

МЕХАНИКА

УДК 621.391:681.327.02

О. В. Бондаренко, Д. Н. Степанов

Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова (Украина)

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ДЛИНУ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В ТРУБКЕ ОПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

В работе исследовано влияние термомеханического воздействия на изменение длины оптического волокна (ОВ) в трубке оптического модуля (ТОМ). Оно показало, что при температуре выше 20°C выбранная модульная конструкция оптического кабеля (ОК) вызывает появление сил растяжения ОВ, а при температуре ниже 20°C – сил сжатия. Причиной этого является наличие в конструкции ОК элементов, выполненных из материалов с различными значениями температурного коэффициента линейного расширения, из-за чего длины ОВ и трубки оптического модуля под воздействием температуры изменяются по-разному. Результаты расчетов изменения длины ОВ показали, что его сжатие в трубке оптического модуля приводит к созданию в структуре волокна макроизгибов, а растяжение – к образованию микротрещин, что требует необходимости учета и создания избыточной длины волокна при его интеграции в ТОМ при производстве. В работе показано, что применение поликарбоната в качестве материала трубки оптического модуля позволяет добиться при изменении температуры меньшего отличия длин оптического волокна и ТОМ.

Ключевые слова: оптический кабель, оптическое волокно, трубка оптического модуля, удлинение, сжатие, растяжение, температурный коэффициент линейного расширения.

O. V. Bondarenko, D. N. Stepanov

Odessa National A. S. Popov Academy of Telecommunications (Ukraine)

INFLUENCE OF THERMOMECHANICAL IMPACT ON OPTICAL FIBER LENGTH IN OPTICAL MODULE TUBE

The influence of the thermomechanical impact on the changing of the optical fiber (OF) length in the optical module tube (OMT) is investigated. It has shown that at temperature higher than 20°C the selected modular design of an optical cable (OC) causes the appearance of OF stretching, and at a temperature below 20°C – compression forces. The reason for this is the presence in the OC design the elements, which are made of materials with different values of the temperature coefficient of linear expansion, due to which the lengths of the OF and optical module tube are different under the influence of temperature. The results of the calculations of the OF length shown that its compression in the optical module tube leads to the creation of macro-bends in the structure of the fiber, but the stretching – to formation of microcracks, which requires the need to record and create an excess fiber length when it is integrated into production. It has been shown that the usage of polycarbonate as a material of the optical module tube can be achieved the smaller difference between the lengths of the optical fiber and OMT at changing of the temperature.

Key words: optical cable, optical fiber, optic module tube, elongation, compression, stretching, temperature coefficient of linear expansion.

Введение. Предусмотрение физической целостности оптических волокон (ОВ) в сердечнике оптических кабелей (ОК) и стабильности их параметров передачи не только при нормированной температуре 20°C, но и во всем диапазоне температур эксплуатации является актуальной задачей конструирования ОК.

Одним из внешних дестабилизирующих факторов является влияние температуры окружающей среды эксплуатации на конструкцию

ОК и его элементы (ОВ, трубки оптических модулей, центральный и периферический силовые элементы, защитные оболочки и др.). При изменении температуры ОК в его конструкции возникает напряженно-деформированное состояние в результате разности значений температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов элементов, в первую очередь, оптических волокон и трубки оптического модуля (ТОМ), в которую они помещены [1]. Такое

состояние ОК может привести к появлению в ОВ экстремальных растягивающе-сжимающих сил, которые повлекут непредсказуемое изменение параметров передачи (коэффициента затухания и дисперсию сигнала), преждевременное старение и выход из строя всей волоконно-оптической линии передачи.

В настоящее время в научной и технической литературе отсутствуют в полной мере данные о термомеханическом воздействии на длины ОВ в ТОМ конструкции ОК под действием изменения температур среды эксплуатации.

Целью данной работы является обоснование метода определения влияния термомеханического действия на длину ОВ в трубке оптического модуля оптического кабеля и предоставление практических рекомендаций по обеспечению технической целостности ОВ при эксплуатации кабеля в различных температурах.

Основная часть. Наличие в конструкции ОК элементов, изготовленных из материалов с различными ТКЛР, является причиной изменения геометрических размеров ОВ, в частности его длины. При изменении температуры эксплуатации это приводит к возникновению сил сжатия или растяжения ОВ. Указанное может привести кроме дополнительных потерь передаваемого оптического сигнала к сокращению срока службы ОК за счет появления микротрещин, макро- и микроизгибов в ОВ.

Как известно, уменьшение длины оптического волокна в конструкции оптического модуля под действием температуры может привести к ограничению свободного передвижения ОВ в середине ТОМ. Это уменьшит величину максимальной допустимой растягивающей нагрузки ОК ниже номинального значения.

Под действием температуры длина элементов ОК, расположенных вдоль продольной оси кабеля, изменяется (увеличивается или уменьшается по сравнению с начальной длиной) [2]:

$$\Delta l = l_0 \cdot \Delta T \cdot \text{ТКЛР}, \quad (1)$$

где Δl – абсолютное изменение длины линейного элемента ОК, мм; l_0 – начальная длина элемента ОК, мм; ΔT – разность температур, К;

ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения материала элемента ОК, K^{-1} .

Для исследования влияния термомеханического действия на ОВ, расположенного в ТОМ, используем подход к этому вопросу, представленный в [3].

Как отмечалось в этой работе, ТКЛР характеризует относительное изменение длины элемента ОК в зависимости от изменения температуры по выражению

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \text{ТКЛР} \cdot \Delta T, \quad (2)$$

где ε – относительное удлинение элемента ОК; Δl – абсолютное удлинение элемента ОК, м; l_0 – начальная длина элемента кабеля, м; ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения элемента кабеля, K^{-1} ; ΔT – разность температур среды, К.

При равенстве длин ОВ и ТОМ относительное изменение их длины определяется по выражению [1]

$$\varepsilon_{\text{ОВ,ТОМ}} = \Delta \text{ТКЛР} \cdot \Delta T = (\text{ТКЛР}_{\text{ОВ}} - \text{ТКЛР}_{\text{ТОМ}}) \cdot (t - t_0), \quad (3)$$

где ε – изменение длины ОВ относительно длины ТОМ; $\text{ТКЛР}_{\text{ОВ}}$, $\text{ТКЛР}_{\text{ТОМ}}$ – температурный коэффициент линейного расширения ОВ и ТОМ соответственно, K^{-1} ; t – температура среды, К; t_0 – температура, при которой начальная избыточная длина ОВ условно равна нулю, К.

В табл. 1 приведены типичные значения ТКЛР материалов ОВ и ТОМ, используемых при изготовлении ОК [1–3].

В табл. 2 приведены данные о характере напряженного состояния ОВ, расположенного внутри ТОМ при изменении температуры [1].

Как показано в табл. 2, для обеспечения термостабильной конструкции сердечника кабеля, чтобы при изменении температуры оптическое волокно не испытывало механических нагрузок и оставалось целостным, необходимо на этапе разработки ОК и в процессе интеграции ОВ в ТОМ предусмотреть избыток длины ОВ в трубке оптического модуля.

Таблица 1

Характеристики материалов для изготовления оптического волокна и трубки оптического модуля

Элемент ОК	Материал	Модуль Юнга, Н/мм ²	Плотность, г/см ³	ТКЛР, K^{-1}
Оптическое волокно	Кварцевое стекло	72 500	2,20	$5,5 \cdot 10^{-7}$
Трубка оптического модуля	Полибутилентерефталат	1 600	1,31	$1,5 \cdot 10^{-4}$
	Полиамид	1 700	1,06	$7,8 \cdot 10^{-5}$
	Поликарбонат	2 300	1,20	$6,5 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Характер напряженного состояния ОВ, расположенного внутри ТОМ при изменении температуры

Сопоставление ТКЛР материалов ОВ и ТОМ	Изменение длин ОВ $\Delta l_{ОВ}$ и ТОМ $\Delta l_{ТОМ}$		Напряженное состояние ОВ	
	при увеличении температуры	при уменьшении температуры	при увеличении температуры	при уменьшении температуры
Положительные ТКЛР $TKLR_{ОВ} < TKLR_{ТОМ}$	Увеличение длины ОВ и ТОМ $\Delta l_{ТОМ} > \Delta l_{ОВ}$	Уменьшение длины ОВ и ТОМ $\Delta l_{ТОМ} < \Delta l_{ОВ}$	Удлинение ТОМ больше удлинения ОВ, появление сил растяжения ОВ (появление микротрещин)	Сокращение ТОМ больше сокращения ОВ, появление сил сжатия ОВ (появление изгибов)

Исходя из табл. 1 и того, что для заданных материалов значение ТКЛР ОВ меньше, чем ТКЛР материалов ТОМ, изменение длины ОВ по сравнению с длиной трубки модуля будет происходить так, как показано на рис. 1.

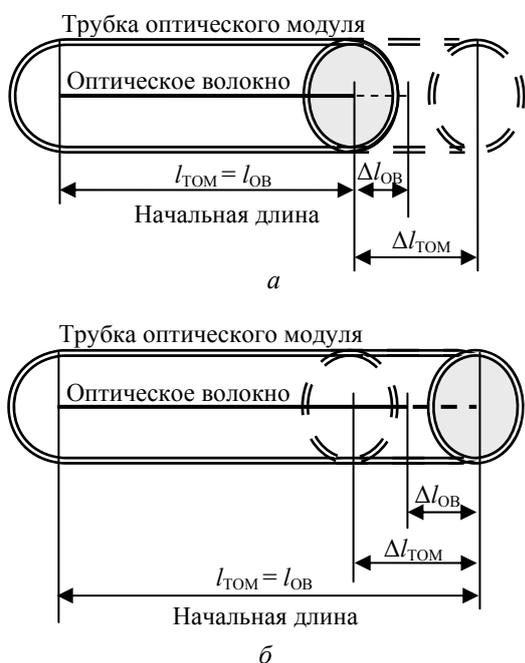


Рис. 1. Изменение длины ОВ сравнительно с длиной ТОМ:
а – при увеличении температуры;
б – при уменьшении температуры

Одним из важных процессов при проверке качества изготовления ОВ на заводе-изготовителе является профтест сил натяжения и удлинения ОВ, которые не должны превышать 4 Н и 0,5% соответственно [1, 3].

Сила приращения длины ОВ может быть определена по данным силы натяжения и удлинения ОВ при профтесте во время его отработки на предприятии:

$$P_{ОВ} = \frac{\epsilon_{ОВ}}{\epsilon_{тестОВ}} P_{тестОВ}, \tag{4}$$

где $P_{ОВ}$ – сила приращения длины ОВ при удлинении, Н; $\epsilon_{ОВ}$ – изменение длины ОВ от температуры окружающей среды; $\epsilon_{тестОВ}$ – удлинение

ОВ при тестировании его качества, %, $\epsilon_{тестОВ} = 0,5\%$; $P_{тестОВ}$ – значение растяжения усилия ОВ при тестировании, Н, $P_{тестОВ} = 4$ Н.

В качестве примера в данной работе были определены силы приращения длины и относительного удлинения ОВ в сравнении с ТОМ, в которой оно расположено, при значениях ТКЛР материалов ОВ и ТОМ из табл. 1. Расчет изменения длины ОВ в трубке ОМ выполняется при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ (293 К), при изменении температуры t в диапазоне от -40 до $+60^\circ\text{C}$ (рис. 2).

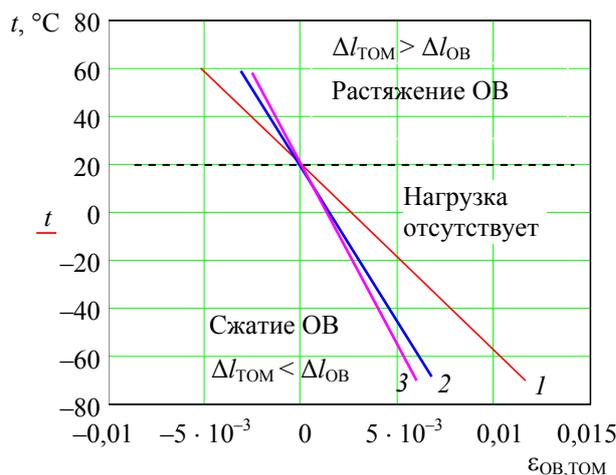


Рис. 2. Изменение длины оптического волокна относительно длины оптического модуля при разных значениях температуры и материалах:
1 – полибутилтерефталан; 2 – полиамид;
3 – поликарбонат

При нагревании трубки ОМ до температуры, например, $+60^\circ\text{C}$ (333 К), оптическое волокно получит приращение относительно ТОМ, изготовленного из полибутилтерефталана

$$\epsilon_{ОВ,ТОМ} = (5,5 \cdot 10^{-7} - 1,5 \cdot 10^{-4}) \times (333 - 293) = -0,006.$$

При охлаждении конструкции трубки ОМ из полибутилтерефталана до температуры -40°C (253 К) длина ОВ изменится относительно длины трубки ОМ на величину:

$$\epsilon_{ОВ,ТОМ} = (5,5 \cdot 10^{-7} - 1,5 \cdot 10^{-4}) \times (253 - 293) = 0,09.$$

При растяжении ОВ при температуре +60°C сила растяжения будет равна:

$$P_{\text{ОВраст}} = \left(\frac{0,006}{0,005} \right) \cdot 4 = 4,8 \text{ Н.}$$

Это значение превышает силу растяжения в 4 Н при профтесте и указывает на появление избыточных механических сил, которые могут привести к разрыву ОВ при увеличении температуры до +60°C.

Анализируя величину изменения длины ОВ в трубке ОМ, видим, что влияние отрицательных температур на ТОМ, а значит на кабель в целом, более критическое, чем положительных температур (за счет появления макроизгибов ОВ в ТОМ).

Из рис. 2 видно, что лучший результат среди рассмотренных материалов ТОМ обеспечи-

вается поликарбонатом, так как возникает меньшая разница в длинах ОВ и ТОМ при изменении температуры.

Заключение. Подводя итоги вышесказанного, можно сделать следующие выводы.

1. Проведенное исследование влияния термомеханического воздействия на изменения длины волокна в трубке ОМ показало, что при температуре выше 20°C выбранная модульная конструкция ОК вызывает появление сил растяжения ОВ, а при температуре ниже 20°C – сил сжатия.

2. Результаты расчетов изменения длины ОВ указывают на то, что его сжатие в трубке оптического модуля приводит к образованию в структуре волокна макроизгибов, а растяжение – к инициированию микротрещин, что требует создания избыточной длины волокна в процессе его интеграции в ТОМ при производстве.

Литература

1. Ларин Ю. Т. Оптические кабели: методы расчета конструкции. Материалы. Надежность и стойкость к ионизированному излучению. М.: Престиж, 2006. 308 с.
2. Бондаренко О. В. Метод определения температурного коэффициента линейного расширения и модуля Юнга диэлектрического оптического кабеля // Наукові праці Донецького національного технічного університету. 2009. Серія «Електротехніка і енергетика». Вип. 9 (158). С. 25–29.
3. Мальке Г., Гессинг П. Волоконно-оптические кабели: Основы проектирования кабелей, планирование систем. Новосибирск: Издатель, 1997. 264 с.

References

1. Larin Yu. T. *Opticheskie kabeli: metody rascheta konstruksii. Materialy. Nadezhnost' i stoykost' k ionizirovannomu izlucheniyu* [Optical cables: methods of design calculation. Materials. Reliability and resistance to ionized radiation]. Moscow, Prestizh Publ., 2006. 308 p.
2. Bondarenko O. V. Method for determining the temperature coefficient of linear expansion and Young's modulus of a dielectric optical cable. *Naukovy pratsi Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo universytetu* [Scientific works of Donetsk National Technical University]. Series "Electrical engineering and power engineering". 2009, issue 9 (158), pp. 25–29 (In Ukrainian).
3. Mal'ke G., Gessing P. *Volokonno-opticheskie kabeli: Osnovy proektirovaniya kabeley, planirovanie sistem* [Fiber Optic Cables: Basics of Cable Design, System Planning]. Novosibirsk, Izdatel' Publ., 1997. 264 p.

Информация об авторах

Бондаренко Олег Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры волоконно-оптических линий связи, проректор по учебной работе. Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова (65029, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1, Украина). E-mail: vols@onat.edu.ua

Степанов Дмитрий Николаевич – кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой волоконно-оптических линий связи. Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова (65029, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1, Украина). E-mail: vols@onat.edu.ua

Information about the authors

Bondarenko Oleg Vladimirovich – PhD (Engineering), Professor, Vice Rector, Professor, the Department of Fiber Optic Communication Lines. Odessa National A. S. Popov Academy of Telecommunications (1, Kuznechnaya str., 65029, Odessa, Ukraine). E-mail: vols@onat.edu.ua

Stepanov Dmitry Nikolaevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Acting Head of the Department of Fiber Optic Communication Lines. Odessa National A. S. Popov Academy of Telecommunications (1, Kuznechnaya str., 65029, Odessa, Ukraine). E-mail: vols@onat.edu.ua

Поступила 19.01.2018