

Received: 09.10.2024

Revised: 23.12.2024



Accepted: 27.12.2024

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.268-293

NEW SHEAROGRAPHY: THEORY, EXPERIMENTS, AND SOME APPLICATIONS

A.P. Vladimirov

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

 <https://orcid.org/0000-0001-6343-9772>  vap52@bk.ru

Email: vap52@bk.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

The paper discusses the theoretical and experimental justification and some applications of new shearography, which is two orders of magnitude higher in sensitivity and spatial resolution than the previously known version of shearography. In addition, it has no such negative properties of the old shearography as low contrast of correlation bands and their disappearance with the slightest translational motion of the object of diagnostics. It is shown that a new mechano-optical effect is the physical basis of the method. Due to this effect, the shearing interference of waves occurs spontaneously, without using special optics. Formulas are given that relate the parameters characterizing the translational motion of an object, the average value, dispersion, time autocorrelation and spectral functions of object deformations to the speckle dynamics parameters in the object image plane. These formulas were found both for a light-scattering surface and for a transparent object located near a random-phase screen. It is also shown that, if the difference in the optical paths Δu of two waves is equal to the sum of M independent values of Δu_m , it becomes possible to determine the above parameters corresponding to the terms Δu_m , $m = 1, 2, \dots, M$. The results of applying the theory to the study of irreversible processes caused by fatigue of materials, intracellular processes in cultured living cells, and turbulent flows are shown. Fatigue-induced degradation mechanisms identified by the new method for some materials are considered. A decrease in cell activity when three toxic substances are introduced into a nutrient solution is evaluated, as well as the relative contribution of vortices with different relaxation times to a turbulent air flow.

Keywords: speckle, high-cycle fatigue, living cells, turbulence, deformation, degradation, mechanisms

Acknowledgment

Gratitude is expressed to my colleagues I. S. Kamantsev, N. A. Drukarenko, P. V. Pavlov, Yu. A. Mikhailenko, N. A. Belokonova, A. G. Sergeev, K. O. Golitsyna, N. A. Naronova, post- and undergraduates K. E. Myznov, K. V. Naumov, as well as to the late A. A. Bakharev, for their active participation in the study. Thanks are also due to A. V. Druzhinin and V. V. Evstigneev for their valuable remarks contributing to the improvement of the paper. The study was performed under research program No 124020700063 of the IES UB RAS and partially supported by the UrFU development program within the Priority-2030 program.

References

1. Vlasov, N.G. and Presnyakov, Yu.P. A simplified version of shearography. *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*, 1973, 5, 199–201. (In Russian).

2. Leendertz, J.A. and Butters, J.N. An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1973, 6 (11), 1107–1110. DOI: 10.1088/0022-3735/6/11/019.
3. Hung, Y.Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing. *Optical Engineering*, 1982, 21 (3), 391–395. DOI: 10.1117/12.7972920.
4. Available at: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/laser-shearography-ndt>
5. ASTM Standard Practice E–2581–7. Shearography of polymer matrix composites, sandwich core materials and filament-wound pressure vessels in aerospace application.
6. Yang, L. and Xie, X. *Digital Shearography, New Developments and Applications*, SPIE Press, Washington, 2016, 226 p.
7. Steinchen, W. *Digital Shearography, Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry*, SPIE Press, Washington, 2003, 312 p.
8. Lobanov, L.M., Znova, V.A., Pivtorak, V.A., and Kiyanets, I.V. Monitoring corrosion damage of elements and components of aircraft structures by the method of electron shearography. *Tekhnicheskaya Diagnostika i Nerazrushayushchiy Kontrol*, 2016, 2. (In Russian).
9. Burkov, M.V. Development of a digital shirography device. *Glavnyi Mekhanik*, 2023, 4. (In Russian). DOI: 10.33920/pro-2-2304-06.
10. Meybodi, M.K., Dobre, I., Klausmeyer, P., Harrington, E.J., and Furlong, C. Investigation of thermomechanical effects of lighting conditions on canvas paintings by laser shearography. In: *Proc. SPIE, Interferometry XVI, Applications*, September 13, 2012, vol. 8494, pp. 84940A. DOI: 10.1117/12.958089.
11. Vladimirov, A.P., Druzhinin, A.V., Malygin, A.S., and Mikitas, K.N. Theory and calibration of speckle dynamics of phase object. In: *Proc. SPIE, Saratov Fall Meeting 2011, Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIII*, November 27–30, 2012, vol. 8337, pp. 83370C-1–83370C-15. DOI: 10.1117/12.924800.
12. Vladimirov, A.P. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media. *Optical Engineering*, 2016, 55 (12), 1217–1227. DOI: 10.1117/1.OE.55.12.121727.
13. Vladimirov, A.P. Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue. Theory and some experiments. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1740, 040004-1–040004-4. DOI: 10.1063/1.4952663.
14. Vladimirov, A.P. Dynamic speckle-interferometry of micro-displacements. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1457, 459–468. DOI: 10.1063/1.4730589.
15. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., Drukarenko, N.A., Trishin, V.N., Akashev, L.A., and Druzhinin, A.V. Assessing fatigue damage in organic glass using optical methods. *Optics and Spectroscopy*, 2019, 127, 943–953. DOI: 10.1134/S0030400X19110286.
16. Vladimirov, A.P. Speckle tomography of the living-cell functions. *Izvestiya Vuzov. Radiofizika*, 2020, 63 (8), 655–664.
17. Vladimirov, A., Drukarenko, N., and Mikhailenko, Yu. Speckle diagnosis of irreversible processes occurring in some living and technical objects. In: *Opticheskie metody issledovaniya potokov, trudy XVI mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Optical Flow Research Methods, June 28–July 02, 2021: Proceedings of Scientific and Practical Conference]. Pero Publ., 2021, pp. 51–62. (In Russian).
18. Kamantsev, I.S., Vladimirov, A.P., and Borodin, E.M. Investigation of crack formation processes under multicycle fatigue in tube steel 09G2S using speckle-interferometry method. *Vestnik TGU*, 2013, 18 (4), 1881–1882. (In Russian).
19. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., Ishchenko, A.V., Veselova, V.E., Gorkunov, E.S., Gladkovskiy, S.V., and Zadvorkin, S.M. Investigation of fatigue crack formation process on changing of surface topography of specimen and its speckle images. *Deformatsiya i Razrushenie Materialov*, 2015, 1, 21–26. (In Russian).
20. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., Veselova, V.E., Gorkunov, E.S., and Gladkovskii, S.V. Use of dynamic speckle interferometry for contactless diagnostics of the nucleation of a

- fatigue crack and determining its growth rate. *Technical Physics*, 2016, 61 (4), 563–568. DOI: 10.1134/S106378421604023X.
21. Vladimirov, A.P. and Ponosov, Yu.S. Application of speckle dynamics and Raman light scattering to study the fracture features of pipe steel at high-cycle fatigue. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2018, 3, 138–146. (In Russian). DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.13.
 22. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., Drukarenko, N.A., Gladkovsky, S.V., Bukhvalov, A.B., Khudorozhkova, Yu.V., Cheremitsina, E.R., and Gorkunov, E.S. Nucleation and initiation of cracks under high-cycle fatigue in the EP679 maraging steel. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2176, 030019. DOI: 10.1063/1.5135143.
 23. Vladimirov, A.P., Drukarenko, N.A., and Myznov, K.E. Using speckle images for determining the local plastic strains arising at high-cycle fatigue of 09G2S steel. *Technical Physics Letters*, 2021, 47 (8), 777–780. DOI: 10.1134/S1063785021080137.
 24. Vladimirov, A.P. Dynamic speckle diagnostics of deformations, damages and operational life of machine details. *Mashinostroenie: Setevoy Elektronnyi Nauchnyi Zhurnal*, 2023, 10 (4), 3–7. (In Russian). DOI: 10.24892/RIJIE/20230401.
 25. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., Drukarenko, N.A., Myznov, K.E., and Naumov, K.V. Comparison of application results of two speckle methods for study multi-cycle fatigue of structural steel. *Nauchno-Technicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologiy, Mekhaniki i Optiki*, 2024, 24 (1), 20–29. (In Russian). DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-20-29.
 26. Orowan, E. Theory of the fatigue of metals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1939, 171 (944), 79–106. DOI: 10.1098/rspa.1939.0055.
 27. Afanasiev, N.N. *Statisticheskaya teoriya ustalostnoy prochnosti materialov* [Statistical Theory of Material Fatigue Strength]. Isd-vo Akad. Nauk Ukr. SSR Publ., Kiev, 1953, pp. 82–88. (In Russian).
 28. Zhurkov, S.N. Kinetic conception of the strength of solids. *Vestnik Akademii Nauk SSSR*, 1968, 46–52. (In Russian).
 29. Troshchenko, V.T. *Ustalost i neuprugost materialov* [Fatigue and Inelasticity of Materials]. Naukova Dumka Publ., Kiev, 1971, 268 p.
 30. Vladimirov, A.P. *Dinamicheskaya spekl-interferometriya deformiruyemykh tel* [Dynamic Speckle Interferometry of Bodies under Deformation]. UrO RAN Publ., Ekaterinburg, 2004, 241 p. (In Russian).
 31. Vladimirov, A.P. and Bakharev, A.A. Dynamic speckle interferometry of thin biological objects: theory, experiments, and practical perspectives. In: *Optical Interferometry*, IntechOpen, 2018, ch. 6, pp. 103–141. DOI: 10.5772/66712.
 32. Vladimirov, A.P. Dynamic Speckle interferometry of technical and biological objects. In: *Interferometry – Recent Developments and Contemporary Applications*, IntechOpen, 2018, pp. 1–18. DOI: 10.5772/intechopen.81389.
 33. Mikhailova, Yu.A., Vladimirov, A.P., Bakharev, A.A., Sergeev, A.G., Novosyolova, I.A., and Yakin, D.I. Studying of cell culture reaction to temperature change by dynamic speckle interferometry. *Russian Journal of Biomechanics*, 2017, 21 (1), 56–64. DOI: 10.15593/RJBIOMEH/2017.1.06.
 34. Volkov, S.D. *Funktsiya soprotivleniya materialov i postanovka kraevykh zadach mekhaniki razrusheniya* [Function of the Strength of Materials and the Formulation of Boundary Value Problems in Fracture Mechanics]. UNTs AN SSSR Publ., Sverdlovsk, 1968, 65 p. (In Russian).
 35. Vladimirov, A.P., Malygin, A.S., Mikhailova, Yu.A., Bakharev, A.A., and Poryvaeva, A.P. Retrofit device for real-time evaluation of metabolic activity in herpes virus infected cell cultures. *Biomedical Engineering*, 2014, 48 (14), 178–181. DOI: 10.1007/s10527-014-9447-9.
 36. Vladimirov, A.P., Mikhailova, Yu.A., and Drukarenko, N.A. Dynamic speckle interferometry of technical and thin biological objects. In: *Proc. SPIE, VII International Conference on Speckle Metrology Speckle*, 2018, September 7, 2018, vol. 10834, pp. 1083427-1–1083427-10. DOI: 10.1117/12.2319729.

Подана в журнал: 09.10.2024



УДК 535.4: 620.178.3

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.6.268-293

НОВАЯ ШИРОГРАФИЯ: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТЫ И НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ

А. П. Владимиров

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия*

 <https://orcid.org/0000-0001-6343-9772>  vap52@bk.ru

Электронная почта: vap52@bk.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

Тел.: +7 (343) 362-30-24

Представлено теоретическое и экспериментальное обоснование новой ширографии, по чувствительности и пространственному разрешению на два порядка превосходящей ранее известный вариант, и рассмотрены некоторые ее применения. Кроме того, в ней отсутствуют такие негативные свойства старой ширографии, как малый контраст полос корреляции и их исчезновение при малейшем поступательном перемещении объекта диагностики. Показано, что физической основой метода является новый механо-оптический эффект, благодаря которому сдвиговая интерференция волн реализуется спонтанно, без использования специальной оптики. Приведены формулы, связывающие параметры, характеризующие поступательное перемещение объекта, среднее значение, дисперсию, временную автокорреляционную и спектральную функцию деформаций объекта, с параметрами динамики спеклов в плоскости его изображения. Указанные формулы найдены как для рассеивающей свет поверхности, так и для прозрачного объекта, расположенного вблизи случайно-фазового экрана. Установлено, что если разность оптических путей Δu двух волн равна сумме M независимых величин Δu_m , то появляется возможность определить вышеуказанные параметры, соответствующие слагаемым Δu_m , $m = 1, 2, \dots, M$. Приведены результаты применения теории для изучения следующих явлений: необратимых процессов, вызванных усталостью материалов; внутриклеточных процессов в живых культивированных клетках; турбулентных потоков. Рассмотрены механизмы усталостной деградации ряда материалов, выявленные новым методом. Количественно оценены уменьшение активности клеток при введении в питательный раствор трех токсичных веществ и относительный вклад вихрей с разными временами релаксации в турбулентное течение воздуха.

Ключевые слова: спеклы, многоцикловая усталость, живые клетки, турбулентность, деформация, деградация, механизмы

1. Введение

В 1970–80-х годах для определения деформаций и неразрушающего контроля разными исследователями в статьях [1–3] был предложен сдвиговый вариант корреляционной спекл-интерферометрии. В литературе за этим методом закрепилось название «ширография» (shearography), данное в статье [3] сотрудником Оклендского университета (США) Ю. Хангом (Hung Y. Y.). В настоящее время ширография широко разрекламирована, выпускаются приборы ширографии [4], имеется стандарт США на ее использование [5], есть обзоры и монографии на эту тему [6, 7]. С недавними публикациями по ширографии можно ознакомиться

ся в работах [8–10]. Следует отметить, что имеются недостатки метода, препятствующие широкому его распространению.

Во-первых, в известном варианте широгрaфии регистрируются слабоконтрастные корреляционные полосы, что затрудняет выявление дефектов и определение деформаций поверхности. Во-вторых, перемещения объекта диагностики относительно оптической системы на величину более 1/10 линейного разрешения используемого объектива приводит к резкому уменьшению контраста и исчезновению полос. Поэтому основным применением метода является обнаружение дефектов. Для устранения относительного перемещения объекта и оптической системы необходимо использовать специальные устройства и методы их взаимной фиксации.

В статьях [11–13] была решена задача о динамике спеклов в плоскости изображения периодически деформируемых объектов. Рассматривались как отражающие, так и прозрачные объекты. В этих работах были получены формулы, которые связывают параметры, характеризующие динамику разности оптических путей Δu двух волн, распространяющихся на некотором среднем характерном расстоянии Δs , с параметрами, характеризующими динамику спеклов в плоскости изображения объекта.

Физической основой метода, реализующего интерференцию указанных пар волн, является новый механо-оптический эффект, теоретически и экспериментально обоснованный в публикации [14]. Этот эффект возникает, если в области линейного разрешения линзы появляется либо градиент перемещения центров рассеяния, либо градиент показателя преломления на пути волн, распространяющихся от центров рассеяния. В этом случае возникает интерференция множества волн с одинаковыми начальными фазами (как и в дифракционной решетке), эквивалентная интерференции двух волн. Волны с разными случайными начальными фазами в плоскости изображения объекта формируют некоторое случайное распределение интенсивности излучения. При изменении периода виртуальной дифракционной решетки волны с одинаковыми начальными фазами создают осцилляцию интенсивности во времени. Как показано в работе [15], в случае использовании телекамер среднего качества метод при прочих равных условиях по пространственному разрешению ($\Delta s \geq 1$ мкм) и по предельной чувствительности ($\Delta u \geq 1$ нм) на два порядка превосходит другие оптические методы определения деформаций, в том числе и старую широгрaфию. При использовании малошумящих камер чувствительность можно увеличить на порядок.

Целью настоящей публикации является ознакомление читателей журнала с работами, проведенными лично автором, а также совместно со студентами, аспирантами и коллегами по разработке и применению новой широгрaфии. В обзоре собраны материалы, опубликованные в разных статьях, а также новые сведения, полученные автором в последнее время. Рассмотрены примеры использования метода для изучения: 1) усталости технических материалов под действием периодических нагрузок; 2) внутриклеточных процессов в живых клетках; 3) особенностей турбулентного течения газов.

2. Краткая теория метода

Как было указано выше, в статьях [11–13] были решены задачи о динамике спеклов в плоскости изображения периодически деформируемого объекта в отраженном, а также в проходящем свете. Оптические системы, взятые для вычислений, приведены на рис. 1. В принятых моделях предполагалось, что объекты одновременно участвуют в трех типах движения. Отражающий объект 3 в виде совокупности точечных центров рассеяния, расположенных в плоскости xu (рис. 1 *a*), одновременно перемещается по оси x , совершает периодические движения в этом же направлении с некоторой амплитудой и периодом, а центры рассеяния 3 хаотически перемещаются в пространстве.

Тонкий прозрачный образец 3 (рис. 1 *б*), расположенный вблизи тонкого трехмерного прозрачного диффузора 2, совершает те же движения, что и отражающий объект. При этом

случайным образом изменяется оптическая длина пути волн, зондирующих объект. Источниками этих волн со случайными амплитудами и фазами являются точечные центры рассеяния, хаотически расположенные внутри диффузора. Линзы с диафрагмами формируют изображения объекта.

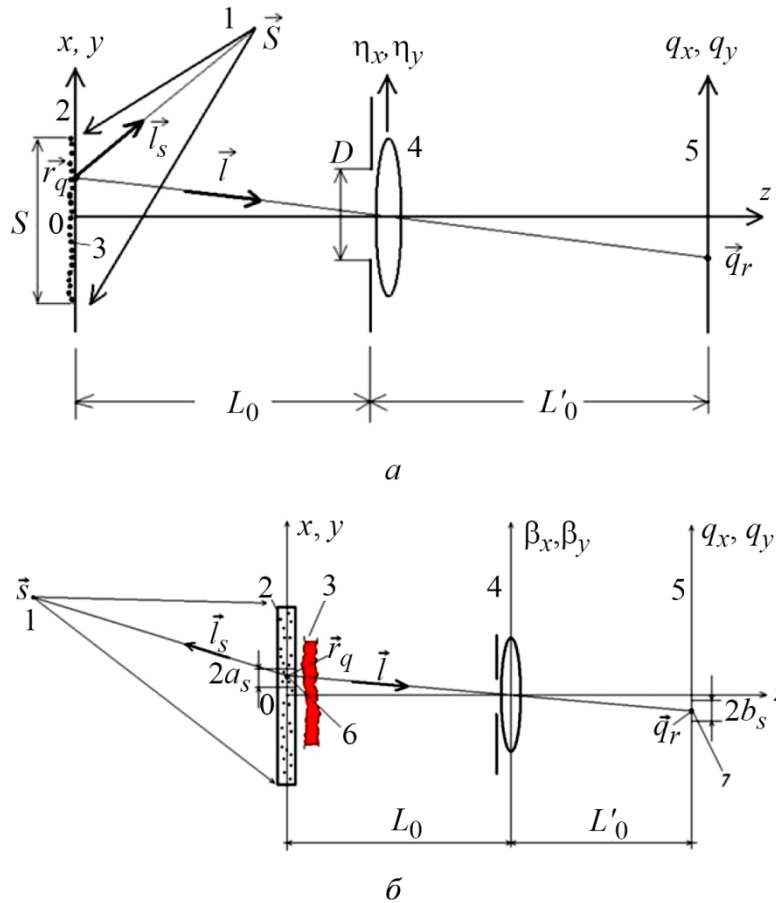


Рис. 1. Оптические системы с отражающим (а) и прозрачным (б) объектами, использованные для расчетов: 1 – точечный источник света, 2 – плоскость объекта, 3 – точечные центры рассеяния, 4 – линза, 5 – плоскость изображения объекта (а); 1 – точечный источник света, трехмерный диффузор, 3 – тонкий прозрачный объект, 5 – плоскость изображения объекта (б)

На рассмотренных выше моделях были получены выражения для средней по времени интенсивности излучения \tilde{I} в произвольной точке \vec{q} плоскости изображения и временной нормированной автокорреляционной функции (ВНАКФ) $\eta(t_1, t_2)$ этой интенсивности:

$$\tilde{I} = I_1 + I_2 e^{-k^2 \sigma^2 / 2} \cos(k \Delta u + \alpha), \quad (1)$$

$$\eta(t_1, t_2) = \eta(u_x) e^{-k_{11} \rho / 2 - k_{22} \rho / 2 + k_{11} \rho(t_1, t_2)} \cos(\langle k \Delta u_2 \rangle - \langle k \Delta u_1 \rangle). \quad (2)$$

В формуле (1) I_1, I_2, α – константы; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны излучения; Δu – разность оптических путей пар волн, распространяющихся от центров рассеяния, расположенных на среднем характерном расстоянии Δs в пределах линейного разрешения линзы; время усреднения величины \tilde{I} равно или кратно периоду колебания T объекта. В формуле (2) $\eta(u_x)$ – это ВНАКФ, соответствующая поступательному перемещению u_x объекта; k_{11}, k_{22} – дисперсии величины $k \Delta u$ в моменты времени t_1 и t_2 соответственно; $\rho(t_1, t_2)$ – ВНАКФ величины Δu ; Δu_1 и Δu_2 – это значения Δu в моменты времени t_1 и t_2 соответственно;

угловые скобки означают усреднение по ансамблю статистически подобных объектов. Для отражающего объекта

$$\eta(u_x) = \frac{(2x_s - u_x)}{2x_s}. \quad (3)$$

Здесь $2x_s$ – линейное разрешение линзы, а $\Delta u = \Delta \vec{u}(\vec{l}_s + \vec{l})$, где $\Delta \vec{u}$ – вектор относительного перемещения двух точек поверхности, расположенных на расстоянии Δs ; \vec{l}_s, \vec{l} – единичные векторы, направленные от точки \vec{r}_q к источнику света и в центр линзы соответственно. Для прозрачного объекта, согласно [13],

$$\eta(u_x) = e^{-\tilde{k}_{11}/2 - \tilde{k}_{22}/2 + \tilde{k}_{11}\tilde{\rho}(t_1, t_2)}, \quad (4)$$

где величины $\tilde{k}_{11}, \tilde{k}_{22}, \tilde{\rho}(t_1, t_2)$ имеют тот же смысл, что и $k_{11}, k_{22}, \rho(t_1, t_2)$, но относятся к флуктуациям величины Δu из-за движения шероховатого прозрачного объекта.

В статье [16] теория метода получила дальнейшее развитие. В предположении, что величина Δu равна сумме M случайных независимых величин Δu_m , вновь были получены выражения для \tilde{I} и $\eta(t_1, t_2)$:

$$\tilde{I} = I_1 + I_2 e^{-k^2 \sum_{m=1}^M \sigma_m^2 / 2} \cos\left(k \sum_{m=1}^M \Delta u_m + \alpha\right), \quad (5)$$

$$\eta(t_1, t_2) = e^{-\sum_{m=1}^M [k_{11m}/2 + k_{22m}/2 - k_{11m}\rho_m(t_1, t_2)]} \cos\left(k \sum_{m=1}^M \langle \Delta u_{2m} \rangle - k \sum_{m=1}^M \langle \Delta u_{1m} \rangle\right), \quad (6)$$

где величины с нижним индексом m имеют тот же смысл, что и в формулах (1) и (2).

Сравнение формул (1) и (5), (2) и (6) показывает, что среднее значение, дисперсия, ВНАКФ величины Δu соответственно равны суммам средних значений, дисперсий, ВНАКФ величин Δu_m . На основе этих равенств в статье [16] было обосновано создание спекл-томографа функций живой клетки. Для определения $2M$ неизвестных Δu_m и σ_m в формуле (5), а также $5M$ неизвестных $\langle \Delta u_m \rangle, \sigma_m, \rho_m$ в формуле (6) следует определить значения \tilde{I} и $\eta(t_1, t_2)$ для разных $2M$ и $5M$ ракурсов наблюдения соответственно. Ту же процедуру определения указанных неизвестных величин можно провести, используя, соответственно, $2M$ и $5M$ длин волн при фиксированном ракурсе наблюдения. Решая затем систему трансцендентных уравнений, можно определить искомые средние значения, дисперсии, ВНАКФ величин Δu_m . Эти величины можно рассматривать в качестве параметров, характеризующих: 1) пространственно-временную активность и другие функции участков живой клетки; 2) процессы усталостной деградации материалов; 3) турбулентное течение жидкостей и газов.

Если процесс $\Delta u = \Delta u(t)$ стационарен, то $\langle k \Delta u_2 \rangle = \langle k \Delta u_1 \rangle, k_{11} = k_{22}$. После того как время $\tau = t_2 - t_1$ превысит время корреляции τ_0 величины $\Delta u, \rho(t_1, t_2)$ исчезает, и величина η выходит на постоянный уровень η^* . Используя формулу, по значению η^* можно определить среднеквадратичное отклонение σ величины Δu :

$$\sigma = (1/k) \left[-\ln(\eta^*) \right]^{0.5}, \quad (7)$$

Для стационарного процесса $\Delta u = \Delta u(t)$ формула (6) будет иметь следующий вид:

$$\eta(\tau) = e^{-k \sum_{m=1}^M [\sigma_m^2 - \sigma_m^2 \rho_m(\tau)]}, \quad (8)$$

где σ_m – среднеквадратичное отклонение величины Δu_m .

В работе [16] было показано, что, подбирая значения σ_m и время корреляции τ_m в лоренцевой или гауссовой функции $\rho_m(\tau)$, можно очень точно аппроксимировать экспериментальные значения величины $\eta(t)$ (рис. 2), взятые из статьи [16].

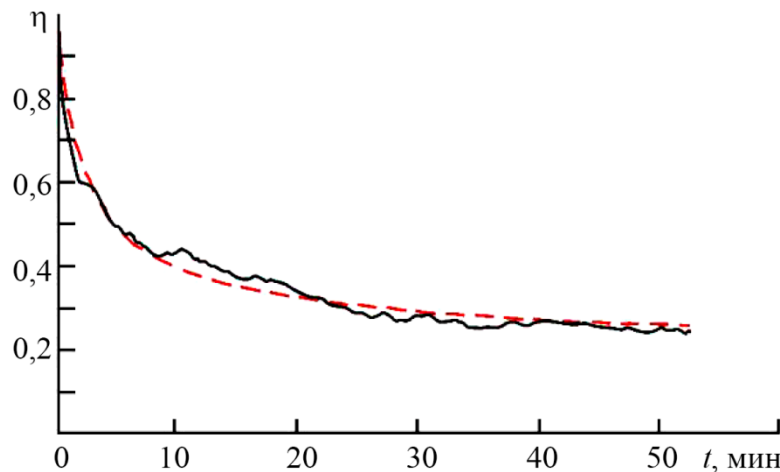


Рис. 2. Совмещенные теоретическая (пунктирная линия) и экспериментальная (сплошная кривая) зависимости $\eta(t)$ для группы живых культивированных клеток. Коэффициент корреляции массивов теоретических и экспериментальных данных равен 0,99

Найденную таким образом зависимость $\sigma_m(\tau_m)$ можно рассматривать в качестве своеобразного спектра, характеризующего относительный вклад m -го процесса, протекающего со скоростью, пропорциональной $1/\tau_m$, в изучаемое явление.

Второй способ определения зависимости $\sigma_m(\tau_m)$ был предложен в работе [17]. Суть метода заключается в отображении в пикселях телекамеры зависимости $\tilde{I}(\tau)$ и выделении из нее слагаемого $i_m(\tau)$, соответствующего $\Delta u_m(\tau)$, известным методом скользящего среднего. Далее по выделенным флуктуациям величины i_m относительно нуля определяется ее среднеквадратичное отклонение σ_{im} , по ВНАКФ величины i_m определяется время ее корреляции τ_{im} . Затем по выведенным формулам $\tau_m = \tau_{im}$, $\sigma_m = \sigma_{im}(\lambda/2\pi\bar{I})$, где \bar{I} – среднее значение \tilde{I} на выбранном интервале времени, выявляется зависимость $\sigma_m(\tau_m)$.

3. Объекты исследования и техника эксперимента

3.1. Образцы и техника эксперимента для изучения усталостных явлений

В работах [15, 18–22,] были использованы призматические образцы с острым надрезом типа Шарпи с радиусом закругления на вершине надреза, равным 0,25 мм. Периодическая деформация осуществлялась трехточечным изгибом. В этих работах использовались оптические системы, схемы которых показаны на рис. 1. Для непрозрачных образцов направления освещения и наблюдения были симметричны нормали, а прозрачные образцы освещали через матовое стекло. Образцы изготавливались из сталей марок ЭП679, 09Г2С и из органического стекла двух марок: «Асгума» и СО-102-А.

Следующий этап работ проводился на металлических образцах толщиной 1,6 мм с плоской рабочей частью, на которой имелись два симметричных выреза радиусом 2,5 мм (рис. 3). Образцы были изготовлены из стали 09Г2С и алюминиевого сплава Д16. Расстояние между вырезами составляло 3 мм. Следы электроискровой обработки удаляли мелкой шкур-

кой, параметр шероховатости Ra лицевой, освещаемой лазером поверхности образца равнялся 1,2 мкм. Тылную поверхность полировали, ее значение Ra составляло = 0,04 мкм. Далее образцы отжигали в течение 2 часов, вместе с печкой охлаждали до комнатной температуры, затем подвергали естественному старению в течение недели.

При испытании данных образцов на усталость использовалась новая оптическая система. Установка, состоящая из лазерного модуля с длиной волны $\lambda = 0,650$ мкм и мощностью 20 мВт и телекамеры Видеоскан-415-USB, располагалась на столике рядом с машиной для испытания на усталость. Она позволяла на одном кадре регистрировать три изображения образца (рис. 4). Изображения 2 и 3 формировали с помощью двух небольших призм, направляющих рассеянные волны в центр объектива телекамеры. Матрица фотоприемников телекамеры состояла из 782×582 пикселей с размером каждого $8,3 \times 8,3$ мкм.

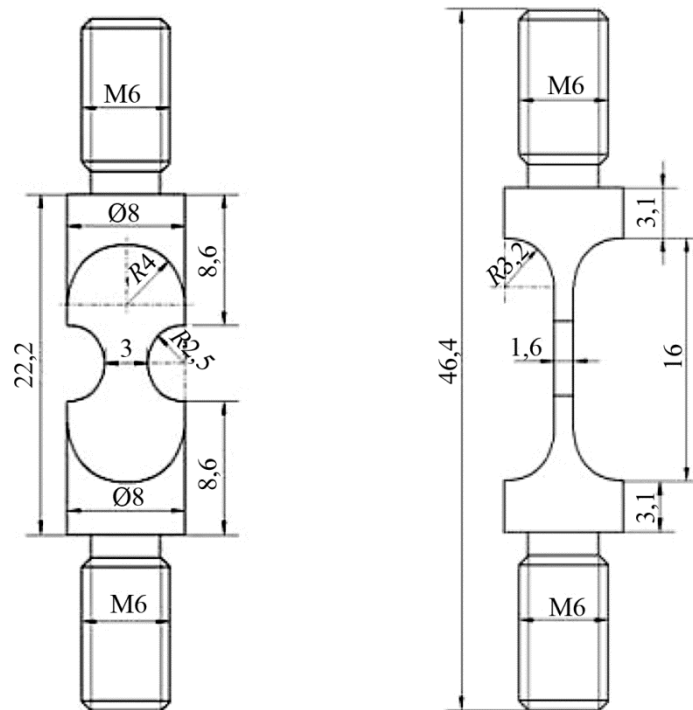


Рис. 3. Образец для испытания на усталость

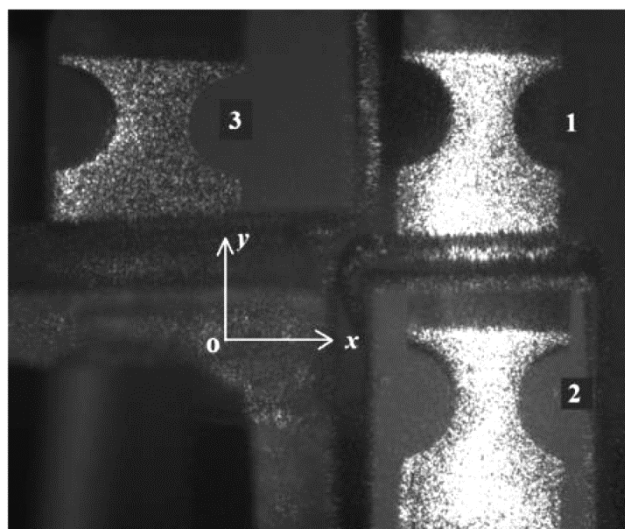


Рис. 4. Три спекловых изображения образца на одном кадре

Направление освещения образца располагалось в плоскости yz , угол между осью y и направлением освещения был равен 66° . При формировании изображений 1 и 2 направления наблюдения лежали в плоскости yz , углы между осью y и указанными направлениями были равны 87 и 109 градусам соответственно. Направление наблюдения при формировании изображения 3 находилось в плоскости xz , угол между осью x и направлением наблюдения равнялся 111° . Испытание образцов на усталость проводили на машине резонансного типа Microtron (Rumul) при частоте около 100 Гц, коэффициент асимметрии цикла равнялся $0,1$.

Кроме металлических образцов, испытанию на усталость подвергали призматические образцы из оргстекла СО-102-А без надрезов. Образцы размером $10 \times 20 \times 70$ мм нагружали трехточечным изгибом.

3.2. Объекты исследования и аппаратура для изучения внутриклеточных процессов

Объектами исследования стали монослои клеток, культивированные на прозрачной подложке. Использовались клетки линий L-41 [23], Vero и ЛЭЧ-3. Динамика спеклов формировалась в плоскости изображения подложки с клетками, помещенной в прозрачную кювету с питательным раствором. Оптическая система (рис. 5) помещалась в термостат, где поддерживалась постоянная температура. Использовались термостаты типа ЗЦ-1125МУ4.2. и ТСЭ-200. Кадры спекловых изображений клеток вводили в компьютер через каждые 9 секунд. Температура кюветы контролировалась контактным термодатчиком DS1820.

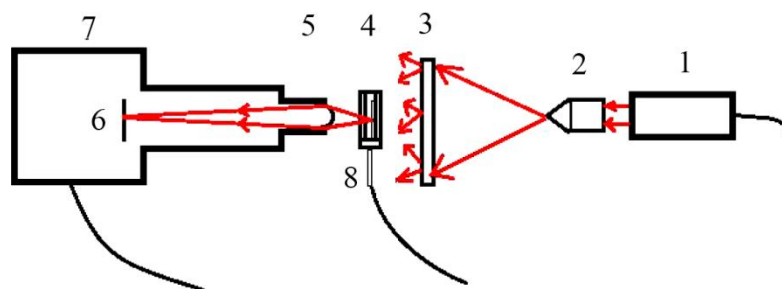
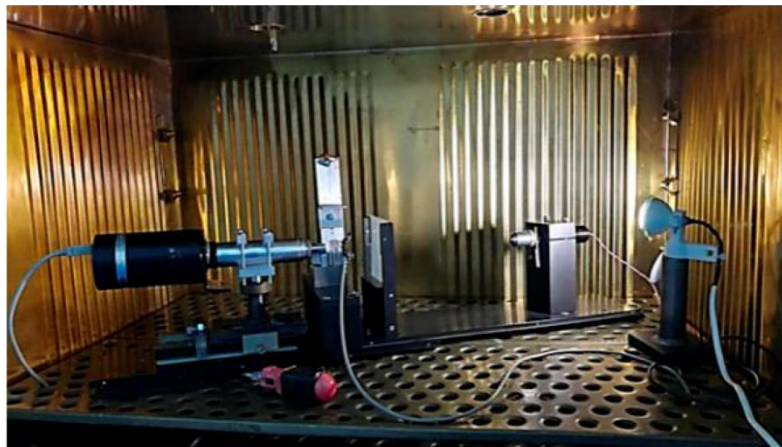


Рис. 5. Фотография (слева) и схема (справа) экспериментальной установки: 1 – лазерный модуль KLM-D532-20-5; 2 – микробъектив $60\times$; 3 – матовое стекло; 4 – прозрачная кювета с питательным раствором и культивированными клетками на прозрачной подложке; 5 – микроскоп с 8-кратным увеличением; 6 – матрица фотоприемников монохромной телекамеры типа «Видеоскан-415М-USB»; 7 – монохромная телекамера типа «Видеоскан-415М-USB»; 8 – контактный термодатчик DS1820

3.3. Техника эксперимента для изучения турбулентного потока

На рис. 6. приведена блок-схема оптической системы, использованной для изучения турбулентного течения воздуха. Профиль температуры потока определялся с помощью термомпары.

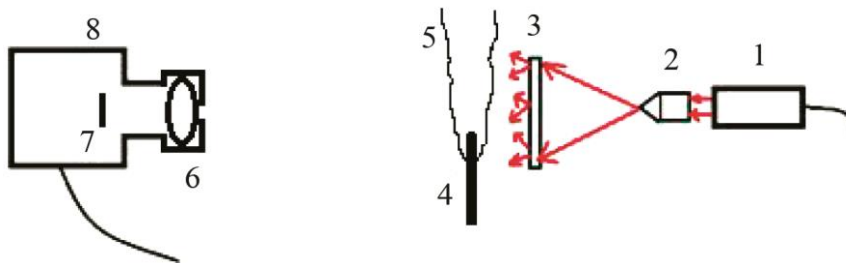


Рис. 6. Оптическая система сдвигового интерферометра, использованного для изучения турбулентного потока воздуха: 1 – лазерный модуль; 2 – микрообъектив; 3 – матовое стекло; 4 – жало паяльника; 5 – турбулентный поток; 6 – объектив; 7 – матрица фотоприемников; 8 – телекамера

4. Результаты

4.1. Изучение усталостной деградации материалов

Необратимые процессы, возникающие при многоцикловом нагружении образцов с острым надрезом типа Шарпи, фиксировались по динамике величины η (формула (2)).

Значение η , являющееся коэффициентом корреляции цифровых значений интенсивности излучения во фрагменте изображения, взятом в начальном и текущем моментах времени, определяли по формуле (38) статьи [12]. Было установлено, что первые признаки необратимых процессов появляются не на вершине надреза, а на некотором расстоянии от нее. Затем вблизи надреза в сталях формируется зона пластичности размером в несколько миллиметров, а в оргстекле возникает зона необратимых изменений показателя преломления таких же размеров. После этого на вершине надреза возникает макротрещина, длина которой постепенно увеличивается.

В работе [21] было обнаружено, что в стали 09Г2С на вершине надреза имеет место локальное тепловыделение с увеличением температуры выше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, в результате чего образовались хрупкие частички карбида железа размером порядка $10\text{ }\mu\text{m}$. Макротрещина формировалась и росла путем разрушения этих частичек. Показано [15], что в оргстекле макротрещина возникает при относительном изменении показателя преломления на величину порядка 10^{-3} . В статье [20] была предложена методика определения положения вершины усталостной трещины по приращению ее зоны пластичности.

У проведенных исследований было несколько недостатков: 1) определялась лишь одна (Δu_z) компонента вектора $\Delta \vec{u}$; 2) использовался слишком острый надрез, вызывающий большое локальное тепловыделение; 3) полученные данные не позволяли найти ответы на вопросы, каковы значения локальных пластических деформаций на разных этапах многоцикловой усталости и каковы механизмы усталостной деградации материалов.

Для ответа на указанные вопросы форма образцов была изменена (рис. 3), создана оптическая система, формирующая три спекловых изображения на одном кадре, проведены эксперименты на усталость сплавов 09Г2С, Д16 [23–25] и образца из оргстекла СО-120-А при разных амплитудах цикла. Регистрируя в пикселях телекамеры три зависимости \tilde{I}_i ($i = 1, 2, 3$) от числа циклов N или три зависимости $\eta_i(N)$, соответствующие одному участку поверхности, определяли число периодов Δn_i величин \tilde{I}_i или η_i . Затем по методике, изложенной

в работе [23], решая систему трех уравнений $\Delta \vec{u}(\vec{l}_s + \vec{l}_i) = \lambda \Delta n_i$ с тремя неизвестными Δu_x , Δu_y , Δu_z , определяли зависимости трех компонент вектора $\Delta \vec{u}$ от числа циклов N .

На рис. 7 для стали 09Г2С и оргстекла СО-120-А при разных циклах нагружения N приведены распределения величины η вдоль вертикальных и горизонтальных линий, проведенных в плоскости изображения образцов. Значения η определяли по фрагменту изображения, равному 3×3 px. Анализ полученных данных показал, что с самого начала опытов на многоцикловую усталость во всех образцах имеет место локализация необратимых процессов на малых участках.

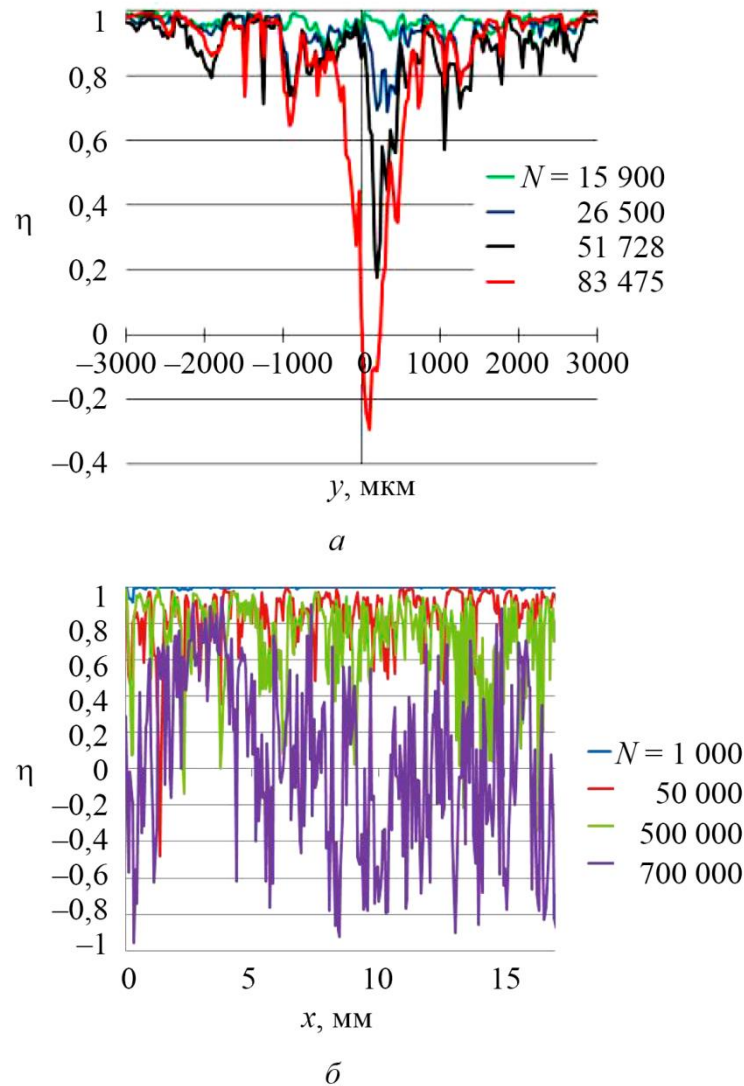


Рис. 7. Распределения η вдоль линий, проведенных в плоскости изображения образцов: сталь 09Г2С [20] (а); оргстекло СО-120-А (б)

На образцах из сплава Д16 подобная локализация была обнаружена при двойной амплитуде цикла $2\sigma_a$, большей, равной и меньшей предела текучести σ_T материала, рис. 8. На рисунке приведены распределения величины η вдоль линии, соединяющей вершины двух вырезов на изображении образца.

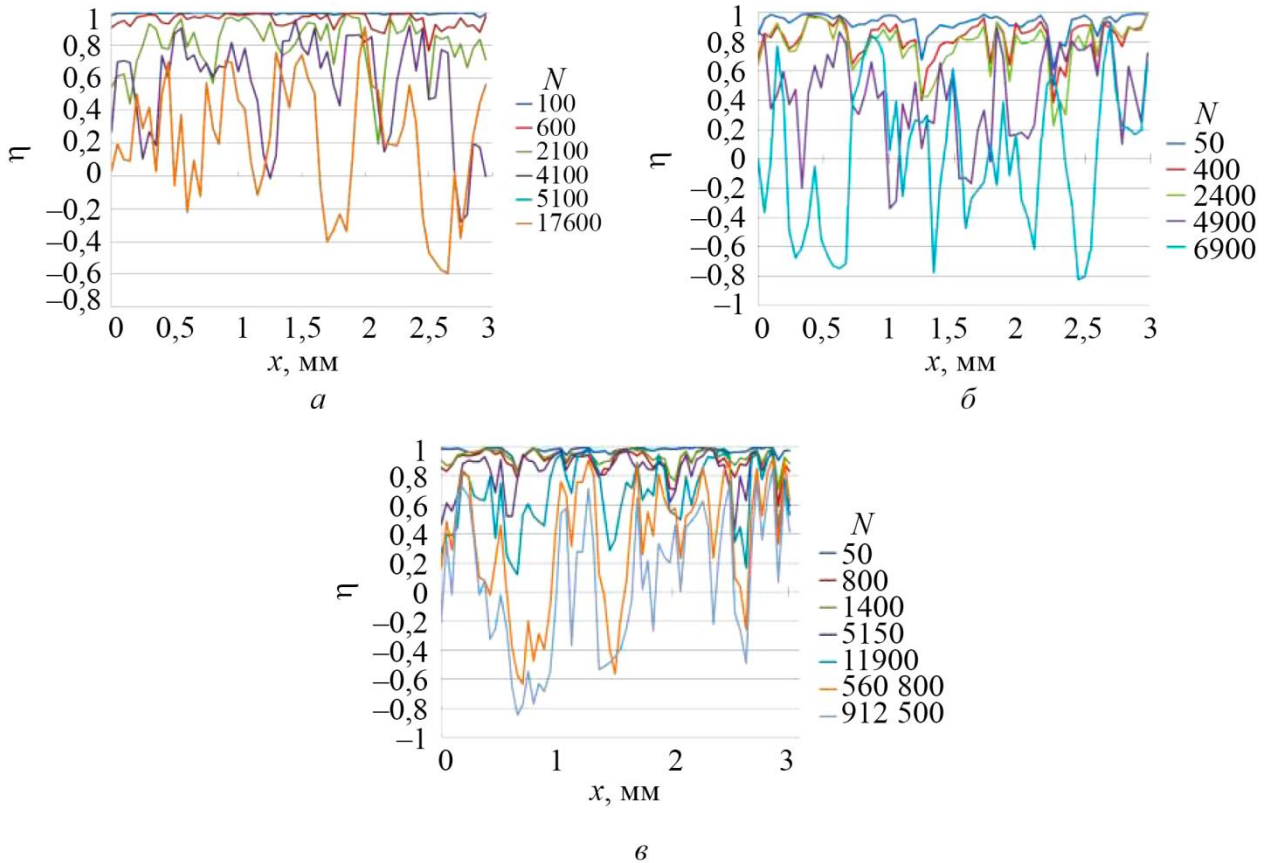


Рис. 8. Распределение величины η вдоль линии, соединяющей вершины двух вырезов на изображении образца: $\sigma_a = 1,2\sigma_T$, малоцикловая усталость (а); $\sigma_a = \sigma_T$, многоцикловая усталость (б); $\sigma_a = 0,8\sigma_T$, гигацикловая усталость (е)

Как видно из приведенных графиков, на фрагментах изображения, соответствующих локализованным деформациям, величина η постепенно становится отрицательной и достигает значения $-0,8...-0,9$. Затем на некоторых фрагментах начинаются квазипериодические изменения величины η относительно нуля.

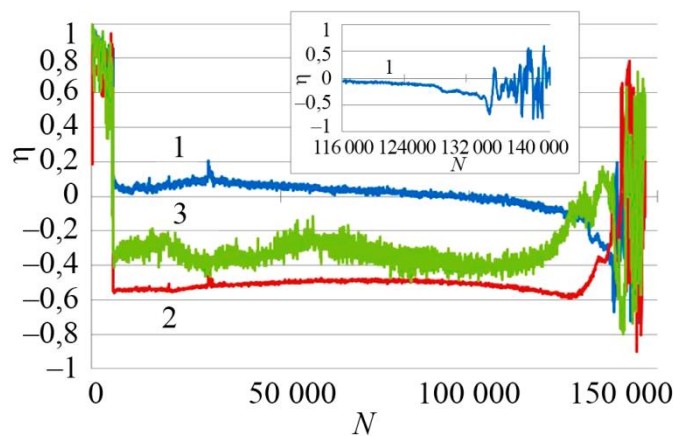


Рис. 9. Типичные зависимости η от числа циклов N для разных ракурсов наблюдения. Номера кривых соответствуют номерам спекловых изображений на рис. 3

На рис. 9 приведены типичные совмещенные зависимости величины η от числа циклов N для разных ракурсов наблюдения одного участка поверхности, взятые из статьи [24]. Кривые получены в опыте со сплавом Д16 (испытание в условиях многоциклового усталости). Номера кривых соответствуют номерам спекловых изображений образца на рис. 3. Как было указано в разделе 2, по значениям периодов величины η можно определить компоненты $\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$ вектора $\Delta \vec{u}$.

На рис. 10 для разных амплитуд цикла приведены совмещенные зависимости трех компонент вектора $\Delta \vec{u}$ от числа циклов N .

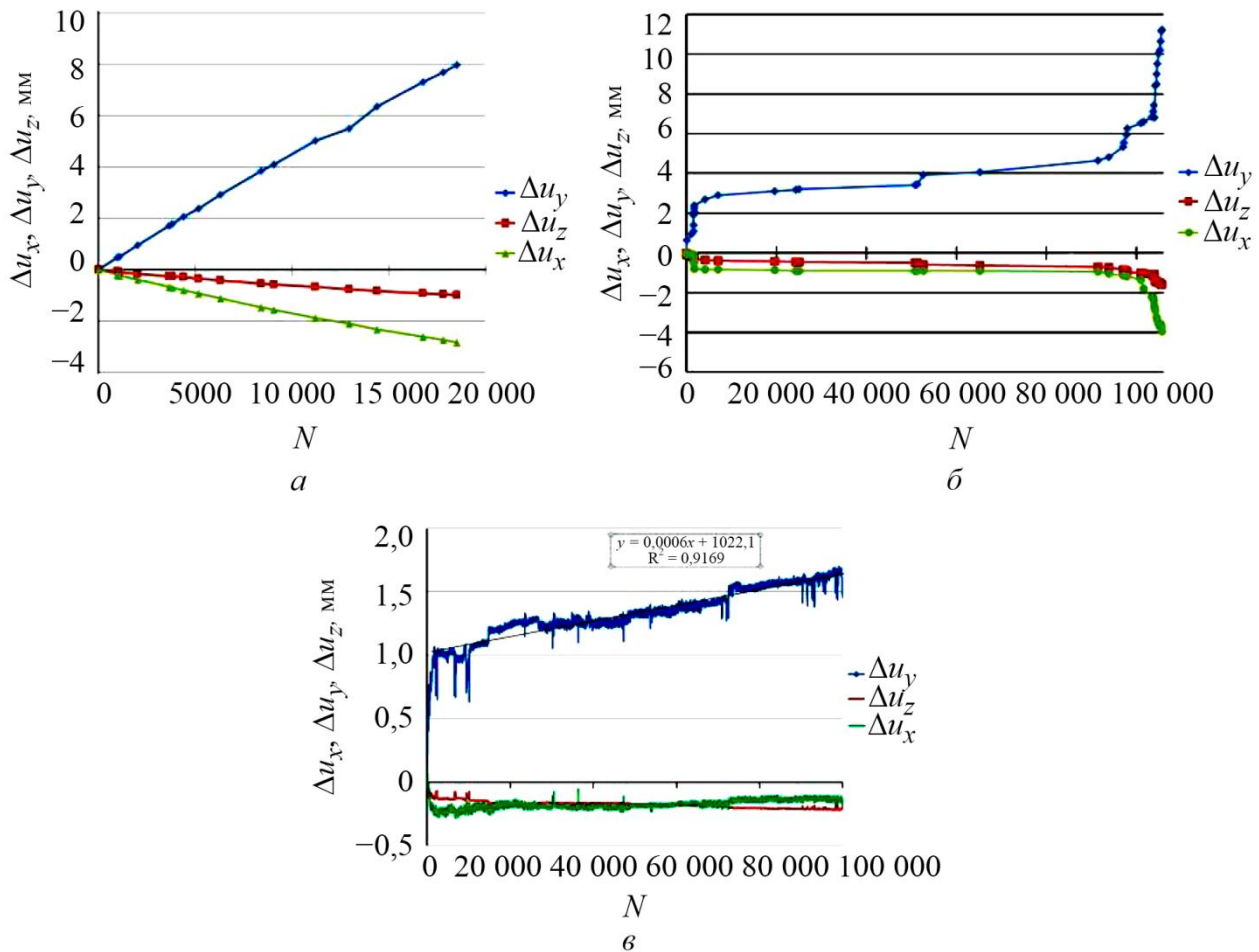


Рис. 10. Совмещенные зависимости трех компонент вектора $\Delta \vec{u}$ от числа циклов N : малоцикловая усталость (а); многоцикловая усталость (б); гигацикловая усталость (в)

Кривые на рис. 10 а и б соответствуют области зарождения трещины, а на рис. 10 в – области максимальной деформации. Из рис. 10 а и б следует, что максимальные значения компоненты Δu_y равны 8 и 11 мкм соответственно. Тогда растягивающие деформации, оцененные по формуле $\epsilon_{yy} = \Delta u_y / \Delta s$, где Δs – линейное разрешение линзы, равное 66 мкм, перед зарождением трещины достигают значений порядка 10^{-1} .

Таким образом, мы получаем, что предельные значения растягивающих деформаций при мало- и многоциклового усталости по порядку величин совпадают с аналогичной деформацией, возникающей при квазистатическом растяжении стандартных образцов. Отсюда можно предположить, что природа разрушения металлов при одно-, мало-, и многоциклового нагружении одина: разрушение металлов имеет место при достижении растягивающими деформациями значений порядка 10^{-1} . Из верхней кривой на рис. 10 в получаем, что при

$2\sigma_a = 0,8\sigma_T$ максимальная растягивающая деформация имеет порядок 10^{-2} . По линии тренда, показанной на рис. 10 в, получаем, что с достоверностью 0,92 деформация ϵ_{yy} достигает значений порядка 10^{-1} при числе циклов порядка 10^7 – 10^8 . Поэтому можно предположить, что при $2\sigma_a = 0,8\sigma_T$ образец деформировался в условиях гигацикловой усталости.

Причину локализации пластических деформаций, возникающей при усталости материалов, еще в 1930–50-е годы объяснили Е. Орован и Н. Н. Афанасьев [26, 27]. Согласно их представлениям, даже если амплитуда цикла мала по сравнению с пределом текучести, при первом полуцикле из-за разброса свойств материала найдется малый участок среды, в котором возникнут макроскопические пластические деформации. Развивая представления Е. Орована и Н. Н. Афанасьева, получаем, что при сколь угодно малой разгрузке на участке возникнут несовместные деформации (если мысленно разбить участок на малые кусочки, они не впишутся в первоначальный объем). Тогда для сохранения сплошности тела окружающая упругая среда сожмет этот участок. При полной разгрузке в конце первого цикла на участке возникнут сжимающие деформации, а рядом (для равновесия) – растягивающие деформации. В дальнейшем образуются участки, периодически деформируемые в условиях сжатия–сжатия, растяжения–сжатия и растяжения–растяжения. Появление участков, постоянно находящихся в растянутом состоянии, является ключевым моментом в понимании природы усталости материалов. На этих участках одновременно идут два необратимых процесса.

В соответствии с кинетической теорией прочности академика С. Н. Журкова [28], в среде, постоянно находящейся в растянутом состоянии, в результате хаотического теплового движения атомов и молекул, возникают разрывы межатомных связей, идет постепенное увеличение числа и объединение подобных дефектов. Одновременно возникает так называемая циклическая ползучесть материала [29], в общем случае состоящая из трех стадий (рис. 10 б).

Вначале пластическая растягивающая деформация резко возрастает по мере увеличения числа циклов, затем идет медленный ее рост. Перед зарождением трещины деформация вновь резко возрастает. Отметим, что подобные кривые в публикациях по усталости приводились и раньше [29], однако типичные предельные значения относительных деформаций были порядка 10^{-4} , редко 10^{-3} – 10^{-2} . Причиной регистрации малых деформаций было использование длинных образцов с относительно большой базой измерения (порядка 1–100 мм).

Отметим также, что при наблюдении фильма динамики спеклов нами было обнаружено, что на фрагменте изображения, соответствующем зоне зарождения трещины, наблюдается характерное «кипение» (мерцание) спеклов, начало «кипения» совпадает с началом резкого увеличения компоненты Δu_y на диаграмме $\Delta u_y(N)$ в конце опыта на многоцикловую усталость (рис. 10 б). Мерцание спеклов наблюдалось также на изображении вершины усталостной трещины при ее движении по поверхности образца. «Кипение» спеклов на диаграмме $\eta(N)$ выражается в виде высокочастотной модуляции величины η (вставка на рис. 9). Данный оптический эффект наблюдался ранее и подробно рассмотрен в публикации [30].

При испытании образцов малых, но представительных размеров на квазистатическое растяжение с использованием жесткой испытательной машины было обнаружено, что начало «кипения» точно совпадает с началом ниспадающей части равновесной диаграммы «напряжение – деформация». На разных материалах было показано, что причиной «кипения» является исчерпание механизмов пластичности материала и начало деформации с изменением объема образца, а не его формы. Если до перехода на ниспадающую часть диаграммы деформирования изменение рельефа поверхности происходило в основном за счет выхода на поверхность дефектов типа дислокаций, то на стадии деформационного разупрочнения – дефектов типа пор и трещин, которые более сильно изменяют фазы отраженных волн и величину Δu .

На рис. 11 приведен типичный трехмерный рельеф поверхности вблизи усталостной трещины, полученный в опыте на многоцикловую усталость сплава Д16. В конце опыта сформировалась усталостная трещина длиной около 1 мм. Профили, зарегистрированные прибором Wyko NT-1100 вдали от вершины трещины и на ее вершине, выявили изменение объема путем разрыхления материала микротрещинами.

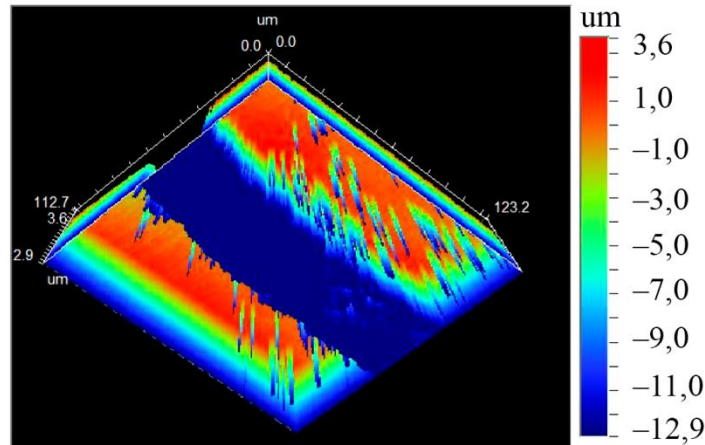


Рис. 11. Трехмерный рельеф поверхности вблизи берегов усталостной трещины, зарегистрированный интерференционным профилометром Wyko NT-1100

Анализ данных, полученных в опытах на малоцикловую усталость, показал, что на многих участках поверхности с самого начала опыта наблюдается «кипение» спеклов. На рис. 12 для сплава Д16 приведены типичные зависимости $\tilde{I}(N)$, соответствующие одному ракурсу наблюдения.

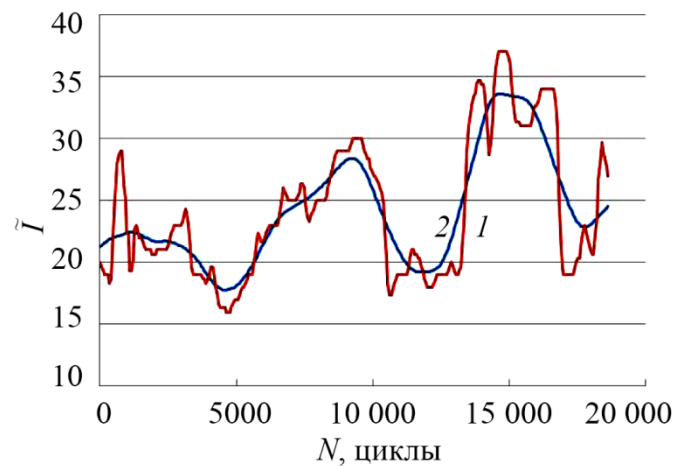


Рис. 12. Типичные кривые $\tilde{I}(N)$ для малоциклового усталости: 1 – до удаления высокочастотной составляющей; 2 – после удаления

Кривая 1 была получена до, а кривая 2 – после удаления высокочастотной составляющей методом скользящего среднего. Кривые на рис. 10 а были построены по данным, полученным после сглаживания трех зависимостей $\tilde{I}(N)$. Отсюда следует, что при малоциклового усталости из-за высокого приложенного напряжения, при первом же полуцикле на многих участках имеет место исчерпание механизмов пластичности, материал участков сразу переходит на стадию деформационного разупрочнения, возникает множество макротрещин. Окончательное разрушение образца происходит путем объединения трещин.

4.2. Количественный анализ активности живых клеток

Метод усредненных во времени спекловых изображений был использован для изучения активности живых клеток. Результаты ранних исследований автора были опубликованы в главах двух монографий [31, 32]. В этих исследованиях была разработана методика определения активности группы клеток. Она была использована для изучения функционирования клеток в норме и при некоторых внешних воздействиях. Увеличение оптической системы было выбрано так, чтобы в кадре располагалось изображение всей кюветы (рис. 13) с двумя прозрачными подложками.

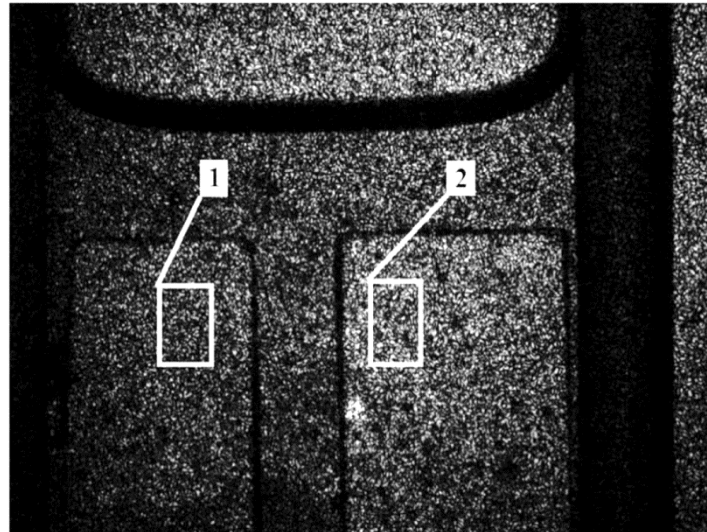


Рис. 13. Изображение кюветы с двумя прозрачными пластинками: 1 – участок пластинки с монослоем культивированных клеток; 2 – участок пластинки без клеток

Первая подложка была с монослоем культивированных клеток, вторая – без клеток. В область линейного разрешения линзы, равную 60 мкм, попадали полностью или частично 2–3 клетки. Клетки изучали в так называемом стационарном состоянии, т. е. в отсутствие их перемещения и деления.

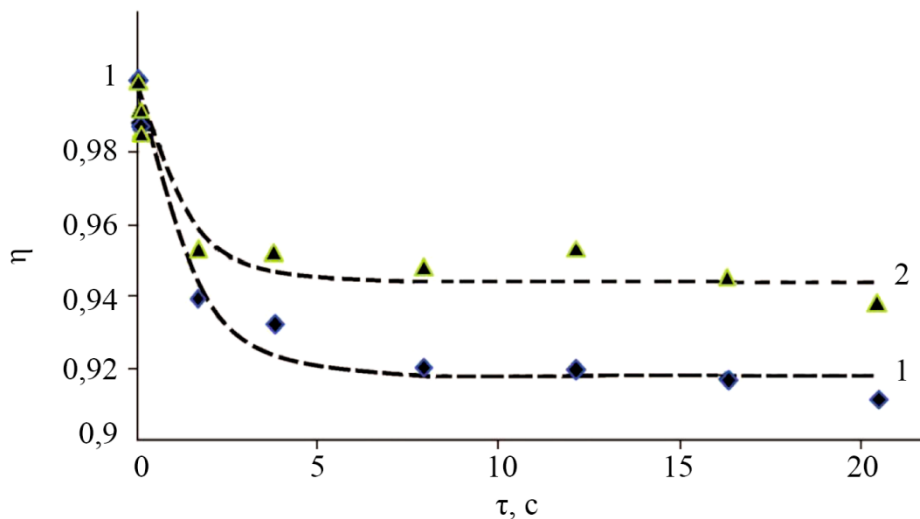


Рис. 14. Зависимости η от времени: 1 – клетки линии L-41 в питательном растворе; 2 – питательный раствор

На рис. 14 для участка с клетками и без клеток приведены типичные зависимости величины η от времени. Из приведенных кривых видно, что значения η через некоторое время выходят на постоянный уровень η^* . В соответствии с нашей теорией: 1) выход η на постоянный уровень означает стационарность процессов $\Delta u = \Delta u(t)$; 2) по значениям η^* , используя формулу (7), можно определить среднеквадратичные отклонения σ_1 и σ_2 , соответствующие клеткам в питательном растворе и раствору. Тогда в предположении, что процессы в клетках и в растворе некоррелированные, по формуле

$$\sigma = (\sigma_1^2 - \sigma_2^2)^{0.5} \quad (9)$$

можно найти среднеквадратичное отклонение σ величины Δu только для клеток.

В статье [33] на основе хорошей корреляции между σ и температурой предложено использовать величину σ в качестве параметра, характеризующего активность клеток. В этой же статье показано, что наибольшую активность клетки проявляют не при 37 °С, как считали раньше, а при 33–34 °С. В работе [31] приведены результаты применения метода для изучения развития вируса простого герпеса в культивированных клетках трех клеточных линий: L-41, Vero и ЛЭЧ-3. На рис. 15 показаны зависимости $\tilde{I}(t)$ в 3 пикселях, соответствующие питательному раствору (кривая 1), клеткам с вирусом (кривая 2) и клеткам без вируса (кривая 3).

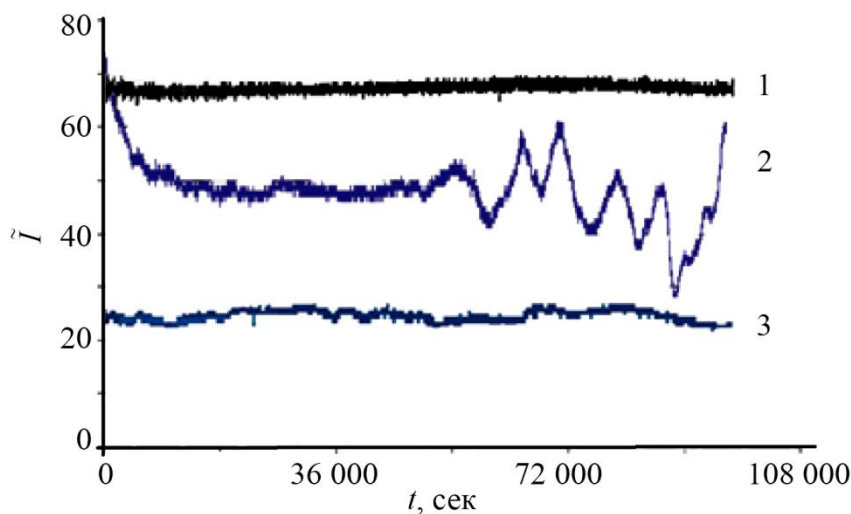


Рис. 15. Зависимости $\tilde{I}(t)$ в 3 пикселях, соответствующие питательному раствору (1), клеткам с вирусом (2) и клеткам без вируса (3)

Как видно из кривой для инфицированных вирусом клеток линии ЛЭЧ-3, в первые три часа величина \tilde{I} постепенно спадает до некоторого постоянного уровня. Это время совпадает со временем, необходимым для проникновения вируса в клетку, а затем в ядро. В течение следующих 5 часов возникают слабые флуктуации величины \tilde{I} , совпадающие с флуктуациями \tilde{I} для клеток без вируса. Этот временной интервал совпадает со временем, необходимым для выработки клеткой белков, необходимых для развития новых вирусов.

Затем идут относительно сильные квазипериодические изменения \tilde{I} . Известно, что в течение этого времени растет капсула с новыми вирусами. Показано, что зависимости $\eta(t)$, соответствующие инфицированным вирусом клеткам, для трех клеточных линий качественно совпадают. Был сделан вывод, что метод позволяет определить наличие вируса простого герпеса в клетках через 10 минут после начала измерений, что существенно меньше времени выявления герпеса традиционными методами.

Для изучения процессов, протекающих в малых участках отдельной клетки, были собраны две оптические установки, в которых оптические кюветы располагаются различным образом: горизонтально и вертикально. Поперечное разрешение использованного объектива равнялось примерно 2 мкм. Модернизированная установка была использована для изучения реакции группы клеток и разных участков отдельной клетки на введение трех веществ, оказывающих негативное влияние на клетки: дистиллированной воды, хлорида цинка и хлоргексидина.

Актуальность такой работы связана с тем, что изучение допустимых концентраций разных веществ в клетках живых систем является сложной и длительной процедурой, в которой состояние клеток оценивается либо субъективно при визуальном осмотре, либо по косвенным признакам. Проведенное исследование было первым пробным шагом в изучении возможности использования новой оптической методики для объективной оценки реакции клеток на внешние воздействия химическими веществами.

Известно, что дистиллированная вода изменяет осмотическое давление в клетке, а хлорид цинка блокирует процессы обмена веществ через клеточную мембрану. Считается, что хлоргексидин изменяет как осмотическое давление, так и обмен веществ в клетках. На рис. 16 приведены три совмещенные зависимости $\eta(t)$ для питательного раствора, для группы клеток до и после введения дистиллированной воды.

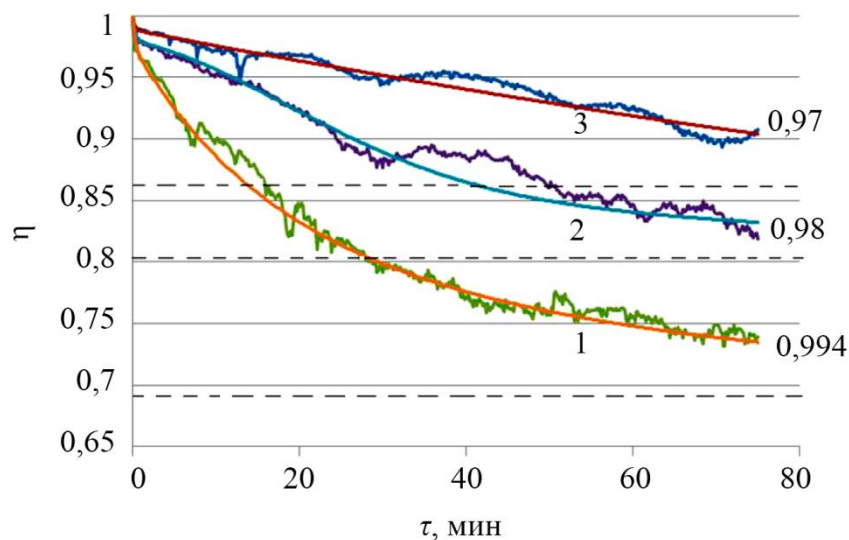


Рис. 16. Теоретические (плавные кривые) и экспериментальные зависимости $\eta(t)$ до (кривые 1) и после (кривые 2) введения дистиллированной воды в питательный раствор; 3 – питательный раствор. Вблизи кривых справа приведены коэффициенты корреляции массивов теоретических и экспериментальных данных

Аналогичные зависимости были получены для остальных двух веществ. По методике, рассмотренной выше, путем подбора значений σ_m и τ_m были совмещены теоретические и экспериментальные кривые $\eta(t)$. Вблизи кривых справа приведены коэффициенты корреляции массивов теоретических и экспериментальных данных. Видно, что имеется очень хорошее совпадение теории и эксперимента. По теоретическим значениям постоянного уровня η^* кривых $\eta(t)$ с помощью формул (7) и (9) были определены среднеквадратичные отклонения σ величин Δu в клетках до и после введения трех веществ.

На рис. 16 постоянные уровни показаны пунктирными линиями. Получено, что введение дистиллированной воды в количестве 20 % от объема кюветы в течение часа экспозиции уменьшает активность клеток на 39 % и что хлорид цинка с концентрацией 0,25 мкг/мл уменьшает значение σ на 68 %, а хлоргексидин с концентрацией 0,0125 мкг/мл – на 34 %.

Указанные результаты получены путем усреднения данных по количеству клеток от 16 до 100.

По методике, изложенной выше в теоретической части настоящей статьи, были определены зависимости $\sigma_m(\tau_m)$ на трех участках клетки размером около 2 мкм. Участки выбирались на краю клетки, в ядре и в цитоплазме примерно в середине между краем клетки и ядром. На рис. 17 для иллюстрации приведены совмещенные зависимости $\sigma_m(\tau_m)$, соответствующие краю клетки до и после введения дистиллированной воды, а также питательному раствору.

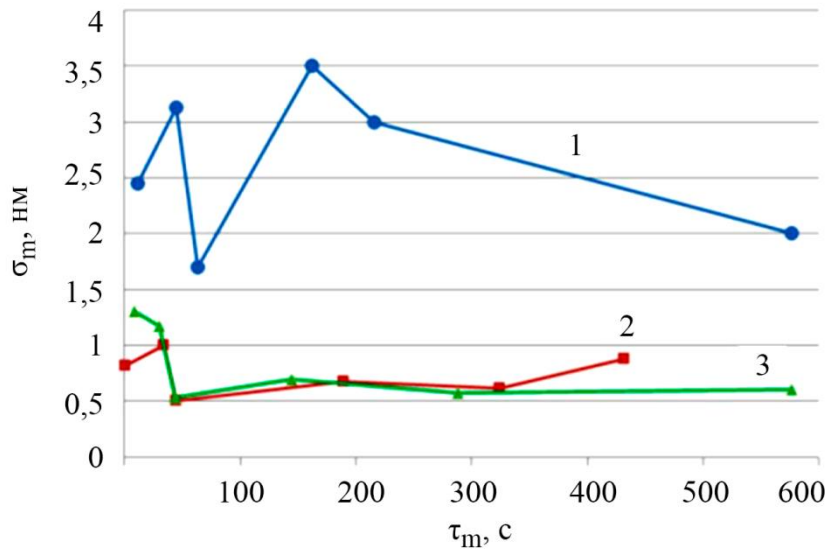


Рис. 17. Зависимости σ_m от τ_m для края клетки: 1 – до введения дистиллированной воды; 2 – после введения дистиллированной воды; 3 – питательный раствор

Анализ кривых показал, что дистиллированная вода практически полностью блокирует процессы, протекающие на выбранном участке края клетки, но слабо влияет на процессы в цитоплазме и в ядре. Хлорид цинка существенно, но не до конца блокирует процессы, протекающие на всех трех участках клетки. Хлоргексидин незначительно уменьшает активность клеточных процессов на краю клетки, но значительно – в цитоплазме и в ядре.

4. 3. Количественный анализ турбулентного потока

С использованием оптической системы, показанной на рис. 6, были зарегистрированы кадры спекловых изображений турбулентного потока воздуха. В компьютер был записан фильм всего процесса формирования потока до его стационарного состояния после включения паяльника, а также кадры воздуха до включения паяльника. На рис. 18 приведены типичные распределения величины η для воздуха, турбулентного потока в нестационарном и стационарном состояниях. На рис. 19 показана кривая $\eta(x)$, демонстрирующая горизонтальный профиль величины η в изображении стационарного потока.

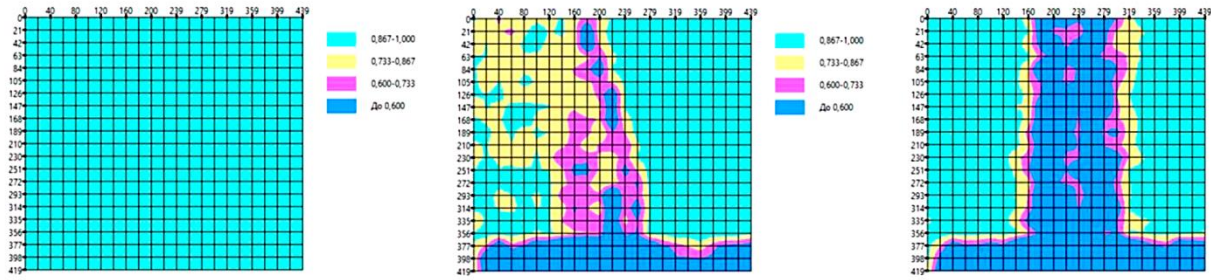


Рис. 18. Типичные распределения величины η для воздуха (слева), турбулентного потока в нестационарном (в центре) и стационарном (справа) состояниях

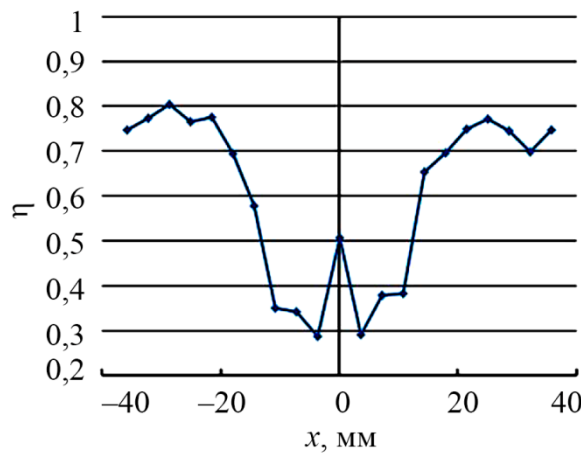


Рис. 19. Профиль величины η в изображении стационарного турбулентного потока

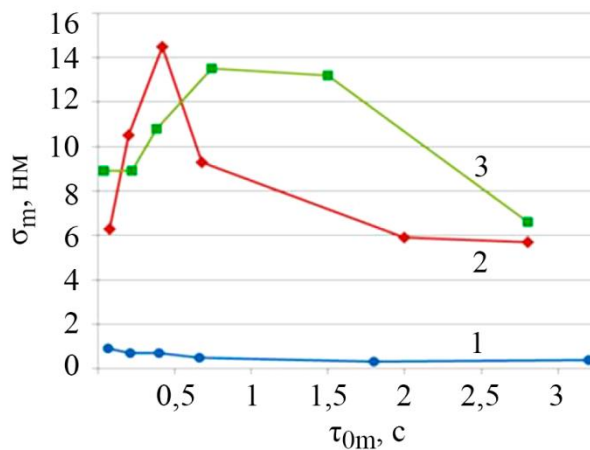


Рис. 20. Совмещенные зависимости $\sigma_m(\tau_m)$, соответствующие флуктуациям Δu :
1 – до формирования турбулентного потока воздуха; 2 – на начальной стадии формирования турбулентности; 3 – во время стационарного течения воздуха

Видно, что поток осесимметричный. Из соображения симметрии можно принять, что в центре потока величина Δu и разность показателя преломления Δn равны нулю. Тогда, полагая, что в формуле (2) величины $\langle \Delta u_1 \rangle$, $\langle \Delta u_2 \rangle$, $\rho(t_1, t_2)$ равны нулю, а $\eta(u_x) = 1$, получаем, что $\eta = \exp[-(\sigma 2\pi/\lambda)^2]$. По значению η в центре потока было найдено значение σ величины Δu , равное 35 нм.

Предположено, что значение σ линейно изменяется от периферии потока к центру, а диаметр изображения потока был разбит на участки одинакового размера. Зная значения σ и η на участках, полагая $\langle \Delta u_1 \rangle = 0$, определили значения $\langle \Delta u_2 \rangle$ участков. По ним нашли суммарное значение $\langle \Delta u \rangle$, т. е. величину $\langle \Delta u \rangle$ в центре потока, а по ней – среднее значение показателя преломления и среднюю температуру в центре потока. Это значение температуры, равное 56 °С, вполне удовлетворительно совпало со средней температурой 62 °С в центре потока, измеренной термопарой.

На разных указанных выше участках по флуктуациям $\tilde{I}(t)$ были определены функции $\sigma_m(\tau_m)$. На рис. 20 для центра потока приведены совмещенные зависимости $\sigma_m(\tau_m)$, соответствующие флуктуациям Δu воздуха до формирования турбулентного потока, на начальной стадии формирования турбулентности и во время стационарного течения. Было обнаружено, что имеется хорошая корреляция двух массивов данных: профиля $\sigma_m(x)$ для вихря с максимальным значением τ_m и профиля средней по времени температуры $T(x)$.

5. Обсуждение результатов

5.1. О механизмах усталостной деградации материалов

Выше в данном обзоре возможности новой широгрaфии проиллюстрированы на трех примерах ее использования, а именно: для выявления природы многоциклового усталости материалов, для количественной оценки реакции живых клеток на некоторые внешние воздействия и для бесконтактной диагностики параметров турбулентного течения газа.

Впервые разбросанные куски картины под названием «усталость материала» с помощью возможностей новой широгрaфии удалось собрать в единое целое. Автору, как физику, стало понятно, что собой представляет такое явление природы как многоцикловая усталость. На образцах, изготовленных из стали, алюминиевого сплава и оргстекла, показано, что с самого начала испытания на усталость начинается локализация необратимых процессов на малых участках. Причиной локализации является разброс свойств материала. Даже если амплитуда цикла мала по сравнению с пределом текучести, найдется небольшой участок, на котором возникает пластическая деформация. Тогда при полной разгрузке появляется малая область, в которой возникают растягивающие деформации, и эта область при дальнейших циклических деформациях всегда будет находиться в растянутом состоянии. Увеличение растягивающих деформаций в таких областях происходит по механизму циклической ползучести. Как было указано выше, такая особенность свойств материалов была предсказана еще в 1930-е годы [26], однако экспериментальное ее подтверждение получено с использованием новой широгрaфии [23].

На заключительной стадии усталости механизмы ползучести исчерпываются. Далее материал переходит на стадию деформационного разупрочнения, на которой необратимые деформации увеличиваются путем изменения не формы, а объема среды. Длительность этой стадии составляет 8–10 % от полного времени до зарождения трещины (в наших экспериментах это составляет примерно 10^4 циклов). Поскольку изменение объема происходит вследствие генерации дефектов типа пор и трещинок, размер которых значительно больше размеров дефектов типа дислокаций, генерирующихся на стадии ползучести, то в сопряженной области возникает «кипение» спеклов. Данный эффект возникает перед зарождением макротрещины, и его можно использовать для принятия мер по предотвращению разрушения детали.

Трещина в металлических образцах зарождалась в области размером ≈ 10 мкм при относительных деформациях $\approx 10^{-1}$. Как показывали датчики перемещения захватов испытательной машины, в пределах двойной амплитуды цикла относительные и абсолютные перемещения точек поверхности измеряются микронами, поэтому деформации порядка 10^{-1} вынуждены локализоваться в области ≈ 10 мкм.

Полученный результат полностью согласуется с концепцией разрушения, разработанной выдающимся российским механиком С. Д. Волковым [34]. Согласно этой концепции, перед разрушением материал неизбежно переходит на стадию деформационного разупрочнения, на которой его сопротивление деформированию (максимально выдерживаемое напряжение) постепенно уменьшается до нуля, возникает макроразрушение. После зарождения трещины ее вершина находится в условиях сжатия–сжатия, а участок впереди нее деформируется в условиях растяжения–растяжения. Поэтому на этом участке должна возникнуть циклическая ползучесть материала, переходящая в деформационное разупрочнение. Действительно, наблюдение фильма спекловых изображений показало, что впереди изображения растущей трещины всегда наблюдается «кипение» спеклов.

Как указано в статье [25], невозможность регистрации многоциклового усталости современными методами неразрушающего контроля объясняется большой базой измерения (размерами области усреднения), а именно 1–100 мм. В той же статье [25] дано обоснование тому, что для регистрации гигантских эффектов, возникающих в малых областях объекта, необходимо создавать методы и приборы неразрушающего контроля нового поколения, имеющие датчики матричного типа с размером ячеек ≈ 10 мкм.

В проведенных исследованиях были определены лишь необратимые деформации. В принципе, новый широгрaф можно настроить для определения полей упругих деформаций. Диагностика упругих циклических деформаций в промежутках между участками необратимых деформаций является предметом дальнейших исследований.

5.2. О перспективах создания спекл-томографа функций живой клетки

В настоящее время новая широгрaфия опробована на живых культивируемых клетках трех клеточных линий. Были изучены особенности функционирования клеток в норме, при изменении температуры среды, при заражении вирусами простого герпеса [35] и вируса Коксаки [36], а недавно и при введении токсичных веществ. Как было показано выше, найден параметр σ , характеризующий активность группы клеток или малого участка отдельной клетки, разработана методика, позволяющая оценить относительный вклад в значение σ процессов, протекающих с разной скоростью.

Недостатком методики в настоящее время является усреднение данных по толщине клетки. Контроль в реальном времени процессов, протекающих на любом участке клетки размером около 2 мкм, возможен. Теория спекл-томографа, позволяющая осуществить данный контроль, опубликована в статье [16]. Создание лабораторного варианта спекл-томографа функций клетки является предметом дальнейших исследований.

5.3. Спекл-диагностика турбулентного течения

Судя по литературе, полностью бесконтактная диагностика турбулентных течений является сложной, не до конца решенной задачей. Проведенные эксперименты показали перспективность использования новой широгрaфии для диагностики турбулентных потоков. Наиболее просто данная задача может быть решена для осесимметричных течений. Если необходимо определять распределение лишь среднего значения и дисперсии показателя преломления (плотности, температуры) в факеле потока, то достаточно регистрировать на одном кадре два спекловых изображения на разных длинах волн. Тогда в выражении (2) можно разделить экспоненту от косинуса и методом Шардина, разбивая область потока на концентрические зоны, вычислить распределение указанных параметров по радиусу потока. Для диагностики неосесимметричных потоков и определения большего числа параметров необходимо использовать многоракурсное наблюдение и/или источник многих когерентных волн разной длины. Технически это возможно, такая модернизация метода может быть предметом дальнейших исследований.

6. Заключение

Создан новый вариант сдвиговой спекл-интерферометрии, который при прочих равных условиях по чувствительности и пространственному разрешению на два порядка превосходит старый вариант широгрaфии.

Использование новой широгрaфии позволило выяснить причину нерегистрации многоциклово́й усталости традиционными методами диагностики и выявить механизмы усталостной деградации трех материалов. Показано, что с самого начала усталости возникает локализация необратимых процессов в малых зонах, приводящая к появлению участков, постоянно находящихся в растянутом состоянии. На этих участках растягивающие деформации сначала растут по механизму циклической ползучести, а затем – вследствие изменения объема (деформационного разупрочнения) среды. В металлах трещина зарождается на участке размером порядка 10 мкм при предельных растягивающих деформациях порядка 10^{-1} .

Применение метода для изучения живых клеток позволило выявить параметр, характеризующий активность группы клеток и участков клетки размером около 2 мкм. Изучено изменение этого параметра при увеличении температуры, внедрении в клетку двух типов вируса и трех токсичных веществ.

Впервые продемонстрировано применение метода для количественного анализа турбулентного потока на начальной стадии и стадии установившегося течения. Рассмотрены перспективы использования метода для определения полей среднего значения, дисперсии и времени релаксации показателя преломления (плотности, температуры) для осесимметричных и неосесимметричных течений.

Для оценки остаточного ресурса деталей, эксплуатируемых в условиях многоциклово́й усталости, предложено создавать методы контроля нового поколения, базирующиеся на датчиках матричного типа с размером ячеек порядка 10 мкм.

В настоящее время недостатком метода является определение физических величин, характеризующих процессы, протекающие в живых клетках, и турбулентные потоки, путем усреднения данных по толщине этих объектов. Предложены варианты модернизации метода для послойной диагностики указанных объектов.

Благодарность

Автор благодарит своих коллег Каманцева И. С., Друкаренко Н. А., Павлова П. В., Михайленко Ю. А., Белоконову Н. А., Сергеева А. Г., Голицыну К. О., Наронову Н. А., аспирантов и студентов Мызнова К. Е., Наумова К. В., а также ушедшего из жизни Бахарева А. А. за их активное участие в проведенных исследованиях. Автор благодарит также Дружинина А. В. и Евстигнеева В. В. за ценные замечания, способствующие улучшению данной статьи. Исследования были проведены в рамках программ исследования № 124020700063 ИМАШ УрО РАН, частично поддержаны программой развития УрФУ в рамках программы Приоритет-2030.

Литература

1. Власов Н. Г., Пресняков Ю. П. Упрощенный вариант интерферометрии сдвига // Приборы и техника эксперимента. – 1973. – № 5. – С. 199–201.
2. Leendertz J. A., Butters J. N. An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1973. – No. 6. – P. 1107–1110. – DOI: 10.1088/0022-3735/6/11/019.
3. Hung Y. Y. Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing // Optical Engineering. – 1982. – Vol. 21 (3). – P. 391–395. – DOI: 10.1117/12.7972920.
4. URL: <https://www.dantecdynamics.com/solutions/laser-shearography-ndt>

5. ASTM Standard Practice E–2581–7. Shearography of polymer matrix composites, sandwich core materials and filament-wound pressure vessels in aerospace application.
6. Yang L., Xie X. Digital Shearography. New Developments and Applications. – Washington : SPIE Press, 2016. – 226 p.
7. Steinchen W. Digital Shearography. Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry. – Washington : SPIE Press, 2003. – 312 p.
8. Контроль коррозионных повреждений элементов и узлов авиационных конструкций методом электронной широгрaфии / Л. М. Лобанов, В. А. Знова, В. А. Пивторак, И. В. Киянец // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2015. – № 2. – С. 5–9.
9. Бурков М. В. Разработка устройства цифровой широгрaфии // Главный механик. – 2023. № 4. – DOI: 10.33920/PRO-2-2304-06.
10. Investigation of thermomechanical effects of lighting conditions on canvas paintings by laser shearography / M. K. Meybodi, I. Dobre, P. Klausmeyer, E. J. Harrington, C. Furlong // SPIE, Interferometry XVI, Applications, September 13, 2012 : proceedings. – 2012. – Vol. 8494. – P. 84940A. – DOI: 10.1117/12.958089.
11. Theory and calibration of speckle dynamics of phase object / A. P. Vladimirov, A. V. Druzhinin, A. S. Malygin, K. N. Mikitas // SPIE, Saratov Fall Meeting 2011, Optical Technologies in Biophysics and Medicine XIII, November 27–30, 2012 : proceedings. – 2012. – Vol. 8337. – P. 83370C-1–83370C-15. – DOI: 10.1117/12.924800.
12. Vladimirov A. P. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media // Optical Engineering. – 2016. – Vol. 55 (12). – P. 1217–1227. – DOI: 10.1117/1.OE.55.12.121727.
13. Vladimirov A. P. Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue: theory and some experiments // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1740. – P. 040004-1–040004-4. – DOI: 10.1063/1.4952663.
14. Vladimirov A. P. Dynamic speckle-interferometry of micro-displacements // AIP Conference Proceedings. – 2012. – Vol. 1457. – P. 459–468. – DOI: 10.1063/1.4730589.
15. Assessing fatigue damage in organic glass using optical methods / A. P. Vladimirov, I. S. Kamantsev, N. A. Drukarenko, V. N. Trishin, L. A. Akashev, A. V. Druzhinin // Optics and Spectroscopy. – 2019. – Vol. 127. – P. 943–953. – DOI: 10.1134/S0030400X19110286.
16. Владимиров А. П. К спекл-томографии функций живой клетки // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63 (8). – С. 655–664.
17. Владимиров А. П., Друкаренко Н. А., Михайленко Ю. А. Спекл-диагностика необратимых процессов, протекающих в некоторых живых и технических объектах // Оптические методы исследования потоков, 28 июня–02 июля 2021 : труды XVI международной научно-технической конференции. – М. : Издательство «Перо», 2021. – С. 51–62.
18. Каманцев И. С., Владимиров А. П., Бородин Е. М. Исследование процессов зарождения трещин при многоциклового усталости трубной стали 09Г2С с использованием метода спекл-интерферометрии // Вестник ТГУ. – 2013. – Т. 18 (4). – С. 1881–1882.
19. Изучение процесса зарождения усталостной трещины по изменению рельефа поверхности образца и ее спекловых изображений / А. П. Владимиров, И. С. Каманцев, А. В. Ищенко, В. Е. Веселова, Э. С. Горкунов, С. В. Гладковский, С. М. Задворкин // Деформация и разрушение материалов. – 2015. – № 1. – С. 21–26.
20. Use of dynamic speckle interferometry for contactless diagnostics of the nucleation of a fatigue crack and determining its growth rate / A. P. Vladimirov, I. S. Kamantsev, V. E. Veselova, E. S. Gorkunov, S. V. Gladkovskii // Technical Physics. – 2016. – Vol. 61 (4). – P. 563–568. – DOI: 10.1134/S106378421604023X.
21. Владимиров А. П., Поносов Ю. С. Применение динамики спеклов и комбинационного рассеяния света для изучения особенностей разрушения трубной стали при многоциклового усталости // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 3. – С. 138–146. – DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.13.

22. Nucleation and initiation of cracks under high-cycle fatigue in the EP679 maraging steel / A. P. Vladimirov, I. S. Kamantsev, N. A. Drukarenko, S. V. Gladkovsky, A. B. Bukhvalov, Yu. V. Khudorozhkova, E. R. Cheremitsina, E. S. Gorkunov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2176. – P. 030019. – DOI: 10.1063/1.5135143.
23. Vladimirov A. P., Drukarenko N. A., Myznov K. E. Using speckle images for determining the local plastic strains arising at high-cycle fatigue of 09G2S steel // Technical Physics Letters. – 2021. – Vol. 47 (8). – P. 773–776. – DOI: 10.1134/S1063785021080137.
24. Владимиров А. П. Динамическая спекл-диагностика деформаций, повреждений и ресурса деталей машин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2023. – Т. 10 (4). – С. 3–7. – DOI: 10.24892/RIJE/20230401.
25. Comparison of applications results of two speckle methods for study multi-cycle fatigue of structural steel / A. P. Vladimirov, I. S. Kamantsev, N. A. Drukarenko, K. E. Myznov, K. V. Naumov // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. – 2024. – Vol. 24 (1). – P. 20–29. – DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-20-29.
26. Orowan E. Theory of the fatigue of metals // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. – 1939. – Vol. 171 (944). – P. 79–106. – DOI: 10.1098/rspa.1939.0055.
27. Афанасьев Н. Н. Статистическая теория усталостной прочности металлов. – Киев : Изд-во Акад. наук Укр. ССР, 1953. – С. 82–88.
28. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник Академии наук СССР. – 1968. – С. 46–52.
29. Трощенко В. Т. Усталость и неупругость металлов. – Киев : Наукова думка. – 1971. – 268 с.
30. Владимиров А. П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 241 с.
31. Vladimirov A. P., Bakharev A. A. Dynamic speckle interferometry of thin biological objects: theory, experiments, and practical perspectives // Optical Interferometry. – London : IntechOpen, 2018. – Ch. 6. – P. 103–141. – DOI: 10.5772/66712.
32. Vladimirov A. P. Dynamic speckle interferometry of technical and biological objects // Interferometry – Recent Developments and Contemporary Applications. – IntechOpen, 2018. – P. 1–18. – DOI: 10.5772/intechopen.81389.
33. Studying of cell culture reaction to temperature change by dynamic speckle interferometry / Yu. A. Mikhailova, A. P. Vladimirov, A. A. Bakharev, A. G. Sergeev, I. A., Novosyolova, D. I. Yakin // Russian Journal of Biomechanics. – 2017. – Vol. 21 (1). – P. 56–64. – DOI: 10.15593/RJBIOMEN/2017.1.06.
34. Волков С. Д. Функция сопротивления материалов и постановка краевых задач механики разрушения. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1986. – 65 с.
35. Retrofit device for real-time evaluation of metabolic activity in herpes virus infected cell cultures / A. P. Vladimirov, A. S. Malygin, Yu. A. Mikhailova, A. A. Bakharev, A. P. Poryvaeva // Bio-medical Engineering. – 2014. – Vol. 48 (14). – P. 178–181. – DOI: 10.1007/s10527-014-9447-9.
36. Vladimirov A. P., Mikhailova Yu. A., Drukarenko N. A. Dynamic speckle interferometry of technical and thin biological objects // SPIE, VII International Conference on Speckle Metrology Speckle, 2018, September 7, 2018 : proceedings. – 2018. – Vol. 10834. – P. 1083427-1–1083427-10. – DOI: 10.1117/12.2319729.