



**Received:** 26.06.2024  
**Revised:** 30.09.2024  
**Accepted:** 25.10.2024  
**DOI:** 10.17804/2410-9908.2024.5.195-207

## DEFECT DETECTION IN AVIATION PLEXIGLASS PARTS BY ANALYZING THE PARAMETERS OF RECORDED SPECKLE FIELDS

P. V. Pavlov<sup>1, a, \*</sup> and A. P. Vladimirov<sup>2, 3, b</sup>

<sup>1</sup>Military Educational and Scientific Center of the Air Force N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin Air Force Academy,  
133 Marshala Nedelina St., Voronezh, 394052, Russia

<sup>2</sup>Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia

<sup>3</sup>Virom Federal Scientific Research Institute of Viral Infections,  
Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection And Human Wellbeing,  
23 Letnyaya St., Ekaterinburg, 620030, Russia

a)  <https://orcid.org/0000-0001-5655-364>  pavlov.pave@yandex.ru;  
b)  <https://orcid.org/0000-0001-6343-9772>  vap52@bk.ru

\*Corresponding author. Email: pavlov.pave@yandex.ru  
Address for correspondence: ul. Uryvskogo, 13, apt. 21, Voronezh, 394002, Russia

The paper presents the results of experimental studies on the use of techniques for applying the method of speckle structures of optical radiation for the tasks of determining the residual life, flaw detection testing, and assessing the health of aircraft cabin glazing elements made of AO-120 aviation plexiglass.

**Keywords:** defect, glass, speckle, movement, nondestructive testing

### Acknowledgment

*We appreciate the assistance of V. V. Artanov in developing the equipment of the optical-electronic system and conducting experiments. We are also grateful to A. O. Yevsin and A. A. Balashov, staff members of the Research Center (Lyubertsy) of the Central Research Institute of the Air Force (the Ministry of Defense of the Russian Federation) for the preparation of the aviation plexiglass test samples.*

### References

1. Mekalina, I.V., Bogatov, V.A., Trigub, T.S., and Sentiourine, E.G. Aviation organic glasses. In: *Trudy VIAM*, 2013, 11, 4. (In Russian).
2. Mekalina, I.V., Aizatulina, M.K., Sentiourin, E.G., and Popov, A.A. Features of influence of atmospheric factors on aviation organic glass. In: *Trudy VIAM*, 2018, 11 (71), 28–34. (In Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-28-34.
3. Akolzin, S.V. and Frolkov, A.I. Performance restoration of the heat-resistant aircraft glazing during repair and operation. *Aviatsionnaya Promyshlennost*, 2014, 1, 41–43. (In Russian).
4. Yakovlev, N.O., Akolzin, S.V., and Shvets, S.M. Determination of the crack resistance of polymer materials. *Novosti Materialovedeniya. Nauka i Tekhnika*, 2014, 4, 3.
5. Leendertz, J.A. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1970, 3 (3), 214–218. DOI: 10.1088/0022-3735/3/3/312.



6. Vladimirov, A.P. and Mikushin, V.I. Interferometric determination of vector components of relative displacements: theory and experiment. In: *SPIE Proceedings*, 1999, 3726, 38–43. DOI: 10.1117/12.341416.
7. Fomin, N.A. *Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements*, 1st ed., Springer-Verlag, Berlin, 1998, 219 p.
8. Vladimirov, A.P. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media. *Optical Engineering*, 2016, 55 (12), 121727. DOI: 10.1117/1.OE.55.12.121727.
9. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., Drukarenko, N.A., Trishin, V.N., Akashev, L.A., and Druzhinin, A.V. Assessment of fatigue damage in organic glass by optical methods. *Optics and Spectroscopy*, 2019, 127, 943–953. DOI: 10.1134/S0030400X19110286.
10. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., Ishchenko, A.V., Veselova, V.E., Gorkunov, E.S., Gladkovskiy, S.V., and Zadvorkin, S.M. Study of the fatigue crack origin process by changing the sample surface relief and its speckle images. *Deformatsiya i Razrushenie Materialov*, 2015, 1, 21–26. (In Russian).
11. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., Veselova, V.E., Gorkunov, E.S. and Gladkovskiy, S.V. Use of dynamic speckle interferometry for contactless diagnostics of fatigue crack initiation and determining its growth rate. *Technical Physics*, 2016, 61, 563–568. DOI: 10.1134/S106378421604023X.
12. 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.
13. Vladimirov, A.P., Kamantsev, I.S., and Drukarenko, N.A. Nucleation and initiation of cracks under high-cycle fatigue in the EP679 maraging steel. In: *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2176, 030019. DOI: 10.1063/1.5135143.



Подана в журнал: 26.06.2024  
УДК 620.179.1:535.4  
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.195-207

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ОРГАНИЧЕСКОГО АВИАЦИОННОГО СТЕКЛА ПО АНАЛИЗУ ПАРАМЕТРОВ РЕГИСТРИРУЕМЫХ СПЕКЛ-ПОЛЕЙ

П. В. Павлов<sup>1, а, \*</sup>, А. П. Владимиров<sup>2, 3, б</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»,  
ул. Маршала Неделина, 133, г. Воронеж, 394052, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

<sup>3</sup>Федеральное бюджетное учреждение науки  
Федеральный научно-исследовательский институт вирусных инфекций «Виром» Роспотребнадзора,  
ул. Летняя, 23, г. Екатеринбург, 620030, Россия

<sup>а)</sup>  <https://orcid.org/0000-0001-5655-364>  pavlov.pave@yandex.ru;

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

\*Ответственный автор. Электронная почта: pavlov.pave@yandex.ru  
Адрес для переписки: ул. Урывского 13, кв. 21, г. Воронеж, 394002, Россия

В статье представлены результаты экспериментальных исследований по использованию методик применения метода спекл-структур оптического излучения для задач определения остаточного ресурса, дефектоскопического контроля и оценки технического состояния элементов из авиационного органического стекла марки АО-120 для остекления кабин самолетов.

**Ключевые слова:** дефект, стекло, спекл, перемещение, неразрушающий контроль

### 1. Введение

В настоящее время для изготовления элементов остекления кабин самолетов широко применяются оптически прозрачные полиметилметакрилатные, поликарбонатные полимерные органические стекла [1]. В процессе эксплуатации детали остекления подвергаются как эксплуатационным, так и атмосферным воздействиям. Ранее проведенные исследования влияния атмосферных факторов [2] и механических нагрузок на структуру и элементы крепления [3, 4] остекления к корпусу кабины свидетельствуют о необходимости разработки прецизионных методов и устройств неразрушающего контроля, способных определять местонахождение и степень опасности обнаруженных дефектов. Известно использование метода спекл-структур оптического излучения для определения перемещений, скорости движения, поворотов, упругих и пластических деформаций тел, потоков жидкостей и газов [5–7]. Поэтому разработка новых методик определения технического состояния элементов остекления из органического стекла является актуальной научно-технической задачей.

Решение задачи по установлению связи между параметрами, характеризующими динамику фаз волн, и динамикой спеклов является очень непростым. Однако в последнее время наблюдается определенный прогресс в решении подобных задач.

Целью данных исследований является ознакомление читателей с последними разработками авторов в области теории и применения динамической спекл-интерферометрии для оценки воздействия внешних факторов и агрессивных сред на структуру авиационного органиче-



ского стекла и определения величины перемещения элементов остекления при создании избыточного давления внутри кабины.

## 2. Теория применяемого метода неразрушающего контроля

Неразрушающий контроль элементов остекления проводился на основе анализа параметров регистрируемых спекл-полей. Суть предлагаемых методик заключается в том, что время экспонирования используемой телекамеры выбирается кратным периоду циклических деформаций.

На основе модели отражающего объекта в виде совокупности точечных центров рассеяния, расположенных на ее поверхности, в работе [8] была решена задача о динамике спеклов в плоскости изображения периодически деформируемого объекта. В предположении, что указанные центры рассеяния могут одновременно перемещаться поступательно, совершать периодические движения с одинаковыми амплитудой и периодом  $T$ , а также случайным образом перемещаться в пространстве в результате необратимых процессов, протекающих на структурном уровне, были получены формулы для интенсивности излучения  $I$  в некоторой точке плоскости изображения и нормированной временной автокорреляционной функции  $\eta(t_1, t_2)$  этого излучения. Предполагалось, что величина  $I$  является усредненной по времени интенсивностью излучения, а время усреднения равно или кратно периоду  $T$ . Для  $I$  и  $\eta(t_1, t_2)$  было получено:

$$I = I_1 + I_2 e^{-\frac{\sigma^2}{2}} \cos(x + \alpha), \quad (1)$$

$$\eta(t_1, t_2) = \eta_1 \eta_2 \eta_3 = \eta(u_x) \cos\left[\left(\langle x_2 \rangle - \langle x_1 \rangle\right)\right] \times e^{-\frac{1}{2}k_{11} - \frac{1}{2}k_{22} + k_{12}}, \quad (2)$$

где в формуле (1)  $I_1, I_2, \alpha$  – константы;  $x = k \Delta \bar{u} (\vec{l}_s + \vec{l})$ ;  $k$  – волновое число;  $\Delta \bar{u}$  – среднее значение вектора относительного необратимого перемещения двух центров рассеяния, расположенных в области, размер которой равен линейному разрешению линзы;  $\vec{l}_s$  и  $\vec{l}$  – единичные векторы, направленные от центра области к источнику света и к центру линзы соответственно. Отметим, что величина  $\Delta \bar{u}$  формируется усреднением как по времени  $T$ , так и по области поверхности, размер которой равен линейному разрешению линзы. В формуле (2)  $\eta = \eta(u_x)$  – автокорреляционная функция, соответствующая поступательному перемещению объекта, где для определенности предполагалось, что объект перемещается по оси  $Ox$ ,  $\langle x_1 \rangle$  и  $\langle x_2 \rangle$  – средние значения,  $k_{11}$  и  $k_{22}$  – дисперсии, а  $k_{12}$  – смешанный корреляционный момент величин  $x$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$  соответственно, угловые скобки означают усреднение по ансамблю объектов. Если в отсутствие поступательного перемещения объекта ( $\eta = 1$ ) процесс случайного изменения разности фаз волн стационарный, то  $\langle x_1 \rangle = \langle x_2 \rangle$ ,  $k_{11} = k_{22}$ . Тогда вместо (2) имеем

$$\eta(t_1, t_2) = \eta_3 = e^{-k_{22} + k_{12}(t_1, t_2)}. \quad (3)$$

Если теперь время  $\tau = t_2 - t_1$  превысит время корреляции  $\tau_0$  разности фаз, то  $k_{12} = 0$ , а величина  $\eta(t_1, t_2)$  выйдет на постоянный уровень  $\eta^* = \exp(-k_{22})$ . По значению  $\eta^*$  можно найти дисперсию  $\sigma_x^2$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma_x$  величины  $x$ .

Формулы (1)–(3) справедливы также и для прозрачного объекта, освещенного через случайный фазовый экран, например матовое стекло. В этом случае  $x = k \Delta u$ , где  $\Delta u$  – средняя разность оптических путей пар волн, а оптическая длина пути  $j$ -й волны определяется выражением

$$u_j = \int_{l_j} [n_j(l) - n_0] dl, \quad (4)$$

где  $n_j(l)$  – распределение показателя преломления в фазовом объекте вдоль пути  $j$ -й волны;  $l_j$  – длина пути  $j$ -й волны в объекте;  $n_0$  – показатель преломления в отсутствие фазового объекта; интегрирование ведется вдоль пути волны  $l_j$ .

### 3. Методика оценки остаточного ресурса деталей из авиационного органического стекла по анализу параметров спекл-поля

В экспериментах значение  $\eta$  определяется по формуле (1) из статьи [9]. В настоящее время метод усредненных во времени спекловых изображений успешно опробован для изучения особенностей многоциклового усталости трубной [10–12] и мартенситной [13] сталей, модельного [9] и авиационного оргстекла.

Для локализации необратимых процессов на заранее известном месте призматические образцы одинакового размера и одинаковой формы изготавливались с острым надрезом типа Шарпи, а именно с радиусом кривизны надреза, равным 0,25 мм. Образцы размером  $5 \times 10 \times 50$  мм испытывались трехточечным изгибом на машине резонансного типа Microtron (Rumul). На рис. 1 для разных материалов приведены распределения величины  $\eta$  вблизи изображения надреза перед стартом трещины. Анализ распределений величины  $\eta$  на разных стадиях циклических деформаций, зависимостей  $\eta$  от числа циклов  $N$  на разных фрагментах показал, что для использованных нами материалов первые признаки повреждений регистрируются на некотором расстоянии от вершины надреза. Показано, что необратимые процессы начинаются задолго до появления трещины, на вершине надреза постепенно формируется зона необратимых деформаций размером 0,5–1 мм, а трещина зарождается на вершине надреза в области размером порядка 10–100 мкм.

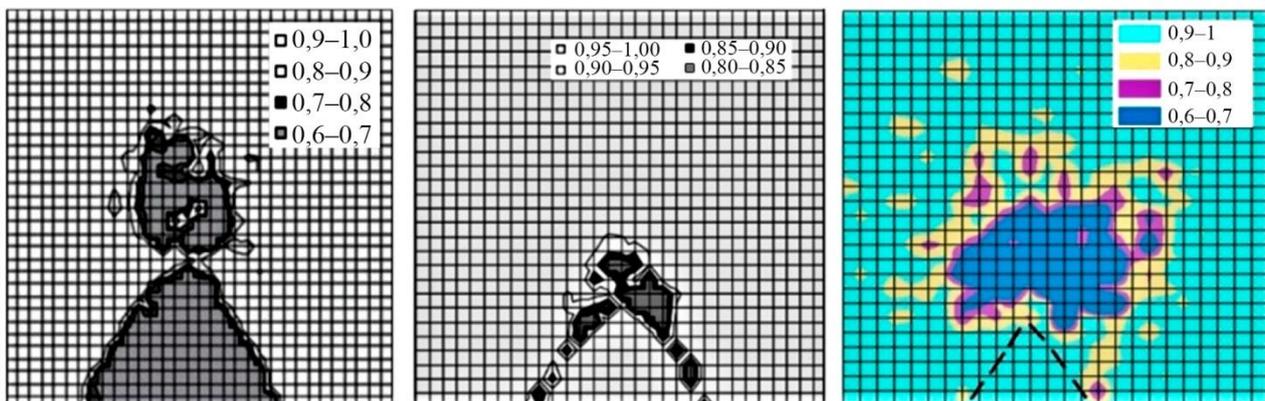


Рис. 1. Распределение величины  $\eta$  на вершине изображения надреза перед стартом трещины для разных материалов (слева направо): сталь 09Г2С, оргстекло марки Асгума, оргстекло марки АО-120

Внутри образца из оргстекла впервые был визуализирован переход первоначально сплошной среды в разрушенное состояние. Найдены предельные значения физических величин, соответствующих старту трещины. Таковыми для непрозрачных объектов являются локальный поворот поверхности, изменение микрорельефа, а для прозрачных тел – показатель преломления и плотность среды. В работах [8, 13] предложена концепция оценки остаточного ресурса контролируемого элемента конструкции, основанная на определении вначале предельного значения физической величины, соответствующей старту трещины, и контроля скорости изменения этой величины в процессе циклических деформаций или эксплуатации объекта.

#### 4. Результаты применения методики определения степени повреждения деталей из органического стекла по анализу изменения параметров спекл-поля

Немаловажной задачей является и оценка степени поверхностного повреждения элементов остекления, снижающего его прочность. С этой целью для исследования были подготовлены призматические образцы размером  $10 \times 20 \times 50$  мм из авиационного оргстекла марки АО-120. Три образца были подвержены воздействию ацетона на протяжении от 10, 15 и 25 минут под нагрузкой  $450 \text{ кг/см}^2$ . Два других образца были подвержены воздействию ультрафиолетового излучения на протяжении 10,4 и 23,3 дней в климатермосветокамере KTLK 1250.

Повреждения оргстекла изучались по методике, предложенной в работе [9]. В соответствии с предложенной методикой, по схеме, показанной на рис. 2, регистрируется два спекловых изображения прозрачного плоского образца. После регистрации первого изображения образец перемещается по оси  $ox$  на расстояние, превышающее размер оптической неоднородности, затем регистрируется второе спекловое изображение образца. Далее путем цифровой обработки данных в плоскости изображения объекта формируется распределение величины  $\eta$ . По значениям величины  $\eta$  в работе [8] в пределах оптической неоднородности были найдены зависимости показателя преломления и плотности от координаты  $x$ .

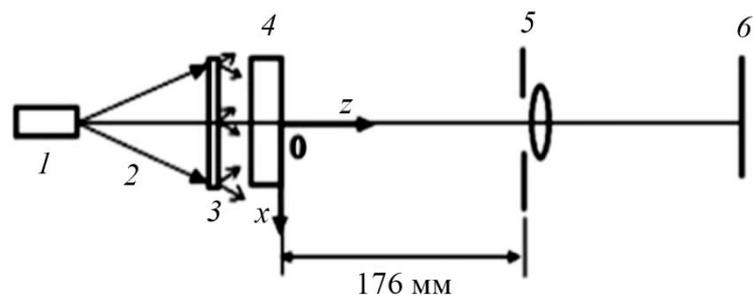
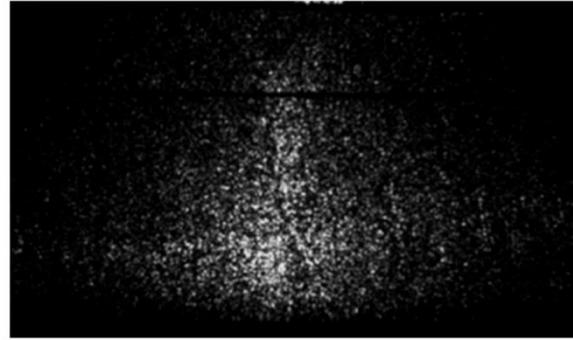
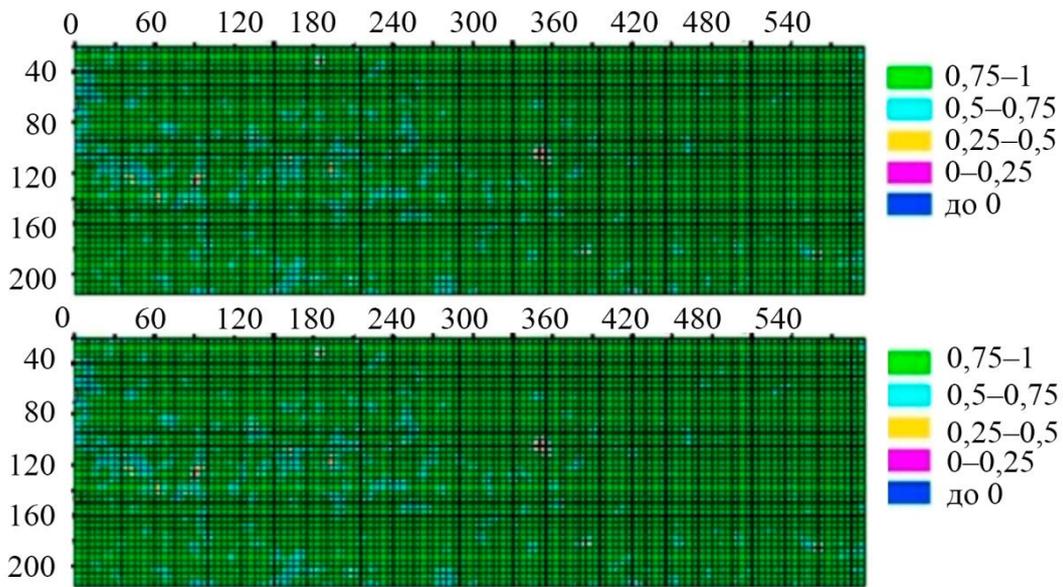


Рис. 2. Схема оптической установки: 1 – лазер; 2 – лазерное излучение; 3 – матовый рассеиватель; 4 – образец; 5 – линза; 6 – матрица телекамеры

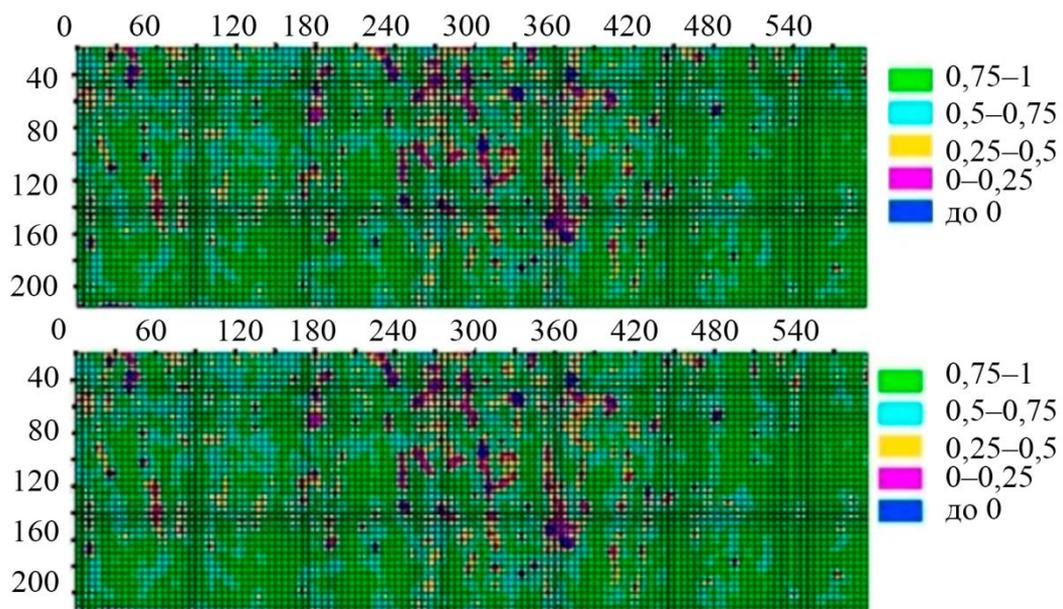
На рис. 3 *а* приведено типичное спекловое изображение образца, на рис. 3 *б* – распределения величины  $\eta$  для неповрежденного образца, на рис. 3 *в* – распределение  $\eta$  для образца, подверженного действию ацетона в течение 15 минут и нагрузки величиной  $450 \text{ кг/см}^2$ , а на рис. 3 *г* – для образца, подверженного воздействию ультрафиолетового излучения в течение 23,3 суток. Величина  $\eta$  определялась на фрагментах изображения размером  $5 \times 5$  пикселей. Из рис. 3 видно, что на образце, не подверженном действию агрессивной среды и излучения, количество неповрежденных и слабо поврежденных участков ( $\eta = 0 \div 0,7$ ) максимально, на следующем образце таких участков значительно меньше, а на последнем образце такие участки не наблюдаются. Повреждениями исходного образца являются царапины, возникшие в процессе изготовления, хранения и транспортировки. Визуальный осмотр, а также регистрация трехмерного профиля поверхности показали, что действие ацетона и нагрузки вызвали образование трещин серебра, а под действием ультрафиолетового излучения в поверхностном слое, кроме того, по-видимому, имели место химические превращения.



$a$



$b$



$\delta$

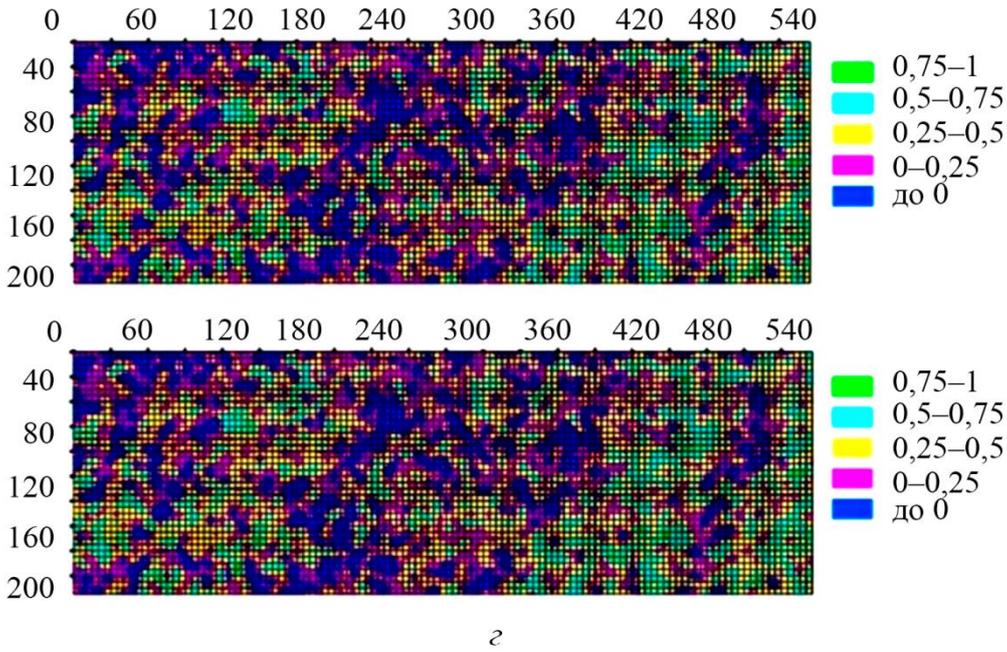
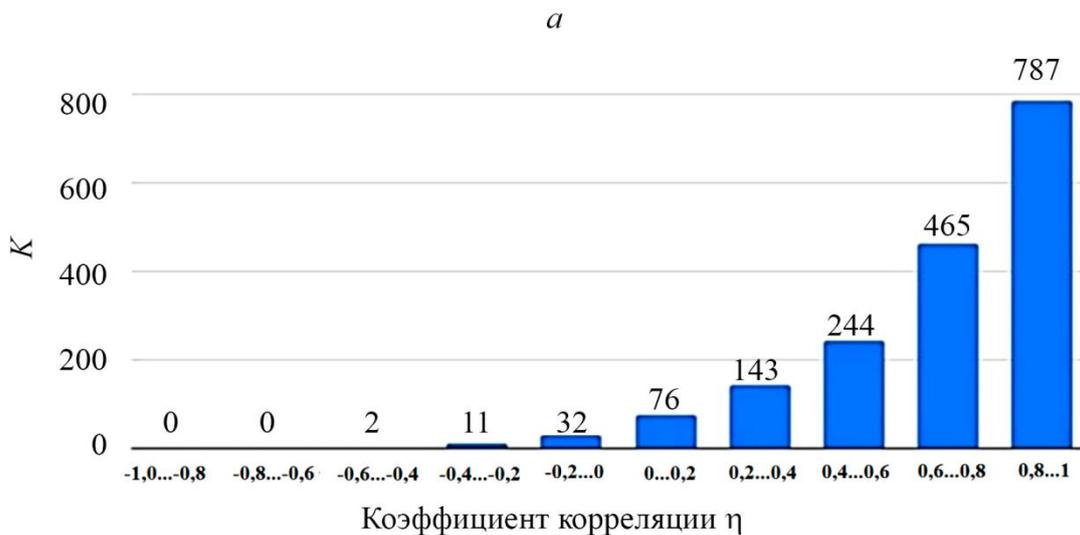
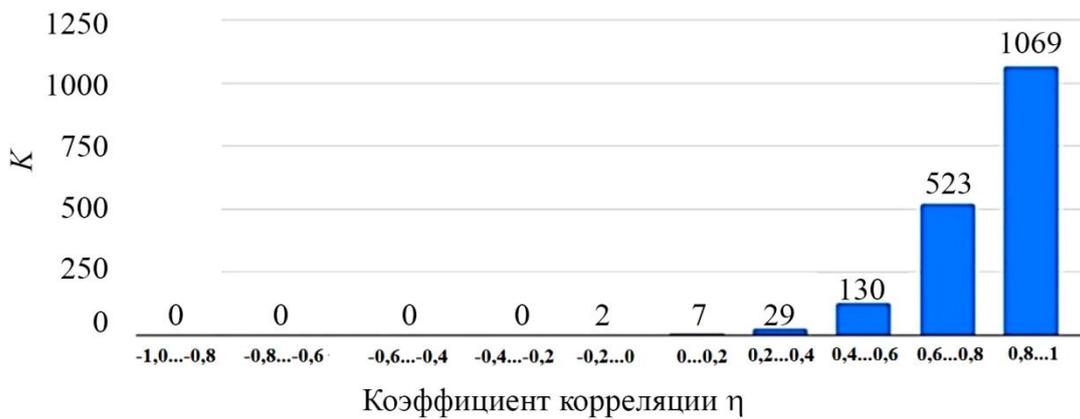


Рис. 3. Типичная спекл-картина от образца авиационного оргстекла (а) и диаграммы распределения коэффициента корреляции  $\eta$  неповрежденного образца (б), образца после воздействия ацетона и нагрузки (в) и образца, подвергнутого воздействию УФ-излучения (г)



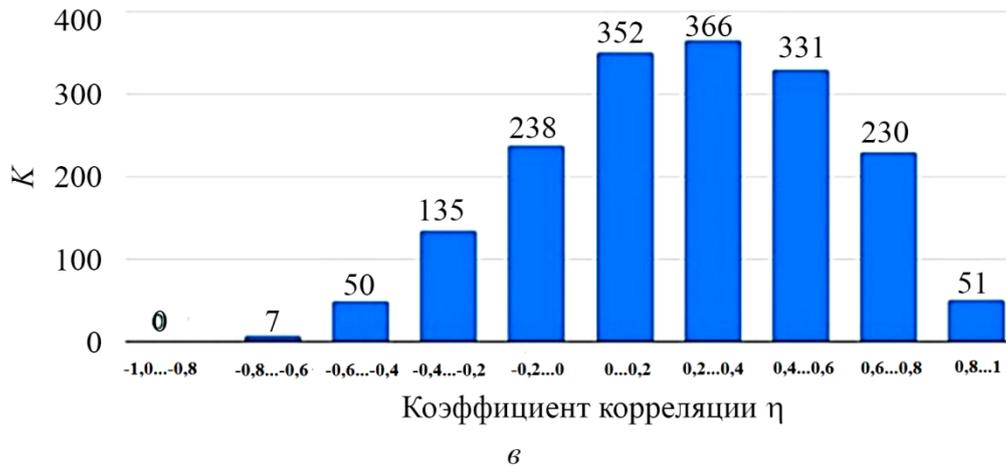


Рис. 4. Гистограммы поврежденности образцов: исходный образец (а), образец под действием ацетона и нагрузки (б) и под действием ультрафиолетового излучения (в)

На рис. 4 приведены гистограммы поврежденности образцов, показывающие количество  $K$  участков образца, в которых величина  $\eta$  попадает в определенный интервал значений.

Анализ гистограмм показал, что под действием агрессивной среды и ультрафиолетового излучения происходит увеличение числа наиболее поврежденных участков, а в соответствующих гистограммах имеет место их удлинение и смещение пика в сторону отрицательных значений  $\eta$ . Полученные данные продемонстрировали возможность создания методики, позволяющей визуализировать наиболее поврежденные участки остекления воздушных судов и объективно оценивать степень их поврежденности.

## 5. Результаты применения методики определения дефектов остекления кабин самолетов внутри заделки

Сущность методики определения параметров дефектов в заделке остекления по анализу параметров регистрируемых спекл-полей от участков остекления при создании избыточного давления внутри кабины заключается в том, что на первоначальном этапе на заданные участки поверхности остекления кабины наносят контрольные маркеры (рис. 5 а), далее с помощью оптико-электронной системы (рис. 5 б) облучают остекление кабины 4 спекл-полем, сформированным за счет прохождения когерентного излучения 2 через матовое стекло 3, регистрируют прошедшее через диафрагму 5 спекл-поле на ПЗС-матрице 6 видеокамеры, повышают избыточное давление внутри кабины и повторно регистрируют спекл-изображения, производят расчет величины перемещения установленных индикаторов  $u_x$  с учетом определения величины коэффициента корреляции  $\eta$ .

Алгоритм испытаний предложенной методики проходил по аналогии с методикой определения величины выходов остекления из заделки согласно регламенту технического обслуживания самолета Т-10В, кн. 4/8, ТК № 13 ленточным методом. Для проведения испытаний из состава авиапарка полка, согласно данным «Журнала учета контроля технического состояния элементов остекления кабин самолетов», было выбрано воздушное судно, у которого было зафиксировано значение выхода остекления из заделки больше 1 мм. Поэтому в качестве контрольных участков остекления были выбраны участки остекления кабины самолета с величиной выхода остекления 0 мм, 0,5 мм и 1,2 мм. С помощью мелового маркера на данные участки кабины были нанесены контрольные маркеры, как показано на рис. 5 б. Далее, на кабину была установлена оптико-электронная система комплекса 1 (рис. 6.) таким образом, чтобы все контрольные маркеры попадали в поле зрения объектива видеокамеры.

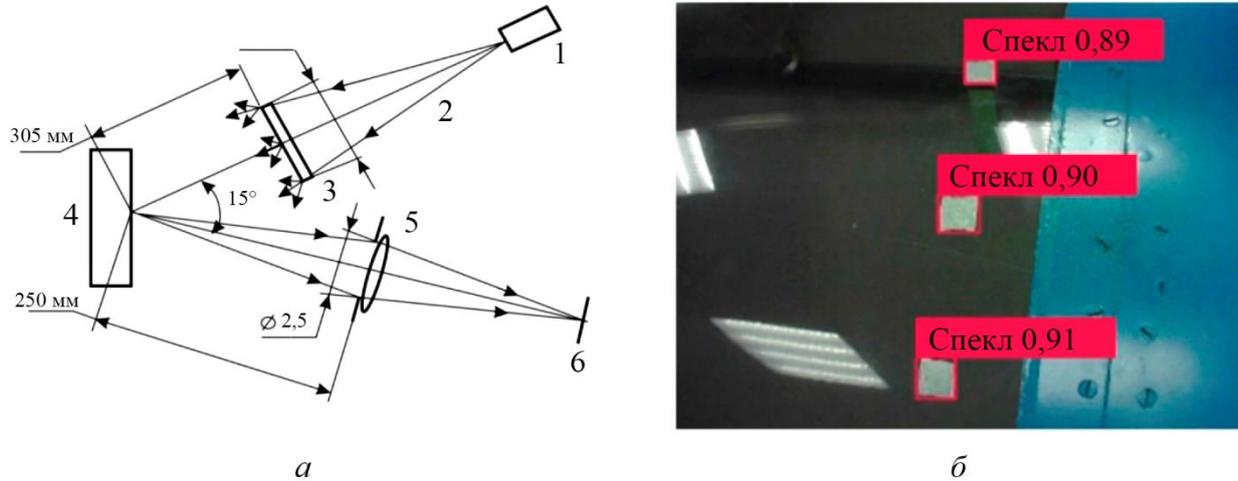


Рис. 5. Схема записи (а) спекл-полей от маркеров (б) на элементе остекления кабины самолета: 1 – лазер; 2 – освещающее излучение; 3 – матовый рассеиватель; 4 – остекление кабины; 5 – объектив с диафрагмой; 6 – ПЗС-матрица

$$u_x = 2x_s(1 - \eta), \quad (5)$$

где  $2x_s$  – размер диафрагмы объектива видеокамеры.



Рис. 6. Программно-аппаратный комплекс определения величины перемещения остекления из заделки по анализу параметров регистрируемых цифровых спекл-полей: 1 – оптоэлектронная система; 2 – ЭВМ с программным модулем обработки спекл-полей; 3 – оснастка для размещения оптоэлектронной системы на кабине самолета

В процессе юстировки оптической системы устанавливали диафрагму объектива из расчета, чтобы средний размер спекла на изображении был чуть больше размера пикселя ПЗС-матрицы (8,3 мкм). Затем контролируемую область остекления облучали спекл-полем, оператором на трех контролируемых участках остекления выбирали сектор, находящийся на поверхности захваченного маркера, при этом каждый сектор соответствовал определенному цвету (зеленый, красный и синий).

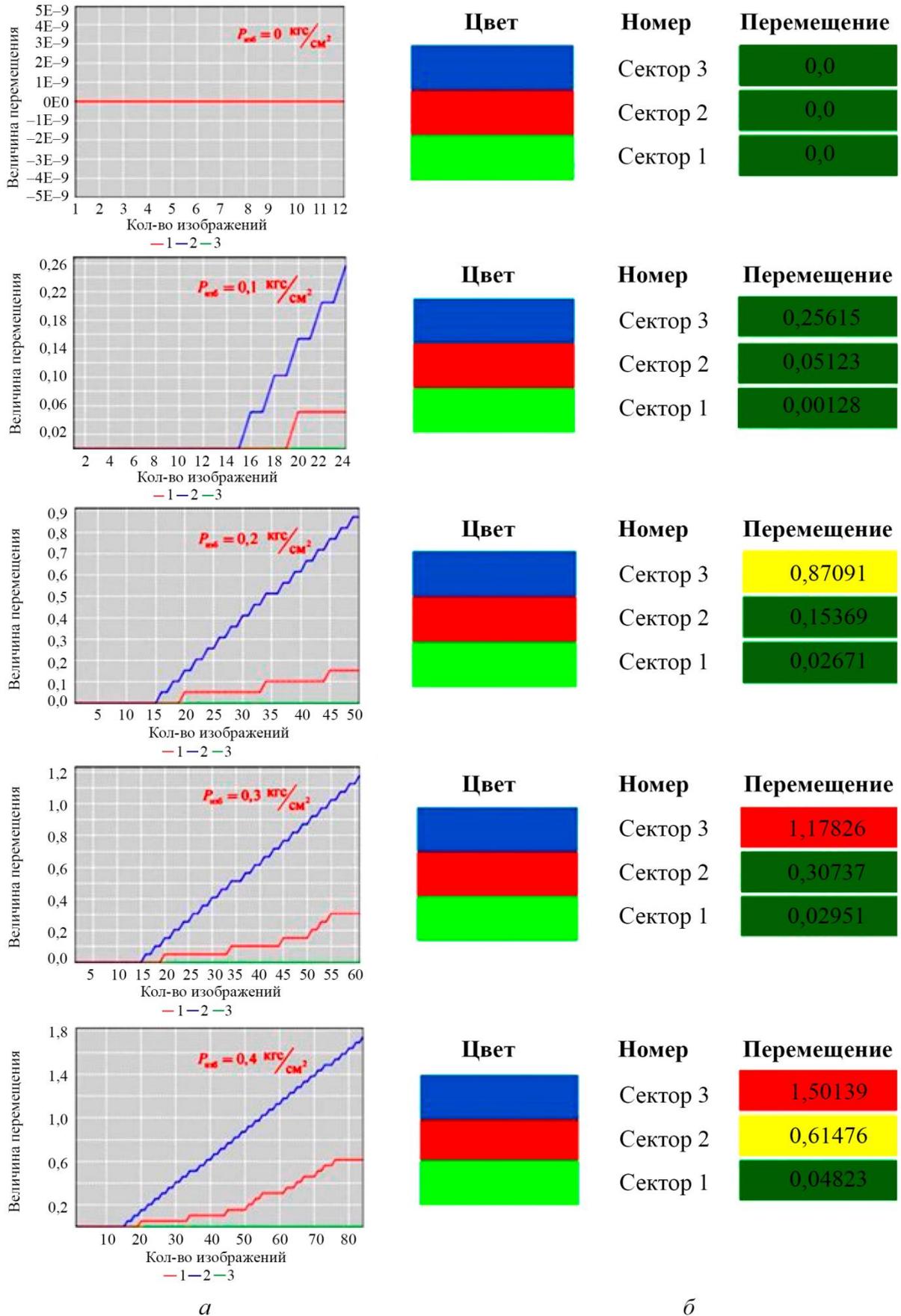


Рис. 7. Результаты измерений величины перемещения (мм) остекления из заделки в графическом (а) и численном (б) виде



По команде оператора одновременно с повышением избыточного давления внутри кабины до  $0,4 \text{ кгс/см}^2$  происходили регистрация спекл-полей и расчет величины выхода остекления из заделки. При этом одновременно на экране ЭВМ отображалась информация о расчете величины перемещения остекления на трех контролируемых участках как в графическом, так и в числовом значении (см. рис. 7); кроме этого, поле, в котором отображается числовое значение величины выхода остекления из заделки, подкрашивается соответствующим цветом: «зеленый» – норма; «желтый» – опасно; «красный» – критически опасно (недопустимо). Верификация результатов испытаний разработанного программного модуля с результатами, полученными в ходе оценки технического состояния кабины ленточным методом, показало, что погрешность полученных результатов на 10 % больше, чем у ленточного метода.

Эти расхождения связаны с вкладом в изменение регистрируемого спекл-поля эффектов поворота стекла за счет изменения давления в кабине самолета.

Для того чтобы рассчитать перемещение стекла в трех проекциях, необходимо доработать структуру оптической системы путем изменения угла регистрации отраженного спекл-поля, что будет учтено при выполнении дальнейших исследований.

## 6. Заключение

Таким образом, в ходе исследований предложенных методик установлено, что использование метода спекл-структур оптического излучения позволяет:

- визуализировать процессы трещинообразования деталей из органического авиационного стекла при испытаниях на многоцикловую усталость;
- определять степень повреждения поверхностной структуры остекления кабин самолетов в процессе эксплуатации и оценивать параметры дефектов типа «серебро»;
- автоматизировать процесс определения величины перемещения остекления из заделки в ходе увеличения избыточного давления внутри кабины.

## Благодарность

*Авторы благодарят Артанова В. В. за помощь в разработке оснастки оптико-электронной системы и проведении экспериментов, а также сотрудников НИЦ (г. Люберцы) ЦНИИ ВВС МО РФ Евсина А. О. и Балашова А. А. за подготовку тестовых образцов авиационного оргстекла.*

## Литература

1. Авиационные органические стекла / И. В. Мекалина, В. А. Богатов, Т. С. Тригуб, Е. Г. Сентюрин // Труды ВИАМ. – 2013. – № 11. – С. 4.
2. Особенности влияния атмосферных факторов на авиационные органические стекла / И. В. Мекалина, М. К. Айзатулина, Е. Г. Сентюрин, А. А. Попов // Труды ВИАМ. – 2018. – № 11 (71). – С. 28–34. – DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-28-34.
3. Акользин С. В., Фролков А. И. Восстановление работоспособности теплостойкого авиационного остекления при ремонте и в эксплуатации // Авиационная промышленность. – 2014. – № 1. – С. 41–43.
4. Яковлев Н. О., Акользин С. В., Швец С. М. Определение трещиностойкости полимерных материалов // Новости материаловедения. Наука и техника. – 2014. – № 4. – С. 3.
5. Leendertz J. A. Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1970. – Vol. 3 (3). – P. 214–218. – DOI: 10.1088/0022-3735/3/3/312.



6. Vladimirov A. P., Mikushin V. I. Interferometric determination of vector components of relative displacements: theory and experiment // SPIE Proceedings. – 1999. – Vol. 3726. – P. 38–43. – DOI: 10.1117/12.341416.
7. Fomin N. A. Speckle Photography for Fluid Mechanics Measurements. – 1st ed. – Berlin : Springer–Verlag, 1998. – 219 p.
8. Vladimirov A. P. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media // Optical Engineering. – 2016. – Vol. 55 (12). – P. 121727. – DOI: 10.1117/1.OE.55.12.121727.
9. Assessment of fatigue damage in organic glass by 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.
10. 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.
11. Use of dynamic speckle interferometry for contactless diagnostics of fatigue crack initiation and determining its growth rate / A. P. Vladimirov, I. S. Kamantsev, V. E. Veselova, E. S. Gorkunov, S. V. Gladkovskiy // Technical Physics. – 2016. – Vol. 61. – P. 563–568. – DOI: 10.1134/S106378421604023X.
12. Владимиров, А. П., Поносов Ю. С. Применение динамики спеклов и комбинационного рассеяния света для изучения особенностей разрушения трубной стали при многоциклового усталости // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2018. – № 3. – С. 138–146. – DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.13.
13. Vladimirov A. P., Kamantsev I. S., Drukarenko N. A. Nucleation and initiation of cracks under high-cycle fatigue in the EP679 maraging steel // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2176. – P. 030019. – DOI: 10.1063/1.5135143.