

# ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ: ОПТОВОЛОКОННЫЕ СЕНСОРЫ КОМПАНИИ НВМ

Для измерения деформации успешно применяются электрические сенсоры деформации (тензорезисторы). Разработанные более 50 лет назад, сегодня они технически усовершенствованы и доступны в различных вариантах исполнения. Не так давно для измерения деформации стали использовать и оптические (оптоволоконные) сенсоры. Во многих областях они явились хорошей альтернативой тензорезисторам.

В оптоволоконных сенсорах деформации [1] используется дифракционная решетка Брэгга, которая содержит большое количество точек отражения, расположенных внутри волокна с определенным интервалом. При прохождении лазерного излучения через волокно часть его на определенной длине волны отражается от решетки. Этот пик отраженного излучения регистрируется измерительной аппаратурой. В результате деформации изменяется интервал между узлами решетки Брэгга, а также коэффициент преломления волокна. Соответственно, изменяется длина волны излучения, отраженного от решетки. По изменению длины волны можно определить величину деформации.

Посмотрим, каковы характеристики оптических сенсоров деформации в сравнении тензорезисторами и где их применение наиболее эффективно.

**Коэффициент тензочувствительности.** Коэффициент тензочувствительности тензорезисторов определяется как

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon,$$

где  $R$  – исходное сопротивление тензорезистора,  $\Delta R$  – изменение сопротивления при деформации решетки тензорезистора,  $k$  – коэффициент тензочувствительности,  $\varepsilon$  – деформация.

Изменение сопротивления тензорезистора обусловлено двумя физическими эффектами [2]. Когда металлический проводник подвергается деформации, изменяется его длина и поперечное сечение. Если коэффициент Пуассона для материала измерительной решетки тензорезистора равен 0,3, то результирующий коэффициент тензочувствительности, определяемый изменением геометрических размеров сенсора, принимает значение 1,6. Удельное со-

Т. Клекерс, Б.Гюнтер

противление материала измерительной решетки также изменяется в зависимости от степени деформации. Поэтому чувствительность измерительных решеток из разных материалов различается. Вклад изменения удельного сопротивления в коэффициент тензочувствительности составляет от 0,4 до 0,6. Оба эффекта могут накладываться друг на друга. Поэтому коэффициент тензочувствительности для тензорезисторов обычно приближен к двум.

Коэффициент тензочувствительности оптических сенсоров деформации определяется по аналогии с тензорезисторами:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = k \cdot \varepsilon,$$

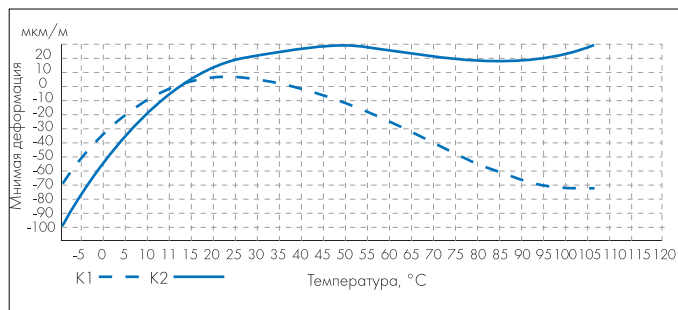
где  $\lambda$  – длина волны, на которой происходит отражение от решетки Брэгга,  $\Delta \lambda$  – изменение  $\lambda$  при деформации волоконной решетки,  $k$  – коэффициент тензочувствительности,  $\varepsilon$  – деформация.

Чувствительность оптических датчиков определяется изменением расстояния между точками отражения в решетке Брэгга и коэффициента преломления оптоволоконка вследствие деформации. Коэффициент тензочувствительности  $k$ , обусловленный первым фактором, равен единице – в данном случае влиянием изменения поперечного сечения волокна, которое для тензорезисторов учитывается через коэффициент Пуассона, можно пренебречь. В результате изменения коэффициента преломления значение  $k$  уменьшается примерно на 0,22. Таким образом, коэффициент тензочувствительности волоконной решетки Брэгга составляет около 0,78.

Сенсоры с волоконной решеткой Брэгга имеют большую толщину, чем электрические тензорезисторы. Поэтому при измерении изгибающих напряжений на тонких объектах оптическими сенсорами необходимо пользоваться формулой, которая учитывает толщину сенсора:

$$\varepsilon_{OF} = \frac{0,5 \cdot h}{0,5 \cdot h + d} \cdot \varepsilon_{Anz},$$

где  $\varepsilon_{OF}$  – деформация на поверхности объекта,  $\varepsilon_{Anz}$  – деформация, измеряемая волокном,  $h$  – толщина объекта



**Рис. 1. Типичная зависимость сигнала тензорезистора (мнимой деформации) от температуры в отсутствие приложенной силы: K1 – зависимость для тензорезистора без температурной компенсации, K2 – зависимость для тензорезистора с температурной компенсацией. Материал измеряемого объекта – ферритная сталь, коэффициент тензочувствительности  $k=2$**

измерения,  $d$  – расстояние между волокном и поверхностью объекта.

**Температурный диапазон применения.** Температурный диапазон применения сенсоров деформации определяется как диапазон, в пределах которого сенсоры способны проводить измерения, и их технические характеристики при этом не меняются за счет изменения температуры.

Температурный диапазон тензорезисторов фирмы HBM составляет  $-200...200^{\circ}\text{C}$  для сенсоров с константановой фольговой решеткой (серия Y) и  $-269...250^{\circ}\text{C}$  для хромо-никелевых фольговых тензорезисторов ("Modco", серия C).

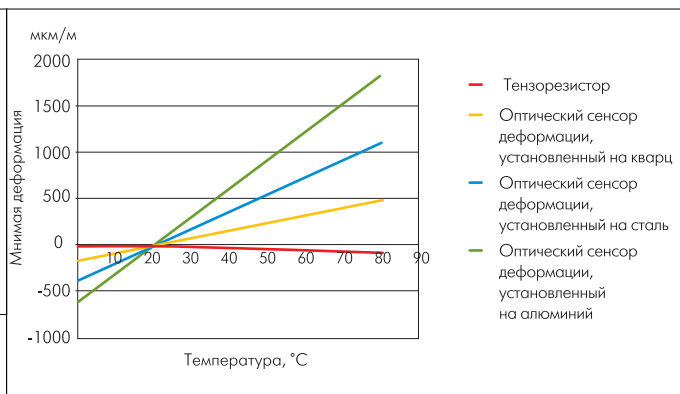
Оптические сенсоры деформации HBM могут использоваться в температурном диапазоне от 0 до  $80^{\circ}\text{C}$ .

**Влияние температуры на выходной сигнал ("мнимая деформация").** У тензорезисторов ошибка сигнала, вызванная изменениями температуры, может быть сведена к минимуму, причем для различных материалов измеряемых объектов. Обычно это достигается за счет подбора сплава, из которого изготавливают решетку тензорезистора (рис.1).

Современные оптические сенсоры деформации не предусматривают автокомпенсацию температурной зависимости. Сигнал таких сенсоров гораздо в большей степени зависит от температуры, чем сигнал тензорезисторов (рис.2).

В общем случае, для оптических сенсоров деформации значительная температурная зависимость точки нуля требует компенсации, которую можно обеспечить с помощью измерений температуры и соответствующих вычислений. Оптические сенсоры деформации демонстрируют хорошую воспроизводимость температурной кривой.

**Усталостное поведение.** Устойчивость к длительным переменным нагрузкам оптических сенсоров деформации HBM была протестирована при циклической деформации  $\pm 1000$  мкм/м. После  $10^7$  циклов никаких изменений измерительных характеристик или пиков отражения выявлено не было – чувствительность сенсоров и базовая длина волны не изменились.



**Рис. 2. Температурные зависимости мнимой деформации для тензорезистора и оптических датчиков в отсутствие механического воздействия**

Тензорезисторы обладают схожими характеристиками, однако они демонстрируют необратимые смещения нуля, которые для лучших тензорезисторов составляют приблизительно 10 мкм/м.

Для оптических сенсоров деформации HBM используются оптоволокна, изготовленные методом вытягивания. По сравнению с тензорезисторами оптические сенсоры деформации выдерживают существенно более высокие пиковые нагрузки и обеспечивают на порядок более высокую стойкость к переменным нагрузкам. Более ран-

ние исследования [3] показали, что волоконные решетки Брэгга, полученные методом вытягивания, фактически не подвержены усталостному разрушению при обычных напряжениях  $\pm 2000$  мкм/м.

**Минимальный радиус изгиба.** Минимальный радиус изгиба для оптических сенсоров деформации HBM составляет 25 мм. При монтаже с изгибом данного радиуса измерительная точка работает должным образом. Минимальный радиус изгиба тензорезисторов равен 0,3 мм.

В целом можно сказать, что оптические сенсоры деформации обладают следующими неоспоримыми преимуществами:

- Измерения с большим числом циклов нагружения: оптические сенсоры деформации позволяют проводить испытания с большим числом циклов нагружения даже на материалах с высокими значениями деформации.
- Применимость в суровых рабочих условиях: оптические сенсоры деформации можно использовать в зонах с электромагнитными влияниями или во взрывоопасных средах.
- Мультиплексирование (одно волокно – несколько измерительных точек): оптические сенсоры деформации позволяют упростить кабельную систему. Несколько оптических элементов можно встроить в одно стек-

ловолокно. Таким образом, оптическая измерительная цепь адаптируется к специфическим требованиям конкретной задачи.

Можно сделать вывод, что оптические сенсоры деформации обладают характеристиками, которые в ряде случаев делают их более эффективными по сравнению с тензорезисторами. Есть свои достоинства и у тензорезисторов. Выбор – за потребителем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. VDI/VDE 2635 Dehnungsmessstreifen mit elektrischem Messgitter, Kenngrößen und Prüfbedingungen (Strain gages with electrical measuring grid, characteristics and test conditions). – Внутренний документ компании HBM.
2. Keil S. Beanspruchungsanalyse mit Dehnungsmessstreifen (Stress analysis using strain gages). – Cuneus – Verlag, 1995.
3. Trutzel M. Dehnungsermittlung mit faseroptischen Bragg-Gitter-Sensoren (Strain measurement using fiber Bragg grating sensors) Dissertation of Technical University of Berlin, Department IV. – UB Stuttgart Dissertation, 2001/2526, 2001.



УВИДЕТЬ НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ С ЛУЧШЕЙ СТОРОНЫ:  
ИННОВАЦИОННО И РЕНТАБЕЛЬНО

Входные билеты на выставку: [www.hannovermesse.com](http://www.hannovermesse.com)

JAPAN



GET NEW  
TECHNOLOGY FIRST  
21-25 APRIL 2008

