

# Перспективы применения спекл-фотоники процессов, протекающих в живой и неживой материи

*А. П. Владимиров*

Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Уральский федеральный университет имени Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Екатеринбургский НИИ вирусных инфекций ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора,

Екатеринбург, Россия

Рассмотрены теория, экспериментальное обоснование и перспективы использования метода усредненных во времени спекловых изображений для количественного анализа необратимых и обратимых процессов, протекающих в ряде живых и неживых объектов. Обсуждаются перспективы создания и применения: оптических и неоптических датчиков нового поколения матричного типа для неразрушающего контроля деталей и элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях многоциклового усталости; спекл-томографов функций живой клетки и турбулентных потоков, позволяющих в режиме реального времени контролировать необратимые процессы в областях минимального размера порядка 1 мкм; методов численного расчета напряженного-деформированного состояния деталей на стадии зарождения, старта и движения трещины; методов оценки остаточного ресурса элементов конструкций.

*Ключевые слова:* Фотоника, Спеклы, Изображение, Живые клетки, Многоцикловая усталость, Турбулентность, Томография, Реальное время.

*Цитирование:* **Владимиров, А. П.** Перспективы применения спекл-фотоники процессов, протекающих в живой и неживой материи / А. П. Владимиров // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 421–429.

## Введение

В данной публикации перспективы использования спекл-фотоники рассмотрены на примере необратимых процессов, протекающих в живых клетках, при многоциклового усталости стали и в турбулентном потоке нагретого воздуха.

В настоящее время имеются томографы, обеспечивающие визуализацию структур клетки, но отсутствуют методики, позволяющие на малых участках внутри клетки в режиме реально времени определять параметры, характеризующие функционирование (функции) живой клетки.

Согласно разным оценкам, от 50 до 80% деталей техники разрушаются вследствие их многоциклового усталости [1–3]. Несмотря на большую историю изучения и многочисленные публикации по этой теме, отсутствуют методы оценки и расчета остаточного ресурса элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях многоциклового усталости, которые удовлетворяли бы требованиям инженерной практики [3].

Трехмерный когерентно - оптический количественный анализ потоков жидкостей и газов детально разработан для ламинарных потоков [4], однако при его использовании для изучения турбулентных потоков возникают большие методические трудности.

Целью статьи является демонстрация возможностей метода усредненных во времени спекловых изображений в решении указанных выше проблем и обсуждение перспектив практического его применения.

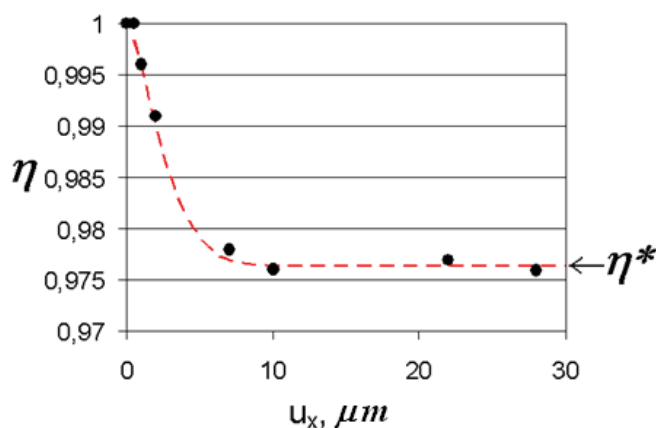
## 1. Теория метода

Теория метода для отражающих объектов была опубликована в статьях [5,6], а для прозрачных объектов, расположенных вблизи случайно-фазового экрана в [7,8]. Предполагалось, что в общем случае объекты одновременно перемещаются поступательно, совершают периодические движения, центры рассеяния отражающего объекта случайным образом перемещаются в пространстве, а показатель преломления прозрачного объекта случайным образом изменяется во времени. Определяемой физической величиной являлась разность оптических путей  $\Delta u$  двух волн, распространяющихся на среднем, характерном расстоянии  $\Delta s$  в пределах области, размер которой равен линейному разрешению линзы  $2a_s$ . На основе аналитического решения задачи о динамике спеклов в плоскости изображения указанных выше объектов были получены выражения для средней по времени интенсивности излучения  $\tilde{I}$  в произвольной точке плоскости изображения и для нормированной временной автокорреляционной функции  $\eta(t_1, t_2)$  этой интенсивности, где  $t_1$  и  $t_2$  - начальный и текущий моменты времени. Согласно [5,7] в формуле для  $\tilde{I}$  величина  $\tilde{I}$  является функцией среднего по времени экспозиции значения  $\Delta u$ , а также дисперсии  $\sigma_{\Delta u}^2$  величины  $\Delta u$ . В формуле для  $\eta(t_1, t_2)$  величина  $\eta$  зависит средних по ансамблю статистически подобных объектов значений  $\langle \Delta u_1 \rangle$  и  $\langle \Delta u_2 \rangle$  величины  $\Delta u$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно, дисперсий  $k_{11}$  и  $k_{22}$  величин  $\langle \Delta u_1 \rangle$  и  $\langle \Delta u_2 \rangle$  соответственно, а также от нормированной временной автокорреляционной функции  $\rho(t_1, t_2)$  величины  $\Delta u$ . Отметим, что в статье [9] для стационарного процесса  $\Delta u(t)$  аналитически была получена формула, связывающая спектральные функции флуктуаций величин  $\Delta u$  и  $\tilde{I}$ . Для отражающего объекта  $\Delta u = \Delta \vec{u}(\vec{l}_s + \vec{l})$ , а для прозрачного объекта  $\Delta u = \Delta n \times L$ , где  $\Delta \vec{u}$  - вектор относительного перемещения двух точек поверхности, расположенных на расстоянии  $\Delta s$ ,  $\vec{l}_s, \vec{l}$  - единичные векторы, направленные от центра области размером  $2a_s$  к источнику света и к центру линзы соответственно,  $\Delta n$  разность показателя преломления на базе  $\Delta s$ ,  $L$  - толщина объекта.

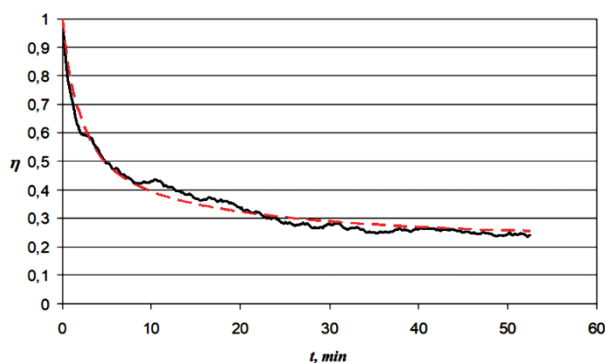
В статьях [6,8] теория, представленная в [5,7], была модернизирована. В статье [8] формулы для  $\tilde{I}$  и  $\eta(t_1, t_2)$  были получены в предположении, что величина  $\Delta u$  является суммой  $M$  независимых величин. Было показано, что значения  $\langle \Delta u_1 \rangle$ ,  $\langle \Delta u_2 \rangle$ ,  $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $\rho(t_1, t_2)$ , соответствующие величине  $\Delta u$ , являются суммами аналогичных величин, соответствующих слагаемым  $\Delta u_m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) величины  $\Delta u$ . В статье [6] для малых по сравнению с длиной

волны значений  $\Delta u_m$  предложена процедура выделения из флуктуаций  $\tilde{I}$  вкладов, соответствующих величинам  $\Delta u_m$ , получены формулы для определения дисперсии  $\sigma_m^2$  и времени релаксации  $\tau_{0m}$  величины  $\Delta u_m$ .

На рис.1 и 2 приведены теоретические и экспериментальные зависимости  $\eta(t_1, t_2)$ , полученные в [9] для прозрачной шероховатой пластины, и в [8] для живых клеток, осажденных на прозрачную пластину сразу после их размораживания. На рис.1 различие теоретических и экспериментальных данных было в пределах 2 %, значения параметра шероховатости  $R_a$ , найденного по постоянному уровню  $\eta^*$  величины  $\eta$  и профилометром, отличались на 5%. На рис.2 коэффициент корреляции массивов теоретических и экспериментальных данных равнялся 0,99. Теоретическая кривая была получена в предположении, что на изменении величины  $\Delta u$  влияют 4 фактора: процессы в питательном растворе, внутриклеточные процессы, контакты клеток, их хаотическое движение. Отметим также, что в статьях [5] и [10] показано, что теоретические и экспериментальные значения компоненты вектора  $\Delta \vec{u}$  и показателя преломления хорошо совпадают, если принять, что база измерения  $\Delta s$  равна линейному разрешению линзы  $2a_s$ .



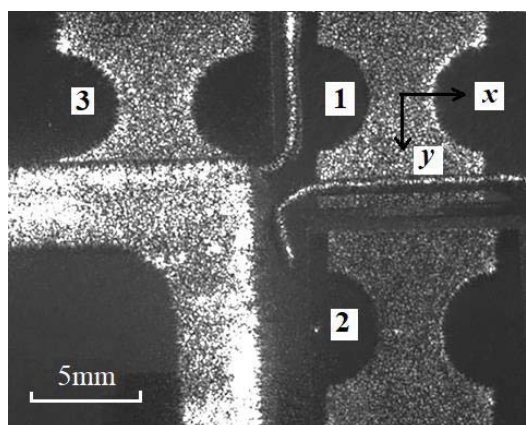
**Рис. 1.** Теоретическая (пунктирная линия) и экспериментальная (точки) зависимости величины  $\eta$  от перемещения  $u_x$  прозрачной пластины [9]



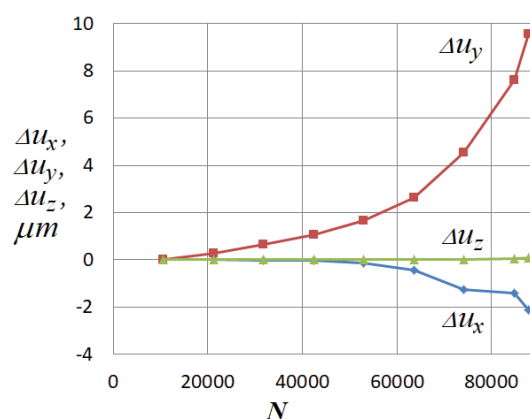
**Рис. 2.** Теоретическая (пунктир) и экспериментальная (непрерывная кривая) нормированные временные автокорреляционные функции, полученные в опыте с живыми клетками [8]

## 2. Эксперименты

На рис. 3а приведены три спекловых изображения одного образца, зарегистрированные на одном кадре под тремя ракурсами наблюдения, детали опыта приведены в статье [11]. Образец из низкоуглеродной стали с двумя выточками радиусом 2,5 мм был испытан на многоцикловую усталость на машине резонансного типа. По трем квазипериодическим изменениям величины  $\tilde{I}$ , зарегистрированным в трех пикселях, соответствующих зоне зарождения трещины, были построены зависимости трех компонент вектора  $\Delta\vec{u}$  от числа циклов нагружения  $N$ , рис.3б. Из рис.3б следует, что предельное значение растягивающей деформации, найденное как отношение  $\Delta u_y/\Delta s$ , имеет порядок  $10^{-1}$ , т.е. по порядку величин совпадает с предельной деформацией, возникающей при квазистатическом растяжении стандартных образцов на разрыв. По рассмотренной в теории методике нами были построены зависимости  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для необратимых процессов, протекающих на стадии накопления повреждений при многоциклового усталости стали 09Г2С, в группе живых культивированных клеток и в разных частях отдельной клетки линии L-41, в турбулентном потоке нагретого воздуха.



а) при спекловых изображения образца



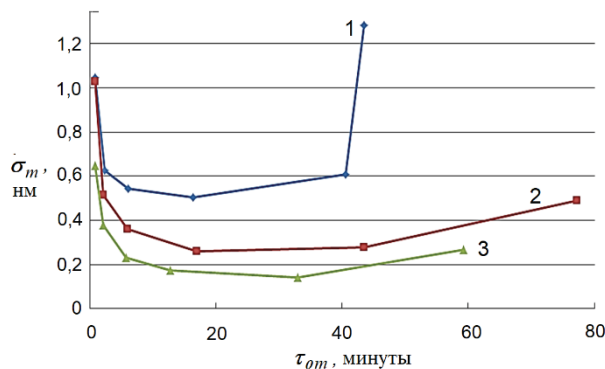
б) зависимости компонент  $\Delta\vec{u}$  от числа циклов  $N$

**Рис. 3.** Спекловые изображения образца под тремя ракурсами наблюдения (а) и зависимости трех компонент вектора  $\Delta\vec{u}$  от числа циклов  $N$  нагружения (б)

Обнаружено, что на стадии накопления повреждений в стали 09Г2С протекают три процесса с разными временами корреляции величин  $\Delta u_m$  ( $m = 1, 2, 3$ ). При фиксированных  $\tau_{0m}$  зависимости  $\sigma_m$  от числа циклов  $N$  качественно согласуются с особенностями накопления вновь образующихся микротрещин, выявленными в работе [12].

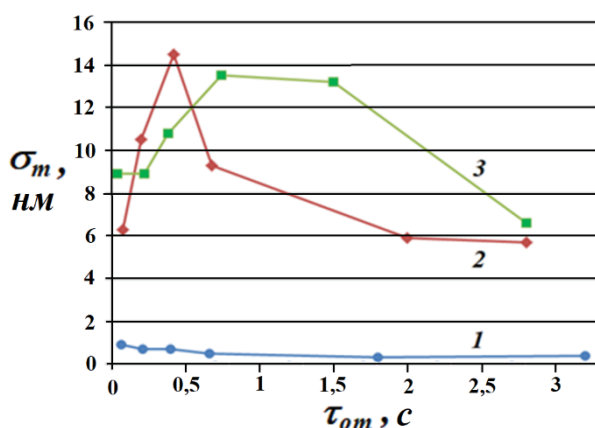
По зависимостям  $\sigma_m(\tau_{0m})$ , зарегистрированным в группе из 16 клеток до и после введения хлоргексидина, было обнаружено, что после добавления токсичного вещества исчезают процессы со временами релаксации от 8 до 60 минут. В тоже время на разных участках отдельной взятой клетки процессы с указанными временами корреляции частично сохраняются (рис.4). На рис.4 приведены совмещенные зависимости  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для питательного

раствора, участка размером 2×2 мкм в цитоплазме клетки до и после введения хлоргексидина.



**Рис. 4.** Совмещенные кривые  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для питательного раствора (3), клеток в питательной среде до (1) и после (2) введения хлоргексидина

На рис. 5 приведены совмещенные зависимости  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для воздуха до появления турбулентного потока, на стадии формирования турбулентности и в стационарном турбулентном потоке. Турбулентное течение формировали нагретым паяльником, закрепленным вертикально, флуктуации цифровых значений  $\tilde{I}$  регистрировали в центре потока. Получено вполне удовлетворительное совпадение средней по диаметру потока температуры, найденной по величине  $\eta(56^\circ\text{C})$  и измеренной термопарой ( $62^\circ\text{C}$ ). Обнаружена также хорошая корреляция профиля температуры потока и профиля  $\sigma_m$  для  $\Delta u_m$  с максимальным временем корреляции.



**Рис. 5.** Совмещенные зависимости  $\sigma_m(\tau_{0m})$  для воздуха (1), на стадии формирования турбулентности (2) и в стационарном турбулентном потоке (3)

### Обсуждение результатов и перспектив применения метода

После публикации [11] можно констатировать, что впервые в мире создан когерентно-оптический метод, позволяющий определять деформации, вызванные изменением формы или объема газов, жидкостей и твердых тел живой или неживой материи на минимальной базе порядка 1 мкм. В методе, по существу, используется сдвиговый интерферометр, в

котором отсутствует оптика, создающая сдвиг волн. Высокая чувствительность метода, позволяющая определять величину  $\Delta u$  с точностью порядка 1 нм с использованием обычных телекамер и 0,1 нм малощумящими фотоприемниками, основана на эффекте спонтанной синхронизации фаз волн в спекл-полях [13,14,10]. Эффект синхронизации фаз  $K$  волн возникает при наличии градиента перемещения (отражающий объект) или показателя преломления (прозрачная среда), интерференция  $K$  волн эквивалентна интерференции двух волн с новой длиной волны  $\lambda_0 = \lambda/K$ .

Совпадение предельной локальной деформации в области зарождения усталостной трещины с предельной деформацией образцов при их квазистатическом растяжении имеет важное научное и практическое значение. Становится ясно, какова физическая причина локализации деформаций и почему существующие методы неразрушающего контроля не обнаруживают многоцикловую усталость. При испытании на многоцикловую усталость образцов типичных размеров возникают абсолютные и относительные перемещения точек поверхности порядка 1 мкм. Тогда в зоне зарождения трещины деформация порядка 0,1 должны локализоваться в области порядка 10 мкм. Существующие методы контроля имеют базу измерения в лучшем случае порядка 1 мм, обычно это сантиметры, а то и дециметры. Кроме того, при использовании малобазовых датчиков необходимо еще и попасть в зону зарождения трещины, что очень маловероятно. Поэтому необходимо создавать датчики неразрушающего контроля нового поколения матричного типа с размерами чувствительных ячеек порядка 10 мкм. Одиночные датчики такого размера практически для всех методов неразрушающего контроля созданы, поэтому разработка датчиков матричного типа технически возможна. По-видимому, сначала нужно разработать матрицы размером 8×8 ячеек, затем из них собирать матрицы большего размера. При создании таких матриц метод усредненных во времени спекловых изображений можно использовать для целеуказания поврежденных участков и калибровки датчиков.

Создание датчиков матричного типа позволило бы оценивать остаточный ресурс деталей на основе концепции, предложенной в статьях [10,14]. Зная предельное значение физической величины в локальной зоне зарождения трещины, и определяя в реальном времени скорость изменения этой величины, можно оценить время до старта трещины.

Спекловый метод определения деформаций на малых базах может быть использован для отладки процедуры численного расчета методом конечных элементов (МКЭ) напряженно-деформированного состояния элементов конструкций на стадиях зарождения, старта и движения трещины. Недостаток МКЭ для решения подобных задач заключается в том, что в зависимости от способа разбиения модели тела на элементы можно получить различные результаты. Для корректного расчета нужен ответ, т.е. информация об эволюции реальных полей компонент вектора  $\Delta \vec{u}$ .

Важное практическое значение имеет разработка и изготовление спекл-томографов отражающих и прозрачных твердых тел, а также живых клеток и турбулентных течений. Для прозрачных объектов появляется возможность послойного изучения необратимых процессов

на  $M$  участках по толщине объекта. Путем регистрации в реальном времени величин  $\tilde{I}$  и  $\eta$  под разными ракурсами освещения, наблюдения и (или) на разных длинах волн, можно сформировать систему трансцендентных уравнений, число которых равно числу неизвестных величин. Неизвестными величинами в общем случае являются средние значения и дисперсии величин  $\Delta u_m$  в начальный  $t_1$  и текущий  $t_2$  моменты времени, смешанные корреляционные моменты величин  $\Delta u_m$ , взятых в начальный и текущий моменты времени.

Путем решения указанной системы уравнений и определения неизвестных величин для процессов, протекающих на разном масштабном уровне отражающего объекта можно определять средние значения компонент вектора  $\Delta \vec{u}_m$ , их дисперсии и временные автокорреляционные функции (времена релаксации), а для стационарных и эргодических процессов  $\Delta u_m(t)$  - их спектральные функции.

В прозрачных средах показатель преломления зависит от плотности, следовательно, от температуры, а значит от выделенной или поглощенной энергии  $E$  химических реакций, от удельной преломляющей способности  $\bar{r}$  веществ, входящих в состав объекта, а также от их относительной концентрации  $C$ . В живых клетках и в турбулентном потоке факела пламени скорости флуктуаций величин  $E$ ,  $\bar{r}$  и  $C$  могут быть различными. Поэтому процессы, связанные с изменениями величин  $E$ ,  $\bar{r}$  и  $C$  будут располагаться на разных участках временного спектра флуктуаций  $\Delta u_m$ , найденного по ее временной автокорреляционной функции. Как показано на рис.4, интерпретация спектров возможна путем ингибирования (подавления) конкретных процессов, протекающих внутри прозрачной среды. Известно, например [15], что при введении хлоргексидина в живую клетку блокируются процессы, регулирующие осмотическое давление в клетке и обмена веществ через клеточную мембрану.

Автор полагает, что создание спекл – томографа живой клетки с технической точки зрения не является слишком сложной задачей. Использование такого прибора в научных исследованиях позволило бы создавать физические модели функционирования клеток в норме и при введении в клетку лекарственных препаратов. В практической медицине спекл-томограф можно было бы использовать для регистрации спектров флуктуаций  $\Delta u_m$  на разных участках и слоях клетки-свидетеля пациента. Полученные данные можно в дальнейшем использовать для его индивидуального лечения.

Использование спекл-томографа может быть полезным также при изучении процессов горения и тепло-массопереноса в турбулентных потоках.

### **Заключение**

На основе данных, полученных методом спекл-фотоники в ходе исследования необратимых процессов, протекающих в некоторых живых и неживых объектах, можно сделать следующие выводы:

1. Впервые в мире создан когерентно-оптический метод, позволяющий в режиме реального времени на минимальной базе порядка 1 мкм определять деформации твердых, жидких и газообразных тел, вызванных изменением формы и объема объектов живой и неживой материи.
2. Теоретически и экспериментально обоснован спекл-томограф, предназначенный для послойного определения параметров, характеризующих функционирование живых клеток и факелов турбулентных потоков.
3. Впервые показано, что предельная локальная растягивающая деформация в зоне зарождения трещины в условиях многоциклового усталости по порядку величин совпадает с предельной деформацией, возникающей при квазистационарном растяжении стандартных образцов.
4. Обоснованы:
  - актуальность создания датчиков неразрушающего контроля нового поколения матричного типа, позволяющих оценивать остаточный ресурс элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях многоциклового усталости;
  - использование спекл-фотоники для оптимизации метода конечных элементов при расчете напряженно-деформированного состояния тел на стадии зарождения, старта и движения трещины;
  - изготовление и применение спекл-томографа живой клетки для целей научной и практической медицины;
  - применение спекл-фотоники для количественного анализа факелов турбулентных потоков.

### **Благодарности**

Автор благодарит своих коллег Бахарева А. А., Михайлову Ю. А., Каманцева И. С., Друкаренко Н. А., Мызнова К. Е. за плодотворное сотрудничество при проведении экспериментов.

### **Литература**

- [1] **Brinckmann, S.** On the role of dislocations in fatigue crack initiation [Dissertation] — Groningen: University of Groningen. — 2005.
- [2] **Новиков, И. И.** Физическая механика реальных материалов / Новиков И.И., Ермишин В.А. — М. Наука, 2004. — 328 с.
- [3] **Lasar, J.** Differential interferometry for real-time measurement in high cycle fatigue metal testing / J. Lasar, M. Hola, O. Cip. In: Conference PhotoMechanics. Book of abstracts — Delft: Delft University, 2015. — P. 64.
- [4] **Хауф, В.** Оптические методы в теплопередаче / Хауф В., Григуль У. — М.: Мир, 1973. — 240 с.
- [5] **Vladimirov, A. P.** Speckle metrology of dynamic macro- and micro-processes in deformable media. Optical Engineering. — 2016. — V. 55 — No. 12 — P. 121727; 1-10. DOI: 10.1117/1.OE.55.12.121727
- [6] **Владимиров, А. П.** Спекл-диагностика необратимых процессов, протекающих в некоторых живых и технических объектах / Владимиров А.П., Друкаренко Н.А., Михайленко Ю.А. // Оптические методы исследования потоков: Под ред. Дубнищева Ю. Н., Скорняковой Н. М. Труды XVI Международной научно-технической конференции, 28 июня – 02 июля 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. — С. 51- 62. [Электронное издание]



- [7] **Vladimirov, A. P.** Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue: Theory and some experiments // AIP Conference Proceedings. — 2016. — V. 1740. — P. 040004. DOI: 10-1063/14962663
- [8] **Владимиров, А. П.** К спекл-томографии функций живой клетки // Изв. вузов. Радиофизика. — 2020. — Т. 63. — № 8. — С. 655–664.
- [9] **Vladimirov, A. P.** Theory and calibration of speckle dynamics of phase object // SPIE Conference Proceeding. — 2012. — Vol. 8337. — P. 83370C-1–15.
- [10] **Владимиров, А. П.** Оценка усталостных повреждений в органическом стекле оптическими методами / Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Тришин В.Н., Акашев Л.А., Дружинин А.В. // Оптика и спектроскопия. — 2019. Т. — 127. — В. 5. — С. 870-880.
- [11] **Vladimirov, A. P.** Using speckle images for determining the local plastic strains arising at high-cycle fatigue of 09G2S steel / Vladimirov A. P. Drukarenko N. A., Myznov K. E. // Technical Physics Letters. — 2021. — V. 47. — No. 8. — P. 773–776.
- [12] **Ботвина, Л. Р.** Кинетика разрушения конструкционных материалов. Учебник. — М.: Наука, 1989. — 230 с.
- [13] **Vladimirov, A. P.** Dynamic speckle – interferometry of micro-displacements // AIP Conference Proceedings. — 2012. — V. 1457. P. 459 – 468.
- [14] **Vladimirov, A. P.** Real-time study of high-cycle fatigue damage using the averaged speckle dynamics / Drukarenko N.A., Kamantsev I.S., Trishin V.N., Lukin N.A. // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 1149.— P. 012013 (1-7)
- [15] **Зверьков, А. В.** Хлоргексидин: прошлое, настоящее и будущее одного из основных антисептиков / Зверьков А.В., Зузова А.П. // Клиническая микробиология и антимикробная химиотерапия. — 2013. — Том 15. — № 4. — С. 280.

## Prospects for the application of speckle photonics of processes occurring in living and inanimate matter

*A. P. Vladimirov*

E.S. Gorkunov Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Ural Federal University named after B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Yekaterinburg Research Institute of Viral Infections of the Federal State Medical Center "Vector" of Rospotrebnadzor, Yekaterinburg, Russia

The theory, experimental substantiation and prospects of using the method of time-averaged speckle images for quantitative analysis of irreversible and reversible processes occurring in a number of living and inanimate objects are considered. Prospects for the creation and application of: optical and non-optical sensors of a new generation of matrix type for non-destructive testing of parts and structural elements operated under conditions of high-cycle fatigue are discussed; speckle tomographs of the functions of a living cell and turbulent flows, allowing real-time layer-by-layer monitoring of processes in areas of the order of 1 microns in size; methods for numerical calculation of the stress-strain state of parts at the stage of nucleation, start and crack movement; methods for estimating the residual life of structural elements.

*Keywords:* Photonics, Speckle, Image, Living cells, High-cycle fatigue, Turbulence, Tomography, Real time.