

УДК 539.4; 53.08
PACS 42.81.-i; 42.87.-d

Влияние радиуса изгиба на долговечность оптических волокон типа «Панда»

Д. В. Хисамов^{1†}, А. Н. Смирнова², И. С. Азанова^{1,2}

¹ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

² Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

† darkh.ness01@gmail.com

В работе рассматривается возможность применения методики принудительного старения, используемой для телекоммуникационных оптических волокон по ГОСТ Р МЭК 60793-2-50, для подтверждения долговечности оптического волокна типа «Панда» при долговременном изгибе. Проведено сравнение результатов оптического волокна типа «Панда» с изотропными оптическими волокнами, которые различаются диаметрами кварцевой оболочки и полимерного покрытия, дана аналитическая оценка времени жизни.

Ключевые слова: долговечность; изгиб волокна; предельная прочность

Поступила в редакцию 12.11.2021; после рецензии 26.11.2021; принята к опубликованию 01.12.2021

Influence of the bend radius for PANDA PM Specialty optical fibers reliability

D. V. Khisamov^{1†}, A. N. Smirnova², I. S. Azanova^{1,2}

¹ Perm State University, Perm, Russia

² Open joint stock-company PNPPK, Perm, Russia

† darkh.ness01@gmail.com

The research considers the possibility of applying the forced «aging» method used for single-mode cable optical fibers in accordance with IEC 60793-2-50 to confirm the reliability of the PANDA PM Specialty optical fiber under long-term bending. A comparison of the results of PANDA PM Specialty optical fiber with isotropic optical fibers, which differ in the diameters of the quartz cladding and polymer coating, is carried out. An analytical estimate of the lifetime is carried out.

Keywords: reliability; bend length factor; tensile strength

Received 12.11.2021; revised 26.11.2021; accepted 01.12.2021

doi: 10.17072/1994-3598-2021-4-52-57

1. Введение

При эксплуатации специальных оптических волокон (ОВ) необходимо знать прогнозируемый срок службы или долговечность. Под долговечностью понимается сохранение механических параметров ОВ в условиях продолжительного исполь-

зования. На долговечность ОВ оказывают негативное влияние множество факторов, из которых основными считают воздействие молекул воды, а также различные изгибы волокна в процессе эксплуатации [1].

Для оценки долговечности стандартных телекоммуникационных ОВ в акрилатном покрытии

существует два основных подхода – аналитический расчёт или проведение ускоренных климатических испытаний (принудительное старение) [1–3]. При этом для специальных ОВ, в том числе анизотропных ОВ, отсутствует методика подтверждения долговечности. Также специальные ОВ часто применяются не в виде протяженных кабелей, а в виде контуров или катушек определенного радиуса, намотанных с определенным натяжением. Специальное анизотропное ОВ типа «Панда» отличается от телекоммуникационного меньшим диаметром по кварцу – 80 мкм вместо 125 мкм и наличием напрягающих стержней в оболочке волокна, создающих двулучепреломление. Цель данной работы – определить применимость методики ГОСТ Р МЭК 60793-2-50 [2] к анизотропному оптическому волокну типа «Панда» с учетом влияния намотки с определенным радиусом.

2. Методика эксперимента

Определение долговечности стандартных телекоммуникационных ОВ происходит путем измерения их предельной прочности и расчета по полученным значениям параметра динамической усталости n_d . Предельная прочность ОВ – величина прилагаемого к волокну напряжения, при котором происходит его разрушение. Динамический параметр стойкости к коррозии в напряженном состоянии (параметр динамической усталости) n_d – величина, которая может быть определена при построении зависимости логарифма предельной прочности от логарифма скорости растяжения (рис. 1) [4].

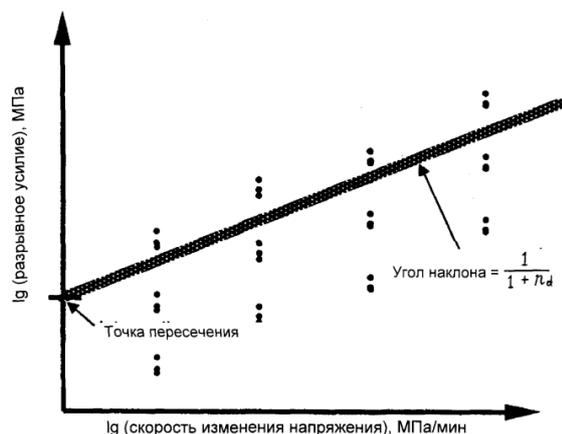


Рис. 1. Пример графика динамической усталости [4]

В данной работе предельная прочность ОВ определялась методом осевого растяжения (рис. 2), который является эталонным за счет большой измерительной базы, а параметр динамической усталости рассчитывался в соответствии с [4, 5]. Во время измерения нагрузка на волокно увеличивалась линейно и с постоянной скоростью.

Измерения проводились на разрывной машине Instron 5969 на скоростях растяжения 10, 50, 100, 500 мм/мин по 15 измерений на каждой скорости.

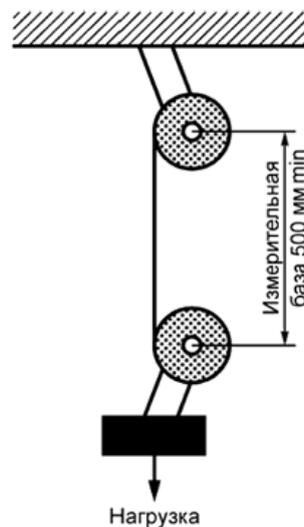


Рис. 2. Схема установки метода осевого растяжения [4]

Кварцевое стекло, из которого изготавливаются ОВ, как любое реальное тело, имеет на своей поверхности множество малоразмерных дефектов, которые появляются и растут при оказываемых механических воздействиях. Помимо механических воздействий рост дефектов сопряжен с разрушением связей в молекулах кварцевого стекла SiO_2 при взаимодействии с молекулами воды и газов окружающего воздуха. Исходя из этого следует, что в условиях эксплуатации такое механическое воздействие, как продолжительный изгиб оптического волокна, создает растягивающие напряжения на поверхности, способные привести к росту имеющихся дефектов, что негативно сказывается на его долговечности.

План эксперимента состоял в определении указанных механических параметров образцов в исходном состоянии и после проведения ускоренных климатических испытаний в свободных намотках разного диаметра, с последующим анализом результатов.

Для исследования влияния изгиба на долговечность из каждого исследуемого волокна формировались свободные намотки диаметрами 92 мм длиной 100 м и 170 мм (стандартный диаметр транспортных катушек) длиной 200 м. Исследование в свободных намотках проводилось с целью определения вклада, оказываемого непосредственно изгибом ОВ.

Для проведения ускоренных климатических испытаний (ускоренное «старение») свободные намотки устанавливались в климатическую камеру LabEvent LC/64/70/3, и задавался режим старения, описанный в ГОСТ Р МЭК 60793-1-50 [6]: температура в камере – $+85^\circ\text{C}$, относительная влажность

воздуха – 85%, продолжительность выдержки – 30 суток.

При завершении выдержки в климатической камере у состаренных образцов в свободных намотках аналогично определялись механические параметры и проводился анализ полученных результатов. Если после проведения климатических испытаний минимальная предельная прочность ОВ $\sigma > 3.03$ ГПа, а параметр $n_d \geq 18$, то с вероятностью 0,95 долговечность ОВ составляет не менее 25 лет [1, 2].

Аналитически срок службы ОВ (или время жизни ОВ) τ , находящегося под постоянной рабочей нагрузкой $\sigma_{раб}$, можно оценить его перемоткой при повышенном напряжении $\sigma_{пер}$ (Proof-test) по формуле [7, 8]:

$$\tau = B \frac{\sigma_{пер}^{n-2}}{\sigma_{раб}^n}, \quad (2.1)$$

где B – параметр, учитывающий влияние среды, n – параметр динамической усталости.

Формула (2.1) не отражает влияния изгиба на время жизни ОВ. Оценка времени жизни оптического волокна t_f , находящегося в изогнутом состоянии, может быть проведена по формуле (2.2) [3]:

$$t_f = \left\{ \left[\frac{\beta^{m_s}}{L} \ln \frac{1}{P} + (\sigma_p^n t_p)^{m_s} \right]^{\frac{1}{m_s}} - \sigma_p^n t_p \right\} \sigma_a^{-n}, \quad (2.2)$$

где L – эффективная длина отрезка ОВ, находящегося под нагрузкой; P – вероятность «выживаемости» волокна (принято считать $P=0.95$); m_s – параметр Вейбулла при статической усталости, который соотносится с параметром Вейбулла для динамической усталости m_d следующим образом: $m_d = m_s(n+1)$; β – параметр, рассчитывающийся по формуле

$$\beta = \sigma_p^n t_p \frac{L_p^{m_d}}{L_p^{n+1}}, \quad (2.3)$$

где σ_p – натяжение при перемотке (Proof test stress); t_p – эффективное время натяжения при перемотке; L_p – длина участка волокна, подвергающегося нагрузке при перемотке под натяжением; n – параметр динамической усталости.

Влияние изгиба на долговечность ОВ в формуле (2.2) отражено в множителе σ_a , который может быть определен выражением (2.4)

$$\sigma_a(D) = \frac{70.33}{8D} \left(1 + \frac{9}{32D} \right), \quad (2.4)$$

где D – диаметр намотки ОВ.

3. Исследуемые оптические волокна

Для проведения исследования было подготовлено три образца ОВ (табл. 1) разных диаметров

по кварцевой оболочке в акрилатном защитно-упрочняющем покрытии (ЗУП), предварительно прошедших проверку натяжением при перемотке (Proof-test) [7].

Табл. 1. Исходные параметры исследуемых образцов ОВ

Номер образца	Тип ОВ	Ø, мкм	
		Кварцевая оболочка ОВ	Акрилатное ЗУП
1	изотропное	125.40	250.88
2	анизотропное	80.45	166.13
3	технологическая кварцевая нить	80.02	165.74

Образец № 1 – изотропное ОВ, со стандартным диаметром по кварцевой оболочке и ЗУП. К такому типу ОВ наиболее часто применяются методики подтверждения долговечности [2].

Образцом № 2 выступает анизотропное ОВ типа «Панда». Ключевыми отличиями данного типа волокон являются наличие в оболочке двух боросиликатных стержней, создающих анизотропию внутренних напряжений, а также малый, по сравнению со стандартными волокнами, диаметр кварцевой оболочки. Благодаря данным конструктивным отличиям, ОВ типа «Панда» активно применяются для формирования кольцевых контуров в волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) [9, 10]. Стоит отметить, что в кольцевом контуре ВОГ ОВ находится в изогнутом состоянии, следовательно, имеет место фактор изгиба, способный сократить долговечность.

Технологическая кварцевая нить (образец № 3) не имеет сердцевин, и, как следствие, создаваемых ею внутренних напряжений. Данный образец выступает аналогом изотропного волокна диаметром 80 мкм по кварцевой оболочке.

Все исследуемые волокна изготовлены компанией ПАО ПНППК.

4. Экспериментальные результаты и их обсуждение

В табл. 2 приведены экспериментальные результаты определения механических параметров (предельная прочность σ и параметр динамической усталости n_d) исследуемых образцов в их исходном состоянии и после проведения старения в намотках диаметрами 92 и 170 мм. Погрешность измерений определялась с помощью коэффициента Стьюдента для достоверности 0.95.

Табл. 2. Экспериментальные результаты

Номер образца	Предельная прочность σ , ГПа				n_d
	10 мм/мин	50 мм/мин	100 мм/мин	500 мм/мин	
Требования	>3.03 ГПа (ГОСТ Р МЭК 60793-2-50-2019) [2]				≥ 18 [2]
1 исходный	4.80±0.04	5.10±0.04	5.30±0.04	5.70±0.04	23
1 (Ø 170 мм)	4.20±0.30	5.11±0.14	5.10±0.21	5.42±0.25	15
1 (Ø 92 мм)	-	5.10±0.10	5.10±0.40	5.60±0.10	-
2 исходный	4.64±0.05	4.94±0.05	5.13±0.03	5.30±0.05	29
2 (Ø 170 мм)	4.60±0.20	5.13±0.03	5.20±0.12	5.45±0.12	23
2 (Ø 92 мм)	4.20±0.13	4.70±0.20	5.00±0.10	5.40±0.14	17
3 исходный	5.11±0.01	5.33±0.01	5.65±0.01	6.13±0.01	21
3 (Ø 170 мм)	5.30±0.12	5.70±0.10	5.80±0.04	5.90±0.10	37
3 (Ø 92 мм)	4.50±0.20	5.20±0.11	5.60±0.10	6.00±0.10	14

Исходные значения механических параметров у всех трех образцов исследуемых ОВ удовлетворяют требованиям, заданным ГОСТ [2]. Значения предельной прочности для образца №3, являются самыми высокими среди исследуемых образцов, а у образца №2 минимальными.

После проведения климатических испытаний у большинства образцов наблюдается ухудшение механических параметров и рост среднеквадратичного отклонения, что не отмечалось в исходном состоянии.

Предполагалось, что после проведения климатических испытаний все исследуемые образцы будут демонстрировать однородный характер деградации механических параметров с уменьшением диаметра намоток. Однако образцы продемонстрировали отличные от ожидаемых результаты после старения.

У образца №1 в намотках диаметром 170 и 92 мм сократились значения предельной прочности, а параметр n_d опустился ниже допустимого уровня [2]. При этом на малой скорости растяжения волокно из намотки диаметром 92 мм не разрушалось, поскольку происходило отделение ЗУП от кварцевой оболочки и данное явление носило систематический характер.

В случае образца №3, который находился в намотке диаметром 170 мм, наблюдается значительный рост значений предельной прочности и параметра n_d по сравнению с исходным. Однако тот же образец, но который находился в намотке диаметром 92 мм, показывает уменьшение значений предельной прочности и сокращение значения параметра n_d до уровня ниже допустимого.

Объект исследования, анизотропное ОВ типа «Панда» (образец №2), показал наиболее близкую к ожидаемой картину зависимости исследуемых механических параметров от радиуса изгиба. Наблюдается стабильное снижение предельной прочности и параметра n_d , по сравнению с исход-

ными, с сокращением диаметра намотки ОВ. В случае намотки диаметром 92 мм значение параметра n_d опустилось ниже допустимого [2].

4.1. Аналитический расчет времени жизни оптических волокон

Для расчетов по формуле (2.1) рабочее натяжение $\sigma_{\text{раб}}$ бралось равным 0.1 ГПа, а натяжение при перемотке $\sigma_{\text{пер}}$ – равным 0.69 ГПа для образца № 1 и 0.41 ГПа для образцов № 2 и № 3, $V=0.002$ ГПа²·с.

Для расчетов по формуле (2.2) натяжение при перемотке (Proof test stress) σ_p также бралось равным 0.69 ГПа и 0.41 ГПа для образцов № 1 и № 2, № 3 соответственно, значение параметра Вейбулла m_d определяется экспериментально [5].

Результаты аналитически рассчитанного времени жизни по формулам (2.1) и (2.2) приведены в табл. 3.

Табл. 3. Время жизни ОВ

Номер образца	τ (2.1), год	t_f (2.2) (Ø 170 мм), год	t_f (2.2) (Ø 92 мм), год
1	$8 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^{39}$	$9 \cdot 10^{32}$
2	$4 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^{44}$	$2 \cdot 10^{45}$
3	$4 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^{45}$	$1 \cdot 10^{18}$

Полученные результаты являются несопоставимыми с реальностью. Аналогичный результат можно встретить и в других математических моделях. Так, например, в [1] при схожих параметрах n и m и схожем виде формулы расчета с (2.1) время жизни ОВ получается численно равным 10^{13} лет, что также является астрономической величиной. В [1] подобный результат объясняется тем, что срок службы волокна увеличивается при уменьшении ε

– натяжении при эксплуатации ($\sigma_{\text{раб}}$ в формуле (2.1)) и стремится к бесконечности при $\epsilon \rightarrow 0$. Поэтому вопрос заключается только в том, не будет ли значение $\sigma_{\text{раб}}$, необходимое для достижения срока службы в 25 лет, нереально малым.

Стоит отметить, что в применяемых математических моделях природа роста трещин характеризуется исключительно перемоткой под натяжением (Proof-test), однако в реальности имеют место посторонние факторы: влажность воздуха, перепады температур, внешние механические воздействия. Исходя из сказанного можно заключить, что указанные формулы неприменимы для расчёта времени жизни ОВ.

5. Заключение

В проведенной работе было подтверждено, что наличие фактора изгиба негативно сказывается на долговечности ОВ типа «Панда». Сопряжено это с возникновением дополнительных напряжений на поверхности, которые способствуют распространению дефектов вглубь ОВ. Причем чем сильнее изгиб (меньше радиус намотки волокна), тем сильнее становятся эти поверхностные напряжения и, как следствие, дефекты глубже проникают в оболочку.

Удалось экспериментально установить факт влияния изгиба на ОВ типа «Панда» за счет применения метода ускоренного «старения» (разработан для телекоммуникационных ОВ): продолжительной выдержки в климатической камере при воздействии высокой температуры и влажности в свободных намотках разного радиуса. Влияние изгиба отразилось на механических параметрах ОВ после выдержки: с уменьшением радиуса намотки происходит уменьшение значения предельной прочности и параметра динамической усталости.

Анизотропное ОВ типа «Панда» обладает высокой стойкостью к продолжительному влиянию изгиба на предельную прочность. Зафиксировано снижение значения параметра динамической усталости ниже допустимого уровня [2], определённого для телекоммуникационных ОВ, при диаметре намотки волокна 92 мм. Для получения более корректных и однозначных результатов требуется повторение работы, но с увеличением измерительной группы исследуемого ОВ, в связи с возникновением большой погрешности после климатических испытаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. (Соглашение № 075-11-2019-059 от 22 ноября 2019 г. по теме «Создание высокотехнологического производства специальных оптических волокон стойких к воздействию высоких и низких температур, водородосодержащих сред и ионизирующего излучения для систем те-

лемеетрии объектов нефтегазовой, аэрокосмической и атомной промышленности»).

Список литературы

1. Листвин А. В., Листвин В. Н. Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
2. ГОСТ Р МЭК 60793-2-50 Технические требования к изделию. Групповые технические требования к одномодовым оптическим волокнам класса В; утв. и введ. 2019-07-01. 31 с.
3. Optical Fibers. Reliability. Power law theory. IEC TR 62048 Technical Report. Geneva, Switzerland: IEC, 2014. (Электронный ресурс) URL: https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62048%7Bed3.0%7Den.pdf (дата обращения: 12.11.2021).
4. ГОСТ Р МЭК 60793-1-33 Методы измерений и проведение испытаний; утв. и введ. 2012-01-01. 16 с.
5. ГОСТ Р МЭК 60793-1-31 Методы измерений и проведение испытаний. Стойкость к коррозии в напряженном состоянии; утв. и введ. 2016–01-01. 30 с.
6. ГОСТ Р МЭК 60793-1-50 Методы измерений и проведение испытаний. Испытания влажным теплом (установившийся режим); утв. и введ. 2016-07-01. 6 с.
7. ГОСТ Р МЭК 60793-1-30 Методы измерений и проведение испытаний. Проверка прочности оптического волокна; утв. и введ. 2012-01-01. 6 с.
8. Коробейников А. Г. и др. Проблемы производства высокопрочного оптического волокна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2 (84). С. 18-23.
9. Lefèvre H. C. The fiber-optic gyroscope. Boston–London: Artech House, 2014. 343 p.
10. Иванов Г. А., Первадчук В. П. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие. Пермь: Изд-во Перм. нац.исслед. политехн. ун-та, 2011. 171 с.

References

1. Listvin A. V. Listvin V. N. *Optical fiber reflectometry*. Moscow: LESARart, 2005. 208 p (In Russian).
2. *Optical fibres – Part 2-50: Product specifications - Sectional specification for class B single-mode fibres*. International standard IEC 60793-2-50:2015, Geneva, Switzerland: 2015.
3. *Optical Fibers. Reliability. Power law theory*. IEC TR 62048 Technical Report. Geneva, Switzerland: IEC, 2014. (Электронный ресурс) URL:

- https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62048%7Bed3.0%7Den.pdf (дата обращения: 12.11.2021)
4. *Optical fibres – Part 1-33: Measurement methods and test procedures – Stress corrosion susceptibility*. International standard IEC 60793-1-33:2001, Geneva, Switzerland: 2001.
 5. *Optical fibres – Part 1-31: Measurement methods and test procedures – Tensile strength*. International standard IEC 60793-1-31:2010. Geneva, Switzerland: 2010.
 6. *Optical fibres – Part 1-50: Measurement methods and test procedures – Damp heat (steady state) tests*. International standard IEC 60793-1-50:2014. Geneva, Switzerland: 2014.
 7. *Optical fibres – Part 1-30: Measurement methods and test procedures – Fibre proof test*. International standard IEC 60793-1-30:2010. Geneva, Switzerland: 2010.
 8. Korobeynikov A. G. etc. Problems in the production of high-strength optical fiber. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, 2013, no. 2 (84), pp.18–23 (In Russian)
 9. Lefèvre H. C. *The fiber-optic gyroscope*. Boston-London: Artech House, 2014. 343 p.
 10. Ivanov G. A., Pervadchuk V. P. *Production technology and properties of quartz optical fibers*. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2011. 171 p. (In Russian)

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Хисамов Д. В., Смирнова А. Н., Азанова И. С. Влияние радиуса изгиба на долговечность оптических волокон типа «Панда» // Вестник Пермского университета. Физика. 2021. № 4. С. 52–57. doi: 10.17072/1994-3598-2021-4-52-57

Please cite this article in English as:

Khisamov D.V., Smirnova A. N., Azanova I. S. Influence of the bend radius for PANDA PM Specialty optical fibers reliability. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2021, no. 4, pp. 52–57. doi: 10.17072/1994-3598-2021-4-52-57

Сведения об авторах

1. *Дамир Владиславович Хисамов*, студент, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990
2. *Анна Николаевна Смирнова*, начальник лаборатории исследования оптических волокон, Пермская научно-производственная приборостроительная компания, ул. 25 Октября, 106 Пермь, 614007
3. *Ирина Сергеевна Азанова*, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614990; начальник отдела специальных оптических волокон, Пермская научно-производственная приборостроительная компания, ул. 25 Октября, 106 Пермь, 614007

Author information

1. *Damir V. Khisamov*, student, Perm State University, Bukirev str. 15, 614990, Perm, Russia
2. *Anna N. Smirnova*, Head of the Optical Fibers Research Laboratory, Open joint-stock company PNPPK, October 25th St. 106, 614007, Perm, Russia
3. *Irina S. Azanova*, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor, Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm, Russia; Head of the Specialty Optical Fibers Department, Open joint-stock company PNPPK, October 25th St. 106, 614007, Perm, Russia