

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЕФОРМАЦИИ



А.Неугодников, В.Поспелов
alexey_18@list.ru

Волоконно-оптический датчик деформации, обладающий всеми свойствами волоконно-оптической измерительной техники, может успешно применяться в строительстве для контроля перемещений и деформации элементов конструкций. Оптимальную структуру датчика для решения задач строительного мониторинга разработало ООО "Мониторинг-Центр".

Волоконно-оптический датчик деформации (ВОДД) предназначен для контроля деформации в элементах любых строительных конструкций, в том числе находящихся в условиях воздействия сильных электромагнитных полей, повышенной пожаро- и взрывоопасности, радиации и т.д.

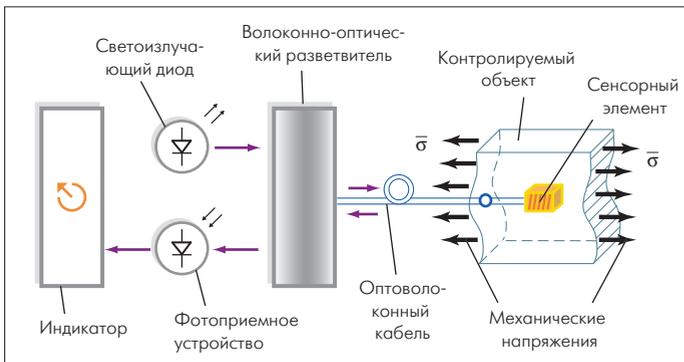


Рис. 1. Схема волоконно-оптического датчика деформации

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СЕНСОРНОГО ЭЛЕМЕНТА

В основе действия ВОДД (рис.1) лежит зависимость коэффициента отражения света в сенсорном элементе, жестко связанном с контролируемым объектом, от величины деформации этого объекта. Оптическая схема сенсорного элемента включает в себя участок световода, служащего для передачи и приема излучения, и зеркало, расположенное на расстоянии z от торца световода (рис.2а). При допущении, что коэффициент отражения от зеркала равен 100%, а отражением от торца световода можно пренебречь, доля оптической мощности r (рис.2б), поступающая обратно в световод после отражения от зеркала, равна:

$$r = 2/\pi [1/p^2 \cdot \arcsin(p/2) + 2 \cdot \arccos\{(p+2)^{1/2}/2\} - \{(p^2+2) \cdot (4-p^2)^{1/2}\}/8p],$$

где $p = 2 \cdot NA \cdot z/a$,

NA – числовая апертура, характеризующая расходимость света на выходе из световода (см. рис.2а); a – радиус сердцевины световода.

Из зависимости $r(z)$ (рис.3) видно, что в интервале значений $z = a-3a$ функция $r(z)$ близка к линейной. Этот важный факт позволяет утверждать, что если на сенсорный элемент оказывается воздействие, в результате которого изменяется расстояние z , то оптическая

мощность, регистрируемая фотоприемным устройством и выводимая на индикатор, представляет собой линейную функцию от величины этого воздействия.

Разработанный в ООО "Мониторинг-Центр" волоконно-оптический датчик деформации амплитудного типа имеет следующие характеристики:

Диапазон измеряемых деформаций	0–10 ⁻³
Погрешность измерения	0,5%
Удаленность места управления и регистрации измерений от наблюдаемого объекта	до 500 м
Размеры датчика	диаметр 20 мм, длина 50 мм
Количество измерительных каналов	1–8
Время одного цикла опроса измерительных каналов	10 с
Потребляемая мощность	не более 2 Вт

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ДАТЧИКА

Для практической реализации датчика необходимо преодолеть множество проблем, главные из которых могут быть сформулированы так:

- конструкция датчика должна отвечать требованиям точности и долговечности при заданных параметрах эксплуатации;
- необходимо, чтобы технология производства датчика была оптимальна с точки зрения темпов наладки производства и минимизации затрат, а также низкой себестоимости;
- технология установки (монтажа) датчика на различных контролируемых объектах должна быть такой, чтобы его внедрение и адаптация не требовали больших временных и ресурсных затрат.

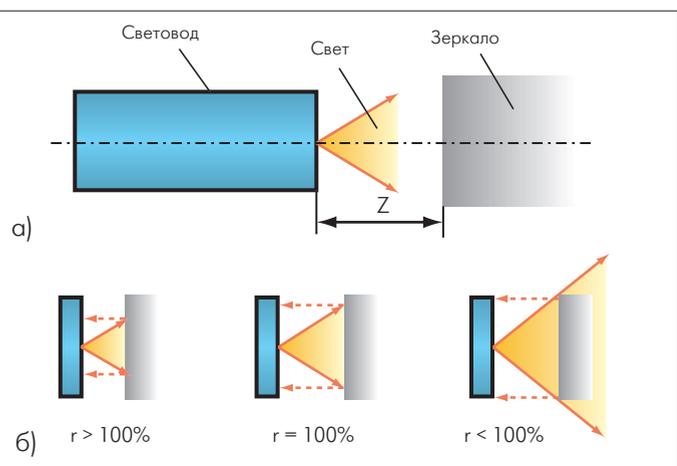


Рис.2. Оптическая схема сенсорного элемента (а) и оптическая мощность отраженного света (б)

Конструктивные принципы датчика определяются исходя из пере- численных задач и того факта, что ВОДД, в зависимости от постав- ленной задачи, может быть закреплен как на наружной поверхности, так и заделан внутрь объекта контроля (например, монолитной кон- струкции). Конструкция сенсорного элемента и технология его за- крепления на объекте контроля должны быть разработаны таким об- разом, чтобы обеспечивалось взаимно-однозначное соответствие между расстоянием z и величиной измеряемой деформации ε ($\varepsilon = \Delta l/l$ – относительная деформация объекта).

Необходимо подчеркнуть, что в реальных условиях, с учетом от- ражения от торца световода, при малых расстояниях z и достаточ- но узкой ширине спектра источ- ника света $\Delta\lambda \ll \lambda^2/4z$, значи- тельную роль могут играть интер- ференционные эффекты. Они существенно изменяют характер за- висимости оптической мощности отраженного света от расстояния z . В определенных условиях эта зависимость оказывается неод- нозначной, что значительно ус- лажняет интерпретацию результатов измерений. При этом в отдель- ных интервалах крутизна характеристики и чувствительность ВОДД возрастают на порядок и более. Для решения проблем возникновения интерференционных эффектов при пользовании ВОДД целесооб- разно использовать светодиоды с широким спектром $\Delta\lambda$. Например, для измерений величин $z \gg 20$ мкм достаточно применять серийные светодиоды с типичной шириной спектра $\Delta\lambda \gg 30-40$ нм.

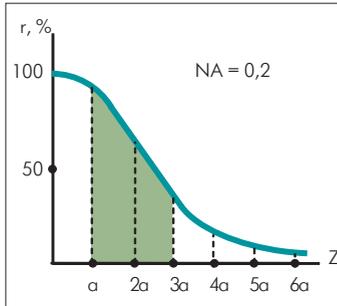


Рис.3. Зависимость оптической мощности отраженного света от расстояния между торцом световода и зеркалом

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Специалистами ООО "Мониторинг-Центр" были проведены экспери- ментальные исследования работы представленного ВОДД при де- формации контрольного объекта (рис.4). В задачи исследований входило сопоставление экспериментальных зависимостей с расчет- ными, а также определение погрешности датчика. Эксперименты включали в себя две серии:

- внешнее крепление датчика на стальную трубу при помощи эпок- сидного клея;
- внутренняя установка датчика путем размещения его в цементно- песчаном образце (ЦПО) при заливке.

В первой серии экспериментов ВОДД наклеивался с помощью эпок- сидного клея на внешнюю поверхность стальной трубы вдоль

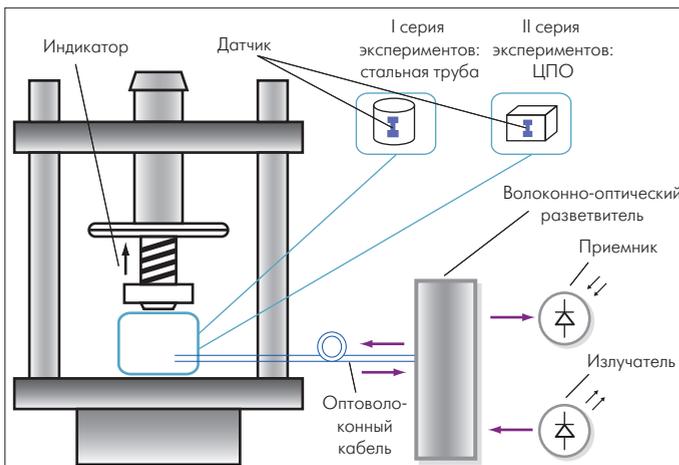


Рис.4. Схема экспериментов с ВОДД

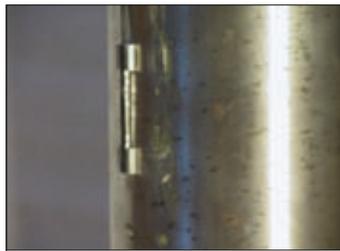


Рис.5. Волоконно-оптический датчик деформации, закрепленный на стальной трубе



Рис.6. Волоконно-оптический датчик внутри бетонного образца

образующей (рис.5). Труба устанавливалась на нижнюю опорную пластину пресса и прижималась верхней пластиной.

Во второй серии датчик помещался в опалубочную форму, заливался цементно-песчаной смесью, и образец выдерживался в течение 28 дней для приобретения требуемой прочности. Затем образец помещался в рабочую область пресса, как и при установке трубы (рис.6).

Исследуемый датчик подключался к мультиметру. Далее происхо- дил цикл ступенчатой нагрузки с шагом 5 т для трубы и с шагом 0,5 т для цементно-песчаного образца. После окончания цикла нагрузки происходил цикл ступенчатой разгрузки с соблюдением условий ста- билизации.

Типичные результаты экспериментов представлены на рис. 7 и 8.

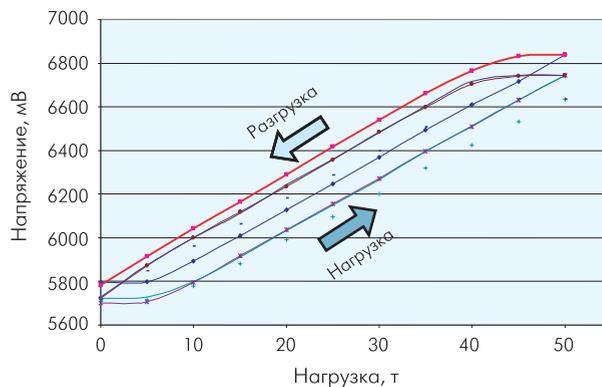


Рис.7. Контроль нагрузок стальной трубы под прессом с помощью ВОДД

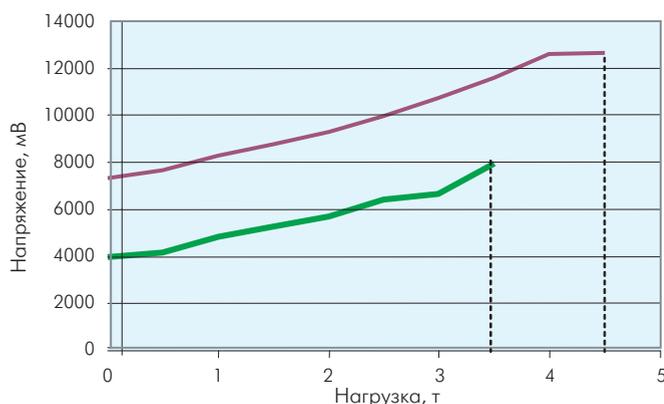


Рис.8. Контроль нагрузок бетонного образца под прессом с помощью ВОДД (два эксперимента)

Большой объем проведенных экспериментов в сочетании с резуль- татами численного моделирования позволил разработать оптимальную конструкцию датчика для решения задач строительного мониторинга. Рассмотренный датчик как элемент системы технического мониторин- га установлен в нескольких зданиях Москвы и Подмосковья.