

# Долговечность кварцевых волоконных световодов с металлическим покрытием при нестационарных продольных деформациях

А. А. Каваленя, А. В. Поляков

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь  
e-mail: kavaleniaanna@gmail.com

Разработана математическая модель, позволяющая оценить долговечность волоконных световодов, включающая влияние температуры и влажности, на их прочностные характеристики. Представлены графики зависимости срока службы кварцевых волоконных световод с различным металлическим покрытием при нестационарных продольных деформациях, вызванных изменением температуры. Такие волокна могут использоваться в качестве чувствительных элементов в волоконно-оптических датчиках температуры.

**Ключевые слова:** волоконный световод; механическая надежность; долговечность; математическая модель; температура.

## Durability of quartz fiber light guides with a metal coating under non-stationary longitudinal deformations

А. А. Каваленя, А. В. Поляков

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: kavaleniaanna@gmail.com

A mathematical model has been developed to evaluate the durability of fiber optic cables, including the influence of temperature and humidity on their strength characteristics. The graphs of the service life of quartz fiber light guides with different metal coatings under non-stationary longitudinal deformations caused by temperature changes are presented. Such fibers can be used as sensing elements in fiber optic temperature sensors.

**Key words:** fiber optic light guide; mechanical reliability; durability; mathematical model, temperature.

### Введение

Механическая надежность является одной из важнейших характеристик оптоволокна. Она определяется его способностью выдерживать механические воздействия без разрушения оптических волокон и при сохранении параметров передачи сигнала. Разрушение оптоволокна может происходить из-за ряда причин: растяжения, сжатия, изгиба и т. д. Поскольку значение коэффициента теплового расширения металлического покрытия значительно больше значения такого коэффициента для оптического волокна, при воздействии на волоконный световод (ВС) высокой температуры в волокне возникают механические напряжения.

В условиях воздействия температуры, динамически изменяющейся и действующей годами, будет происходить постепенное разрушение ВС. Это явление, называемое статической усталостью стекла, объясняется ростом имеющихся в нем дефектов и ведет к снижению долговечности оптоволокна. В связи с этим возникает

задача оценки влияния высоких, изменяющихся во времени температур на прочность ВС.

Для анализа долговечности ВС при постоянной температуре в волоконно-оптических линиях связи на практике обычно используют распределение Вейбулла (Weibull), полученные с помощью разрывных машин [1, 2]. Основным недостатком метода Вейбулла является то, что тесты волокна на разрыв производятся при статических нагрузках и, как правило, при комнатной температуре. Полученные результаты справедливы только для конкретного исследуемого типа волокна. Как следует из изложенного, данный метод определения долговечности ВС является трудоемким, неэкономичным, требует больших временных затрат и применения специального оборудования. Для анализа прочностных характеристик ВС с различными покрытиями и типами легирующих примесей необходимо получить и использовать аналитические модели, основанные на описании физико-химических процессов в ВС.

### Результаты численного моделирования

На прочность и на срок службы оптоволокна в наибольшей степени влияют поверхностные дефекты, связанные с зарождением пор и образованием поверхностных микротрещин. Предложен способ теоретической оценки долговечности волоконных световодов, используемых в волоконно-оптических датчиках в качестве чувствительного элемента, в зависимости от напряжений, возникающих при динамических изменениях температуры, учитывающий конструктивные особенности волокна (диаметры сердцевины и оболочки, металлическое или полимерное покрытие), типы легирования, относительную влажность окружающей среды. Разработанная модель основана на выражении, определяющем скорость роста поверхностных микротрещин под нагрузкой во влажной среде [3]:

$$v = \lambda C \frac{kT\zeta}{h} \exp\left(-\frac{W_a - \beta\sigma\omega}{kT}\right). \quad (1)$$

В данной формуле  $\sigma$  – приложенное к образцу растягивающее напряжение;  $\omega$  – активационный объем ( $6,7 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ );  $C$  – относительная влажность среды (в долях от единицы);  $k$  и  $h$  – постоянные Больцмана и Планка;  $\zeta$  – трансмиссионный коэффициент ( $0,7 - 1$ );  $\lambda \approx 0,45 \cdot 10^{-9} \text{ м}$  – среднее расстояние между соседними цепочками атомов в кварцевом стекле;  $\beta$  – коэффициент концентрации напряжений,  $T$  – измеряемая температура.

Оценка долговечности световодов проводилась в соответствии с полученным выражением:

$$t = \frac{4h}{C\zeta\sigma\omega} \left( \beta_0 + \frac{kT}{\sigma\omega} \right) \exp\left( \frac{W_a (1 - \sigma/\sigma_{bc0})}{kT} \right), \quad (2)$$

где  $\sigma_{bc0}$  – инертная прочность.

При моделировании прочностных характеристик оптоволокно представлено в виде системы из трех цилиндров (сердцевина, оболочка и покрытие). Были учтены зависимости коэффициента линейного расширения металлического покрытия и изменения модуля Юнга оптоволокна [4] от температуры. При расчетах также учитывалось, что с ростом температуры значение энергия активации  $W_a$  уменьшается.

Исследования проводились для кварцевого волокна с сердцевиной  $\text{GeO}_2$ , оболочкой  $\text{SiO}_2$  и тремя различными видами металлического покрытия. Значение влажности среды выбрано равным 0,5, что соответствует нормальной влажности.

Результаты оценки срока службы представлены на рис. 1. Из рис. 1 следует, что срок службы волокна с увеличением температуры уменьшается по экспоненциальному закону, а при некоторой критической температуре волокно разрушается. Для срока службы волоконного световода не менее 10 лет максимальная воздействующая температура, например, в оптоволоконных измерителях, не должна превышать 325 °C.

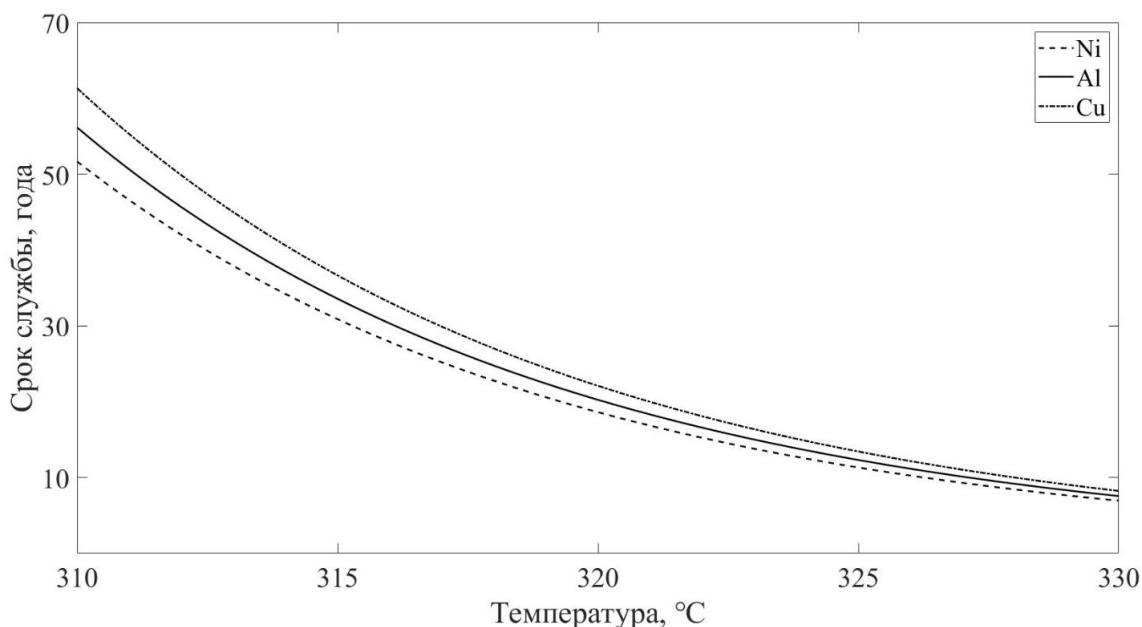


Рис. 1. Оценка срока службы волоконного световода с различными видами покрытия при значении влажности среды 0,5

Для анализа влияния на оптоволокно случайно изменяющейся температуры с помощью численного моделирования получена зависимость срока службы волоконного световода с медным покрытием от отклонения температуры в окрестности 325 °C (рис. 2). Из полученного графика следует, что при увеличении диапазона изменения температур срок службы ВС увеличивается. Поскольку зависимость долговечности волокна от температуры носит экспоненциальный характер и при уменьшении температуры срок службы увеличивается значительно больше по сравнению с его уменьшением при возрастании измеряемой температуры, то с увеличением диапазона колебаний температуры результирующий срок службы будет увеличиваться.

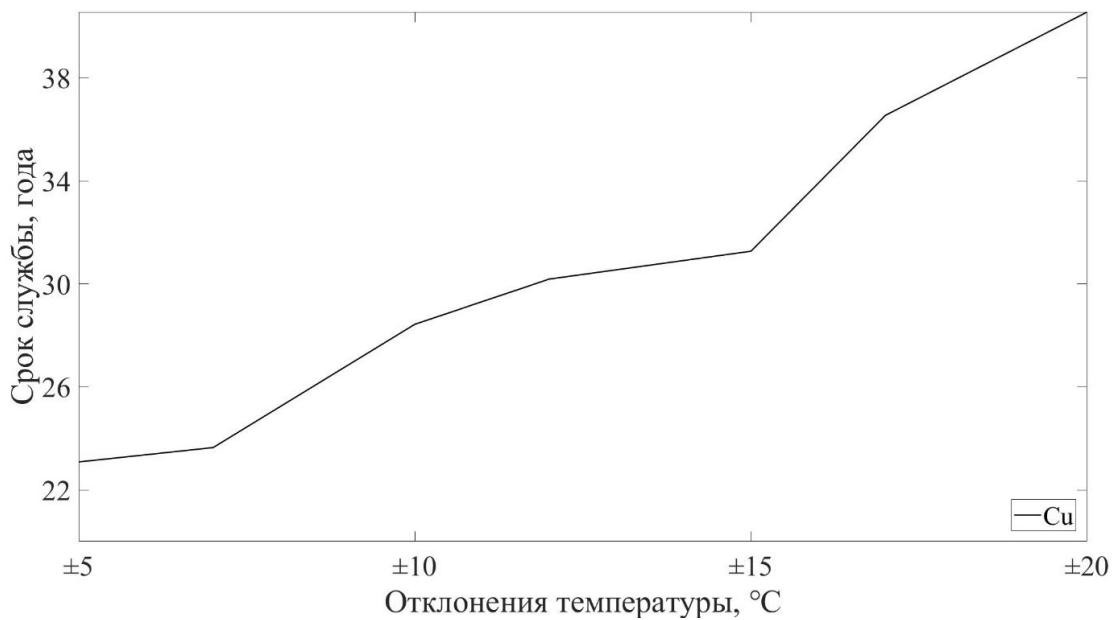


Рис.2. Оценка срока службы волоконного световода с медным покрытием при случайно изменяющейся температуре

### Заключение

Предложен способ теоретической оценки долговечности волоконных световодов, используемых в волоконно-оптических датчиках в качестве чувствительного элемента, в зависимости от продольных механических напряжений, возникающих при динамических изменениях температуры. Разработана аналитическая модель, учитывающая конструктивные особенности волокна (диаметры сердцевины и оболочки, металлическое или полимерное покрытие), типы легирования, относительную влажность окружающей среды и т. п. Получены зависимости срока службы световодов при динамических воздействиях температуры и установлено, что максимально измеряемая температура при динамическом воздействии составляет 325 °C для срока службы волоконно-оптических датчиков температуры 10–12 лет.

### Библиографические ссылки

1. *Matthewson M. J.* Optical fiber mechanical testing techniques // Critical Reviews of Optical Science and Technology. 1993. Vol. CR50. P. 32–59.
2. *Severin I.* Strength measurements of silica optical fibers under severe environment / I. Severin, R. El Abdi, M. Poulain // Optics & Laser Technology. 2007. Vol. 39, iss. 2. P. 435–441.
3. *Дяченко А. А.* Термодинамическая модель разрушения кварцевого стекла и световодов // Нелинейный мир. 2009. Т. 7, №4. С. 239–283.
4. *Лунин Б. С., Торбин С. Н.* О температурной зависимости модуля Юнга чистых кварцевых стекол // 271 Вестн. Моск. ун-та. сер. 2. Химия. 2000. Т. 41. С. 172–173.