

УДК 620.174.25

С. Семенов¹, В. Щербаков²

¹Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова РАН – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра "Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук", Москва, Российская Федерация

²АО «Центр ВОСПИ», Москва, Российская Федерация

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ В ОБЛАСТИ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА ПРИ РАЗРАБОТКЕ И КОНСТРУИРОВАНИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Габариты изделий на основе оптического волокна ограничиваются чувствительностью оптоволокна к макроизгибам, приводящим к росту оптических потерь при малых радиусах изгиба. Появление типов волокна с малыми макроизгибными потерями позволяет существенно уплотнить монтаж. Однако при этом может возникнуть опасность разрушения волокна в местах изгиба в течение срока службы изделия из-за механической усталости. В статье на основе использования модели статической усталости кварцевого стекла получено простое выражение для оценки вероятности разрушения волокна при длительном напряжении на изгибе в зависимости от длины изогнутого участка, радиуса изгиба и величины влажности, с учетом результата проверочного испытания под нагрузкой, проведенного изготовителем волокна. Обсуждается возможность повышения механической надежности кварцевого волокна путем нанесения герметичного углеродного покрытия. Использование полученных выражений при конструировании позволяет уменьшить габариты оптоволоконных изделий без риска снижения их надежности.

Ключевые слова: оптическое волокно, оптические потери на макроизгибах, механическая надежность, проверочный тест, влияние влажности, допустимый радиус изгиба, углеродное покрытие.

S.L. Semjonov¹, V.V. Shcherbakov²

¹Dianov Fiber Optics Research Center – branch of Prokhorov
General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences

²JSC “Center VOSPI”

APPLICATION OF ADVANCES IN THE DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF OPTICAL FIBER IN THE DEVELOPMENT AND DESIGN OF FIBER OPTIC DEVICES

The dimensions of devices based on optical fiber are limited by the sensitivity of the optical fiber to macrobending, which leads to an increase in optical losses at small bending radii. New types of fibers with low macrobending losses make it possible to significantly tighten the dimensions. However, there may be a risk of fiber failure at bending points during the life of the product due to mechanical fatigue. In the article, based on the use of a static fatigue model of silica glass, a simple expression is obtained to estimate the probability of fiber failure under long-term bending stress depending on the length of the bent section, bend radius and humidity, taking into account the result of a proof-test carried out by the fiber manufacturer. The possibility of increasing the mechanical reliability of silica fiber by applying a hermetical carbon coating is discussed. The use of the obtained expressions in design makes it possible to reduce the dimensions of fiber optic products without the risk of reducing their reliability.

Keywords: optical fiber, macrobending optical loss, mechanical reliability, proof-test, influence of humidity, permissible bending radius, carbon coating.

На современном этапе развития волоконно-оптической техники наблюдается интенсивная специализация типов оптического волокна (ОВ) для применения в различных областях оптической связи, позволяющая достигнуть наилучших результатов. Процесс развития ОВ отражает выпуск международных стандартов на оптическое волокно, которых с 1980 г. к настоящему времени ИТУ-Т уже выпустил восемь: G.651 – G.657.

Появление в последние годы ОВ с низкими потерями на макроизгибах открывает ряд новых возможностей применения ОВ. В табл. 1 и 2 приведены параметры ОВ этого типа, выпускаемых ведущей мировой волоконной компанией Corning (США).

Использование ОВ с низкими потерями на макроизгибах позволяет существенно уменьшить размеры волоконно-оптических изделий, размеры которых определяются диаметром колец ОВ с минимальным радиусом изгиба. Из этих таблиц можно выбрать тип волокна, обеспечивающего наименьшие дополнительные затухания на рабочей длине волны при радиусе изгиба 7,5 или 5 мм. Кольца ОВ диаметром 15 или 10 мм позволяют разработчику существенно

уплотнить монтаж, но при этом возникает вопрос, а как долго такой монтаж будет надежно работать? Не разрушится ли кварцевое волокно при таком крутом изгибе в течение заданного срока службы?

Таблица 1

Одномодовые ОВ

Характеристики	LEAF®	SMF- 28e+®LL	SMF- 28®ULL	SMF- 28®Ultra	ClearCurve®	
					LBL	ZBL
Прирост затухания						
При изгибе @1625 нм, радиус 30 мм, 100 витков	<0,05 дБ	<0,03 дБ	<0,05 дБ		<0,4 дБ	
При изгибе @1550 нм, радиус 25 мм, 100 витков		<0,03 дБ	<0,05 дБ	<0,01 дБ	<0,8 дБ	
При изгибе @1550 нм, радиус 16 мм, 1 виток	<0,50 дБ	<0,03 дБ	<0,1 дБ			<0,10 дБ
При изгибе @1550 нм, радиус 10 мм, 1 виток				<0,5		<0,30 дБ
При изгибе @1625 нм, радиус 10 мм, 1 виток				<1,5		

Примечание: ¹Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, руководитель; ²АО «Центр ВОСПИ», технический директор.

Разработчики привыкли, что минимальный допустимый радиус изгиба оптических кабелей для внутриблочного и межблочного монтажа обычно устанавливается равным 20 (или 10) диаметрам кабеля, что гарантирует надежную работу волокна на срок более 25 лет, но когда монтаж выполняется ОВ без дополнительного покрытия, ОВ в буферном покрытии диаметром 0,9 мм, или ОВ, уложенным в фуркационную трубку диаметром 0,9 мм, насколько справедливо это правило?

Таблица 2

Многомодовые ОВ

InfiniCor® 300		ClearCurve		
		OM4	OM3	OM2
Прирост затухания				
При изгибе @850 нм, радиус 37,5 мм, 100 витков	<0,5 дБ	При изгибе @850 нм, радиус 37,5 мм, 100 витков	<0,5 дБ	<0,05 дБ
При изгибе @1300 нм, радиус 37,5 мм, 100 витков	<0,5 дБ	При изгибе @1300 нм, радиус 37,5 мм, 100 витков	<0,5 дБ	<0,15 дБ
		При изгибе @850 нм, радиус 15 мм, 2 витка		<0,1 дБ
		При изгибе @1300 нм, радиус 15 мм, 12 витка		<0,3 дБ
		При изгибе @850 нм, радиус 7,5 мм, 2 витка		<0,2 дБ
		При изгибе @1300 нм, радиус 7,5 мм, 2 витка		<0,5 дБ

Изготовитель ОВ обычно проверяет его прочность, перематывая его с натяжением, обеспечивающим его кратковременное удлинение на 1 или 2 % (обычный или двойной proof test) и определяет количество обрывов N_p на единицу длины. Чем совершеннее технология производства ОВ, тем меньше слабых точек на волокне, приводящих к его обрыву при нагружении. Лучшие производители ОВ достигают в последние годы единиц обрывов на десятки километров даже при 2%-ном натяжении. Поэтому ОВ, используемое для монтажа, длина которого составляет единицы метров, имеет очень низкую вероятность разрушения даже при малых радиусах изгиба. Оценка этой вероятности и представляет для нас интерес.

В свое время Мицунага и др. [1] вывели следующее соотношение для оценки вероятности F разрушения во время эксплуатации в зависимости от времени эксплуатации световода t_s под нагрузкой σ_s после перемотки под нагрузкой σ_p :

$$F = 1 - \exp \left[-N_p L \left\{ \left[\left(1 + \frac{\sigma_s^n t_s}{\sigma_p^n t_p} \right) \frac{1}{1+C} \right]^{\frac{m}{n-2}} - 1 \right\} \right], \quad (1)$$

где t_p – длительность действия нагрузки при перемотке, N_p – среднее число обрывов на единицу длины световода при перемотке, L – длина световода, для которой делается оценка, m – статистический параметр Вейбулла, n – параметр статической усталости, C – параметр, учитывающий время снятия нагрузки во время контрольной перемотки (как правило, $C \ll 1$, и им можно пренебречь).

Формула (1) получила широкое распространение, однако она выводилась с помощью простого степенного закона в предположении, что параметры статической усталости n и B , характеризующие скорость роста микротрещин, одинаковы при перемотке световодов и во время эксплуатации. Эксплуатация световодов обычно происходит в значительно менее благоприятных условиях (например, при повышенной влажности), чем перемотка.

Ранее нами было обнаружено, что при изменении влажности параметр статической усталости n остается практически неизменным (~ 20), а относительные изменения параметра B (измерение абсолютного значения которого вызывает большие затруднения) приводят к сокращению времени до разрушения при одной и той же нагрузке при увеличении относительной влажности [2]. В частности, было получено, что при увеличении относительной влажности с 30 до 100 % время до разрушения сокращалось в 18 раз [3].

Таким образом, учитывая вышеприведенные соображения, можно получить более удобное приближенное выражение для вероятности разрушения:

$$F \approx N_p \cdot L \cdot \frac{m}{n-2} \cdot \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_p} \right)^n \cdot \frac{t_s}{t_p} \cdot \frac{1}{\beta}, \quad (2)$$

где β – коэффициент, учитывающий уменьшение срока службы в случае увеличения относительной влажности при эксплуатации по сравнению с условиями при контрольной перемотке под нагрузкой.

Максимальная величина рабочей нагрузки при изгибе волокна σ_s (действующая в течение срока эксплуатации t_s) определяется его диаметром d и радиусом его изгиба R :

$$\sigma_s = d E / (2R + d) E, \quad (3)$$

где E – модуль Юнга кварцевого стекла, $E = 74$ ГПа.

Типичные нагрузки при испытательной перемотке – $\sigma_p = 1,4$ ГПа (при удлинении $\varepsilon_p = 2$ %, или силе натяжения 16,4 Н на волокно с $d = 125$ мкм), или $\sigma_p = 0,7$ ГПа (при удлинении $\varepsilon_p = 1$ %, или натяжении 8,4 Н).

Для консервативной оценки вероятности разрушения до конца срока службы можно выбрать следующие параметры:

срок службы $t_s = 25$ лет $= 0,8 \times 10^9$ с,

k – число колец ОВ радиуса R волокна с $d = 125$ мкм,

$t_p = 1$ с – время действия нагрузки при тестовой перемотке,

$N_p = 0,01$ м⁻¹ – число обрывов при контрольной перемотке (в среднем 1 обрыв на 100 м),

$n = 20$ – параметр статической усталости волокна с обычным уретанакрилатным покрытием,

$m = 2$ – типичный статистический параметр Вейбулла на уровне удлинения при перемотке 1–2 %,

$\beta = 0,055$ ($=1/18$) – параметр, учитывающий уменьшение срока службы при максимально возможном увеличении относительной влажности,

$L = 2\pi R \cdot k$ – длина изогнутого ОВ, находящегося под рабочей нагрузкой σ_s .

С использованием выражения (2) рассчитана следующая табл. 3.

Таблица 3

Вероятность разрушения в течение 25 лет ОВ, испытанного перемоткой с 2%-ным удлинением

R , мм		5	10	15	20	25
F	$k = 1$	>1	8×10^{-5}	$3,6 \times 10^{-8}$	$1,5 \times 10^{-10}$	$2,2 \times 10^{-12}$
	$k = 2$	>1	$1,6 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-8}$	$3,0 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-12}$

Из таблицы легко видеть, что ОВ, прошедшее 2 % proof test, можно укладывать как с одним, так и с двумя витками радиусом 10 мм без опасения его разрушения за 25 лет.

Однако расчеты показывают, что при $R = 5$ мм даже волокно с $N_p = 10^{-4}$ м⁻¹ (один обрыв на 10 км) и 2%-ной перемоткой имеет высокую вероятность разрушиться за 25 лет эксплуатации.

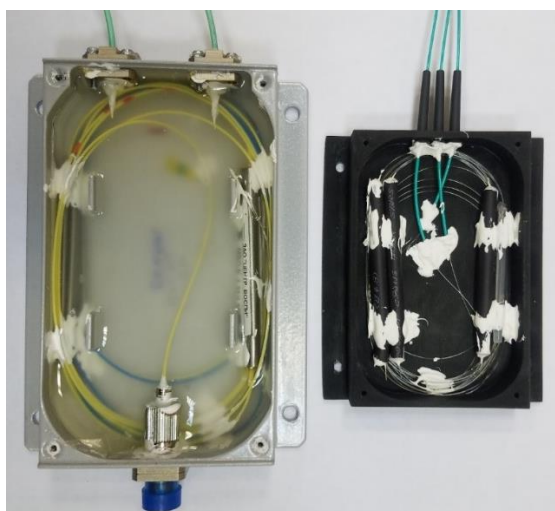
Согласно выражению (2), при использовании волокна, прошедшего только 1 % proof test, вероятность отказа повышается в $2^{20} = 10^6$ раз

(табл. 4). При этом изгиб с $R = 10$ мм на срок 25 лет становится недопустимым, а с $R = 15$ сомнительным.

Таблица 4

Вероятность разрушения в течение 25 лет ОВ, испытанного перемоткой с 1%-ным удлинением

R , мм		5	10	15	20	25
F	$k = 1$	>1	>1	$3,6 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-6}$
	$k = 2$	>1	>1	$7,2 \times 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-4}$	$4,4 \times 10^{-6}$



а

б

Рис. Монтаж двухкаскадного мультиплексора 1310/1550 на сварных ответвителях: а – с $R_{\text{мин}} = 30$ мм; б – с $R_{\text{мин}} = 20$ мм; использовалось ОВ, прошедшее 1 % proof test (см. табл. 4)

Использование возможности уменьшения радиуса изгиба при монтаже волоконно-оптического устройства проиллюстрировано на рис. 1, где радиус изгиба уменьшен с 30 до 20 мм без влияния на результирующие характеристики устройства и с допустимым снижением вероятности отказа.

Какие есть пути повышения механической долговечности изогнутого кварцевого ОВ?

Значительного повышения долговечности можно добиться, защищая ОВ от действия влаги, путем герметизации в объеме с

осушенным газом или погружая в среду влагозащитного геля, как и поступают изготовители полевых и магистральных кабелей и оптоволоконных линий задержки. Но есть и более радикальные методы.

Исследования, проведенные в НЦВО РАН, показывают, что защита оптического волокна герметизирующим карбоновым покрытием позволяет получить параметр статической усталости $n = 100 \dots 150$ [4]. Для оценок долговечности также подходит выражение (2), но только с использованием других величин параметров статической усталости: $n = 100$ и $\beta = 1$. Это покрытие радикально повышает долговечность, и при этом покрытие волокно будет вполне надежным даже при изгибах с $R < 5$ мм (табл. 5). Следует учитывать, однако, что малая толщина герметизирующего покрытия требует его дополнительной защиты от механических повреждений полимерным покрытием и защиты от пробоя разрядами электростатики при перемотке волокна.

Таблица 5

Вероятность разрушения ОВ с карбоновым покрытием ($n = 100$),
испытанного перемоткой с 2%-ным удлинением

R , мм		4	5	10	15	20	25
F	$k = 1$	$<10^{-8}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$
	$k = 2$	$<10^{-8}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$	$<10^{-15}$

Поскольку технология нанесения карбонового покрытия освоена в России в АО ПНППК (г. Пермь), есть реальная возможность получить супернадёжное монтажное волокно для использования в миниатюрных волоконных изделиях и фотонных интегральных схемах.

В заключение необходимо отметить, что все выкладки и выводы, изложенные в данной статье, применимы только к волокну, не прошедшему очистку от полимерного покрытия и не имеющему его повреждений.

Список литературы

1. Mitsunaga, Y. Reliability assurance for long-length optical fibre based on proof testing / Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, Y. Ishida // Electronics Letters. – 1981. – Vol. 17(16). – P. 567–568. DOI: 10.1049/el:19810398

2. Механическая надежность волоконных световодов / В.А. Богатырев, М.М. Бубнов, С.Д. Румянцев, С.Л. Семенов // Труды ИОФАН СССР. Т. 23. – М.: Наука, 1990. – С. 66–93.

3. Mechanical reliability of polymer-coated and hermetically coated optical fibers based on proof testing / V.A. Bogatyrjov, M.M. Bubnov, E.M. Dianov, S.D. Rumjantsev, S.L. Semjonov // Optical Engineering. – 1991. – Vol. 30(6). DOI: 10.1117/12.55866