

УДК 681.586.5

**М.В. Банников^{1,2}, А.Н. Вшивков¹, Е.А. Гачегова¹,
И.А. Трефилов², А.Н. Кондрашов², Н.С. Созонов³**

¹Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Российская Федерация

³Инверсия-Сенсор, Пермь, Российская Федерация

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ОПТОВОЛОКНА В РЕЖИМЕ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Активное применение композиционных смарт-материалов, включающих в себя помимо основного материала, несущего прочностную нагрузку, оптическое волокно с брегговскими решетками (ВБР) для мониторинга состояния, делает актуальной задачу по определению прочности самих оптоволоконных датчиков. Особенно остро такая задача стоит в системах, подверженных длительной знакопеременной (усталостной) нагрузке, когда в материале начинают накапливаться необратимые повреждения. В данной статье показан метод определения усталостной долговечности датчиков с ВБР в режиме так называемой гигацикловой усталости, когда материал сопротивляется циклическому нагружению более чем 10^9 циклов.

Ключевые слова. оптоволоконные датчики, испытания на циклическую долговечность и прочность конструкции, смарт-материалы.

**M.V. Bannikov^{1,2}, A.N. Vshivkov¹, E.A. Gachegova¹,
I.A. Trefilov², A.N. Kondrashov², N.S. Sozonov³**

¹Institute of Continuum Mechanics, Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

²Perm State National Research University, Perm, Russian Federation

³Inversion-Sensor LLC, Perm, Russian Federation

MECHANICAL TESTING OF OPTICAL FIBERS IN THE GIGACYCLE FATIGUE REGIME

The active application of composite smart materials, which include, in addition to the main material carrying the strength load, optical fibers with optic sensors for condition monitoring, makes the task of determining the strength of the fiber optic sensors itself urgent. Such a task is especially acute in systems subjected to long-term alternating (fatigue) loading, when irreversible damage begins to accumulate in the material. This paper shows a method for determining the fatigue life of specialized optical fibers with Bragg gratings in the so-called gigacycle fatigue regime, when the material resists cyclic loading for more than 10^9 cycles.

Keywords. fiber optic sensors, cyclic durability and structural strength testing, smart materials.

Введение

Усталостное разрушение материалов происходит под действием циклической нагрузки, амплитуда которой меньше предела прочности. Оно проявляется в любых элементах конструкции при эксплуатации за счет накопления необратимых повреждений. В зависимости от значения приложенного напряжения изменяются скорость и характер накопления этих повреждений. Различают: малоцикловую усталость 10^2 – 10^4 циклов до разрушения, когда приложенные к материалу нагрузки находятся в диапазоне пластической деформации; многоцикловую усталость 10^4 – 10^8 циклов до разрушения, при этом к материалу приложены нагрузки в области упругой деформации, но в определенных местах образуются области локализации напряжений, где впоследствии зарождается усталостная трещина; гигацикловую (сверхмногоцикловую) усталость 10^8 и более циклов нагружения, в таком режиме нагружения локализация напряжений происходит на внутренних дефектах материала и трещина выходит на поверхность только в катастрофической фазе процесса разрушения. Исследования в области гигацикловой усталости направлены на определение предела допустимых деформаций при сверхмалых амплитудах нагружения, когда приложенные макроскопические амплитуды напряжений ниже предела пропорциональности. Указанные условия нагружения реализуются в слабонагруженных деталях конструкций, подверженных циклическому деформированию с большими частотами, например в турбинах авиадвигателей. Наиболее изученными материалами в данном направлении являются металлы и сплавы [1–3], а также композиционные материалы [4, 5]. В настоящей работе объектом исследования является оптическое волокно с нанесенной решеткой Брэгга, выполняющее роль чувствительного элемента вибрационного датчика деформаций, которые в дальнейшем будут играть роль «смарт-материалов» [6, 7].

Нагружение в эксперименте осуществлялось с помощью силы электромагнитной силы, возникающей в результате протекания переменного тока в электромагнитной катушке. Знакопеременная сила вынуждает совершать гармонические колебания ферромагнитному сердечнику в катушке индуктивности, который жестко закреплен к планке с оптоволоконном. Два других конца планки крепятся к неподвижной раме, тем самым к планке применяется схема нагружения типа «трехточечный изгиб» (рис. 1).

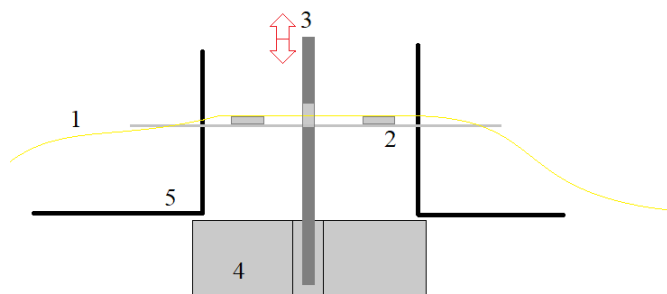


Рис. 1. Принципиальная схема испытаний: 1 – волокно; 2 – планка для крепления волокна; 3 – ферритный сердечник, имеющий одну степень свободы для изгибного нагружения планки; 4 – катушка индуктивности; 5 – система жесткого крепления планки

Экспериментальная установка и обработка результатов

Электрическая схема испытательного стенда (рис. 2) включает в себя широкодиапазонный электрический генератор 1 Гц – 1 МГц, реле управления с транзистором, источник питания и катушку индуктивности.

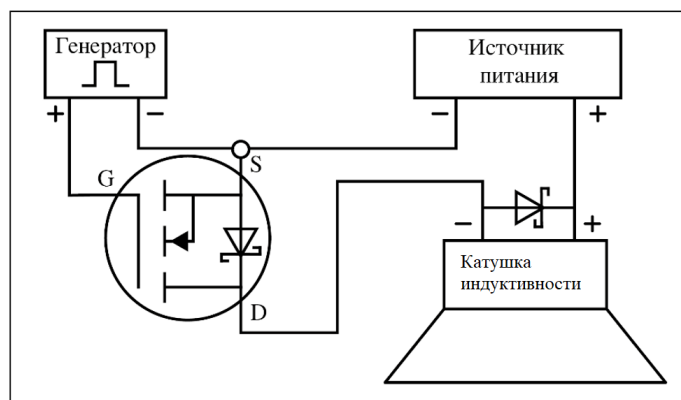


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема испытательного стенда

Рабочая частота подбиралась опытным путём, исходя из возможностей системы отбора данных и механических параметров испытательной системы. Экспериментально определена оптимальная частота испытаний 210 Гц.

В соответствии с размерами образца и условиями испытания была изготовлена жесткая оснастка для закрепления образца (рис. 3), установленная в мягкой среде для гашения паразитных вибраций. Оснастка

представляет собой стенд для испытаний на трехточечный изгиб. По краям планка закрепляется между винтами к неподвижным опорам с возможностью небольшого смещения в горизонтальном направлении. В центре на планку давит алюминиевый стержень, жестко соединенный с ферритовым сердечником. Ферритовый сердечник помещается в полость электромагнитной катушки, переменное поле которой заставляет его колебаться в одном направлении вдоль оси катушки, изгибая планку (см. рис. 1). Поскольку жесткость стержня в области нагружения значительно превышает жесткость планки, перемещение оголовка обоймы можно считать перемещениями центра планки. Контроль деформации волокна осуществлялся с помощью анализатора сигнала волоконно-оптических датчиков УОВОД.

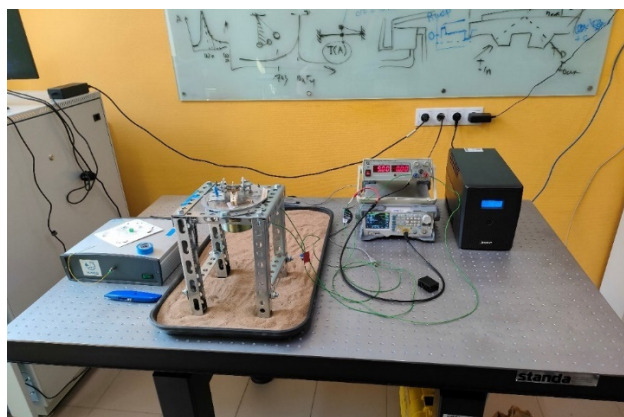


Рис. 3. Внешний вид стенда для испытаний на циклическую выносливость оптоволокна в гигациковом диапазоне нагружения

На рис 4. приведены значения средней амплитуды колебаний в процессе всего срока испытаний. Значение амплитуды колебаний длины волны составляло 2,5 нм в начале испытаний, но впоследствии среднее значение изменилось и вышло на асимптоту в окрестности 1,6 нм. Заметны колебания как в течение одних суток, связанные с температурой окружающей среды, так и длительные изменения сигнала, выходящие на определенный тренд. Построена линия аппроксимации главного тренда сигнала, уравнение которой оказалась близко к степенной зависимости. С учетом того, что линия уходит на асимптоту, можно сделать вывод, что этот тренд связан с деформацией металлической подложки, на которой закреплено волокно. Дело в том, что условия

усталостного нагружения «жесткие», при испытаниях происходит контроль по амплитуде деформации, но не ведется контроль приложенной силы. В процессе испытаний на самых первых циклах материал подложки начинает терять свою «жесткость», и подложка накапливает необратимые пластические деформации. Поскольку приложенные деформации не увеличиваются, материал перестаёт накапливать дополнительную деформацию к последним циклам, и тренд «уходит» в асимптотическую зависимость. Возможно, при таких условиях испытаний металлическая подложка сломается раньше, чем произойдет усталостный разрыв волокна.

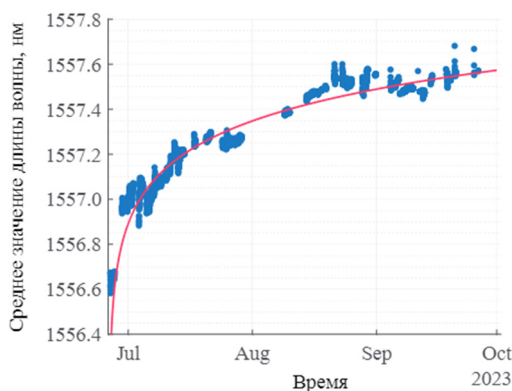


Рис. 4. Среднее значение длины волны в процессе испытаний

На рис. 5 указаны амплитуды колебаний основной частоты и дополнительных гармоник в натуральном и логарифмическом масштабе. В работах [8–10] установлено, что при накоплении дефектов в объеме материала и достижении критических значений поврежденности амплитуды младших гармоник начнут увеличиваться. Однако в процессе длительных испытаний образца таких изменений не произошло, что можно увидеть на графике, где видно, что амплитуда второй и третьей гармоник практически не меняется на протяжении всего эксперимента.

Образец испытывался в указанном режиме $2,4 \cdot 10^9$ циклов. Внешних признаков наличия повреждений, как и значительных отклонений в получаемых оптических сигналах, не было обнаружено, однако было принято решение проверить состояние материала после пройденного этапа нагружения. Образец исследовался на оптическом микроскопе «3D Laser Scanning Microscope, VK-X200» и с помощью рентгеновского томографа «SkyScan 1272 Bruker».

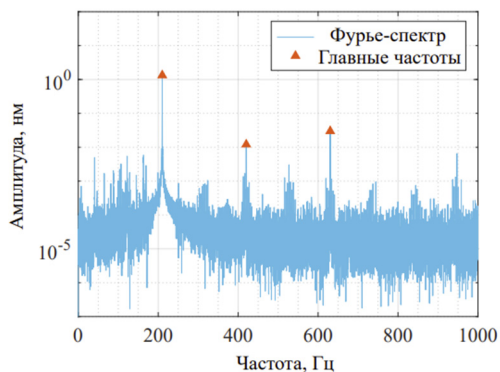


Рис. 5. Амплитудно-частотная характеристика колебаний в логарифмическом масштабе

При исследовании оптическим микроскопом (рис. 6) было обнаружено место с повреждением оболочки в виде периодических полос в месте утолщения волновода, которое выступает в роли концентратора напряжений и является очагом нелинейности колебаний в системе. На оболочке проявляются полосы скольжения, которые при дальнейших испытаниях могут привести к образованию усталостной трещины [2, 3].

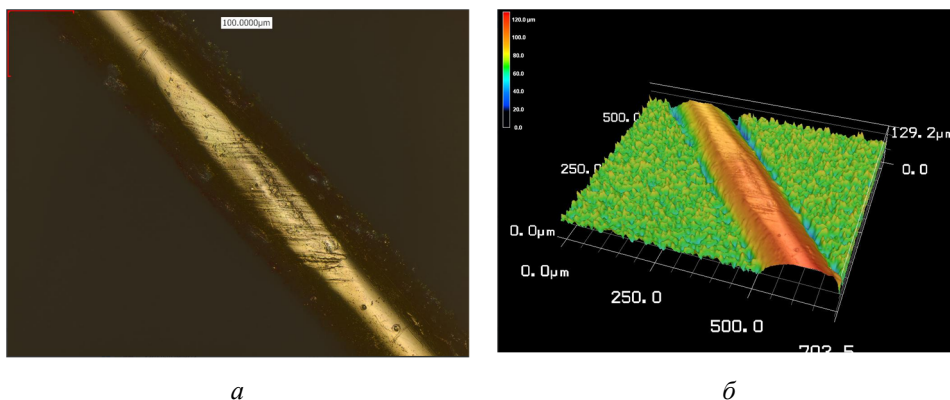


Рис. 6. Изображения оптоволоконна (а), полученные на оптическом микроскопе «3D Laser Scanning Microscope, VK-X200»; б – реконструированный 3D-профиль поверхности

Для определения глубины этих бороздок в объеме образца было решено исследовать с помощью рентгеновского томографа (рис. 7). Исследования показали, что в сердцевине волокна имеет место некоторое уплотнение в области, находящейся под очагом повреждений, зафиксированным на оптическом микроскопе, в остальном образце она

однородна. Возможно, данный дефект является очагом зарождающейся трещины. Брэгговская решетка при выбранных параметрах съемки не была обнаружена.

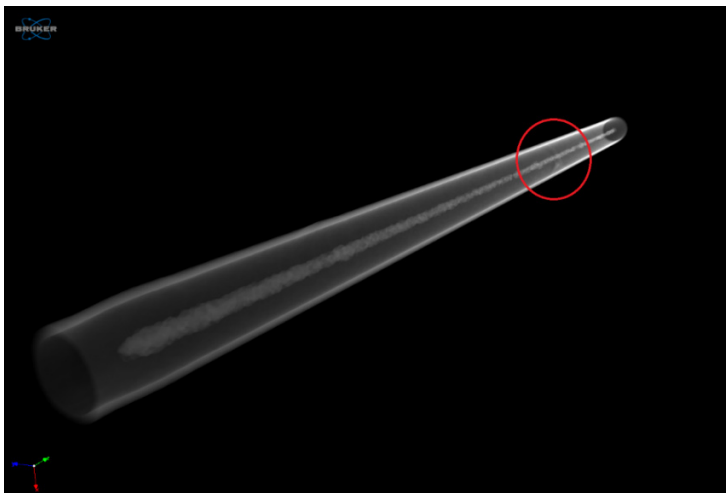


Рис. 7. Изображение участка оптоволокон, полученное на рентгеновском томографе; кругом выделена область с неоднородным уплотнением, которое может выступить в роли дефекта и образовать усталостную трещину

Заключение

В работе описан метод испытаний специализированных оптических волокон с брэгговскими решетками в режиме гигацикловой усталости, показаны работоспособность метода и способность волокон к сопротивлению нагрузкам в изученном диапазоне деформаций.

Исследования на оптическом микроскопе позволили локализовать участок повреждений в полиамидной смоле, покрывающей волокно, которое возникло в процессе циклических испытаний. Исследования на рентгеновском томографе позволили установить области уплотнения в сердцевине волокна в том же месте, где были обнаружены повреждения внешней оболочки. Возможно, данный участок волокна является концентратором напряжений и при дальнейших испытаниях вызовет макроскопическое разрушение.

Список литературы

1. Bathias, C. Gigacycle fatigue in mechanical practice / C. Bathias, P.C. Paris. – New York: Marcel Dekker Publisher Co. – 2005. – 305 p.

2. Mughrabi, H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime / H. Mughrabi // *International Journal of Fatigue*. – 2006. – Vol. 28, № 11. – P. 1501–1508.

3. Mughrabi, H. Microstructural fatigue mechanisms: cyclic slip irreversibility, crack initiation, non-linear elastic damage analysis / H. Mughrabi // *International Journal of Fatigue*. – 2013. – Vol. 57. – P. 2–8.

4. Fatigue testing of carbon fibre reinforced polymers under VHCF loading / M. Gude, W. Hufenbach, I. Koch, R. Koschichow, K. Schulte, J. Knoll // *Procedia Materials Science*. – 2013. – Vol. 2. – P. 18–24.

5. Experimental investigation of VHCF of polymer composites: Two alternative approaches* / T.J. Adam, P. Horst, P. Lorsch, M. Sinapius // *Materials Testing*. – 2012. – Vol. 54, № 11-12. – P. 734–741.

6. Castano, L. Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review / Lina M. Castano, Alison B. Flatau // *Smart Mater. Struct.* – 2014. – Vol. 23. – P. 053001.

7. Механические испытания интеллектуального крепежа / М.В. Банников, Е.С. Попов, А.Д. Юрина, А.Н. Кондрашов // *Прикладная фотоника*. – 2023. – Т. 10, № 2. – С. 5–24.

8. In situ damage assessment in a cast magnesium alloy during very high cycle fatigue / A. Kumar, R.R. Adharapurapu, J.W. Jones, T.M. Pollock // *Scr. Mater.* – 2011. – Vol. 64. – P. 65–68.

9. Critical dynamics of defects and mechanisms of damage-failure transitions in fatigue / O. Naimark, V. Oborin, M. Bannikov, D. Ledon // *Materials*. – 2021. – Vol. 14. – P. 2554.

10. Нелинейная динамика и стадийность поврежденности титановых сплавов Ti6Al4V и Ti45Nb при сверхмногоциклового усталости / М.В. Банников, В.А. Оборин, Д.А. Билалов, О.Б. Наймарк // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2020. – № 2. – С. 145–153.

References

1. Bathias C., Paris P.C. *Gigacycle fatigue in mechanical practice*. New York, Marcel Dekker Publisher Co., 2005, 305 p.

2. Mughrabi H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime. *International Journal of Fatigue*, 2006, vol. 28, no. 11, pp. 1501-1508.

3. Mughrabi H. Microstructural fatigue mechanisms: cyclic slip irreversibility, crack initiation, non-linear elastic damage analysis. *International Journal of Fatigue*, 2013, vol. 57, pp. 2-8.

4. Gude M., Hufenbach W., Koch I., Koschichow R., Schulte K., Knoll J. Fatigue testing of carbon fibre reinforced polymers under VHCF loading. *Procedia Materials Science*, 2013, vol. 2, pp. 18-24.

5. Adam T.J., Horst P., Lorsch P., Sinapius M. Experimental investigation of VHCF of polymer composites: two alternative approaches*. *Materials Testing*, 2012, vol. 54, no. 11-12, pp. 734-741.

6. Castano L.M., Flatau A.B. Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review. *Smart Mater. Struct.*, 2014, vol. 23, p. 053001.

7. Bannikov M.V., Popov E.S., Yurina A.D., Kondrashov A.N., Rizvanov D.G., Soromotin A.A. Mekhanicheskie ispytaniia intellektual'nogo krepzha [Mechanical testing of intelligent fasteners]. *Applied Photonics*, 2023, vol. 10, no. 2, pp. 5-24.

8. Kumar A., Adharapurapu R.R., Jones J.W., Pollock T.M. In situ damage assessment in a cast magnesium alloy during very high cycle fatigue. *Scr. Mater.*, 2011, vol. 64, pp. 65-68.

9. Naimark O., Oborin V., Bannikov M., Ledon D. Critical dynamics of defects and mechanisms of damage-failure transitions in fatigue. *Materials*, 2021, vol. 14, p. 2554.

10. Bannikov M.V., Oborin V.A., Bilalov D.A., Naimark O.B. Nelineinaia dinamika i stadiinost' povrezhdennosti titanovykh splavov Ti6Al4V i Ti45Nb pri sverkhmnogotsiklovoi ustalosti [Nonlinear dynamics and stages of damage of Ti6Al4V and Ti45Nb titanium alloys in very high cycle fatigue]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2020, no. 2, pp. 145-153.

Сведения об авторах

БАНИКОВ М.В.

e-mail: mbannikov@icmm.ru

Кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры общей физики Пермского государственного национального исследовательского университета, научный сотрудник исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, научный сотрудник лаборатории физических основ прочности Института механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация

ВШИВКОВ А.Н.

e-mail: vshivkov.a@icmm.com

Младший научный сотрудник лаборатории термомеханики твердых тел Института механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация

ГАЧЕГОВА Е.А.

e-mail: gachegova.e@icmm.ru

Инженер лаборатории термомеханики твердых тел Института механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация

ТРЕФИЛОВ И.А.

e-mail: igortrefilov59@gmail.com

Аспирант ИТМО, ассистент кафедры общей физики Пермского государственного национального исследовательского университета, лаборант научно-исследовательской лаборатории сенсорики и перспективных средств измерения, ведущий инженер-конструктор ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь, Российская Федерация

About the authors

M.V. BANNIKOV

e-mail: mbannikov@icmm.ru

Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, lecturer of the Department of "General Physics" of the PGNIU, Researcher at the Research Laboratory of Sensorics and Advanced Measuring Instruments, Researcher at the Laboratory of Physical Foundations of Strength of the Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

A.N. VSHIVKOV

e-mail: vshivkov.a@icmm.com

Junior researcher of solid thermomechanics laboratory of the Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

E.A. GACHEGOVA

e-mail: gachegova.e@icmm.ru

Engineer of solid thermomechanics laboratory of the Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

I.A. TREFILOV

e-mail: igortrefilov59@gmail.com

Postgraduate student of ITMO, Assistant of the Department of General Physics, Perm State National Research University, laboratory assistant of the Research Laboratory of Sensorics and Advanced Measuring Instruments, Leading Design Engineer, Inversion Sensor Co., Ltd., Perm, Russian Federation

КОНДРАШОВ А.Н.

e-mail: akon@psu.ru

A.N. KONDRASHOV

e-mail: akon@psu.ru

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Пермского государственного национального исследовательского университета, заведующий исследовательской лабораторией сенсорики и перспективных средств измерения, г. Пермь, Российская Федерация

Ph.D., docent of the Department of "General Physics", Head of the Research Laboratory of Sensorics and Advanced Measuring Instruments, Perm, Russian Federation

СОЗОНОВ Н.С.

e-mail: sozonov@i-sensor.ru

N.S. SOZONOV

e-mail: sozonov@i-sensor.ru

Инженер-конструктор ООО «Инверсия-Сенсор», г. Пермь, Российская Федерация

Design engineer Inversion Sensor Co., Ltd., Perm, Russian Federation

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Получена: 26.01.2024

Одобрена: 28.01.2024

Принята к публикации: 31.01.2024

Financing. The work was not sponsored,

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 26/01/2024

Approved: 28/01/2024

Accepted for publication: 31/01/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Механические испытания оптоволокна в режиме гигацикловой усталости / М.В. Банников, А.Н. Вшивков, Е.А. Гачегова, И.А. Трефилов, А.Н. Кондрашов, Н.С. Созонов // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 1. – С. 73–83.

Please cite this article in English as: Bannikov M.V., Vshivkov A.N., Gachegova E.A., Trefilov I.A., Kondrashov A.N., Sozonov N.S. Mechanical testing of optical fibers in the gigacycle fatigue regime. *Applied photonics*, 2024, no. 1, pp. 73-83.