

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Булатов М.И., Панькова Д.А., Шацов А.А. Истинная прочность оптических волокон различного диаметра // Вестник ПНИПУ. Машиностроение. Материаловедение. – 2022. – Т. 24, № 3 – С. 57–63. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.07

Please cite this article in English as:

Bulatov M.I., Pankova D.A., Shatsov A.A. True strength of optical fibers of various diameters. *Bulletin of PNRPU. Mechanical engineering, materials science*. 2022, vol. 24, no. 3, pp. 57-63. DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.07

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 24, № 3, 2022
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9877/2022.3.07

УДК 620.172.22:677.5

М.И. Булатов, Д.А. Панькова, А.А. Шацов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

ИСТИННАЯ ПРОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА

Специальные защитные покрытия на сегодняшний день обеспечивают наиболее высокие эксплуатационные свойства кварцевых волокон. Для предохранения волокон от механических воздействий, а также с целью маркировки волокна покрывают различными защитными покрытиями. Металлизированные покрытия позволяют существенно улучшить эксплуатационные свойства кварцевых волокон. Одно из актуальных покрытий – это алюминий, достоинства таких волокон – это работа в жестких условиях (высокая температура, давление), что необходимо для нефтегазовой промышленности, металлургии, электроэнергетики, медицины, химической промышленности, машиностроения, противопожарных систем жизнеобеспечения. Объектом исследования являлись оптические волокна с алюминиевыми покрытиями. Осуществлялось определение прочности оптических волокон разного диаметра, покрытых алюминием. Для измерения диаметров оптических волокон изготавливали микрошлиф, который впоследствии измеряли на оптическом микроскопе. Методом осевого растяжения определен предел прочности волокон, при постоянной скорости нагружения 500 мм/мин. Построен график В. Вейбулла, из которого найден наклон прямых для понимания природы дефектов. Большинство исследователей измеряли предел прочности оптических волокон с алюминиевым покрытием диаметром 125 мкм по кварцу, и в литературе нет данных о прочности волокон различного диаметра. Кроме того, вклад покрытия не учитывают, считая, что основную компоненту прочности составляет кварц, без учета влияния металла. Было найдено, что вклад алюминиевого покрытия в предел прочности оптических волокон разного диаметра составляет около 40 %. Истинная прочность оптических волокон уменьшается с увеличением диаметра кварца и не зависит от приращения толщины покрытия из алюминия.

Ключевые слова: оптическое волокно, предел прочности, алюминиевое покрытие, осевое растяжение, хрупкое разрушение, теория Гриффитса, графики В. Вейбулла, метод намораживания, модуль Юнга, концентрация напряжений.

M.I. Bulatov, D.A. Pankova, A.A. Shatsov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

TRUE STRENGTH OF OPTICAL FIBERS OF VARIOUS DIAMETERS

Special protective coatings currently provide the highest operational properties of quartz fibers. To protect the fibers from mechanical influences, as well as for the purpose of marking, the fibers are covered with various protective coatings. Metallized coatings can significantly improve the performance properties of quartz fibers. One of the actual coatings is aluminum, the advantages of such fibers are working in harsh conditions (high temperature, pressure), which is necessary for the oil and gas industry, metallurgy, electric power, medicine, chemical industry, mechanical engineering, fire-fighting life support systems. The object of the study was optical fibers with aluminum coatings. The aim of the work was to determine the strength of optical fibers coated with aluminum of different diameters. To measure the diameters of optical fibers, a microslit was made, which was subsequently measured on an optical microscope. The strength limit of the fibers was determined by the axial stretching method, at a constant loading speed of 500 mm/min. A V. Weibull graph is constructed from which the slope of straight lines is found to understand the nature of defects. In the literature data, most researchers measured the tensile strength of optical fibers with an aluminum coating with a diameter of 125 microns and there is no data on the strength of fibers of various diameters. In addition, the contribution of the coating is not taken into account, considering that the main component of strength is quartz, without taking into account the influence of metal. It was found that the contribution of the aluminum coating to the tensile strength of optical fibers of different diameters is about 40%. The true strength of optical fibers decreases with increasing quartz diameter and does not depend on the increment of the thickness of the aluminum coating.

Keywords: optical fiber, tensile strength, aluminum coating, axial tension, brittle fracture, Griffiths theory, V. Weibull graphs, freezing method, Young's modulus, stress concentration.

Введение

Оптическое волокно, обладая малыми геометрическими размерами, может выдерживать значительные нагрузки, возникающие в процессе укладки. Однако оно подвержено сильному воздействию влаги, температуры, механических напряжений в процессе эксплуатации, что приводит к росту трещин и возникновению микроизгибов. Поэтому в связи с указанной уязвимостью для практического применения оптическое волокно необходимо покрывать защитной оболочкой, таким покрытием, например, могут быть один или несколько слоев полимерных материалов на основе акрилата [1], полиимида [2] или металла [3].

В настоящее время применение оптиковолоконных технологий расширяется, поэтому требуется разработка новых типов оптических волокон специального назначения. Металлизированные покрытия позволяют существенно улучшить эксплуатационные свойства кварцевых волокон. На сегодняшний день оптические волокна в металлизированном покрытии применяются в солнечных панелях [4], медицинских лазерах [5], термоядерных реакторах (ИТЭР) [6] и нефтяных скважинах [7].

Микротрещины в стекле появляются при приложении растягивающей нагрузки. Динамические испытания на растяжение – наиболее актуальный метод для измерения прочности материалов на разрыв, используются промышленные установки, позволяющие менять скорость нагружения. Теоретический предел прочности оптических волокон находится в интервале 20–25 ГПа. Для описания хрупкого разрушения оптических кварцевых волокон в процессе их эксплуатации при воздействии циклических нагрузок используют теорию Гриффитса [8]. В XIX в. Гриффитс постулировал, что приращение предела прочности абсолютного хрупкого твердого тела зависит от малых эллиптических трещин. Положим, что такая трещина длиной $2a$ находится в кварцевом волокне, в результате воздействия растягивающей нагрузки в вершине трещины возникает концентрация напряжений σ_m [8]:

$$\sigma_m = 2\sigma\sqrt{\frac{a}{\rho}}, \quad (1)$$

где σ_m – растягивающее напряжение, σ – предел прочности, ρ – радиус кривизны контура сечения трещины у ее вершины.

Большинство исследователей измеряли предел прочности оптических волокон с алюминиевым покрытием диаметром 125 мкм по кварцу [9; 10], и в литературе нет данных о прочности волокон различного диаметра. Кроме того, вклад по-

крытия не учитывают, считая, что основную компоненту прочности составляет кварц, без учета влияния металла. В волокнах с органическими покрытиями предел прочности можно рассчитывать, исходя только из прочности кварца, т.к. модуль Юнга на несколько порядков меньше чем у кварца $E = 70,3$ ГПа [11], в металлах же модуль упругости сопоставим с модулем Юнга кварца. Исследования предела прочности волокон в металлических покрытиях важны, потому что это основной параметр долговечности материала. Объектом исследования является оптическое волокно с алюминиевым покрытием (рис. 1).

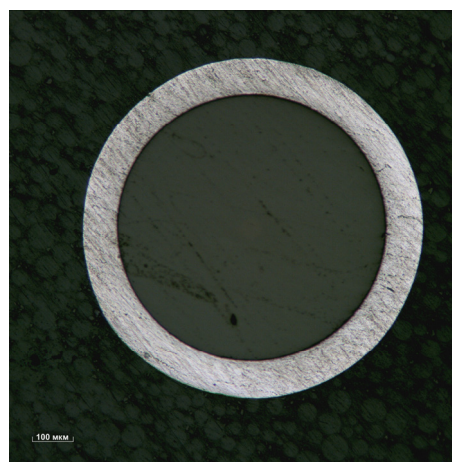


Рис. 1. Торцевое оптическое волокно с алюминиевым покрытием

Предметом исследования является определение и интерпретация механических свойств оптических волокон с алюминиевым покрытием различного диаметра.

Цель работы – определение прочности оптических волокон с алюминиевым покрытием различного диаметра по кварцу и интерпретация полученных результатов.

Материалы и методы исследования

В табл. 1 представлены оптические волокна с алюминиевым покрытием.

Таблица 1

Образцы волокна оптических волокон в алюминиевом покрытии

№ п/п	Диаметр по кварцевой оболочке, мкм	Диаметр по защитному покрытию, мкм
1	870	1050
2	660	860
3	330	410
4	220	290

Для измерения геометрических параметров изготавливали микрошлиф. Отрезки оптических

волокон длиной 20 мм прикрепляли с помощью пластилина внутри металлического кольца и заливали эпоксидной смолой. Процесс затвердевания длился 15 мин, диаметр шлифа составлял 20 мм, высота – 15 мм. После затвердевания его обрабатывали на шлифовально-полировальном станке фирмы Metaserv 250 (Германия) с использованием набора наждачной бумаги с размером зерна от 55 до 8 мкм и окончательно полировали абразивом шероховатостью от 3 до 1 мкм. Измерения диаметров проводили на инвертированном оптическом микроскопе Leica DMi8 (Германия).

Нанесение алюминиевого покрытия на волокно производилось в процессе вытяжки с помощью метода «намораживания» [12; 13]. В этом методе оптическое волокно с низкой температурой проходит через ванну с расплавленным металлом. При этом если температура металла находится на границе с температурой плавления, то некоторый слой металла может «намерзнуть» на поверхности оптического волокна [14–16]. Основным достоинством метода является толщина металлического покрытия (около 20 мкм). Кроме того, металлические покрытия позволяют эксплуатировать оптические волокна при высоких температурах (медь до 600 °С, алюминий до 400 °С) [17; 18], чем органические полиимидные волокна (до 350 °С) [19]. Основным недостатком таких волокон – это микроизгибные потери из-за «намораживания» толстой металлической оболочки относительно кварца [20; 21]. Кроме метода «намораживания», металл можно нанести с помощью физического осаждения из паровой фазы (PVD) [22], электроосаждением [23] или химическим методом [24–26].

Предел прочности измеряли на оборудовании MTS E42.503 производства США. Установка для определения предела прочности оптических волокон методом осевого растяжения состояла из двух кабанов одинакового диаметра, шагового двигателя и тензометрического датчика, схематически представлена на рис. 2.

Длина одного образца оптического волокна составляла 1,2 м с учетом намотки на нагрузочные барабаны. В данном методе скорость нагрузки была равна 500 мм/мин. Это позволяет определять, как будет вести себя предел прочности от различных дефектов, которые распределены по всей длине нагружения. Предел прочности σ оптического волокна рассчитывали по формуле (7) [27]:

$$\sigma = \frac{10^3 F}{\pi r^2}, \quad (2)$$

где F – нагрузка при разрыве, r – радиус кварцевой оболочки.

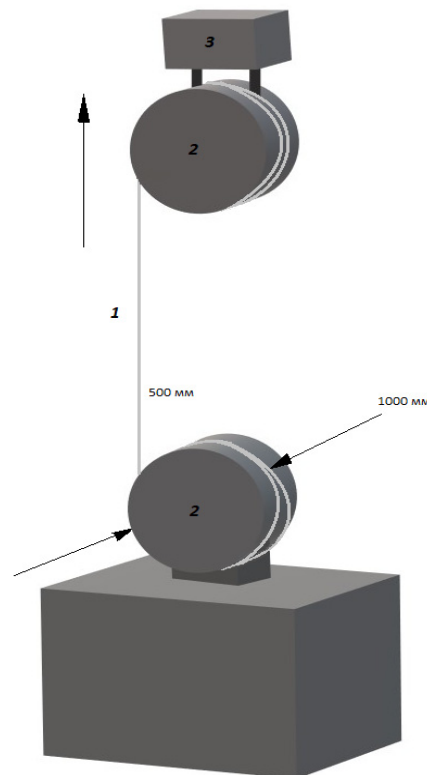


Рис. 2. Схема осевого растяжения оптического волокна: 1 – оптическое волокно, 2 – нагрузочные барабаны, 3 – динамометрический датчик

Результаты экспериментальных испытаний механической прочности оптических волокон показывают значительный разброс значений [28], что свидетельствует о наличии в волокнах микротрещин различного размера и является характерной чертой хрупкого разрушения. Теория разрушения кварцевых волокон строится на предположении о хаотичном распределении микротрещин по длине оптического волокна. Чтобы описать вид распространения поверхностных микротрещин по длине волокна используется статистическая модель на распределения В. Вейбулла [29]. В распределении предполагается, что вероятность разрушения равна:

$$P(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m, \quad (3)$$

где m и σ_0 – экспериментально определяемые параметры.

На основании (3) закон распределения В. Вейбулла обычно записывается в виде [29]:

$$\ln(\ln((1 - P(\sigma, L))^{-1})) = m \ln(\sigma) + \ln(L) + \text{const}, \quad (4)$$

следовательно, функция $P(\sigma, L)$ представляет собой прямую с углом наклона m . Чем меньше разброс прочности, тем круче наклон прямой и, соответственно, больше параметр В. Вейбулла. Для построения графика В. Вейбулла нужно провести i

одинаковых испытаний отрезков ОВ и расположить их результаты в порядке возрастания. Далее каждому результату (в зависимости от номера k) нужно присвоить вероятность $P(\sigma_k) = k/(i + 1)$.

Вклад покрытия алюминия в прочность оптических волокон был посчитан по формуле ниже [30]:

$$R = \frac{E_0 A_0}{E_0 A_0 + \sum_j^N E_j A_j}, \quad (5)$$

где E_0 – модуль Юнга кварцевого стекла – 70,3 ГПа, A_0 – площадь поперечного сечения кварцевого стекла, для N -слоев металлического покрытия с индексом j , E_j , и A_j – это модуль Юнга и площади поперечного сечения каждого слоя соответственно.

Результаты и их обсуждение

По формуле (2) рассчитана предельная прочность оптических волокон с алюминиевым покрытием различного диаметра. На рис. 4 построен график В. Вейбулла для оптических волокон с помощью метода осевого растяжения. Можно заметить, что алюминиевое волокно диаметром в 660 мкм имеет наименьшее значение прочности, по сравнению с остальными диаметрами. В свою очередь оптическое волокно диаметром 220 мкм имеет наибольшее значение прочности.

По рис. 4 найден параметр m , который описывает предельную прочность оптического волокна: 870 мкм – 18, 660 мкм – 6, 330 – 11 и 220 – 9. Чем больше его значение, тем в меньшей степени отличается нижний уровень прочности от верхнего. При m параметре ниже 50 означает, что в оптических волокнах содержатся дефекты, которые напрямую влияют на предел прочности [31].

В табл. 2 представлены результаты по прочности оптического волокна с алюминиевым покрытием.

Таблица 2

Результаты прочности оптических волокон в алюминиевом покрытии

Диаметр оптического волокна, мкм	Полученная σ , ГПа	$\sigma_{ист}$, ГПа
870	$3,72 \pm 0,70$	1,53
660	$3,24 \pm 0,40$	2,04
330	$4,60 \pm 0,28$	2,81
220	$5,64 \pm 0,37$	3,55

Полученная прочность оптических волокон сопоставима с литературными данными [32]. По формуле (5) посчитана истинная прочность оптических волокон для различного диаметра, обнаружено, что при увеличении диаметра по кварцу истинная прочность уменьшается, также оценен вклад покрытия на каждом диаметре: 870 мкм – 41 %, 660 мкм – 37 %, 330 мкм – 39 % и 220 мкм – 37 %. Таким образом, прочность от варьирования толщины алюминия не изменяется в оптических волокнах, а зависит от диаметра по кварцу.

Заключение

Найден параметр m из графика В. Вейбулла, который описывает предельную прочность оптического волокна: 870 мкм – 18, 660 мкм – 6, 330 – 11 и 220 – 9. Чем больше его значение, тем в меньшей степени отличается нижний уровень прочности от верхнего. При параметре m ниже 50 считается, что в оптических волокнах содержатся дефекты, которые напрямую влияют на предел прочности.

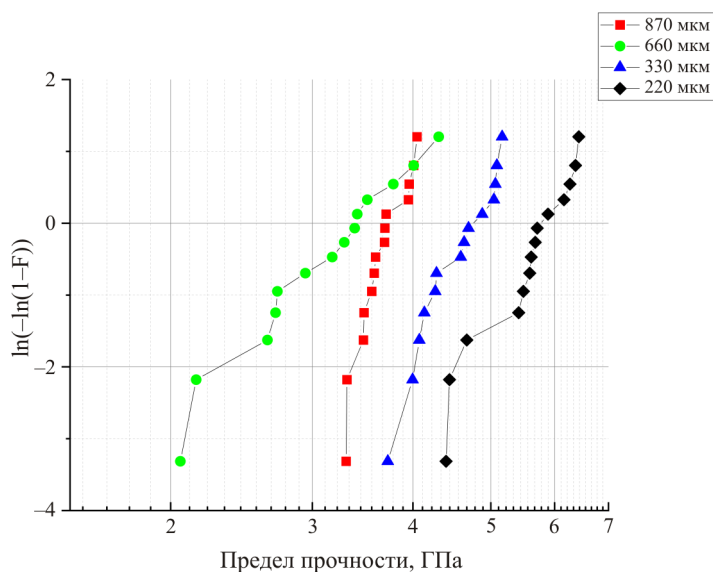


Рис. 4. Распределения В. Вейбулла для оптического волокна, полученные методом осевого растяжения

Полученная прочность оптических волокон сопоставима с данными в литературных источниках. Прочность от изменения толщины алюминия не изменяется в оптических волокнах, а зависит от диаметра по кварцу.

Вклад алюминия в предел прочности оптических волокон вносит около 40 % для всех исследуемых диаметров и должен быть учтен при измерении методом осевого растяжения.

Библиографический список

1. Stolov A.A., Simoff D.A., Jie Li. Thermal stability of specialty optical fibers // *J. Lightwave Technol.* – 2008. – Vol. 26. – P. 3443–3451.
2. Dipak R.B. Characterization of polyimide-coated optical fibers // *Optical Eng.* – 1991. – Vol. 30, no. 6. – P. 772–775.
3. Arridge R.G.C., Heywood D. The freeze-coating of filaments // *Brit. J. Appl. Physics.* – 1967. – Vol. 18. – P. 447–457.
4. Ultraviolet-visible light-induced solarisation in silica-based optical fibres for indoor solar applications / G.M. Lo Piccolo, A. Morana, A. Alessi, A. Boukenter, S. Girard, Y. Ouerdane, F.M. Gelardi, S. Agnello, M. Cannas // *Journal of NonCrystalline Solids.* – 2021. – Vol. 552. – P. 1–5.
5. Stable propagation of optical solitons in fiber lasers by using symbolic computation / Li Bo, Zhao Jianping, Pan Aimin, Mirzazadeh M., Ekici M., Zhou Q., Liu W. // *International Journal for Light and Electron Optics.* – 2019. – Vol. 178. – P. 142–145.
6. Radiation assessment of hydrogen-loaded aluminium-coated pure silica core fibres for ITER plasma diagnostic applications / B. Brichard, A.L. Tomashuk, H. Ooms, V.A. Bogatyrvov, S. Klyamkin, A.F. Fernández, F. Berghmans, M. Decréton // *Fusion Engineering and Design.* – 2007. – № 15-24. – P. 2451–2455.
7. Булатов М.И., Шацов А.А. Прочность и трещиностойкость кварцевых волокон с полиимидными покрытиями // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия.* – 2021. – Т. 15, № 2. – С. 22–30.
8. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // *Philos. Trans. Of Roy. Soc. Of London. Ser. A.* – 1920. – Vol. 221. – P. 163–198.
9. Radiation resistant single-mode fiber with different coatings for sensing in high dose environments / G. Melin, P. Guitton, R. Montron, T. Gotte, T. Robin, B. Overton, S. Rizzolo, S. Girard // *IEEE Trans. Nucl.* – 2018. – № 7. Sci. – P. 1657–1662.
10. Bubnov M.M., Dianov E.M., Semjonov S.L. Influence of Residual Water on the Strength of Metal Coated Optical Fibers // *MRS Proceedings.* – 1991. – Vol. 244. – P. 97.
11. High-strength hermetically tincoated optical fibers / V.A. Bogatyrvov, M.M. Bubnov, E.M. Dianov, A.Y. Makarenko, S.D. Rumyantsev, S.L. Semjonov, A.A. Sysoljatin // *Optical fiber commun.* – 1991. – 115 p.
12. Pinnow D.A., Jr Robertson G.D., Wysocki J.A. Reductions in static fatigue of silica fibers byhermetic jacketing // *Appl. Phys. Lett.* – 1979. – Vol. 34 (1). – P. 17–19.
13. Advances in high-strength metal-coated fiber-optical waveguides / D.A. Pinnow, G.D. Robertson, G.R. Blair, J.A. Wysocki // *Proc. OFC.* – Washington. DC. – 1979. – P. 16–18.
14. Calculation of the thickness of a metal coating for fibre produced by the freezing technique / A.S. Biriukov, V.A. Bogatyrvov, E.M. Dianov, A.G. Khitun // *Sov. Lightwave Community.* – 1993. – Vol. 3. – P. 235–246.
15. Simpkins P.G. Thermal response of optical fibers to metallization processing // *Materials Sci. Eng.* – 1994. – Vol. B23. – P. 5–7.
16. Biriukov A.S., Bogatyrvov V.A., Khitun A.G. Theoretical investigation of metal coating deposition on optical fibers by freezing technique. The model of the process // *Materials Research Society, Symposium Proceedings.* – 1998. – Vol. 531. – P. 273–284.
17. Standage A.E., Gani M.S. Reaction between vitreous silica and molten Aluminium // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1967. – Vol. 50. – P. 101–105.
18. Inada K., Shiota T. Metal coated fibers // *Proc.SPIE.* – 1985. – Vol. 584. – P. 99–106.
19. Определение термостойкости оптических волокон / Б.Б. Ахмед, К.Н. Нищев, А.А. Пыненков, Н.В. Моисеев // *Ж. прикл. физики.* – 2017. – No. 5. – С. 82–86.
20. Strength and reliability of metal-coated optical fibers at high temperatures / A.S. Biriukov, V.A. Bogatyrvov, V.F. Lebedev, A.A. Sysolyatin, A.G. Khitun // *MRS Online Proceeding Library.* – 1998. – Vol. 531. – P. 297–300. DOI: 10.1557/PROC-531-297
21. High temperature effects of aluminum coated fiber / T. Shiota, H. Hidaka, O. Fukuda, K. Inada // *J. Lightwave Technology.* – 1986. – Vol. 4. – P. 1151–1156.
22. Tu Y., Qi Y.H., Tu S.T. Fabrication and thermal characteristics of multilayer metal-coated regenerated grating sensors for high-temperature sensing // *Smart materials and structures.* – 2013. – Т. 22, № 7. – P. 075026.
23. Simultaneous measurement of the temperature and force using a steel cantilever soldered with a partially nickel coated in-fibre Bragg grating / Y. Li [et al.] // *Optics Communications.* – 2012. – Т. 285, № 21-22. – P. 4275–4279.
24. Chang T., Jia L., Sui Q. High-temperature experimental study on Cu-plating fiber bragg grating // *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS LASER.* – 2008. – Т. 19, № 2. – P. 187.
25. A study of the temperature sensitivity of fiber Bragg gratings after metallization / J.F. Xie [et al.] // *Smart materials and structures.* – 2007. – Т. 16, № 5. – P. 1837.
26. A simple method for metal re-coating of optical fibre Bragg gratings / S. Sandlin [et al.] // *Surface and Coatings Technology.* – 2006. – Т. 201, № 6. – P. 3061–3065.
27. Wiederhorn S.M. Influence of water vapor on crack propagation in soda-lime glass // *J. Amer. Ceramic Soc.* – 1967. – Vol. 50 (8). – P. 407–414.
28. Strength and reliability of metal-coated optical fibers at high temperatures / A.S. Biriukov, V.A. Bogatyrvov, V.F. Lebedev, A.A. Sysolyatin, A.G. Khitun // *MRS Online Proceeding Library.* – 1998. – Vol. 531. – P. 297–300. DOI: 10.1557/PROC-531-297
29. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability // *J. Appl. Mech.* – 1951. – Vol. 18. – P. 293–297.
30. ГОСТ Р МЭК 60793-1-31-2010. Волокна оптические. Методы измерения и проведения испытаний. Прочность при разрыве: национальный стандарт Российской Федерации

ской Федерации: дата введения 2012-01-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Изд. официальное. – М.: Стандартинформ, 2020. – 124 с.

31. Семенов С.Л., Прочность и долговечность волоконных световодов на основе кварцевого стекла: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. – М., 2007.

32. Wysocki J.A., Lee A. Mechanical properties of high-strength metal-coated fibers // IOOC. – San Francisco, CA, 1981. – P. 24.

References

1. Stolov A.A., Simoff D.A., Jie Li. Thermal stability of specialty optical fibers. *Journal Lightwave Technol.*, 2008, vol. 26, pp. 3443–3451.

2. Dipak R.B. Characterization of polyimide-coated optical fibers. *Optical Eng.*, 1991, vol. 30, no. 6, pp. 772–775.

3. Arridge R.G.C., Heywood D. The freeze-coating of filaments. *Brit. J. Appl. Physics*, 1967, vol. 18, pp. 447–457.

4. Lo Piccolo G.M., Morana A., Alessi A., Boukenter A., Girard S., Ouerdane Y., Gelardi F.M., Agnello S., Cannas M. Ultraviolet-visible light-induced solarisation in silica-based optical fibres for indoor solar applications. *Journal of NonCrystalline Solids*, 2021, vol. 552, 120458, pp. 1–5.

5. Li Bo, Zhao Jianping, Pan Aimin, Mirzazadeh M., Ekici M., Zhou Q., Liu W. Stable propagation of optical solitons in fiber lasers by using symbolic computation. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2019vol. 178, pp. 142–145.

6. Brichard B., Tomashuk A.L., Ooms H., Bogatyryov V.A., Klyamkin S., Fernández A.F., Berghmans F., Decréton M. Radiation assessment of hydrogen-loaded aluminium-coated pure silica core fibres for ITER plasma diagnostic applications. *Fusion Engineering and Design*, 2007, no. 15-24, pp. 2451–2455.

7. Bulatov M.I., Shatsov A.A. Prochnost' i treshchinostoikost' kvartsevyykh volokon s poliimidnymi pokrytiami [Strength and crack resistance of polyimide-coated quartz fibers]. *Izvestia vuzov. Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 22–30.

8. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philos. Trans. Of Roy. Soc. Of London. Ser. A*, 1920, vol. 221, pp. 163–198.

9. Melin G., Guitton P., Montron R., Gotte T., Robin T., Overton B., Rizzolo S., Girard S. Radiation resistant single-mode fiber with different coatings for sensing in high dose environments. *IEEE Trans. Nucl.*, 2018, no. 7. Sci., pp. 1657–1662.

10. Bubnov M.M., Dianov E.M., Semjonov S.L. Influence of Residual Water on the Strength of Metal Coated Optical Fibers. *MRS Proceedings*, 1991, vol. 244, p. 97.

11. Bogatyryov V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Makarenko A.Y., Romyantsev S.D., Semjonov S.L., Sysoljatin A.A. High-strength hermetically tincoated optical fibers. *Optical fiber commun*, 1991, 115 p.

12. Pinnow D.A., Jr Robertson G.D., Wysocki J.A. Reductions in static fatigue of silica fibers byhermetic jacketing. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, vol. 34 (1), pp. 17–19.

13. Pinnow D.A., Robertson G.D., Blair G.R., Wysocki J.A. Advances in high-strength metal-coated fiber-optical waveguides. *Proc. OFC*. Washington, DC, 1979, pp. 16–18.

14. Birukov A.S., Bogatyryov V.A., Dianov E.M., Khitun A.G. Calculation of the thickness of a metal coating for fibre produced by the freezing technique. *Sov. Lightwave Community*, 1993, vol. 3, pp. 235–246.

15. Simpkins P.G. Thermal response of optical fibers to metallization processing. *Materials Sci. Eng.*, 1994, vol. B23, pp. 5–7.

16. Biriukov A.S., Bogatyryov V.A., Khitun A.G. Theoretical investigation of metal coating deposition on optical fibers by freezing technique. The model of the process. *Materials Research Society, Symposium Proceedings*, 1998, vol. 531, pp. 273–284.

17. Standage A.E., Gani M.S. Reaction between vitreous silica and molten Aluminium. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1967, vol. 50, pp. 101–105.

18. Inada K., Shiota T. Metal coated fibers. *Proc.SPIE*, 1985, vol. 584, pp. 99–106.

19. Akhmed B.B., Nishchev K.N., Pynenkov A.A., Moiseev N.V. Opredelenie termostoikosti opticheskikh volokon. *Zh. prikl. Fiziki*, 2017, no. 5, pp. 82–86.

20. Biriukov A.S., Bogatyryov V.A., Lebedev V.F., Sysolyatin A.A., Khitun A.G. Strength and reliability of metal-coated optical fibers at high temperatures. *MRS Online Proceeding Library*, 1998, vol. 531, pp. 297–300. DOI: 10.1557/PROC-531-297

21. Shiota T., Hidaka H., Fukuda O., Inada K. High temperature effects of aluminum coated fiber. *J. Lightwave Technology*, 1986, vol. 4, pp. 1151–1156.

22. Tu Y., Qi Y.H., Tu S.T. Fabrication and thermal characteristics of multilayer metal-coated regenerated grating sensors for high-temperature sensing. *Smart materials and structures*, 2013, vol. 22, no. 7, p. 075026.

23. Li Y. et al. Simultaneous measurement of the temperature and force using a steel cantilever soldered with a partially nickel coated infibre Bragg grating. *Optics Communications*, 2012, vol. 285, no. 21-22, pp. 4275–4279.

24. Chang T., Jia L., Sui Q. High-temperature experimental study on Cu-plating fiber bragg grating. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS LASER*, 2008, vol. 19, no. 2, pp. 187.

25. Xie J.F. et al. A study of the temperature sensitivity of fiber Bragg gratings after metallization. *Smart materials and structures*, 2007, vol. 16, no. 5, pp. 1837.

26. Sandlin S. et al. A simple method for metal re-coating of optical fibre Bragg gratings. *Surface and Coatings Technology*, 2006, vol. 201, no. 6, pp. 3061–3065.

27. Amer J. Ceramic Soc. Wiederhorn S.M. Influence of water vapor on crack propagation in soda-lime glass, 1967, vol. 50, no. 8, pp. 407–414.

28. Biriukov A.S., Bogatyryov V.A., Lebedev V.F., Sysolyatin A.A., Khitun A.G. Strength and reliability of metal-coated optical fibers at high temperatures. *MRS Online Proceeding Library*, 1998, vol. 531, pp. 297–300. DOI: 10.1557/PROC-531-297

29. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, 1951, vol. 18, pp. 293–297.

30. GOST R MEK 60793-1-31-2010. Volokna opticheskie. Metody izmereniia i provedeniia ispytaniia. Prochnost' pri razryve: natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii: data vvedeniia 2012-01-01. Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniu. Izdatelstvo ofitsial'noe. Moscow: Standardinform, 2020, 124 p.

31. Semenov S.L., Prochnost' i dolgovechnost' volokonnykh svetovodov na osnove kvartseвого стекла [Strength and durability of quartz glass-based fiber light guides]. Abstract PhD thesis. Moscow, 2007.

32. Wysocki J.A., Lee A. Mechanical properties of high-strength metal-coated fibers. IOOC. San Francisco. CA, 1981, p. 24.

Поступила: 15.07.2022

Одобрена: 17.08.2022

Принята к публикации: 20.08.2022

Об авторах

Булатов Максим Игоревич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: BylatovMI@gmail.ru).

Панькова Диана Алексеевна (Пермь, Россия) – студентка кафедры общей физики Пермского национального исследовательского политехнического университета (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: pankowadiana2001@gmail.com).

Шацов Александр Аронович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металловедения, термической и лазерной обра-

ботки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета (Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: shatsov@pstu.ru).

About the authors

Maksim I. Bulatov (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Metal Science, Thermal and Laser Processing of Metals, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: BylatovMI@gmail.ru).

Diana A. Pankova (Perm, Russia) – student of the Department of General Physics of Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: pankowadiana2001@gmail.com).

Alexander A. Shatsov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Metal Science, Heat and Laser Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky ave., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: shatsov@pstu.ru).

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад всех авторов равноценен.