

УДК 535.92; 536.6
PACS 62.20.-x

Структура кварцевых волокон с медными покрытиями после вакуумной термической обработки

М. И. Булатов^{1,2†}, Н. С. Григорьев², А. А. Шацов¹, Л. В. Спивак³

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Россия

³ Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

† maksimka.bulatov.95@mail.ru

Методами рентгеновских дифракций и дифференциального сканирующего калориметрического анализа исследованы структура и влияние термической обработки в вакууме на физико-механические свойства кварцевых волокон с медным покрытием. Результаты рентгенофазового анализа показывают, что кварц до 1000 °С является рентгеноаморфным, однако метод дифференциальной сканирующей калориметрии оказался чувствительнее к изменению свойств материала. Обнаружено, что при скорости нагрева 10 °С/мин у кварцевых волокон формируется кристаллическая структура в интервале температур 630–1000 °С в течение 30 мин, что приводит к существенному ухудшению физических и механических свойств. С помощью сканирующего электронного микроскопа при конкретных температурах этот эффект был подтвержден.

Ключевые слова: калориметрия; оптическое волокно; кристаллизация

Поступила в редакцию 24.07.2023; после рецензии 01.08.2023; принята к опубликованию 01.08.2023

The structure of quartz fibers with copper coatings after vacuum heat treatment

M. I. Bulatov^{1,2†}, N. S. Grigorev², A. A. Shatsov¹, L. V. Spivak³

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm, Russia

³ Perm State University, Perm, Russia

† maksimka.bulatov.95@mail.ru

Using X-ray diffraction and differential scanning calorimetric analysis, we investigated the structure and the effect of heat treatment in vacuum on the physical and mechanical properties of quartz fibers with a copper coating. The results of X-ray phase analysis show that at temperatures up to 1000 °C quartz is X-ray amorphous; however, the method of differential scanning calorimetry turned out to be more sensitive to changes in the properties of the material. It was found that at a heating rate of 10 °C/min, a crystal structure is formed in quartz fibers in the temperature range of 630–1000 °C during 30 minutes, which leads to a significant deterioration of physical and mechanical properties. This effect was confirmed at specific temperatures with the help of a scanning electron microscope.

Keywords: calorimetry; optic fiber; crystallization

Received 24 July 2023; revised 01 August 2023; accepted 01 August 2023

doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-09-15

1. Введение

В последние годы кварцевые оптические волокна широко применяют в нефтегазовой промышленности [1, 2] и в качестве распределительных датчиков высокой температуры на атомных электростанциях [3]. В жестких условиях покрытие кварцевых волокон должно обеспечить надежную защиту на годы, а то и десятки лет. Делят покрытия на две большие группы – это органические и металлические, к органическим относятся: силикон, акрилат, полиимид и т.д. Такие покрытия способны эксплуатироваться при температурах от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [4, 5], они прекрасно подходят для использования в нефтяных скважинах. Чаще всего для увеличения продолжительности работы кварцевого волокна при высоких температурах применяют ряд покрытий из металла: Al, Cu, Sn, Au [6, 7]. Для улучшения адгезии металла на кварц наносят наноподслой ($\sim 50\text{ нм}$) из аморфного пироуглерода с помощью химического осаждения из газовой фазы [8], подслоя углерода также является эффективным барьером для молекулярного водорода [9].

Кварцевые волокна вытягивают на больших вертикальных башнях, которые представляют из себя высокотемпературную графитовую печь, куда помещается и расплавляется кварцевая заготовка до тонкой нити порядка 100 мкм . Металлические покрытия наносят посредством «намораживания» [10], которое заключается в расплаве металла, например, меди при достижении ($T_{\text{пл}} = 1083\text{ }^{\circ}\text{C}$), которую впоследствии быстро охлаждают газообразным гелием, и слой металла успевает замерзнуть на поверхности кварца или пироуглеродного подслоя.

Основной дефект в кварцевых волокнах это – микротрещины. В 1920 г. А. Гриффитс [11] заявлял, что любое хрупкое тело содержит дефекты в виде эллиптических трещин, которые инициируют разрушение при приложении к ним нагрузки. Нанесение покрытия способно улучшить механические характеристики [12] будь это обратный эффект Ребиндера в полимерах [13] или сжимающие напряжения в металлах [14]. В работах [15–17] приведены результаты изучения особо прочных кварцевых волокон с покрытием из алюминия и олова ($13,6\text{ ГПа}$ и $14,6\text{ ГПа}$, соответственно), что близко к теоретическому пределу прочности 25 ГПа , когда волокно считается бездефектным [18].

В данной работе впервые изучены структура (сканирующий электронный микроскоп, метод рентгеновской дифракции) и термические свойства (методом дифференциального сканирующего калориметрического анализа) кварцевых волокон с медными покрытиями при термической обработке в вакууме, что позволяет рационально использовать данные волокна при температуре.

2. Методика эксперимента и образцы для исследования

В работе исследовали образцы оптических волокон с медными покрытиями (чистотой $99,997\%$). Диаметр по кварцу составил $125 \pm 2\text{ мкм}$, кварц легирован $\sim 2\%$ фтора, для выполнения полного внутреннего отражения, диаметр по покрытию – $160 \pm 10\text{ мкм}$.

Тепловые свойства кварцевых волокон были исследованы методом дифференциального сканирующего калориметрического анализа (ДСК) на дериватографе STA 449C Jupiter (Германия). Медное покрытие предварительно стравливалось в особо чистой азотной кислоте или хлориде железа. Основным элементом любого дериватографа являются аналитические весы и электрическая печь (рис. 1).

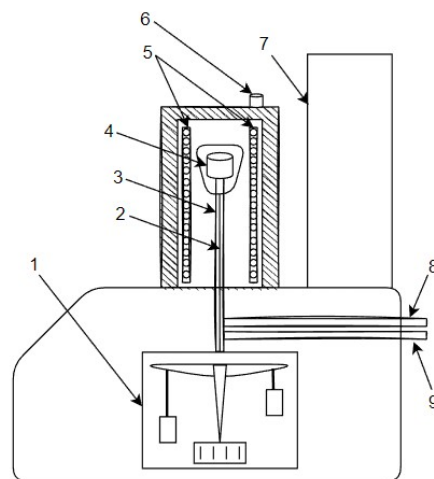


Рис. 1. Схема типичного дериватографа: 1 – весовая система, 2 – термопара расположенная под тиглем с исследуемым образцом, 3 – фарфоровая трубка, 4 – тигель для образца, 5 – нагревательные элементы, 6 – выходной клапан газа, 7 – стойка, 8 – насос, 9 – подвод газа

Образцы волокон нарезают на маленькие кусочки и укладывают в корундовый тигель объемом $0,75\text{ см}^3$. ДСК был проведен в инертной атмосфере (аргон $99,9999\%$) при скорости нагрева $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. Исследования проводились в интервале температур $T = 100\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рентгенофазовый анализ волокон выполняли на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 «Shimadzu». Диапазон угла сканирования 2θ составляет от 10 до 80° , рентгеновская трубка – Cu, напряжение трубки – 30 кВ , ток трубки – 30 мА . Скорость сканирования – $1,2^{\circ}/\text{мин}$, шаг сканирования – $0,02^{\circ}$. Температурная приставка: НТК 16N «Anton Paar», материал нагревательного элемента – Pt. Для отделения K_{β} составляющей рентгеновского излучения при проведении анализа использовался монохроматор.

На нагревательный элемент (Pt) температурной приставки помещались образцы кварцевого волокна, расположенные в один слой. Задавалась необходимая температура (25 °С, 200 °С, 400 °С, 600 °С, 800 °С и 1000 °С) при скорости нагревания – 50 °С/мин. По достижению заданной температуры осуществлялась выдержка в течение 10 мин, анализ проводился в среде воздуха.

Обработка дифрактограмм и расшифровка проводились с использованием программного обеспечения «XRD 6000/7000 Ver. 5.21» и базы данных ICDD PDF-4+.

Поскольку образцы укладывали тонким слоем на нагревательный элемент (Pt), то на дифрактограммах образца проявляются характеристические пики платины (углы 2θ : около 40, 46, 67 °).

Для выявления структуры шлифы кварцевых волокон с медными покрытиями были исследованы и сфотографированы на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3 (Чехия). Для обработки полученных изображений использовали программы Atlas и Axalit.

При проведении температурных испытаний кварцевых волокон с медными покрытиями использовали вакуумные печи TAV TVHS 20/30 (Италия), скорость нагрева 5 °/мин.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Мировые производители кварцевых волокон с медными покрытиями заявляют его работоспособность вплоть до температур 600–700 °С [19–21], откуда следует, что исследование структуры и физико-механических свойств при таких температурах является приоритетной задачей. Проведено испытание кварцевых волокон с медным покрытием в вакууме при температурах 24–1000 °С, при давлении вакуума 10^{-4} Па. Скорость нагрева составляла 5 °С/мин, длина – 200 м в свободной намотке диаметром 170 мм. При температуре 400 °С время выдержки составило 1 ч, 600 °С – 25 мин, 800 °С – 20 мин, 1000 °С – 10 мин. Охлаждение всех образцов производили в печи.

На рис. 2 представлена зависимость интенсивности от 2θ кварцевого волокна без покрытия при нагреве до различных температур.

Из-за того, что образцы кварцевых волокон нанесли тонким слоем на нагревательный элемент (Pt), то на дифрактограммах образца проявляются характеристические пики платины (углы 2θ около 40°, 46°, 67°). Помимо пиков, характерных для платины, на дифрактограмме кварцевых волокон при всех температурах анализа (25 °С, 200 °С, 400 °С, 600 °С, 800 °С, 1000 °С), другие пики не идентифицированы. Кварцевое волокно при всех температурах является рентгеноаморфным, фазовых переходов не происходит.

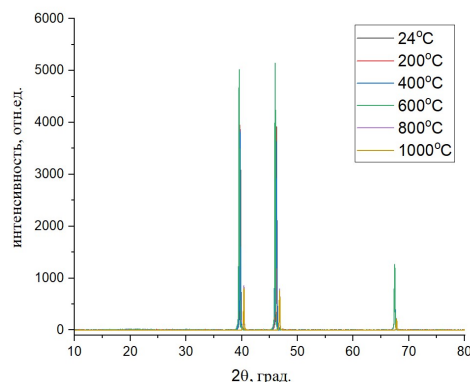


Рис. 2. Рентгенодифракционный спектр кварцевого волокна

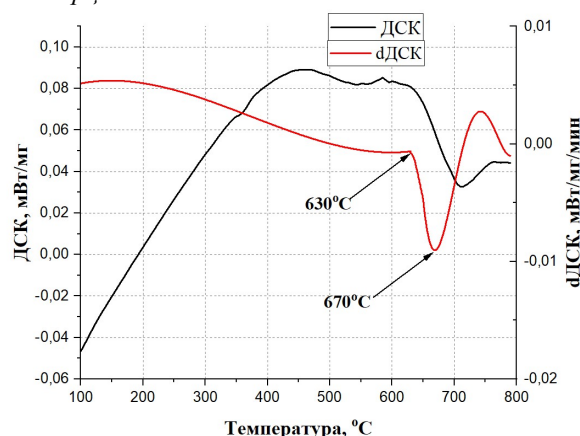


Рис. 3. Кривые ДСК и первая производная ДСК в диапазоне температур $100 \leq T \leq 800$ °С для кварцевого волокна без покрытия

Метод ДСК оказался более чувствительным по сравнению с рентгенофазовым анализом. Давно известно, что физические характеристики теплового потока могут отражать важные структурные процессы, фазовые переходы, типы химических реакций и окисление [22]. На рис. 3 показаны кривые ДСК и первая производная ДСК в диапазоне температур $100 \leq T \leq 800$ °С для кварцевого волокна без покрытия.

На рис. 3 наблюдали фазовый переход первого рода, кристаллизацию кварца, начало которого приходится на температуру 630 °С. Для подтверждения этого эксперимента были подготовлены шлифы, исследованные на сканирующем электронном микроскопе. Результаты структуры приведены на рис. 4.

Из рис. 4, *г* видно, что наблюдается кристаллическая структура, которая влияет на физико-механические свойства. Например, в литературе [23] предел прочности при температуре выше 600 °С заметно уменьшается, а оптические потери наоборот увеличиваются.

Кроме того, при проведении испытаний на 800 °С и 1000 °С наблюдалось слипание витков волокна друг с другом из-за диффузии меди (рис. 5), такие ситуации необходимо учитывать для

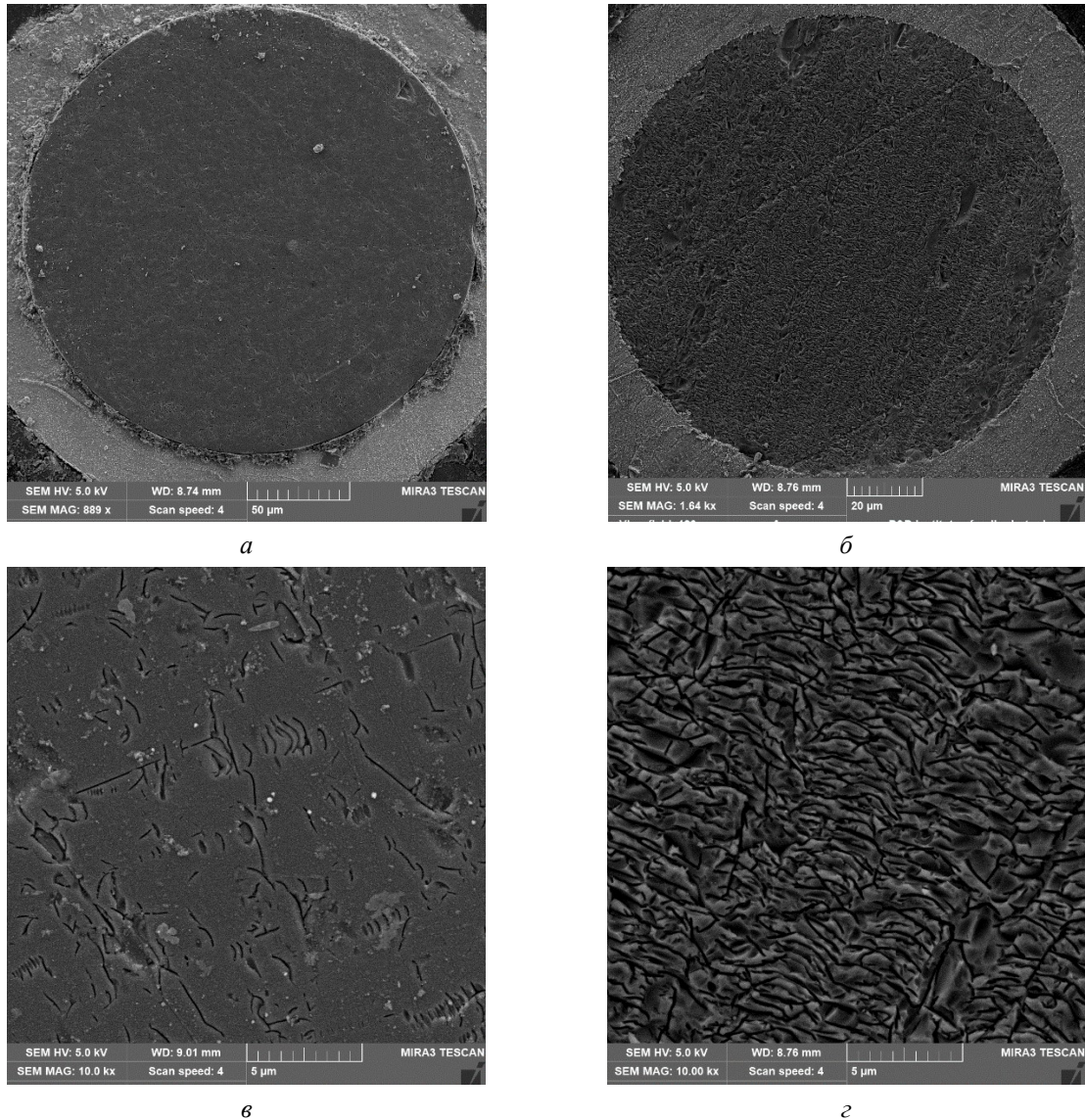


Рис. 4. Структура кварца: а) – при температуре $T=24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\times 889$; б) – при температурах $T = 700\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\times 1640$; в) при температуре $T=24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\times 10000$; г) – при температурах $T=700\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\times 10000$

дальнейших испытаний и прокладке в кабель несколько волокон.



Рис. 5. Внешний вид свободной намотки оптического волокна с медным покрытием после термообработки на $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$

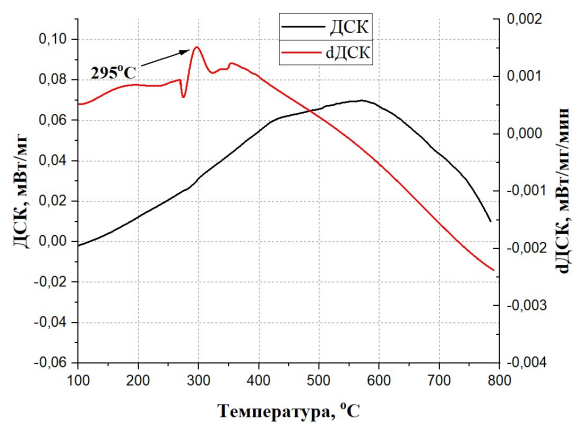


Рис. 6. Измеренные кривые ДСК и первой производной ДСК в диапазоне температур $100 \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ для кварцевого волокна с медным покрытием

На рис. 6 показаны измеренные методом ДСК изменение теплового потока и его первая производная по времени в оптическом волокне с медным покрытием. На предыдущем рис. 3 ДСК кварцевого волокна без покрытия фазового перехода не наблюдается при такой температуре. Значит, можно утверждать, что это фазовый переход 1 рода в самой меди, а именно – рекристаллизация, начало которого приходится ~300 °С. Это также подтверждается литературными данными [24, 25].

4. Заключение

Результаты рентгенофазового анализа показывают, что кварц до 1000 °С является рентгеноаморфным, однако метод дифференциальной сканирующей калориметрии оказался чувствительнее к изменению свойств материала. Обнаружено, что при скорости нагрева 10 °С/мин у кварцевых волокон формируется кристаллическая структура в интервале температур 630–1000 °С в течении 30 мин, что приводит к существенному ухудшению физических и механических свойств. С помощью сканирующего электронного микроскопа при конкретных температурах этот эффект был подтвержден. Таким образом, ухудшение механических свойств связано с изменением структуры кварцевого волокна. Из этого следует, что волоконно способно эксплуатироваться до температур порядка 700 °С, это стоит учитывать для применения в атомных реакторах.

Список литературы

1. Kersey A. D. Optical Fiber sensors for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry // *IEICE Transactions on Electronics*. 2000. Vol. 84. P. 400–404.
2. Kragas T., Williams B., Myers G. A. The optic oil field: deployment and application of permanent in-well fiber optic sensing systems for production and reservoir monitoring // *Environmental Science*. 2001. P. 1–9. DOI: 10.2118/71529-MS
3. Kashaykin P., Tomashuk A. L., Vasiliev S. A., Ignatyev A. D., et al. Radiation resistance of single-mode optical fibers with view to in-reactor applications // *Nuclear Materials and Energy*. 2021. Vol. 27. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.nme.2021.100981
4. Stolov A. A., Simoff D. A., Li J. J. Thermal stability of specialty optical fibers // *Journal of Lightwave Technology*. 2008. Vol. 26. P. 3443–3451. DOI: 10.1109/JLT.2008.925698
5. Stolov A. A., Slyman B. E., Simoff D. A., Hokansson A. S., et al. Optical fibers with polyimide coatings for medical applications. Design and Quality for Biomedical Technologies // *Materials Science*. 2012. Vol. 8215. P. 1–10. DOI: 10.1117/12.916858
6. Abramov A. A., Bubnov M. M., Prokhorov A. M., Semjonov S. L., et al. Optical performance of low loss aluminium-coated fibers exposed to hydrogen and temperature cycling // *Physics*. 1993. P. 76–77. DOI: 10.1364/OFC.1993.WA2
7. Волошин В. В., Воробьев И. Л., Иванов Г. А., Исаев В. А., и др. Потери на поглощении света при высоких температурах в оптических волокнах с покрытием из алюминия или меди // *Радиотехника и электроника*. 2010. Т. 55. №6. С. 1–8.
8. Li J., Lindholm E, Horska J., Abramczyk J. Advances in design and development of optical fibers for harsh environments // *International Wire and Cable Symposium*. 1999. P. 1–11.
9. Craing A. T., Wilson K. S. Characterization of CVD carbon films for hermetic optical fiber coatings // *Surface and Coatings Technology*. 2003. Vol. 168. P. 1–11. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00888-5
10. Arridge R., Heywood D. The freeze-coating of filaments // *British Journal of Applied Physics*. 1967. Vol. 18. P. 447–457. DOI: 10.1088/0508-3443/18/4/308
11. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids // *Phil. Trans. R. Soc. Lond*. 1921. Vol. 221. P. 163–198. DOI: 10.1098/RSTA.1921.0006
12. Булатов М. И., Шацов А. А. Прочность и трещиностойкость кварцевых волокон с полиимидными покрытиями // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. Т.15. №. 2. С. 22–30. DOI: 10.17073/1997-308X-2021-2-22-30
13. Волинский А. Л. Эффект Ребиндера в полимерах // *Природа*. 2006. № 11. С. 11–20.
14. Булатов М. И., Шацов А. А., Григорьев Н. С., Мальков Н. А. Трещиностойкость, прочность и динамическая усталость кварцевых волокон с медными покрытиями // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2022. Т.16. № 1. С. 57–65. DOI: 10.17073/1997-308X-2022-1-57-65
15. Bubnov M. M., Dianov E. M., Prokhorov A. M., Semjonov S. L., et al. High-strength carbon-coated optical fibre // *Materials Science*. 1992. Vol. 2. P. 245–250.
16. Semjonov S. L., Bubnov M. M., Dianov E. M., Shchebunyaev A. G. Reliability of aluminum coated fibers at high temperature // *Fiber Optics Reliability and Testing*. 1994. Vol. 2074. P. 25–33. DOI: 10.1117/12.168642
17. Bogatyryov V. A., Bubnov M. M., Dianov E. M., Makarenko A. Y., et al. High-strength hermetically tin-coated optical fibers // *Optical Fiber Communication*. 1991. Vol. 4. P. 115. DOI: 10.1364/OFC.1991.WL9

18. Листвин А. В., Листвин В. Н., Швырков Д. В. Оптические волокна для линий связи // М: ЛЕ-САПарт. 2003. 288 с.
19. Biriukov A. S., Bogatyryov V. A., Lebedev V. F., Sysoliatin A. A. Strength and reliability of metal-coated optical fibers at high temperatures // MRS Online Proceeding Library. 1998. Vol. 531. P. 297–300. DOI: 10.1557/PROC-531-297
20. Bogatyrev V. A. Semjonov S. L. Metal-Coated Fibers // Physics. 2007. P. 491–512. DOI:10.1016/B978-012369406-5/50017-5
21. Косолапов А. Ф., Семенов С. Л. Термическая стойкость волоконных световодов в медном покрытии // Фотон-экспресс. 2019. № 5. С. 190–191.
22. Ибрагимова С. И., Джабаров С. Г., Гусейнов Г. Г., Гульева Х. М. Рентгеноструктурный и дифференциальный сканирующий калориметрический анализ CuInZnSe₃ // Физика и техника полупроводников. 2021. Том 55. Вып. 11. С. 1011–1014. DOI: 10.21883/ftp.2021.11.51553.9663
23. Bulatov M. I., Shatsov A. A., Grigorev N. S., Malkov N. A. Strength, crack resistance and optical losses of heat-treated silica fibers coated with non-ferrous metal // Optical Fiber Technology. 2023. Vol. 75, 103174. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103174
24. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир. 1972. 408 с.
25. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия. 1986. 544 с.
- ence, 2012, vol. 8215, pp. 1–10. DOI: 10.1117/12.916858
6. Abramov A. A., Bubnov M. M., Prokhorov A. M., Semjonov S. L., et al. Optical performance of low loss aluminium-coated fibers exposed to hydrogen and temperature cycling. *Physics*, 1993, pp. 76–77. DOI: 10.1364/OFC.1993.WA2
7. Voloshin V. V., Vorobyev I. L., Ivanov G. A., Isaev V. A., et al. Light absorption losses at high temperatures in optical fibers coated with aluminum or copper. *Radio Engineering and Electronics*, 2010, vol. 55, no. 6, pp. 1–8.
8. Li J., Lindholm E, Horska J., Abramczyk J. Advances in design and development of optical fibers for harsh environments. *International Wire and Cable Symposium*, 1999, pp. 1–11.
9. Craig A. T., Wilson K. S. Characterization of CVD carbon films for hermetic optical fiber coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2003, vol. 168, pp. 1–11. DOI: 10.1016/S0257-8972(02)00888-5
10. Arridge R., Heywood D. The freeze-coating of filaments. *British Journal of Applied Physics*, 1967, vol. 18, pp. 447–457. DOI: 10.1088/0508-3443/18/4/308
11. Griffith A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1921, vol. 221, pp. 163–198. DOI: 10.1098/RSTA.1921.0006
12. Bulatov M. I., Shatsov A. A. Strength and fracture resistance of quartz fibers with polyimide coatings. *Izvestia Vuzov, Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya*, 2021, vol. 15, no. 2, pp. 22–30. DOI: 10.17073/1997-308X-2021-2-22-30 (In Russian).
13. Volynsky A. L. Rebinder effect in polymers. *Priroda* [Nature], 2006, no. 11, pp. 11-20 (In Russian).
14. Bulatov M. I., Shatsov A. A., Grigoryev N. S., Malkov N. A. Crack resistance, strength and dynamic fatigue of quartz fibers with copper coatings. *Izvestia Vuzov, Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 57–65. DOI: 10.17073/1997-308X-2022-1-57-65 (In Russian).
15. Bubnov M. M., Dianov E. M., Prokhorov A. M., Semjonov S. L., et al. High-strength carbon-coated optical fibre. *Materials Science*, 1992, vol. 2, pp. 245–250.
16. Semjonov S. L., Bubnov M. M., Dianov E. M., Shchegunyaev A. G. Reliability of aluminum coated fibers at high temperature. *Fiber Optics Reliability and Testing*, 1994, vol. 2074, pp. 25–33. DOI: 10.1117/12.168642
17. Bogatyryov V. A., Bubnov M. M., Dianov E. M., Makarenko A. Y., et al. High-strength hermetically tin-coated optical fibers. *Optical Fiber Communication*, 1991, vol. 4, pp. 115. DOI: 10.1364/OFC.1991.WL9

References

1. Kersey A. D. Optical fiber sensors for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry. *IEICE Transactions on Electronics*. 2020, vol. 84, 2000, pp. 400–404.
2. Kragas T., Williams B., Myers G. A. The optic oil field: deployment and application of permanent in-well fiber optic sensing systems for production and reservoir monitoring. *Environmental Science*, 2001, pp. 1–9. DOI: 10.2118/71529-MS
3. Kashaykin P., Tomashuk A. L., Vasiliev S. A., Ignatyev A. D., et al. Radiation resistance of single-mode optical fibers with view to in-reactor applications. *Nuclear Materials and Energy*, 2021, vol. 27, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.nme.2021.100981
4. Stolov A. A., Simoff D. A., Li J. J. Thermal stability of specialty optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, vol. 26, pp. 3443–3451. DOI: 10.1109/JLT.2008.925698
5. Stolov A. A., Slyman B. E., Simoff D. A., Hokansson A. S., et al. Optical fibers with polyimide coatings for medical applications. Design and quality for biomedical technologies. *Materials Sci-*

18. Listvin A.V., Listvin V. N., Shvyrkov D. V. *Optical Fibers for Communication Lines*. Moscow: LESARart, 2003. 288 p. (In Russian).
19. Biriukov A. S., Bogatyryov V. A., Lebedev V. F., Sysoliatin A. A. 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
20. Bogatyrev V. A. Semjonov S. L. Metal-coated fibers. *Physics*, 2007, pp. 491–512. DOI: 10.1016/B978-012369406-5/50017-5
21. Kosolapov A. F., Semenov S. L. Thermal stability of fiber light guides in copper coating. *Photon-express*, 2019, no. 5, pp. 190–191. (In Russian).
22. Ibragimova S. I., Jabbarov S. G., Huseynov G. G., Galieva H. M. X-ray diffraction and differential scanning calorimetric analysis CuInZnSe₃. *Physics and Technology of Polyconductors*, 2021, vol. 55, no. 11, pp. 1011–1014. DOI: 10.21883/ftp.2021.11.51553.9663 (In Russian).
23. Bulatov M. I., Shatsov A. A., Grigorev N. S., Malkov N. A. Strength, crack resistance and optical losses of heat-treated silica fibers coated with non-ferrous metal. *Optical Fiber Technology*, 2023, vol. 75, 103174. DOI: 10.1016/j.yofte.2022.103174
24. Khonikomb R. *Plasticheskaia deformatsiia metallov* [Plastic Deformation of Metals]. Moscow: Mir, 1972. 408 p. (In Russian).
25. Gulyaev A. P. *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow: Metallurgy, 1986. 544 p. (In Russian).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Булатов М. И., Григорьев Н. С., Шацов А. А., Спивак Л. В. Структура кварцевых волокон с медными покрытиями после вакуумной термической обработки // Вестник Пермского университета. Физика. 2023. № 3. С. 09–15. doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-09-15

Please cite this article in English as:

Bulatov M. I., Grigorev N. S., Shatsov A. A., Spivak L. V. The structure of quartz fibers with copper coatings after vacuum heat treatment. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2023, no. 3, pp. 09–15. doi: 10.17072/1994-3598-2023-3-09-15

Сведения об авторах

1. Максим Игоревич Булатов, аспирант кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ул. Комсомольский пр-т, 29, Пермь, 614068
2. Никита Сергеевич Григорьев, магистр кафедры «Общая физика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ул. Комсомольский пр-т, 29, Пермь, 614068
3. Александр Аронович Шацов, д-р. тех. наук, профессор кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ул. Комсомольский пр-т, 29, Пермь, 614068
4. Лев Волькович Спивак, д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры «Нанотехнологий и микросистемной техники», Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068

Author information

1. Max I. Bulatov, Postgraduate Student, Department of Metallurgy, Thermal and Laser Processing of Metals, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614068, Russia
2. Nikita S. Grigorev, Master's Student, Department of General Physics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614068, Russia
3. Alexander A. Shatsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Department of Metallurgy, Thermal and Laser Processing of Metals, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospekt, Perm, 614068, Russia
4. Lev V. Spivak, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia