
ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 23, № 3, 2021

Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2021.3.05
УДК 620.172.22:677.5

М.И. Булатов, А.А. Шацов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

РАЗРУШЕНИЕ КВАРЦЕВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАЩИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Специальные защитные покрытия на сегодняшний день обеспечивают наиболее высокие эксплуатационные свойства кварцевых волокон. Одно из лучших покрытий – это полиимид, сочетающий высокие механические характеристики и термостойкость (до 350 °С). При температуре эксплуатации 350 °С и выше используют волокна с металлическими покрытиями, которые позволяют увеличить температурный диапазон вплоть до 600 °С. Объектом исследования являлись оптические волокна без покрытий, с полиимидными и с медными покрытиями. Целью работы являлось определение прочности, твердости и трещиностойкости оптических волокон без покрытий, с полиимидными и с медными покрытиями. Значения трещиностойкости и твердости кварцевых волокон измерены методом индентирования. Трещиностойкость K_{1c} оптических волокон была определена с помощью полуэмпирической зависимости А. Ниихары, размер трещины – с использованием сканирующей электронной микроскопии. Методом осевого растяжения и методом двухточечного изгиба определен предел прочности волокон, при постоянной скорости нагружения 100 мм/мин. Построен график зависимости предела прочности от трещиностойкости, на котором показано сравнение методов двухточечного изгиба и осевого растяжения. Метод двухточечного изгиба дает завышенные результаты по сравнению с эталонным методом. Мы полагаем, это связано с распределением дефектов по длине оптического волокна. Наиболее высокая прочность наблюдалась у оптического волокна с медным покрытием от 6,7 до 9,0 ГПа. Низкая прочность, как и ожидалось, была получена у оптического волокна без покрытия от 0,3 до 2,3 ГПа. Рост прочности и трещиностойкости у волокон с покрытиями определяют сжимающими напряжениями на поверхности при нанесении меди и полиимиды на кварцевые волокна.

Ключевые слова: оптическое волокно, предел прочности, трещиностойкость, твердость, коэффициент интенсивности напряжений, полиимидное покрытие, медное покрытие, методика Ниихары, осевое растяжение, двухточечный изгиб.

M.I. Bulatov, A.A. Shatsov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

DESTRUCTION OF SILICA FIBERS WITH DIFFERENT PROTECTIVE COATINGS

Special protective coatings currently provide the highest operational properties of quartz fibers. One of the best coatings is polyimide, which combines high mechanical characteristics and heat resistance (up to 350 °C). At an operating temperature of 350 °C and above, fibers with metal coatings are used, which allow increasing the temperature range up to 600 °C. The object of the study was optical fibers without coatings, with polyimide and with copper coatings. The aim of the work was to determine the strength, hardness and crack resistance of optical fibers without coatings, with polyimide and with copper coatings. The values of crack resistance and hardness of quartz fibers were measured by the indentation method. The crack resistance of K_{1c} optical fibers was determined using the semi-empirical dependence of A. Niihara, the crack size using scanning electron microscopy. The strength limit of the fibers was determined by the method of axial stretching and the method of two-point bending, at a constant loading speed of 100 mm/min. A graph of the dependence of the ultimate strength on crack resistance is constructed, which shows a comparison of the methods of two-point bending and axial stretching. The two-point bending method gives overestimated results compared to the reference method, we believe this is due to the distribution of defects along the length of the optical fiber. The highest strength was observed in an optical fiber with a copper coating from 6.7 to 9.0 GPa. Low strength, as expected, was obtained for an uncoated optical fiber from 0.3 to 2.3 GPa. The increase in strength and crack resistance of coated fibers is determined by compressive stresses on the surface when copper and polyimide are applied to quartz fibers.

Keywords: optical fiber, tensile strength, crack resistance, hardness, stress intensity factor, polyimide coating, copper coating, Niihara technique, axial tension, two-point bending.

Введение

Одним из главных факторов, влияющих на свойства оптического волокна, является защитно-упрочняющее покрытие. На сегодняшний день активно используются покрытия на основе акрилата [1], полиимида [2] и металла [3]. Отличительной особенностью оптического волокна с полиимидным покрытием является повышенная температурная стабильность (350 °С) и высокие механические свойства [4]. Однако данное покрытие негерметично к диффундированию молекул воды, что ограничивает применение волокон с полиимидным покрытием. Проблема может быть решена путем нанесения дополнительного подслоя углерода толщиной порядка 50 нм [5].

Области применения оптико-волоконных технологий расширяются и на сегодняшний день вытесняют традиционные медные кабели. Широкое применение волоконно-оптических датчиков требует разработки новых типов оптических волокон специального назначения, которые находят применение в приборостроении, системах телеметрии и др. Новыми сферами применения оптических волокон в металлизированном покрытии являются солнечные панели [6], термоядерные реакторы [7] и медицинские лазеры [8].

Теоретический предел прочности кварцевых волокон лежит в интервале 20–25 ГПа, такая предельная прочность эквивалентна прочности стальной проволоки аналогичного диаметра [9]. При приложении растягивающей нагрузки трещины ускоренно растут, тем самым уменьшая предел прочности оптического волокна, таким образом, полученная прочность кварцевых оптических волокон составляет лишь 20–40 % от теоретического значения.

Для описания хрупкого разрушения оптических кварцевых волокон в процессе их эксплуатации при воздействии циклических нагрузок используют теорию Гриффитса [10]. 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 при воздействии растягивающей нагрузки, в результате этого в вершине трещины возникает концентрация напряжений σ_m [10]:

$$\sigma_m = 2\sigma\sqrt{\frac{a}{\rho}},$$

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

В 60-х гг. Ирвин установил, что коэффициент интенсивности напряжений K_1 зависит от размера трещины [11]. Такой коэффициент точно передает все локальные напряжения в вершине трещины, величина K_1 может быть найдена из выражения

$$K_1 = Y\sigma\sqrt{a},$$

где a – длина большой полуоси трещины; Y – параметр, учитывающий форму трещины, для полуэллиптической трещины $Y = 1,24$ [12]. Для коротких трещин в литературе [13] рекомендуют пользоваться уравнением

$$K_{1c} = 2\sigma\sqrt{a}.$$

Объектом исследования является оптическое волокно без покрытия с полиимидным и с медным покрытиями (рис. 1).

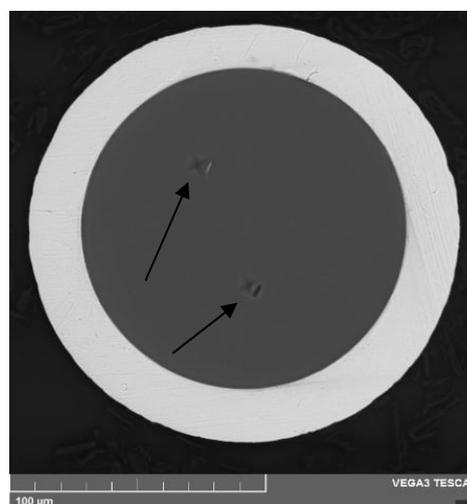


Рис. 1. Торцевое изображение оптического волокна с медным покрытием. Стрелками показаны места индентирования

Предметом исследования является определение и интерпретация механических свойств и трещиностойкости в оптических волокнах без покрытия, с полиимидным и с медным покрытиями.

Цель работы – определение твердости и прочности оптических волокон без покрытия, с полиимидным и с медным покрытиями.

Материалы и методики исследования

Образцы оптических волокон представляли собой сердцевину (8 ± 1) мкм из чистого аморфного кварца и кварцевую оболочку (125 ± 1) мкм с разными показателями преломления. Диаметр по полиимидному покрытию – (155 ± 5) мкм, диаметр по медному покрытию – (165 ± 10) мкм.

Нанесение полиимидного покрытия HD Micro Systems на оптическое волокно производили

в процессе вытяжки с использованием открытых фильер на обычной вертикальной вытяжной установке со скоростью 40 м/мин.

Нанесение медного покрытия на волокно производилось в процессе вытяжки с помощью метода «намораживания». 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. Основным достоинством метода является толщина металлического покрытия (около 20 мкм). Кроме того, металлические покрытия позволяют эксплуатировать оптические волокна при более высоких температурах (медь до 600 °С, алюминий до 400 °С) [14, 15], чем органические полиимидные волокна (до 350 °С) [16]. Основной недостаток таких волокон – это микроизгибные потери из-за «намораживания» толстой металлической оболочки относительно кварца [17, 18].

Твердость оптических волокон была получена методом indentирования алмазной пирамидки по А. Виккерсу с использованием оборудования KV 30 S. Величина нагрузки составляла 100 г, время выдержки 15 с. Коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} определяли по полуэмпирической зависимости А. Ниихары [19]:

$$K_{1c} = 0,203a^2 H_v c^{-3/2},$$

где a – полудиагональ отпечатка индентора; H_v – твердость материала; c – длина радиальной трещины. Торцы оптического волокна и идентифицирование отпечатков исследовали на сканирующем электронном микроскопе Mira 3 производства Tescan.

Предел прочности оптических волокон определяли методом двухточечного изгиба на установке FiberSigma производства США. Данный метод заключается в расположении оптического волокна между двумя плоскопараллельными пластинами с U-образными канавками, при этом одна из пластин покоится, а вторая движется с постоянной скоростью. При достижении критического радиуса изгиба оптического волокна и уменьшения расстояния между U-образными канавками напряжение в вершине кварцевого волокна возрастает, и далее кварцевое волокно разрушается. В момент разрушения фиксировали расстояние между пластинами и рассчитывали предел прочности σ оптического волокна и относительное удлинение ε из уравнений [20]:

$$\sigma = \varepsilon E_0 (1 + \alpha \varepsilon),$$

где E_0 – модуль Юнга кварца (72,5 ГПа [21]); α – параметр, корректирующий нелинейность зависи-

мости растяжения от прикладываемой нагрузки ($\alpha = 2,125$ [22]);

$$\varepsilon = 1,198 \frac{d_f}{D - d_c},$$

где d_f – диаметр сердцевинки кварцевого волокна, мкм; D – расстояние между плоскопараллельными пластинами при разрушении волокна, мкм; d_c – наружный диаметр волокна по кварцевой оболочке, мкм. Главным достоинством метода двухточечного изгиба является малая длина нагружения волокна для одного измерения (около 20 мм), из-за этого затрачивается малая строительная длина оптического волокна, что позволяет экономить образцы. Один из важных недостатков заключается в завышенных данных предела прочности, так как дефекты и неоднородности расположены хаотично, а метод нагружения влияет только на малую часть оптического волокна.

Предел прочности измеряли на оборудовании Instron 5969 производства США. Установка для определения предела прочности оптических волокон методом осевого растяжения состояла из двух кабестанов одинакового диаметра, шагового двигателя и тензометрического датчика. В отличие от метода двухточечного изгиба, в котором область нагружения оптического волокна составляет от 10 до 30 мм, в данном методе область нагрузки составляла 500 мм. Это позволяет определять, как будет вести себя предел прочности от различных дефектов, которые распределены по всей области нагружения. Предел прочности σ оптического волокна рассчитывали по формуле [23]

$$\sigma = \frac{F}{\pi r^2},$$

где F – нагрузка; r – радиус кварцевой оболочки.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлен типичный отпечаток алмазного индентора в кварцевом волокне. Твердость оптического волокна без покрытия, с полиимидным и с медным покрытиями по А. Виккерсу составила 788, 1000 и 1020 HV соответственно. Доверительные интервалы значений K_{1c} для волокон без покрытия составили $K_{1c} = (1,17 \pm 0,33)$ МПа·м^{1/2}, с полиимидным покрытием – $K_{1c} = (1,45 \pm 0,38)$ МПа·м^{1/2}, с медным покрытием – $K_{1c} = (4,45 \pm 0,15)$ МПа·м^{1/2}. Близкие значения трещиностойкости получены в работе [24], что подтверждает тот факт, что покрытие оказывает благоприятное влияние на трещиностойкость за счет сжимающих напряжений на поверхности при усадке и высокой смачиваемости кварца, в нашем случае полиимидом или медью.

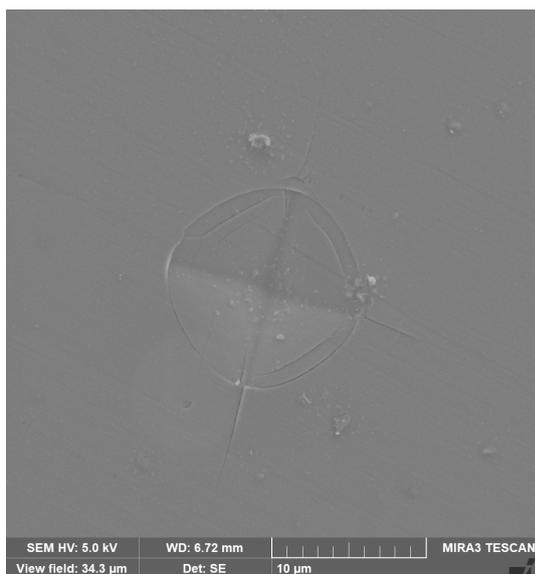


Рис. 2. Отпечаток алмазного индентора в кварцевом волокне

На рис. 3 представлена зависимость предела прочности, измеренная разными методами, от трещиностойкости кварцевых волокон без покрытия, с полиимидным и с медным покрытиями.

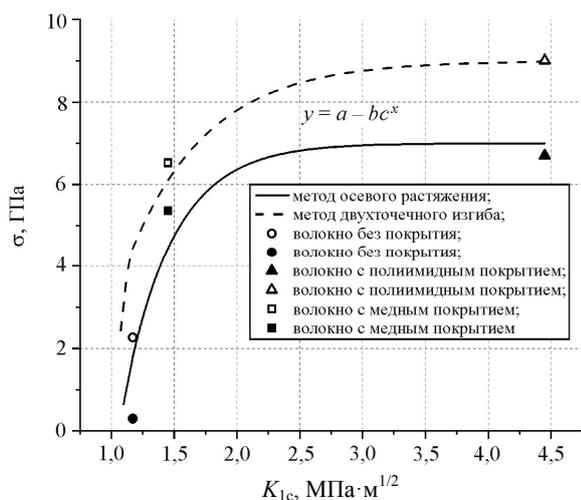


Рис. 3. Зависимость предела прочности оптических волокон от трещиностойкости

Из графика видно, что метод двухточечного изгиба дает завышенные результаты по сравнению с эталонным методом осевого растяжения, особенно эта разница видна у волокон без покрытия (превышает значения в 8 раз). Это связано с распределением дефектов и трещин по всей поверхности кварцевых волокон. Трещиностойкость, как было сказано выше, зависит от нанесенного покрытия, оказывает положительное влияние на предел прочности.

В таблице представлены полученные результаты по трещиностойкости, твердости и прочности оптических волокон без покрытия, с полиимидным

и с медным покрытиями. Значения прочности, измеренные методом двухточечного изгиба и осевым растяжением, представлены при постоянной скорости 100 мм/мин.

Результаты механических испытаний оптических волокон

Наименование образцов	Двухточечный изгиб σ , ГПа	Осевое растяжение σ , ГПа	Твердость по Виккерсу, HV	K_{1c} , МПа·м ^{1/2}
Оптическое волокно без покрытия	2,27±0,19	0,30±0,10	788	1,17±0,33
Оптическое волокно с полиимидным покрытием	6,52±0,07	5,36±0,11	1000	1,45±0,38
Оптическое волокно с медным покрытием	9,01±0,31	6,70±0,20	1020	4,45±0,15

Из таблицы следует, что предел прочности у оптического волокна без покрытия меньше, чем у волокна с полиимидным или медным покрытием; вероятно, это связано со смачиваемостью покрытия полиимидом или со сжимающими напряжениями в меди. Предел прочности оптических волокон без покрытия, с полиимидным и с медным покрытиями, измеренный методом осевого растяжения и двухточечного изгиба, хорошо согласуется с литературными данными [25, 26].

Выводы

Метод А. Ниихары [19] позволяет корректно определять трещиностойкость оптических волокон. Обнаружено наличие функциональной связи между пределом прочности и K_{1c} волокон.

Предел прочности и трещиностойкости оптического волокна с полиимидным покрытием превышает значения кварцевых волокон без покрытия, что, скорее всего, обусловлено созданием напряжений сжатия на поверхности дефектов, ответственных за разрушение.

Нанесение медного покрытия на оптическое волокно повышает предел прочности и трещиностойкость в большей мере, чем полиимидное, что обусловлено различием механизмов создания на поверхности сжимающих напряжений.

Рост трещиностойкости определяют сжимающими напряжениями на поверхности при нанесении медного покрытия на кварцевые волокна, обусловленными уменьшением диаметра покрытия при охлаждении.

Список литературы

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. Optical fibers with polyimide coatings for medical applications / A.A. Stolov, B.E. Slyman, D.A. Simoff, A.S. Hokansson, R.S. Allen, J.P. Earnhardt // *Design and Quality for Biomedical Technologies.* – 2012. – Vol. 8215. – P. 1–10.
5. Huff R.G., DiMarcello F.V. Hermetically coated optical fibers for adverse environments // *Proc. SPIE.* – 1987. – Vol. 867. – P. 40–45.
6. Ultraviolet-visible light-induced solarisation in silica-based optical fibres for indoor solar applications / G.M. Lo Piccolo, A. Morana, Alessi A. Boukenter A., S. Girard, Y. Ouerdane, F.M. Gelardi, S. Agnello, M. Cannas // *Journal of NonCrystalline Solids.* – 2021. – Vol. 552:120458. – P. 1–5.
7. Polarimetric optical fibre sensing for plasma current measurement in thermonuclear fusion reactors / M. Wuilpart, A. Gusarov, Leysen W. Batistoni P., P. Moreau, P. Dandu, P. Merget // 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy. – 2020. – P. 1–4.
8. Stable propagation of optical solitons in fiber lasers by using symbolic computation / Li Bo, Zhao Jianping, Pan Aimin, Mirzazadeh M., M. Ekici, Q. Zhou, W. Liu // *International Journal for Light and Electron Optics.* – 2019. – Vol. 178. – P. 142–145.
9. High strength furnace-drawn optical fibers / F.V. DiMarcello, A.C. Hart, Williams J.C. Kurjian C.R. // *Fiber optics: advances in research and development.* – New York: Plenum Publ. Corp., 1979. – P. 125–135.
10. 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.
11. Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate // *Journal of applied Mechanics.* – 1957. – Vol. 24. – P. 361–364.
12. Muraoka M., Abe H. Subcritical crack growth in silica optical fibers in wide range of crack velocities // *Journal of the American Ceramic Society.* – 1996. – Vol. 79(1). – P. 51–57.
13. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989. – 234 с.
14. Standage A.E., Gani M.S. Reaction between vitreous silica and molten Aluminium // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 1967. – Vol. 50. – P. 101–105.
15. Inada K., Shiota T. Metal coated fibers // *Proc. SPIE.* – 1985. – Vol. 584. – P. 99–106.
16. Определение термостойкости оптических волокон / Б.Б. Ахмед, К.Н. Нищев, А.А. Пыненков, Н.В. Монсеев // *Журнал прикладной физики.* – 2017. – № 5. – С. 82–86.
17. Reliability and optical losses of metal-coated fibers at high temperatures / A.S. Biriukov, V.A. Bogatyrov, V.F. Lebedev, A.A. Sysoliatin, A.G. Khitun // *Materials Research Society. Symposium Proceedings, MRS Spring Meeting.* – 1998. – Vol. 531. – P. 297–300.

18. High temperature effects of aluminum coated fiber / T. Shiota, H. Hidaka, O. Fukuda, K. Inada // *J. Lightwave Technology.* – 1986. – Vol. 4. – P. 1151–1156.
19. Гогоци Г.А., Башта А.В. Исследование керамики при внедрении алмазной пирамиды Виккерса // *Проблемы прочности.* – 1990. – № 9. – С. 49–54.
20. Matthewson M.J., Kurjian C.R., Gulati S.T. Strength measurement of optical fibers by bending // *Journal of the American Ceramic Society.* – 1986. – Vol. 69 (11). – P. 815–821.
21. Механическая прочность и надежность волоконных световодов для систем оптической связи / В.А. Богатырев, М.М. Бубнов, С.Д. Румянцев, С.Л. Семенов // *Proc. XV International Congress on Glass.* – Leningrad, 1989. – P. 295–298.
22. Griffioen W. Effect of nonlinear elasticity on measured fatigue data and lifetime estimations of optical fibers // *J. Am. Ceram. Soc.* – 1992. – Vol. 75 (10). – P. 2692–2696.
23. 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.
24. 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.
25. Tensile strength and failure behavior of bare mode fibers / Ma. Zhangwei, W. Zhifeng, Liu Huanhuan, Pang Fufei, Chen Zhenyi, W. Tianxing // *Optical Fiber Technology.* – 2019. – Vol. 52. – P. 1–5.
26. Radiation resistant single-mode fiber with different coatings for sensing in high dose environments / G. Melin, P. Guitton, R. Montron, T. Gotter, T. Robin, B. Overton, S. Rizzolo, S. Girard // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2018. – No. 7. – P. 1657–1662.

References

1. Stolov A.A., Simoff D.A., Jie Li. Thermal stability of specialty optical fibers. *Journal Lightwave Technology*, 2008, vol. 26, pp. 3443–3451.
2. Dipak R.B. Characterization of polyimide-coated optical fibers. *Optical Engnering*, 1991, vol. 30, no. 6, pp. 772–775.
3. Arridge R.G.C., Heywood D. The freeze-coating of filaments. *British Journal of Applied Physics*, 1967, vol. 18, pp. 447–457.
4. Stolov A.A., Slyman B.E., Simoff D.A., Hokansson A.S., Allen R.S., Earnhardt J.P. Optical fibers with polyimide coatings for medical applications. *Design and Quality for Biomedical Technologies*, 2012, vol. 8215, pp. 1–10.
5. Huff R.G., DiMarcello F.V. Hermetically coated optical fibers for adverse environments. *Proceedings of SPIE*, 1987, vol. 867, pp. 40–45.
6. 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.

7. Wuilpart M., Gusarov A., Leysen W. Batistoni P., P. Moreau, P. Dandu, P. Merget Polarimetric optical fibre sensing for plasma current measurement in thermonuclear fusion reactors. *22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Bari, Italy, 2020*, pp. 1–4.
8. 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*, 2019, vol. 178, pp. 142–145.
9. Di Marcello F.V., Hart A.C., Williams J.C. Kurkjian C.R. High strength furnace-drawn optical fibers. *Fiber optics: advances in research and development*. New York: Plenum Publ. Corp., 1979, pp. 125–135.
10. 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.
11. Irwin G.R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. *Journal of applied Mechanics*, 1957, vol. 24, pp. 361–364.
12. Muraoka M., Abe H. Subcritical crack growth in silica optical fibers in wide range of crack velocities. *Journal of the American Ceramic Society*, 1996, vol. 79(1), pp. 51–57.
13. Kolesnikov Iu.V., Morozov E.M. *Mekhanika kontaktnogo razrusheniia* [Contact fracture mechanics]. Moscow: Nauka, 1989, 234 p.
14. Standage A.E., Gani M.S. Reaction between vitreous silica and molten Aluminium. *Journal Amer. Ceram. Soc.*, 1967, vol. 50, pp. 101–105.
15. Inada K., Shiota T. Metal coated fibers. *Proc.SPIE*, 1985, vol. 584, pp. 99–106.
16. B.B. Akhmed, K.N. Nishchev, A.A. Pynenkov, N.V. Moiseev *Opređenje termostoikosti opticheskikh volokon* [Determining the thermal resistance of optical fibers]. *Zhurnal prikladnoi fiziki*, 2017, no. 5, pp. 82–86.
17. Biriukov A.S., Bogatyryov V.A., Lebedev V.F., Sysoliatin A.A., Khitun A.G. Reliability and optical losses of metal-coated fibers at high temperatures. *Materials Research Society. Symposium Proceedings, MRS Spring Meeting*, 1998, vol. 531, pp. 297–300.
18. Shiota T., Hidaka H., Fukuda O., Inada K. High temperature effects of aluminum coated fiber. *Journal Lightwave Technology*, 1986, vol. 4, pp. 1151–1156.
19. Gogotsi G.A., Bashta A.V. *Issledovanie kerami-ki pri vnedrenii almaznoi piramidy Vikkera* [Investigation of ceramics with Vickers diamond pyramid embedding]. *Problemy prochnosti*, 1990, no. 9, pp. 49–54.
20. Matthewson M.J., Kurjian C.R., Gulati S.T. Strength measurement of optical fibers by bending. *Journal of the American Ceramic Society*, 1986, vol. 69 (11), pp. 815–821.
21. Bogatyrev V.A., Bubnov M.M., Rumiantsev S.D., Semenov S.L. *Mekhanicheskaiia prochnost' i nadezhnost' volo-konnykh svetovodov dlia sistem opticheskoi sviazi* [Mechanical strength and reliability of fiber optic fibers for optical communication systems]. *Proc. XV International Congress on Glass*. Leningrad, 1989, pp. 295–298.
22. Griffioen W. Effect of nonlinear elasticity on measured fatigue data and lifetime estimations of optical fibers. *Journal Am. Ceram. Soc.*, 1992, vol. 75 (10), pp. 2692–2696.
23. Wiederhorn S.M. Influence of water vapor on crack propagation in soda-lime glass. *Journal Amer. Ceram. Soc.*, 1967, vol. 50 (8), pp. 407–414.
24. Bulatov M.I., Shatsov A.A. Prochnost' i tre-shchinostoikost' kvartsevykh volokon s poliimidnymi pokrytiiami [Strength and crack resistance of polyimide-coated quartz fibers]. *Izvestiia vuzov. Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 22–30.
25. Zhangwei Ma., Zhifeng W., Liu Huanhuan, Pang Fufei, Chen Zhenyi, Tianxing W. Tensile strength and failure behavior of bare mode fibers. *Optical Fiber Technology*, 2019, vol. 52, pp. 1–5.
26. Melin G., Guitton P., Montron R., Gotter 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. Sci.*, 2018, no. 7, pp. 1657–1662.

Получено 27.07.2021

Опубликовано 30.09.2021

Сведения об авторах

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

Шацов Александр Аронович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета, 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, e-mail: BylatovMI@gmail.ru.

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, e-mail: shatsov@pstu.ru.