

## **Система контроля микродеформации поверхности на основе оптического преломления**

Л.И. Рапохина<sup>1</sup>, П.Е. Рослов<sup>2</sup>, Н.А. Марков<sup>3</sup>

*Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых*

600000, г. Владимир, ул. Горького, 87

<sup>1</sup> E-mail: [lilya3.04@mail.ru](mailto:lilya3.04@mail.ru)

<sup>2</sup> E-mail: [roslov@laser33.ru](mailto:roslov@laser33.ru)

<sup>3</sup> E-mail: [markov@laser33.ru](mailto:markov@laser33.ru)

*В статье рассматривается система контроля микродеформации поверхности конструкций, основанная на использовании оптического принципа распространения коллимированного лазерного излучения в стеклянном световоде. Описана конструкция устройства, включающая систему взаимно ориентированных световодов, лазерный источник излучения и фотоприемник. Принцип действия основан на изменении условий распространения лазерного пучка при возникновении деформации контролируемой поверхности, что приводит к ослаблению или прекращению светового сигнала на фотодетекторе. Предложенная система обеспечивает регистрацию продольных, поперечных и крутильных деформаций поверхности конструкций и может применяться для мониторинга состояния промышленных объектов, строительных сооружений и элементов транспортной инфраструктуры.*

*Ключевые слова: микродеформация поверхности, оптический контроль, лазерное излучение, стеклянный световод, оптоэлектронные системы, мониторинг конструкций, диагностика деформаций, промышленная безопасность.*

## **Optical refraction-based surface microdeformation control system**

L.I. Rapohina<sup>1</sup>, P.E. Roslov<sup>1</sup>, N.A. Markov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Vladimir State University.

*The article considers a control system for micro-deformation of the surface of structures based on the use of the optical principle of propagation of collimated laser radiation in a glass fiber. The design of the device is described, which includes a system of mutually oriented optical fibers, a laser radiation source and a photodetector. The principle of operation is based on a change in the propagation conditions of the laser beam when a deformation of the controlled surface occurs, which leads to a weakening or termination of the light signal on the photodetector. The proposed system provides registration of longitudinal, transverse and torsional deformations of the surface of structures and can be used to monitor the condition of industrial facilities, construction structures and elements of transport infrastructure.*

*Keywords: surface microdeformation, optical control, laser radiation, glass fiber, optoelectronic systems, structural monitoring, deformation diagnostics, industrial safety.*

## **Введение**

В современных условиях эксплуатации промышленного оборудования, строительных конструкций и объектов транспортной инфраструктуры особую актуальность приобретает задача своевременного выявления деформационных процессов, возникающих в материалах и элементах конструкций под действием внешних и внутренних нагрузок. Накопление деформаций может приводить к снижению прочности конструктивных элементов, появлению дефектов, развитию усталостных

трещин и, как следствие, к возникновению аварийных ситуаций. Особенно важным является контроль состояния объектов повышенной опасности, к которым относятся сосуды высокого давления, резервуары, трубопроводы, мостовые конструкции, несущие элементы зданий и сооружений.

Традиционные методы контроля деформаций основаны на применении механических, тензометрических, индуктивных и емкостных датчиков. Несмотря на широкое распространение, такие методы имеют ряд недостатков, включая ограниченную чувствительность к малым деформациям, необходимость сложных схем монтажа и подключения, а также чувствительность к внешним электромагнитным помехам. В связи с этим все большее распространение получают оптические методы контроля, основанные на регистрации изменений параметров светового излучения при взаимодействии с контролируемой конструкцией [1].

Оптические методы обладают рядом существенных преимуществ, среди которых высокая чувствительность, возможность дистанционного контроля, устойчивость к электромагнитным помехам и минимальное влияние на контролируемый объект. Одним из перспективных направлений развития таких систем является использование световодов и лазерного излучения для регистрации изменений геометрии поверхности конструкций [2-4].

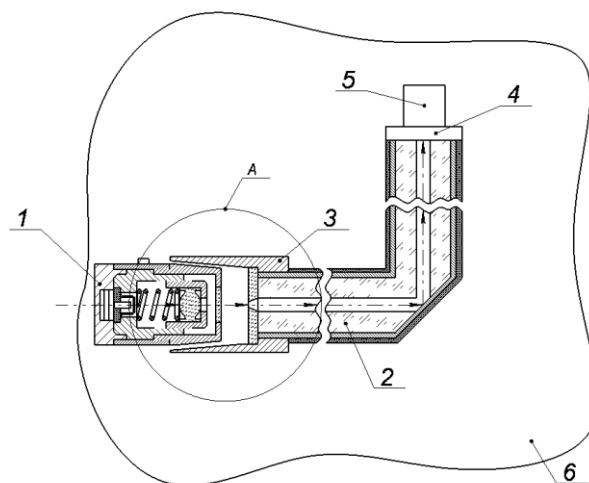
В данной статье рассматривается система контроля микродеформации поверхности конструкций, основанная на принципе изменения условий распространения коллимированного лазерного излучения внутри оптического канала, сформированного в стеклянном световоде. Предложенное решение позволяет регистрировать деформации различных типов, включая продольные, поперечные и крутильные, что обеспечивает расширение функциональных возможностей систем мониторинга состояния конструкций и повышение надежности диагностики их технического состояния.

### **Конструкция системы контроля деформации**

Существующие методы контроля деформаций конструкций можно условно разделить на механические, электрические и оптические. Одним из наиболее перспективных направлений является использование оптоволоконных и световодных систем контроля деформаций, в которых изменение геометрии конструкции приводит к изменению условий распространения светового излучения. Подобные системы могут обеспечивать высокую точность регистрации микродеформаций поверхности за счёт использования направленного лазерного излучения и фоточувствительных элементов. На основе данного подхода разработана система контроля микродеформации поверхности конструкций, использующая оптический принцип распространения коллимированного лазерного пучка внутри специально сформированного световодного канала [5-6].

Предлагаемая система предназначена для регистрации предельных значений деформации поверхности различных конструкций и объектов промышленной инфраструктуры. К таким объектам относятся корпуса технологического оборудования, резервуары, трубопроводы высокого давления, элементы строительных конструкций, опоры и балки мостов, а также различные механически нагруженные элементы транспортных и энергетических систем.

Общая схема устройства контроля деформации поверхности представлена на рис. 1. Конструктивно система включает лазерную оптическую головку, систему стеклянных световодов, оптический соединитель и фотоприемник [7].

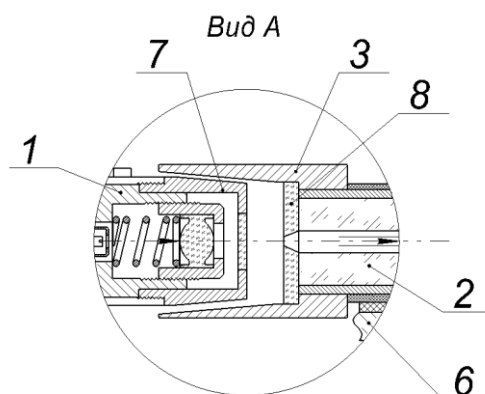


**Рис. 1. Общая схема системы контроля микродеформации поверхности: 1 – лазерная оптическая головка, 2 – стеклянный световод, 3 – оптический соединитель, 4 – фотоприемник, 5 – узел обработки сигнала, 6 – фрагмент контролируемой поверхности**

В качестве источника излучения используется лазерная оптическая головка, формирующая коллимированный пучок низкоинтенсивного лазерного излучения. В качестве источника могут применяться полупроводниковые лазерные диоды, работающие в видимом диапазоне длин волн. Передача излучения осуществляется по стеклянному радиационно тонированному световоду, внутри которого сформирован прозрачный оптический канал. Световод закрепляется на контролируемой поверхности объекта с помощью клеевого или механического соединения.

Для расширения функциональных возможностей устройства используется второй стеклянный световод, соединенный с первым под углом  $90^\circ$  в плоскости контролируемой поверхности. В месте соединения световодов выполнен полированный срез под углом  $45^\circ$ , обеспечивающий изменение направления распространения лазерного пучка. Такая конфигурация позволяет повысить чувствительность системы и обеспечить регистрацию различных типов деформаций поверхности.

Соединение лазерной головки со световодом осуществляется с помощью разъёмного оптического соединителя, обеспечивающего точную центровку оптических элементов. Конструкция узла ввода лазерного излучения представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Узел ввода лазерного излучения в световод: 1 – лазерная оптическая головка, 2 – стеклянный световод, 3 – оптический соединитель, 6 – фрагмент контролируемой поверхности, 7 – узел ввода лазерного излучения, 8 – светопоглощающая вставка**

### Принцип работы системы

Входная часть световода дополнительно оснащена светопоглощающей стеклянной вставкой с коническим отверстием, выполняющей функцию пространственного фильтра и обеспечивающей формирование лазерного пучка требуемого диаметра. На выходном конце второго световода устанавливается фотоприемник, включающий фотодетектор и электронную схему обработки сигнала.

Принцип функционирования системы основан на изменении условий распространения лазерного излучения внутри оптического канала световода при деформации контролируемой поверхности. Схема распространения лазерного излучения в световодной системе представлена на рис. 3.

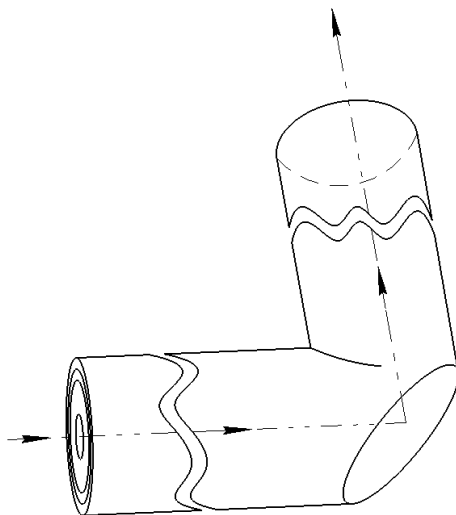


Рис. 3. Распространение лазерного излучения в световоде

В нормальном состоянии поверхности коллимированный лазерный пучок распространяется вдоль прозрачного канала световода и достигает фотодетектора. При этом фотоприемник фиксирует наличие светового сигнала, что соответствует штатному режиму функционирования системы. При возникновении деформации контролируемой поверхности происходит изгиб или скручивание закрепленного на ней световода. В результате ось прозрачного оптического канала смещается относительно направления распространения лазерного луча. В случае значительной деформации лазерное излучение выходит за пределы прозрачной области световода и попадает в радиационно-тенированную область стекла, где происходит его поглощение. Это приводит к резкому уменьшению интенсивности излучения на выходе световода. Фотодетектор фиксирует отсутствие сигнала и формирует команду на включение системы сигнализации. Таким образом обеспечивается регистрация факта возникновения опасной деформации поверхности конструкции [8].

Предлагаемая система контроля микродеформации поверхности обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с существующими методами диагностики.

Во-первых, использование оптического принципа регистрации деформации обеспечивает высокую чувствительность системы к малым изменениям геометрии поверхности. Даже незначительное отклонение оптического канала приводит к ослаблению лазерного излучения, что позволяет фиксировать начальные стадии деформационных процессов.

Во-вторых, применение стеклянных световодов позволяет обеспечить устойчивость системы к воздействию электромагнитных помех, что особенно важно при эксплуатации вблизи мощного промышленного оборудования.

В-третьих, конструкция системы позволяет регистрировать различные типы деформаций поверхности, включая продольные, поперечные и крутильные. Это существенно расширяет функциональные возможности устройства по сравнению с традиционными датчиками деформации.

Дополнительным преимуществом является возможность интеграции системы в автоматизированные комплексы мониторинга технического состояния конструкций с передачей данных по каналам связи.

### **Выводы**

Таким образом, разработанная система контроля микродеформации поверхности на основе оптического преломления и направленного распространения лазерного излучения представляет собой эффективное средство диагностики состояния конструкций. Использование оптических световодов, радиационно-тонированных областей стекла и угловых соединений позволяет обеспечить высокую чувствительность к деформациям и надежную регистрацию критических изменений геометрии поверхности.

Предложенное техническое решение может найти широкое применение в системах мониторинга промышленного оборудования, строительных сооружений, транспортной инфраструктуры и объектов энергетики. Внедрение подобных систем позволит повысить уровень промышленной безопасности, обеспечить раннее выявление опасных деформационных процессов и снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций

*Работа выполнена в рамках государственных заданий в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (темы FZUN-2024-0020, FZUN-2024-0004, госзадания ВлГУ).*

### **Литература**

1. Патент РФ №2120517. Устройство для регистрации линейных деформаций / Захаров В.В., Селюков Е.И., Павлов В.А. Оpubл. 20.10.1998.
2. Зудин В.Л., Жуков Ю.П., Маланов А.Г. Датчики: измерение перемещений, деформаций и усилий. М.: Юрайт, 2025. 199 с.
3. Патент №2047924. Устройство для измерения деформации кожуха ядерного реактора / Кожанов М.Г. Заявлено 21.09.1990. Оpubл. 10.11.1995.
4. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. М.: Сов. радио, 1980. 424 с.
5. Мачулка Г.А. Лазерная обработка стекла. М.: Сов. радио, 1979. 136 с.
6. Кудачев С.В., Давыдов Н.Н. Моделирование параметров процесса радиационно-лазерного формирования интегрально-оптических волноводов на центрах окраски в стеклах // Проектирование и технология электронных средств. 2001. №3. С. 37-43.
7. Патент №238196. Устройство контроля деформации поверхности конструкций / Давыдов Н.Н., Люхтер А.Б., Рослов П.Е., Марков Н.А., Шевень Я.С. №2025119034: заявлено 10.07.2025; опубликовано 21.10.2025. 6 с.
8. Патент №2388026. Способ изготовления сигнальных устройств / Давыдов Н.Н., Руфицкий М.В., Аракелян С.М., Прокошев В.Г., Давыдов Н.Н. Заявлено 31.03.2008. Оpubл. 27.04.2010. Бюл. №12.