

УДК 620.172.22 : 677.5

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-57-65

## Трещиностойкость, прочность и динамическая усталость кварцевых волокон с медными покрытиями

© 2022 г. М.И. Булатов<sup>1</sup>, А.А. Шацов<sup>1</sup>, Н.С. Григорьев<sup>1</sup>, Н.А. Мальков<sup>2</sup><sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

Статья поступила в редакцию 04.08.21 г., доработана 08.12.21 г., подписана в печать 14.12.21 г.

**Аннотация:** Металлизированные покрытия позволяют существенно улучшить эксплуатационные свойства кварцевых волокон. Целью работы было определение трещиностойкости, прочности и динамической усталости оптических волокон без покрытия и с медными покрытиями. Микротвердость кварцевых волокон измеряли методом алмазного индентирования торцевых поверхностей. Параметр интенсивности напряжений  $K_{1c}$  был найден из полуэмпирической зависимости А. Ниихари, геометрию отпечатка и радиальных трещин исследовали на сканирующем электронном микроскопе. Трещиностойкость кварца без покрытия оказалась почти в 3 раза меньше, чем у волокна в медном покрытии, что, полагаем, связано с аддитивным вкладом сжимающих напряжений на поверхности волокон и смачиванием кварца медью. Вытяжка оптического волокна с медным покрытием повышает предел прочности, трещиностойкость и параметр динамической усталости и является главным ресурсом сохранения эксплуатации волокна в условиях статистического подхода к конструкционной прочности. Проведены сравнительные испытания на прочность оптических волокон методами двухточечного изгиба и осевого растяжения. Результаты экспериментальных испытаний предела механической прочности кварцевых оптических волокон показали значительный разброс данных, что свидетельствует о наличии в хрупком теле трещин различного размера и является характерной особенностью хрупкого разрушения, как и предполагала теория А. Гриффитса. Кроме того, принималось, что хаотичное распределение дефектов и микротрещин распространяется по всей длине хрупкого тела, в данном случае кварцевого оптического волокна. Для описания поверхностных микротрещин в зависимости от длины волокна использована статистическая модель, основанная на распределении В. Вейбулла. Построены графики В. Вейбулла в координатах, связывающих вероятность разрушения с прочностью, длиной волокна и параметром, описывающим предельную прочность.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, прочность, оптическое волокно, медное покрытие, двухточечный изгиб, осевое растяжение.

**Булатов М.И.** – аспирант кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29). E-mail: BylatovMI@gmail.com, maksimka.bulatov.95@mail.ru.

**Шацов А.А.** – докт. техн. наук, проф. кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов», ПНИПУ. E-mail: shatsov@pstu.ru.

**Григорьев Н.С.** – магистрант кафедры «Общая физика», ПНИПУ. E-mail: super.nikitaperm@yandex.ru.

**Мальков Н.А.** – магистрант кафедры «Нанотехнологии и микросистемная техника» Пермского государственного национального исследовательского университета (614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15). E-mail: nikitaandreich0@gmail.com.

**Для цитирования:** 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. No. 1. С. 57–65. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-57-65.

## Crack resistance, strength and dynamic fatigue of quartz fibers with copper coatings

M.I. Bulatov<sup>1</sup>, A.A. Shatsov<sup>1</sup>, N.S. Grigoryev<sup>1</sup>, N.A. Malkov<sup>2</sup><sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia<sup>2</sup> Perm State National Research University, Perm, Russia

Received 04.08.2021, revised 08.12.2021, accepted for publication 14.12.2021

**Abstract:** Metallized coatings can significantly improve the operational properties of quartz fibers. The research was conducted to determine the crack resistance, strength and dynamic fatigue of optical fibers without any coating and with copper coatings.

The microhardness of quartz fibers was measured by the diamond indentation of end surfaces. The stress intensity parameter  $K_{Ic}$  was found from the A. Niihara semi-empirical dependence. The geometry of indentation and radial cracks was studied using a scanning electron microscope. The crack resistance of uncoated quartz turned out to be almost 3 times less as compared to the copper coating fiber, which is presumably due to the additive contribution of compressive stresses on fiber surfaces and quartz wetting with copper. Copper-coated optical fiber drawing increases the tensile strength, crack resistance and dynamic fatigue parameter, and it is the main resource for maintaining operation in the conditions of a statistical approach to structural strength. Comparative tests were conducted to check the optical fiber strength by two-point bending and axial tension methods. Experimental tests conducted to check the ultimate mechanical strength of quartz optical fibers showed a significant spread of data, which indicates the presence of cracks of various sizes in a brittle solid and is a characteristic feature of brittle fracture as suggested by the A. Griffiths theory. In addition, it was assumed that the chaotic distribution of defects and microcracks extends along the entire length of a brittle solid, a quartz optical fiber in this case. A statistical model based on the Weibull distribution was used to describe surface microcracks depending on the fiber length. As a result, Weibull graphs were plotted in coordinates connecting the probability of failure with the strength, fiber length and parameter describing the ultimate strength.

**Keywords:** crack resistance, strength, optical fiber, copper coating, two-point bending, axial tension.

**Bulatov M.I.** – postgraduate student of the Department «Metal science, heat and laser treatment of metals», Perm National Research Polytechnic University (PNRPU) (614990, Russia, Perm, Komsomolskii pr., 29).  
E-mail: BylatovMI@gmail.ru, maksimka.bulatov.95@mail.ru.

**Shatsov A.A.** – Dr. Sci. (Eng.), prof. of the Department «Metal science, heat and laser treatment of metals», PNRPU.  
E-mail: shatsov@pstu.ru.

**Grigoriev N.S.** – undergraduate student of the Department of general physics, PNRPU.  
Email: super.nikitaperm@yandex.ru.

**Malkov N.A.** – undergraduate student of the Department of nanotechnology and microsystem technology, Perm State National Research University (614068, Russia, Perm, Bukireva str., 15).  
E-mail: nikitaandreich0@gmail.com.

**For citation:** Bulatov M.I., Shatsov A.A., Grigoryev N.S., Malkov N.A. Crack resistance, strength and dynamic fatigue of quartz fibers with copper coatings. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya Metallurgiya i Funktsional'nye Pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2022. Vol. 16. No. 1. P. 57–65 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2022-1-57-65.

## Введение

В последние годы оптические волокна (ОВ) получили массовое распространение в разных областях науки и техники — системах телеметрии, лазерной технике, приборостроении и др. К числу важных применений оптических волокон относятся также термоядерные реакторы [1] и медицинские лазеры [2], в которых ключевую роль играют изменения температурных и механических характеристик. Для кварцевых световодов используются органические и металлические покрытия. Органические покрытия — например, акрилат или полиимид — способны защитить световод при температурах 85 и 300 °C соответственно [3, 4]. Металлы расширяют температурные интервалы функционирования волокон и обеспечивают другие полезные свойства [5].

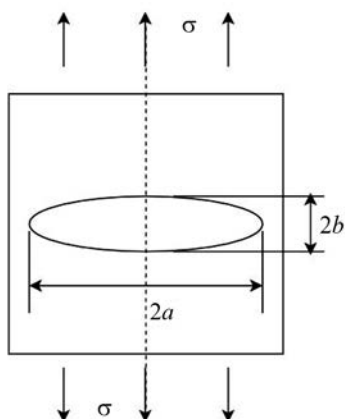
Теоретическая предельная прочность ОВ находится в диапазоне 20–25 ГПа, что сопоставимо с предельной прочностью стальной проволоки аналогичного диаметра [6]. Однако в реальности имеющиеся в ОВ микротрещины при воздействии растягивающей нагрузки способны ускоренно расти, тем самым быстро уменьшая прочность ОВ,

поэтому экспериментальная прочность кварцевых оптических волокон составляет лишь  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  от теоретической величины. Технология производства волокон и агрессивная внешняя среда (высокая температура, давление, радиация и пр.) приводят к образованию дефектов (микротрещин) на поверхности ОВ и покрытия.

Для описания параметров прочности кварцевых ОВ в процессе их разрушения при воздействии динамических нагрузок используют теорию, основанную А. Гриффитсом [7], который в начале прошлого века предполагал, что каждое абсолютно хрупкое твердое тело содержит маленькие трещины, эллиптические в своем сечении. Пусть такая трещина длиной  $2a$  имеется в тонком волокне, подвергнутом простому растяжению (рис. 1). В вершине трещины возникает концентрация напряжений, характеризующаяся максимальным напряжением [7]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — растягивающее напряжение, необходимое для распространения трещины (предел прочно-



**Рис. 1.** Эллиптическая трещина на поверхности кварцевого стекла

**Fig. 1.** Elliptical crack on the surface of quartz glass

сти);  $E$  — модуль Юнга;  $\gamma$  — поверхностная энергия стенок трещины, отнесенная к единице ее площади;  $a$  — половина длины трещины.

В 1957 г. Г. Ирвин ввел коэффициент интенсивности напряжений  $K_I$ , зависящий от размера трещины и точно характеризующий локальное повышение растягивающего напряжения у переднего ее края [8]:

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}, \quad (2)$$

где  $a$  — длина большой полуоси трещины (см. рис. 1);

$\sigma$  — номинальное растягивающее напряжение вдали от трещины;  $Y$  — параметр, учитывающий форму образца и размер трещины (для полуэллиптической трещины  $Y = 1,24$ ) [9]. При разрушении, происходящем перпендикулярно плоскости трещины, коэффициент интенсивности напряжений обозначают  $K_{Ic}$ . Так, для коротких трещин в монографии [10] предложено:

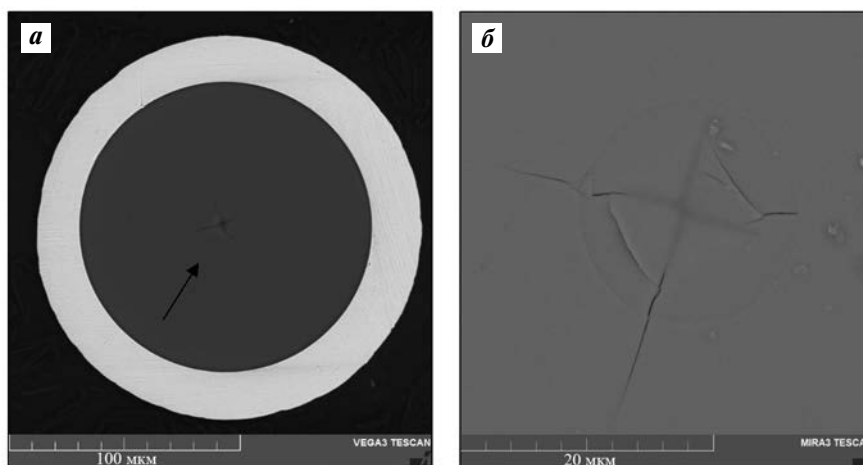
$$K_{Ic} = 2\sigma\sqrt{a}. \quad (3)$$

Объектом исследования в настоящей работе являлось оптическое волокно без покрытия и с медным покрытием (рис. 2). Цель работы — прогнозирование трещиностойкости, определение твердости, прочности и динамической усталости оптических волокон без покрытия и с медными покрытиями.

## Материалы и методики исследования

Исследуемые образцы ОВ по структуре имели сердцевину из чистого кварца и оболочку, легированную фтором. Диаметры составляли  $125 \pm 1$  мкм по кварцу ОВ и  $160 \pm 1$  мкм по медному покрытию.

Нанесение медного покрытия на волокно производилось в течение вытяжки с применением метода «намораживания». Суть этого метода описана в работах [11, 12] и заключается в следующем: во



**Рис. 2.** Торцев оптического волокна с медным покрытием (*а*) и внешний вид отпечатка индентора с радиальными трещинами (*б*)

Стрелкой указано место индентирования

*а* — увеличение  $1000\times$ , *б* —  $8000\times$

**Fig. 2.** Copper-coated optical fiber end (*a*) and appearance of indentation with radial cracks (*b*)

Arrow indicates indentation point

*a* —  $1000\times$  magnification, *b* —  $8000\times$  magnification

время вытяжки волокно проходит через отверстие, заполненное расплавленным металлом. При этом если температура металла близка к температуре плавления, а ОВ имеет более низкую температуру, то слой металла может «намерзнуть» на поверхности оптического волокна. В результате на волокне образуется гладкое и тонкое металлическое покрытие. Современные технологии предполагают нанесение барьерного слоя графита толщиной порядка 50 нм [13], которое расположено между волокном и металлом.

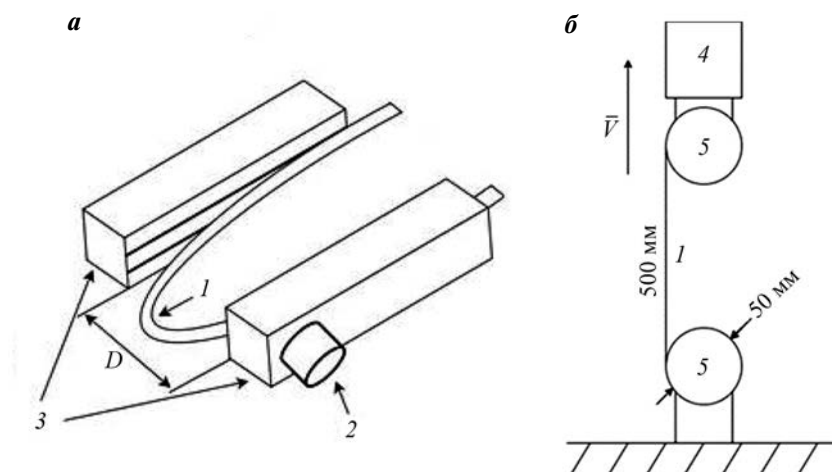
Преимуществами метода «намораживания» являются достаточная толщина покрытия (10–50 мкм), позволяющая обойтись во многих случаях без дополнительного покрытия, защищающего от механических контактов, сравнительно высокая скорость нанесения и относительная простота. Основным недостатком металлических покрытий, полученных данным способом, заключается в росте оптических потерь в ОВ вследствие микроизгибов, возникающих при намораживании относительно толстой металлической оболочки. Причиной микроизгибных оптических потерь является усадка металлического покрытия при его охлаждении от точки плавления до комнатной температуры, поскольку коэффициент линейного температурного расширения металлов значительно больше, чем у кварцевого стекла (медь —  $16,70 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , стекло —  $0,57 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).

Твердость ОВ определяли методом индентирования алмазной пирамидки по А. Виккерсу с помощью твердомера КВ 30 S (фирма «KB Pruftechnik GmbH», Германия). Величина нагрузки составляла 100 г, время выдержки — 15 с. Отпечатки алмазной пирамидки исследовали с помощью сканирующей электронной микроскопии на микроскопе «Mira 3» (Tescan, Чехия). Коэффициент интенсивности напряжений рассчитывали по полуэмпирической зависимости А. Ниихары [14]:

$$K_{Ic} = 0,203a^2H_v c^{-3/2}, \quad (4)$$

где  $a$  — полудиагональ отпечатка индентора;  $H_v$  — твердость материала;  $c$  — длина радиальной трещины.

Предел прочности ОВ измеряли методом двухточечного изгиба согласно схеме, изображенной на рис. 3, а. Оптическое волокно размещали между двумя металлическими плоскопараллельными пластинами с V-образными канавками, при этом одна из пластин находилась в неподвижном состоянии, а вторую перемещал шаговый мотор с постоянной скоростью (10, 85, 630, 3000 мкм/с) на каждые 15 образцов. При уменьшении радиуса изгиба ОВ и расстояния между канавками напряжение в вершине кварцевого волокна возрастает. При достижении его критического значения волокно разрушается — момент разрушения фиксируется акустическим датчиком. Далее измеряется рассто-



**Рис. 3.** Схемы двухточечного изгиба оптического волокна (а) и его осевого растяжения (б)

1 — оптическое волокно, 2 — акустический датчик, 3 — металлические плоскопараллельные пластины, 4 — динамометрический датчик, 5 — нагрузочные барабаны, D — расстояние между плоскопараллельными пластинами

**Fig. 3.** Diagram of two-point optical fiber bending (a) and axial tension of optical fiber (b)

1 — optical fiber, 2 — acoustic sensor, 3 — metal plane-parallel plates, 4 — load cell, 5 — load drums  
D — distance between plane-parallel plates

яние между пластинами и рассчитывается предел прочности.

Предел прочности ( $\sigma$ ) оптического волокна и относительное удлинение ( $\varepsilon$ ) определяли следующим образом [15]:

$$\sigma = \varepsilon E_0(1 + \lambda \varepsilon), \quad (5)$$

$$\varepsilon = 1,198 \frac{d_f}{D - d_c}, \quad (6)$$

где  $E_0$  — модуль Юнга кварца (72 ГПа);  $\lambda$  — параметр, корректирующий нелинейность зависимости растяжения от прикладываемой нагрузки ( $\lambda = 2,125$  [16]);  $d_f$  — диаметр сердцевинки волокна, мкм;  $d_c$  — наружный диаметр волокна по кварцевой оболочке, мкм;  $D$  — расстояние между плоскопараллельными пластинами при разрушении волокна, мкм.

Основным преимуществом двухточечного изгиба считается малая длина волокна для одного измерения (около 30 мм). К недостаткам можно отнести завышенные данные предела прочности из-за того, что дефекты расположены хаотично, а способ нагружения влияет только на небольшую длину волокна.

Схематически на рис. 3, б показана установка для определения прочности ОВ методом осевого растяжения. Она состоит из двух натяжных барабанов, шагового двигателя и тензометра. В отличие от метода двухточечного изгиба, в котором область нагрузки ОВ составляет от 10 до 30 мм, в данном методе область нагрузки равна 500 мм. Скорость нагрузочных барабанов составляла 10, 50, 100, 500 мм/мин на каждые 15 образцов оптических волокон. Это позволяет определять различные дефекты и неоднородности, распределенные по всей области нагружения. Предел прочности ( $\sigma$ ) оптического волокна рассчитывался по формуле [17]:

$$\sigma = H/(\pi r^2), \quad (7)$$

где  $H$  — нагрузка при разрыве,  $r$  — радиус кварцевой сердцевинки.

Предел прочности в медной оболочке считали исходя из того, что сначала происходило разрушение кварца.

Результаты экспериментальных испытаний механической прочности оптических волокон показывают значительный разброс значений [18], что свидетельствует о наличии в волокнах микротрещин различного размера и является характерной чертой хрупкого разрушения. Теория разруше-

ния кварцевых волокон строится на предположении о хаотичном распределении микротрещин по длине ОВ. Для описания вида распространения поверхностных микротрещин по длине волокна используется статистическая модель, основанная на распределении В. Вейбулла [19]. В распределении предполагается, что вероятность разрушения равна

$$P(\sigma) = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m, \quad (8)$$

где  $m$  и  $\sigma$  — экспериментально определяемые параметры.

На основании (8) закон распределения В. Вейбулла обычно записывается в виде [19]:

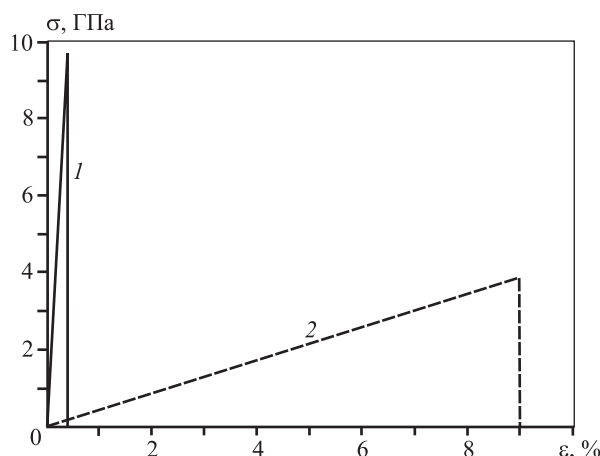
$$\ln\{\ln[(1 - P(\sigma, L))^{-1}]\} = m \ln(\sigma) + \ln(L) + \text{const}, \quad (9)$$

следовательно, в координатах  $\ln\{\ln[(1 - P(\sigma, L))^{-1}]\}$  и  $\ln(\sigma)$  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  $P(\sigma_k) = k/(i + 1)$ .

## Обсуждение результатов

На рис. 2, б представлен типичный отпечаток индентора в ОВ с медным покрытием. Твердость ОВ без покрытия и с медным покрытием по А. Виккерсу составила 812 и 1020 НВ соответственно. Средняя длина радиальных трещин для ОВ без покрытия и с медным покрытием была 10,36 и 5,80 мкм соответственно. Доверительные интервалы значений  $K_{Ic}$  составили  $1,31 \pm 0,18$  МПа·м<sup>1/2</sup> для ОВ без покрытия и  $3,74 \pm 0,40$  МПа·м<sup>1/2</sup> для ОВ с медным покрытием. Аналогично результатам [20] подтверждается тот факт, что покрытие оказывает благоприятное влияние на трещиностойкость за счет сжимающих напряжений на поверхности при охлаждении кварца с медным покрытием.

По формуле (7) рассчитана предельная прочность ОВ без покрытия и с медным покрытием. Построены графики В. Вейбулла из выражений (8) и (9), а также найден параметр динамической усталости  $n_d$ . По физическому смыслу  $1/(1 + n_d)$  есть тангенс угла наклона в координатах  $\ln(\sigma)$  и скорости изменения напряжения. В таблице приведены



**Рис. 4.** Типичный график зависимости напряжения от деформации ОВ с медным покрытием

1 – метод двухточечного изгиба, 2 – метод осевого растяжения

**Fig. 4.** Standard stress-strain plot for copper-coated optical fiber

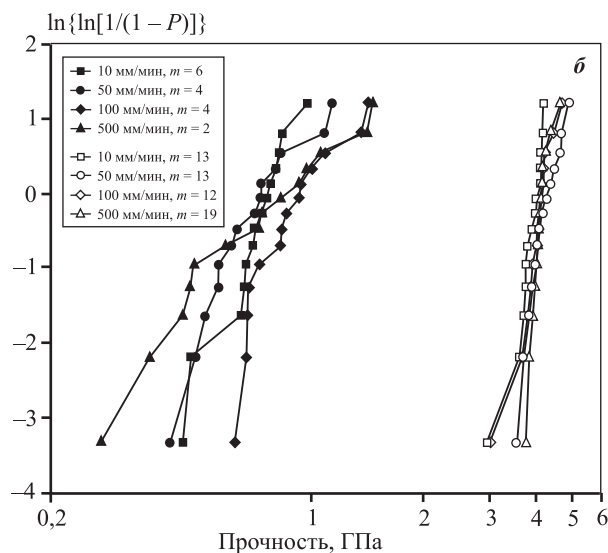
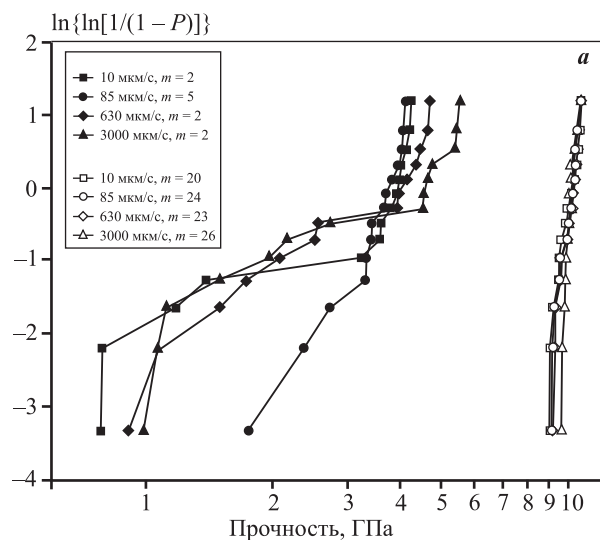
1 – two-point bending method, 2 – axial tension method

значения трещиностойкости, динамической усталости и прочности ОВ без покрытия и с медным покрытием при различных скоростях нагружения, измеренные двумя различными методами. На рис. 4 показан типичный график зависимости напряжения от деформации, полученный разными методами.

Несмотря на существенную разницу напряжений и деформаций, полученные измерения коррелируют с литературными данными [21, 22].

На рис. 5, а представлены графики В. Вейбулла для ОВ без покрытия и с медным покрытием, построенные с помощью метода двухточечного изгиба. Наблюдаются резкое ухудшение прочности и уменьшение угла наклона ( $m$ ) у ОВ без покрытия по сравнению с волокном в медном покрытии. Медианная прочность волокна (соответствующая вероятности разрушения  $P = 50\%$ ) без покрытия и с медным покрытием составила около 3 и 10 ГПа соответственно, что в 2 раза меньше теоретического предела прочности [6].

На рис. 5, б представлены графики В. Вейбулла для ОВ без покрытия и с медным покрытием, полученные методом одноосного растяжения. У ОВ без покрытия наблюдается уменьшение предела прочности и параметра  $m$ . Медианная прочность волокна без покрытия и с медным покрытием составила около 1 и 4 ГПа соответственно. Такая низкая прочность обусловлена хаотичным распределением дефектов по длине ОВ. Сравнивая два



**Рис. 5.** Распределение В. Вейбулла для оптического волокна, полученное методом двухточечного изгиба (а) и методом одноосного растяжения (б)

Темные значки – ОВ без покрытия, светлые – с медным покрытием

**Fig. 5.** Weibull distribution for optical fiber obtained by two-point bending method (а) and uniaxial tension method (б)

Dark signs – uncoated optical fiber, light signs – copper-coated optical fiber

метода измерения предела прочности ОВ, следует отметить, что параметр В. Вейбулла  $m$  значительно изменяется.

В таблице представлены результаты по трещиностойкости и прочности ОВ без покрытия и с медным покрытием. Видно, что предел прочности у ОВ без покрытия меньше, чем в случае с медным

покрытием, — вероятно, это связано с высокими сжимающими напряжениями, возникающими на поверхности кварца при охлаждении. При увеличении скорости растяжения предел прочности повышается в пределах погрешности, такой же результат был получен ранее [20]. Предел прочности ОВ без покрытия, измеренный методом осевого растяжения, согласуется с литературными данными [23]. Параметр динамической усталости ( $n_d$ ) у волокон с металлическими покрытиями, по литературным данным [24, 25], превышает значение 100,

измеренное методом двухточечного изгиба. Благодаря нанесению медного покрытия параметр  $n_d$  у волокон увеличивается. В дальнейшем это играет огромную роль в прогнозировании их срока службы.

На рис. 6 показана структура медного покрытия после вытяжки из расплава и охлаждения на воздухе, а также после закалки до 300 °С с последующим быстрым охлаждением в воде.

После вытяжки из расплава и охлаждения на воздухе средний размер зерна составил 330 мкм,

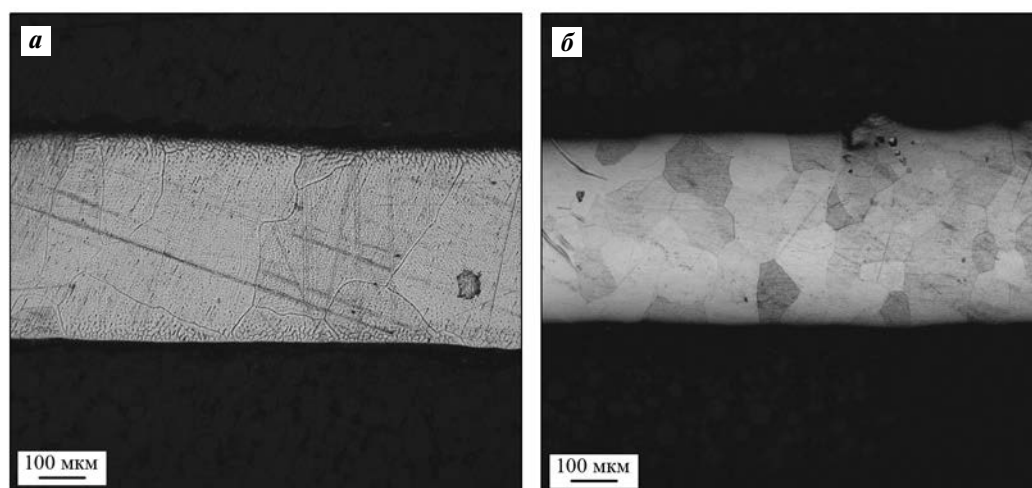
### Трещиностойкость, прочность и параметр динамической усталости оптических волокон без покрытия и с медным покрытием, определенные разными методами

Crack resistance, strength and dynamic fatigue parameter of uncoated and copper-coated optical fibers measured by different methods

Вид ОВ	$K_{Ic}$ , МПа·м <sup>1/2</sup>	$\sigma$ , ГПа		$n_d$	
		Изгиб*	Растяжение**	Изгиб	Растяжение
Без покрытия	1,31 ± 0,18	3,18 ± 0,83	0,71 ± 0,08	11	10
		3,47 ± 0,43	0,68 ± 0,12		
		3,20 ± 0,89	0,86 ± 0,15		
		3,46 ± 1,10	0,75 ± 0,20		
С медным покрытием	3,73 ± 0,40	9,81 ± 0,38	3,89 ± 0,19	235	85
		9,87 ± 0,32	4,27 ± 0,26		
		9,92 ± 0,32	4,02 ± 0,22		
		9,98 ± 0,22	4,17 ± 0,19		

\* При скорости 10, 85, 630, 3000 мкм/с.

\*\* При скорости 10, 50, 100, 500 мм/мин.



**Рис. 6.** Структура продольного сечения оптического волокна с медным покрытием после вытяжки (а) и закалки до 300 °С (б)

**Fig. 6.** Longitudinal section structure of copper-coated optical fiber after drawing (a) and quenching up to 300 °C (b)



при закалке до 300 °С с быстрым охлаждением средний размер зерна был 125 мкм. Дальнейшее понижение до температуры 180 °С оказывало слабое влияние на размер зерна. Таким образом, температура завершения рекристаллизации составляет 300 °С.

Медное покрытие не изменяет структуру кварца, но создает сжимающие напряжения [26], которые, исходя из принципа суперпозиции, понижают растягивающие напряжения в вершине дефектов:

$$\Delta\sigma = E\alpha\Delta t = 12 \cdot 10^{10} \cdot 16,7 \cdot 10^{-6} \cdot 300 = 0,60 \text{ ГПа}, \quad (10)$$

где  $E$  — модуль упругости меди;  $\alpha$  — разность коэффициентов линейного теплового расширения; температурный интервал  $\Delta t = 300$  °С выбран исходя из того, что при данной температуре завершается рекристаллизация меди (рис. 6) [27].

Разницу ( $\Delta\sigma_{12}$ ) между разрушающим напряжением до ( $\Delta\sigma_1$ ) и после ( $\Delta\sigma_2$ ) покрытия медью нашли из предположения, что половина длины дефекта в среднем составила 10 нм [20]. Тогда по формуле (3), выразив из [10] разрушающее напряжение и подставляя измеренные значения трещиностойкости, получили

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{12} = \Delta\sigma_2 - \Delta\sigma_1 &= \frac{K_{1c}^*}{2\sqrt{10}} - \frac{K_{1c}}{2\sqrt{10}} = \\ &= 0,70 - 0,18 = 0,52 \text{ ГПа}. \end{aligned} \quad (11)$$

Хорошее совпадение значений  $\Delta\sigma$  и  $\Delta\sigma_{12}$  доказывает, что рост трещиностойкости при нанесении медного покрытия на кварцевые волокна обусловлен созданием напряжений сжатия.

## Заключение

Нанесение медного покрытия на оптическое волокно повышает предел прочности, трещиностойкость и параметр динамической усталости, что является важнейшим фактором улучшения конструкционной прочности. Проведены сравнительные испытания оптических волокон без покрытия и с медным покрытием. Трещиностойкость кварца без покрытия составила  $K_{1c} = 1,31 \pm 0,18 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ , с медным покрытием —  $K_{1c} = 3,74 \pm 0,40 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Рост трещиностойкости определяют сжимающие напряжения на поверхности при нанесении меди на кварцевые волокна. Определен предел прочности оптического волокна без покрытия и с медным покрытием методами двухточечного изгиба и осевого растяжения. Медианная прочность волокна

без покрытия и с медным покрытием, полученная методом двухточечного изгиба, составила около 3 и 10 ГПа соответственно, что в 2 раза меньше теоретического предела прочности. Медианная прочность волокна без покрытия и с медным покрытием, полученная методом осевого растяжения, составила около 1 и 4 ГПа соответственно. Метод двухточечного изгиба дает завышенные результаты по сравнению с одноосным растяжением. Изменения предела прочности, характерные для волокон с покрытиями, у обоих методов одинаковы. Параметр динамической усталости составил  $n_d = 11$  и 235 у волокон без покрытия и с медным покрытием соответственно в случае использования метода двухточечного изгиба, тогда как при определении его методом одноосного растяжения он был равен 10 и 85 соответственно. Высокие значения параметра  $n_d$  у волокон с медным покрытием в дальнейшем сыграют главную роль в определении срока службы.

*Авторы выражают свою благодарность А.А. Мальковой и Е.А. Ладыжец за содействие в исследовании на сканирующем электронном микроскопе.*

**Acknowledgments:** *The authors thank A.A. Malkova and E.A. Ladyzhets for their assistance in the study on the scanning electron microscope.*

## Литература/References

1. Wuilpart M., Gusarov A., Leysen W., Batistoni P., Moreau P., Dandu P., Megret P. Polarimetric optical fibre sensing for plasma current measurement in thermonuclear fusion reactors. In: *Proc. 22-nd Intern. conf. on transparent optical networks (ICTON)*. Bari, Italie, 2020. P. 1—4. DOI: 10.1109/ICTON51198.2020.9203467.
2. Li Bo, Zhao J., Pan A., Mirzazadeh M., Ekici M., Zhou Q., Liu W. Stable propagation of optical solitons in fiber lasers by using symbolic computation. *Int. J. Light Electr. Optics*. 2019. Vol. 178. P. 142—145. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.09.135.
3. Stolov A.A., Simoff D.A., Jie Li. Thermal stability of specialty optical fibers. *J. Lightwave Technol.* 2008. Vol. 26. P. 3443—3451. DOI:10.1109/jlt.2008.925698.
4. Булатов М.И., Азанова И.С., Косолапов А.Ф., Смирнова А.Н., Саранова И.Д. Исследование влияния отрицательных температур на оптические потери волоконного световода в защитно-упрочняющем покрытии на основе полиамидокислоты. *Кр. сообщ. по физике ФИАН*. 2019. No. 9. С. 9—13. Bulatov M.I., Azanova I.S., Kosolapov A.F., Smirnova A.N., Saranova I.D. Effect of below-freezing temperature on



- optical loss of polyimide-coated optical fibers. *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2019. Vol. 46. No. 9. P. 9–13. DOI: 10.3103/S1068335619090021.
5. Alexis Mendez, Morse T.F. Specialty optical fibres handbook. Acad. Press, Elsevier, 2007.
6. DiMarcello F.V., Hart A.C., Williams J.C., Kurkjian C.R. High strength furnace-drawn optical fibers. In: *Fiber optics: Advances in research and development*. N.Y.: Plenum Publ. Corp., 1979. P. 125–135. DOI: 10.1007/978-1-4684-3492-7\_7.
7. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philos. Trans. Roy. Soc. London. Ser. A.* 1920. Vol. 221. P. 163–198.
8. Irwin G.R. Analysis of Stresses and Strains near the end of a crack traversing a plate. *J. Appl. Mech.* 1957. Vol. 24. P. 361–364.
9. Muraoka M., Abe H. Subcritical crack growth in silica optical fibers in wide range of crack velocities. *J. Am. Ceram. Soc.* 1996. Vol. 79(1). P. 51–57. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1996.tb07879.x.
10. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. М.: Наука, 1989. Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M. Contact fracture mechanics. Moscow: Nauka, 1989 (In Russ.).
11. Arridge R.G.C., Heywood D. The freeze-coating of filaments. *Brit. J. Appl. Phys.* 1967. Vol. 18. P. 447–457.
12. Pinnow D.A., Robertson G.D., Wysocki J.A. Reductions in static fatigue of silica fibers by hermetic jacketing. *Appl. Phys. Lett.* 1979. Vol. 34 (1). P. 17–19.
13. Severin I., Rochdi El Abdi. Mechanical and chemical characteristics of hermetically coated silica optical fibre. *Surf. Coat. Technol.* 2008. Vol. 202. P. 2494–2499.
14. Гогоци Г.А., Бахта А.В. Исследование керамики при внедрении алмазной пирамиды Виккерса. *Пробл. прочности*. 1990. No. 9. С. 49–54. Gogotsi G.A., Bashta A.V. The study of ceramics with the Vickers diamond pyramid. *Problemy prochnosti*. 1990. No. 9. P. 49–54 (In Russ.).
15. Matthewson M.J., Kurkjian C.R., Gulati S.T. Strength measurement of optical fibers by bending. *J. Am. Ceram. Soc.* 1986. Vol. 69 (11). P. 815–821. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1986.tb07366.x
16. 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.
17. Wiederhorn S.M. Influence of water vapor on crack propagation in soda-lime glass. *J. Am. Ceram. Soc.* 1967. Vol. 50 (8). P. 407–414. DOI: 10.1111/j.11512916.1967.tb15145.x
18. Biriukov A.S., Bogatyrvov 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. P. 297–300. DOI: 10.1557/PROC-531-297.
19. Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.* 1951. Vol. 18. P. 293–297.
20. Булатов М.И., Шацов А.А. Прочность и трещиностойкость кварцевых волокон с полиимидными покрытиями. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. Т. 15. No. 2. С. 22–30. Bulatov M.I., Shatsov A.A. Strength and crack resistance of quartz fibers with polyimide coatings. *Izvestiya Vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya (Powder Metallurgy and Functional Coatings)*. 2021. Vol. 15. No. 2. P. 22–30 (In Russ.).
21. Байкова Л.Г., Песина Т.И., Kurkjian C.R., Tang Zh., Куреенко М.Ф., Тихонова Л.В. О методике определения истинной прочности неорганических стекол. *Журн. техн. физики*. 2003. Т. 83. С. 55–60. Baikova L.G., Pesina T.I., Kurkjian C.R., Tang Zh., Kireenko M.F., Tikhonova L.V. On the method for determining the true strength of inorganic glasses. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki (Technical Physics Journal)*. 2003. Vol. 83. P. 55–60 (In Russ.).
22. Kurkjian C.R., Gupta P.K., Brow R.K., Lower N. The intrinsic strength and fatigue of oxide glasses. *J. Non-Crystal. Solids*. 2003. Vol. 316. P. 114–124.
23. Zhangwei Ma., Zhifeng W., Huanhuan Liu, Fufei P., Zhenyi C., Tianxing W. Tensile strength and failure behavior of bare mode fibers. *Opt. Fiber Technol.* 2019. Vol. 52. P. 1–5. DOI: 10.1016/j.yofte.2019.101966.
24. Bogatyrvov V.A., Bubnov M.M., Dianov E.M., Makarenko A.Y., Rumyantsev S.D., Semjonov S.L., Sysolyatin A.A. High-strength hermetically tin-coated optical fibers. *Opt. Fiber Commun.* 1991. Vol. 4. Paper WL9. P. 115. DOI: 10.1364/ofc.1991.wl9.
25. Tuzzolo M.R., Allegretto A.E., Urruti E.H. Hermetic product performance: ensuring the uniformity of the carbon layer. *Proc. Int. Wire Cable Symp.* 1993. P. 381–385.
26. Иоффе М.А. Теория литейных процессов: Учеб. пос. в 2 т. Т. 1. СПб.: Изд-во СЗТУ. 2009. Ioffe M.A. The theory of foundry processes: an educational and methodological complex. Vol. 1. St. Petersburg: Izd-vo SZTU, 2009 (In Russ.).
27. Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1981. Kolachev B.A., Livanov V.A., Elagin V.I. Metallurgy and heat treatment of non-ferrous metals and alloys. Moscow: Metallurgiya, 1981 (In Russ.).