

УДК 539.422, 681.7.068

НАДЕЖНОСТЬ МНОГОСЕРДЦЕВИННОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ

С. Л. Семенов, О. Н. Егорова

Получены аналитические выражения для оценки минимально допустимого диаметра изгиба в зависимости от ожидаемого срока службы, вероятности досрочного разрушения и диаметра оптического волокна, которое можно использовать для оценок работоспособности многосердцевидного оптического волокна в конкретных применениях.

Ключевые слова: многосердцевидное оптическое волокно, волоконно-оптические линии задержки, долговременная надежность.

Волоконно-оптические линии задержки (ВОЛЗ) являются одним из элементов, используемых в современном бортовом оборудовании летательных аппаратов, в частности для радиоэлектронной защиты. Существенным недостатком ВОЛЗ являются высокие масса и габариты, связанные с большой длиной оптического волокна (ОВ) при создании длительных времен задержки, например, 100 мкс и более. Нами было показано, что снижение массы и габаритов линии задержки возможно за счет последовательного прохождения сигнала по сердцевинам многосердцевидного оптического волокна (МОВ) [1, 2]. Снижение массы и габаритов достигается за счет снижения длины ОВ, необходимого для создания заданной задержки, при использовании многосердцевидного оптического волокна вместо односердцевидного. Для создания компактных линий задержки на основе МОВ также желательно осуществлять его намотку с малым диаметром изгиба. Диаметр стеклянной оболочки МОВ, как правило, больше чем односердцевидного волокна. При увеличении диаметра ОВ возрастают механические напряжения при изгибе того же диаметра, способствующие росту трещин на поверхности волокна за счет явления статической усталости, и, следовательно, срок службы волокна уменьшается. Методики оценки срока службы и оборудование для тестирования хорошо отработаны для применений ОВ в протяженных линиях связи, когда волокно со стандартным

диаметром 125 мкм находится в прямом или немного изогнутом кабеле [3]. Однако использование в линиях задержки оптического волокна, как было указано выше, имеет свою специфику, которую нужно принимать во внимание, особенно в случае МОВ. В научной литературе этот вопрос еще не рассматривался. В связи с этим, настоящая работа посвящена оценке времени жизни МОВ за счет статической усталости при намотке на катушки с малым диаметром и ограничением, связанным с этим явлением.

Короткие (~ 1 м) отрезки ОВ обычно имеют прочность около 5.5 ГПа с очень узким разбросом значений, однако технология производства ОВ не может полностью исключить появления на многокилометровых длинах отдельных дефектов, снижающих прочность до 0.5 ГПа и ниже. Для обнаружения таких дефектов принято использовать разрушающий метод контроля – перемотку под нагрузкой всей длины ОВ. При этом волокно сматывается с катушки, проходит специальное приспособление, где создается требуемая нагрузка, и, после этого, наматывается на другую катушку с малым натяжением. Каждый участок волокна последовательно оказывается под заданной нагрузкой в течение примерно 0.1–1 секунды, в зависимости от конструктивных особенностей установки. Современное оборудование позволяет перематывать ОВ без повреждения защитного полимерного покрытия под нагрузкой до 20 Н. Причем стандартное значение для телекоммуникационного ОВ – 9 Н (1% удлинения). Для волокна диаметром 125 мкм – это достаточно высокая нагрузка, позволяющая обеспечивать длительный срок службы с учетом явления статической усталости, то есть медленного роста дефектов на поверхности стекла под нагрузкой в присутствии атмосферной влаги.

Срок службы ОВ t_s под механическим напряжением σ_s после перемотки под нагрузкой σ_p с учетом вероятности разрушения во время эксплуатации F можно оценить, используя следующее выражение [3]:

$$t_s = t_p \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_s} \right)^n \left\{ \left[1 - \frac{\ln(1-F)}{N_p L} \right]^{(n-2)/m} - 1 \right\}. \quad (1)$$

Здесь t_p – время действия нагрузки при перемотке, N_p – среднее число обрывов волокна на единицу длины при перемотке, L – длина волокна, для которой делается оценка, m – статистический параметр Вейбулла, n – параметр статической усталости.

Следует также принять во внимание, что вышеприведенное выражение было получено в предположении, что относительная влажность воздуха при перемотке и во время эксплуатации – одна и та же. В то же время ранее наблюдалось, что время до разру-

шения под нагрузкой связано с относительной влажностью воздуха RH следующим образом [4]:

$$t_s \sim (RH)^{-2.2}. \quad (2)$$

Выражение (1) с учетом (2) удобно преобразовать к виду:

$$\sigma_s = A_0 \sigma_p \left(\frac{t_p}{t_s} \right)^{1/n}, \quad (3)$$

где

$$A_0 = \left(\frac{RH_P}{RH_S} \right)^{\frac{2.2}{n}} \left\{ \left[1 - \frac{\ln(1-F)}{N_p L} \right]^{\frac{n-2}{m}} - 1 \right\}^{\frac{1}{n}}, \quad (4)$$

где RH_P и RH_S – относительная влажность при перемотке и при эксплуатации.

В таблице 1 приведены значения параметра A_0 для значений длины МОВ в линии задержки $L = 1 - 10$ км и количества обрывов при его перемотке $N_p = 0.1 - 0.01$ км⁻¹ при типичных значениях параметров $n = 20$ и $m = 2$, а также в наихудшем случае по относительной влажности (10% при перемотке и 100% при эксплуатации).

Т а б л и ц а 1

Расчетные значения параметра A_0

	$F = 0.0001$	$F = 0.001$	$F = 0.01$
$N_p L = 1$	0.54666	0.61349	0.68975
$N_p L = 0.1$	0.61347	0.68959	0.78849
$N_p L = 0.01$	0.68958	0.78824	1.06148

Для случая намотки всей длины МОВ на катушку диаметром D_s , максимальное механическое напряжение, которому может подвергаться волокно, может быть получено из следующего выражения:

$$\sigma_s = \varepsilon_s E = \frac{d \cdot E}{D_s + d} \approx \frac{d \cdot E}{D_s}, \quad (4)$$

где ε_s – максимальное относительное удлинение на поверхности волокна, d – диаметр волокна, E – модуль Юнга кварцевого стекла (74 ГПа).

Как было указано выше, современное оборудование для контрольной перемотки под нагрузкой обеспечивает усилие натяжения ОВ при перемотке P_p до 20 Н. Для произвольного диаметра ОВ контрольное напряжение будет равно:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{S} = \frac{P_p}{\pi d^2/4} = \frac{4P_p}{\pi d^2}, \quad (5)$$

откуда с использованием выражения (2) можно оценить допустимый диаметр намотки при эксплуатации:

$$D_s = \frac{E\pi d^3}{4P_p A_0} \left(\frac{t_s}{t_p} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (6)$$

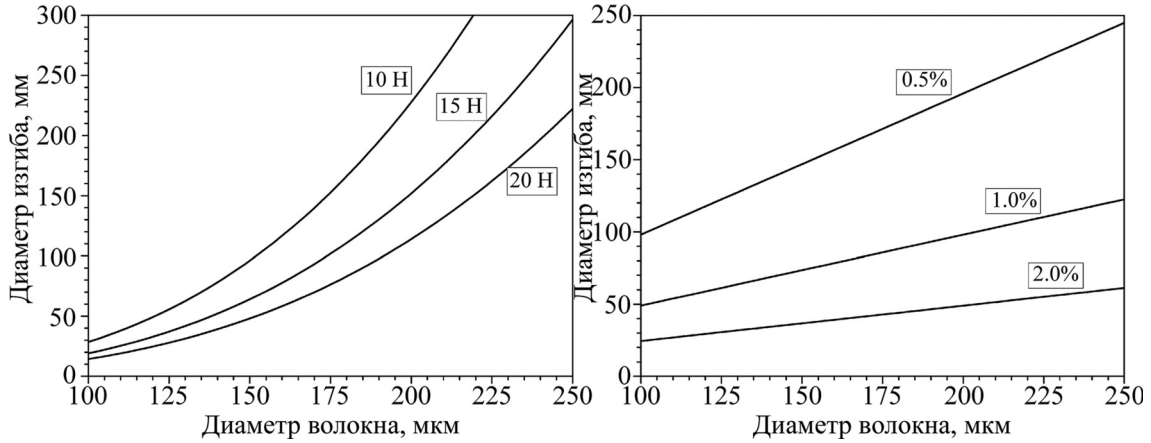


Рис. 1: Оценки минимально допустимых диаметров намотки для МОВ разного диаметра после испытаний контрольной перемоткой с растягивающей нагрузкой 10, 15 и 20 Н.

Рис. 2: Оценки минимально допустимых диаметров намотки для МОВ разного диаметра после испытаний контрольной перемоткой через ролики с удлинением 0.5%, 1.0% и 2.0%.

На рис. 1 приведены оценки минимально допустимых диаметров намотки для эксплуатации волокна разного диаметра в течение 10 лет при 100% относительной влажности после контрольной перемотки с растягивающей нагрузкой 10, 15 и 20 Н в течение 1 секунды при 10% относительной влажности при вероятности досрочного разрушения $F = 0.0001$ для типичных значений остальных параметров $N_p L = 1$, $n = 20$ и $m = 2$. Видно, что при увеличении диаметра волокна допустимый диаметр рабочей катушки резко возрастает, что приводит к существенному росту габаритов прибора.

Помочь в данной ситуации может переход к менее распространенному методу контрольного испытания – перемотке с изгибом на роликах определенного диаметра D_p , расположенных в нескольких плоскостях (чтобы подвергнуть растяжению всю поверхность волокна вокруг его оси). Допустимый диаметр намотки при эксплуатации в таком случае оказывается равным:

$$D_s = \frac{d}{\varepsilon_p A_0} \left(\frac{t_s}{t_p} \right)^{\frac{1}{n}},$$

где

$$\varepsilon_p = \frac{d}{D_p + d} \approx \frac{d}{D_p}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены оценки минимально допустимых рабочих диаметров изгиба для различных относительных удлинений при испытании перемоткой через ролики (0.5%, 1.0% и 2.0%), сделанные для тех же параметров, что и рис. 1, откуда видно, что в этом случае можно существенно уменьшить размеры рабочих катушек линии задержки.

Стоит заметить, что использовать для контрольного испытания перемоткой через ролики относительные удлинения более 2% нежелательно, ввиду возможности повреждения защитного полимерного покрытия волокна, а также существенного нарастания количества обрывов при перемотке. Тем не менее, уже при таких контрольных удлинениях оказывается возможным использовать сравнительно толстое волокно (~ 250 мкм) на катушках диаметром существенно меньше 100 мм, что крайне важно для использования в компактных линиях задержки или других приборах, требующих ограниченного объема.

Таким образом, проведенные впервые оценки срока службы МОВ в линиях задержки показали, что специфика такого волокна (увеличенный диаметр) и области применения (намотка всей длины волокна на катушку малого диаметра) не позволяют эффективно использовать стандартный метод обеспечения долговременной надежности ОВ путем контрольной перемотки всей длины под растягивающей нагрузкой из-за ограничений испытательного оборудования. В то же время перемотка волокна с изгибом через ролики определенного диаметра позволяет обеспечить контрольное напряжение на поверхности волокна, достаточное для дальнейшего его долговременного использования на катушках диаметром менее 100 мм. Получены аналитические выражения для оценки минимально допустимого диаметра катушки в зависимости от ожидаемого срока службы, вероятности досрочного разрушения и диаметра волокна, которое можно использовать для оценок работоспособности МОВ в конкретных приборах.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (шифр проекта RFMEFI60715X0138).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] О. Н. Егорова, М. С. Астапович, М. Е. Белкин, С. Л. Семенов, Квантовая электроника **46**(12), 1134 (2016).

- [2] О. Н. Егорова, М. С. Астапович, М. Е. Белкин, С. Л. Семенов, Краткие сообщения по физике ФИАН **43**(12), 60 (2016).
- [3] Y. Mitsunaga et al., J. Applied Phys. **53**(7), 4847 (1982).
- [4] В. А. Богатырев и др., Квантовая электроника **11**(7), 1467 (1984).

Поступила в редакцию 7 августа 2017 г.