

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-20-29

УДК 535.417: 539.388.1

Сравнение результатов применения двух спекловых методов изучения многоциклового усталости конструкционной стали

Александр Петрович Владимиров¹, Иван Сергеевич Каманцев²,
Никита Александрович Друкаренко³, Константин Евгеньевич Мызнов⁴✉,
Константин Вячеславович Наумов⁵

^{1,2,3} Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация

⁴ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация

⁵ Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

¹ var52@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6343-9772>

² ks@imach.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>

³ targosk@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5979-7398>

⁴ myznov@imp.uran.ru✉, <https://orcid.org/0009-0002-0411-1712>

⁵ knaumov98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-9857>

Аннотация

Введение. Новым методом усредненных во времени спекловых изображений и известным ранее методом интерференции двух спекл-полей изучено развитие пластических деформаций, возникающих при многоциклового усталости конструкционной стали. Выполнена оценка корректности определения деформаций новым методом путем сравнения данных, полученных двумя методами. **Метод.** Исследованы две оптические системы, в которых применены лазерные модули с разными длинами волн. Предложенная оптическая система позволяет определять компоненты Δu_y , Δu_z вектора относительного перемещения двух точек поверхности, расположенных на расстоянии (базе измерения) $\Delta s = 66$ мкм. Известная схема дает возможность описать деформации традиционным методом на базе измерения 470 мкм. Исследуемый образец представлял собой плоскую пластину с двумя боковыми вырезами, выполненную из стали марки 09Г2С. Испытания на усталость проводились на установке резонансного типа при разных амплитудах цикла. **Основные результаты.** Показано, что при всех амплитудах цикла развитие пластических деформаций происходит по механизму циклической ползучести. Существует хорошая корреляция данных, полученных двумя разными спекловыми методами. Вместе с тем деформация, оцененная новым методом, в ряде случаев на порядок превышает значение деформации, рассчитанной известным методом. Очевидно, это связано с существованием локальных малоразмерных (порядка 10^1 мкм) участков деформации, измерение которых традиционными методами невозможно. Рассчитанная новым методом предельная растягивающая деформация $\Delta u_y / \Delta s$ имеет порядок 10^{-1} , что совпадает с аналогичной деформацией, возникающей при испытании стандартных образцов на разрыв. **Обсуждение.** Результаты, полученные новым методом, обосновывают необходимость разработки датчиков и приборов неразрушающего контроля нового поколения, позволяющих по скорости изменения физических величин и по их предельным значениям оценивать время до зарождения усталостной трещины.

Ключевые слова

многоциклового усталость, сталь, разрушение, спеклы, интерференция, свободное пространство, изображение

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по темам № АААА-А18-118020790148-1 и «Диагностика» № 122021000030-1. При выполнении работы было использовано оборудование Центра коллективного пользования «Пластометрия» при Институте машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук.

© Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Мызнов К.Е., Наумов К.В., 2024

Ссылка для цитирования: Владимиров А.П., Каманцев И.С., Друкаренко Н.А., Мызнов К.Е., Наумов К.В. Сравнение результатов применения двух спекловых методов изучения многоциклового усталости конструкционной стали // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 1. С. 20–29. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-20-29

Comparison of application results of two speckle methods for study multi-cycle fatigue of structural steel

Alexandr P. Vladimirov¹, Ivan S. Kamantsev², Nikita A. Drukarenko³,
Konstantin E. Myznov⁴✉, Konstantin V. Naumov⁵

^{1,2,3} Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620049, Russian Federation

⁴ Institute of Metal Physics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108, Russian Federation

⁵ Ural Federal University named after the First President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

¹ vap52@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6343-9772>

² ks@imach.uran.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>

³ targosk@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5979-7398>

⁴ myznov@imp.uran.ru✉, <https://orcid.org/0009-0002-0411-1712>

⁵ knaumov98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5636-9857>

Abstract

The new method of time-averaged speckle images and the well-known method of speckle-field interference studied the development of plastic deformations occurring during multicycle fatigue of structural steel. The correctness of strain determination by the new method is evaluated by comparing the data obtained by the two methods. Two optical systems including laser modules with different wavelengths were investigated. The proposed optical system allows to determine the components Δu_y , Δu_z of the relative displacement vector of two surface points located at a distance (measurement base) $\Delta s = 66 \mu\text{m}$. The known scheme makes it possible to describe deformations by the traditional method on the base of $470 \mu\text{m}$. The object of study was a flat specimen made of 09Г2С steel with two side notches. Fatigue tests were carried out on a resonance-type machine at different cycle amplitudes. It is shown that at all cycle amplitudes the development of plastic deformations occurs by the mechanism of cyclic creep. There is a good correlation between the data obtained by two different speckle methods. At the same time, the strain estimated by the new method is in some cases an order of magnitude higher than the strain calculated by the known method. Obviously, this is due to the existence of local small-sized (of the order of $10^1 \mu\text{m}$) strain areas which cannot be measured by conventional methods. The ultimate tensile strain $\Delta u_y/\Delta s$ calculated by the new method is of the order of 10^{-1} , which coincides with the similar strain occurring in tensile testing of standard specimens. The results obtained by the new method justify the need of developing sensors and nondestructive testing devices of a new generation, allowing to estimate the time to fatigue crack initiation by the rate of change of physical quantities and by their limit values.

Keywords

high-cycle fatigue, steel, destruction, speckles, interference, free space, image

Acknowledgements

The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the topic no. AAAA-18-118020790148-1 and “Diagnostics” no. 122021000030-1. The equipment of the Collective Center “Plastometria” at Institute of Engineering Science of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences was used for this work.

For citation: Vladimirov A.P., Kamantsev I.S., Drukarenko N.A., Myznov K.E., Naumov K.V. Comparison of applications results of two speckle methods for study multi-cycle fatigue of structural steel. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 20–29 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-1-20-29

Введение

При освещении когерентным светом шероховатой поверхности, а также прозрачного объекта через матовое стекло, в свободном пространстве и в плоскости изображения объектов образуется пятнистая или спекловая структура рассеянного излучения. Использование спекловых [1], а также других оптических [2] и не оптических методов [3, 4] для изучения многоциклового усталости материалов является актуальной задачей. В работах [5, 6] описан новый спекловый метод, который по чувствительности и пространственному разрешению на два порядка превосходит имеющиеся оптические методы определения

деформации. В [7] путем регистрации на одном кадре трех спекловых изображений, формируемых под углом ракурсами наблюдения, с использованием нового метода были найдены зависимости трех компонент вектора относительного перемещения точек поверхности от числа циклов деформации. Было обнаружено, что предельная локальная растягивающая деформация, соответствующая зарождению трещины, на базе измерения 66 мкм достигает порядка 10^{-1} . Полученное значение деформации по порядку величин совпадает с предельной деформацией, возникающей при испытаниях стандартных образцов в условиях их квазистатического растяжения. Вследствие важности указанного совпадения, как с научной, так и с практической точек

зрения, необходимо оценить надежность полученного результата. Недостатком метода является определение порядка интерференции с точностью до знака. В настоящей работе данные, полученные новым методом, сравнивались с результатами, полученными с помощью известного спеклового метода [8], позволяющего определять величину и знак порядка интерференции.

Цели настоящей работы: воспроизведение значения предельной растягивающей деформации, соответствующей зарождению трещины; сравнение необратимых относительных перемещений точек поверхности одновременно новым методом и известным методом интерференции двух спекл-полей; изучение особенности локализации необратимых деформаций при разных амплитудах цикла.

Теоретические положения

В работе [8] представлены теория метода интерференции двух спекл-полей в свободном пространстве и возможности его применения для изучения деформаций. Если два малых участка тела осветить когерентным светом от одного источника, то при равенстве направлений освещения этих участков и направлений наблюдения, связь между разностью оптических путей Δu двух волн, отраженных от центров двух освещенных участков поверхности, находящихся на расстоянии Δs , и порядком интерференции Δn в точке наблюдения, расположенной в области наложения двух спекл-полей, определим формулой:

$$\Delta u = \Delta \mathbf{u} \cdot (\mathbf{I}_s + \mathbf{I}) = \lambda \Delta n, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения; \mathbf{I}_s и \mathbf{I} — единичные векторы, направленные от центров освещенных участков к источнику света и в точку наблюдения; $\Delta \mathbf{u}$ — вектор относительного перемещения двух точек поверхности, расположенных на расстоянии (на базе измерения) Δs .

Теория усредненных во времени спекловых изображений для отражающего и прозрачного объектов приведена в работах [5, 9] и [6, 10, 11]. В принятой модели предположено, что в общем случае центры рассеяния отражающего объекта перемещаются поступательно, совершают периодические движения, а также случайным образом перемещаются в пространстве. Аналогично предполагалось, что тонкий прозрачный объект, расположенный вблизи случайного фазового экрана, перемещается поступательно, совершает периодические движения, а показатель преломления изменяется случайным образом. Регистрируемая величина — среднее по времени цифровое значение интенсивности излучения \tilde{I} в произвольной точке \mathbf{q} плоскости изображения объекта, а также временная автокорреляционная функция $\eta(t_1, t_2)$ этой интенсивности, где t_1 и t_2 — начальный и текущий моменты времени. Отметим, что время усреднения должно быть кратным периоду колебаний объекта. Определяемая величина — разность оптических путей Δu двух волн, распространяющихся на среднем, характерном расстоянии Δs в окрестности точки в плоскости объекта, сопряженной точке \mathbf{q} . Размер этой области равен ли-

нейному разрешению линзы Δx . При изменении Δu во времени функции $\tilde{I}(t)$ и $\eta(t_1, t_2)$ в общем случае являются квазипериодическими. Если объект является отражающим, то связь между Δu и Δn определяется по формуле (1), где теперь Δn — период указанных функций $\tilde{I}(t)$ и $\eta(t_1, t_2)$. За счет использования нескольких направлений наблюдения становится возможной регистрация изменения компонент вектора $\Delta \mathbf{u}$ во времени. Для прозрачного объекта используется формула $\Delta u = \Delta n_0 L$, где Δn_0 — разность показателя преломления на базе Δs ; L — толщина объекта. На практике, как будет показано в разделе «Методика эксперимента», функцию $\eta(t_1, t_2)$ определим по фрагменту спеклового изображения. Этому фрагменту в сопряженной области объекта соответствует область поверхности, содержащая определенное количество участков размером Δx . Если деформация области поверхности однородна, то функция $\eta(t_1, t_2)$ квазипериодически изменяется в интервале от +1 до -1. Если деформация неоднородна, то по недостижению функцией $\eta(t_1, t_2)$ значений +1 и -1 можно определить дисперсию величины Δu .

Преобразуем формулу (1) к следующему виду:

$$\Delta u_d 2 \cos(\theta/2) = \lambda \Delta n, \quad (2)$$

где Δu_d — проекция вектора $\Delta \mathbf{u}$ на биссектрису угла θ между единичными векторами \mathbf{I}_s и \mathbf{I} .

Методика эксперимента

Для проведения эксперимента были собраны две оптические системы, в которых применены лазерные модули с разными длинами волн. Первая оптическая система (рис. 1, а) использована для формирования двух спекловых изображений (рис. 2, а) на одном кадре монохромной видеокамеры, необходимых для определения двух компонент вектора относительных необратимых перемещений. Направление освещения и два направления наблюдения объекта расположены в плоскости yoz . Во второй оптической системе (рис. 1, б) луч лазера разделен на два пучка, пучки фокусировались на два расположенные рядом участка поверхности в центре образца. Интерференционные полосы (рис. 2, б), возникающие в свободном пространстве в области наложения двух спеклов, были зарегистрированы с помощью цветной видеокамеры. Направление освещения и наблюдения также сформированы в плоскости yoz . Объект исследования — плоский образец из стали 09Г2С с двумя симметричными выточками диаметром 5 мм и размерами $3,1 \times 1,8$ мм в минимальном сечении (рис. 3). Образец был подвергнут циклическому деформированию с частотой около 100 Гц и коэффициентом асимметрии цикла 0,1, при этом амплитуда цикла последовательно увеличивалась от 1,0 кН до 1,8 кН с шагом 0,1 кН. Образец выдерживался при постоянной амплитуде сначала в течение 34 и 65 тысяч циклов, затем в течение 100 тысяч циклов.

Рассматриваемые оптические системы были собраны таким образом, чтобы биссектрисы угла θ_1 для одного из направлений наблюдения первой системы и угла θ_2 второй системы совпали. С использованием

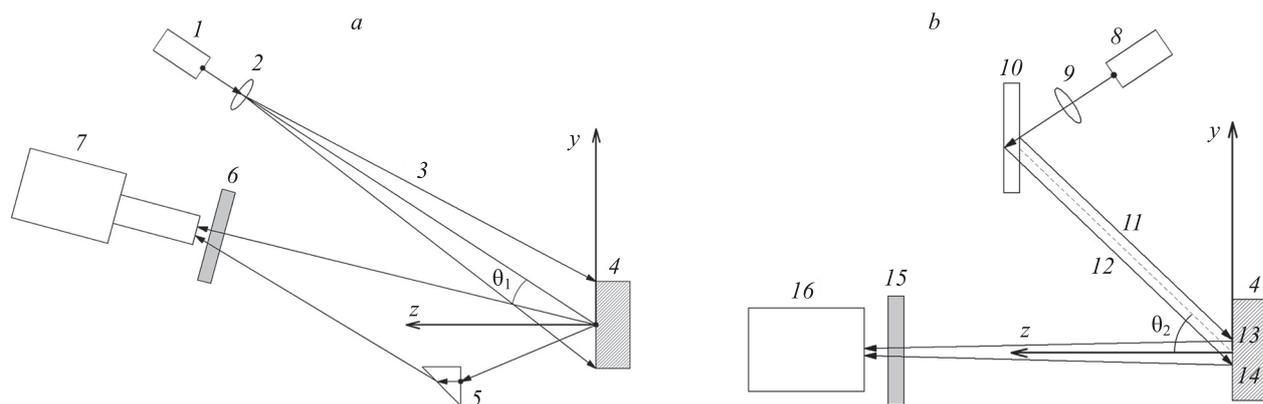


Рис. 1. Оптические системы, использованные для изучения усталости стали спекловыми методами: усредненных во времени спекловых изображений (а) и интерференции спекл-полей (б).

1 — лазерный модуль ($\lambda = 532$ нм); 2 — микрообъектив; 3 — освещающий пучок; 4 — образец; 5 — оптическая призма; 6 — зеленый светофильтр; 7 — монохромная видеокамера; 8 — лазерный модуль ($\lambda = 650$ нм); 9 — фокусирующая линза; 10 — плоскопараллельная пластина; 11 и 12 — освещающие пучки; 13 и 14 — освещенные участки; 15 — красный светофильтр; 16 — цветная видеокамера

Fig. 1. Optical systems used to study steel fatigue by speckle methods: time-averaged speckle images (a) and speckle-field interference (b).

1 — laser module ($\lambda = 532$ nm); 2 — microlens; 3 — illuminating beam; 4 — specimen; 5 — optical prism; 6 — green light filter; 7 — monochrome video camera; 8 — laser module ($\lambda = 650$ nm); 9 — focusing lens; 10 — parallel-sided plate; 11 and 12 — illuminating beams; 13 and 14 — illuminated areas; 15 — red light filter; 16 — color video camera

двух систем были зарегистрированы три зависимости величины Δn от числа циклов N нагружения. На кадре (рис. 2, б) в центре светлой или темной интерференционной полосы выбрана точка (пиксел) наблюдения и по смещению полос относительно выбранной точки визуально с точностью 1/10 полосы определено значение

порядка интерференции Δn . На двух спекловых изображениях (рис. 2, а) в центре изображений рабочей части образца выбраны пиксели для определения цифрового значения интенсивности \tilde{I} , а также два фрагмента изображения размером 3×3 пиксела для определения коэффициента корреляции η . По функциям $\tilde{I}(t)$ и $\eta(t_1, t_2)$

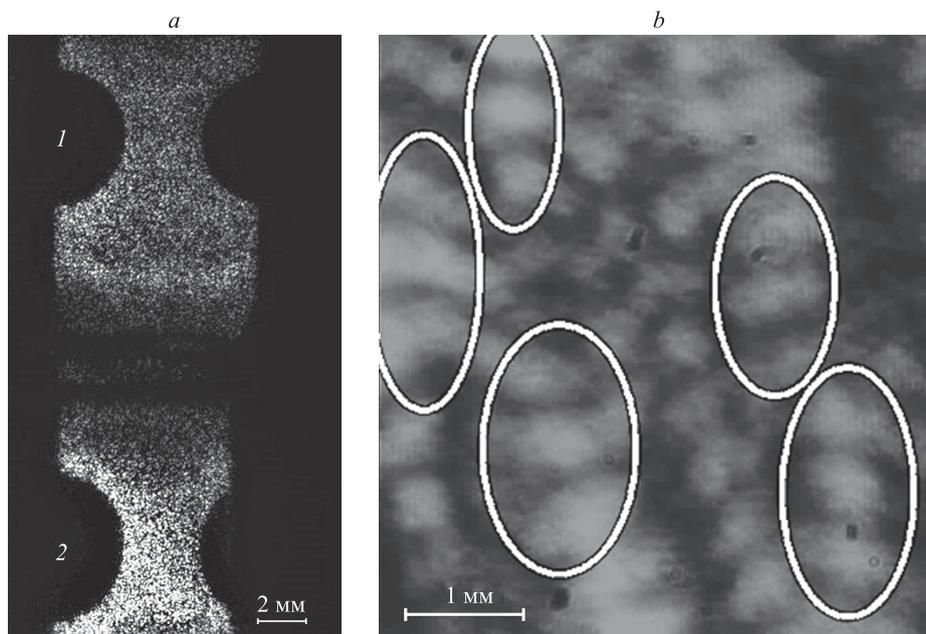


Рис. 2. Кадры, полученные с помощью методов: усредненных во времени спекловых изображений (а) и интерференции спекл-полей (б).

1 и 2 — спекловые изображения, соответствующие двум направлениям наблюдения под углами $88^\circ 12'$ и $101^\circ 18'$ к оси oy .
Белые овалы — области, по которым можно определять смещение полос

Fig. 2. Frames obtained using the time-averaged speckle image method (a) and the speckle-field interference method (b).

1 and 2 — speckle images corresponding to two observation directions at angles of $88^\circ 12'$ and $101^\circ 18'$ to the oy axis.
White ellipses — areas by which the fringe shift can be determined

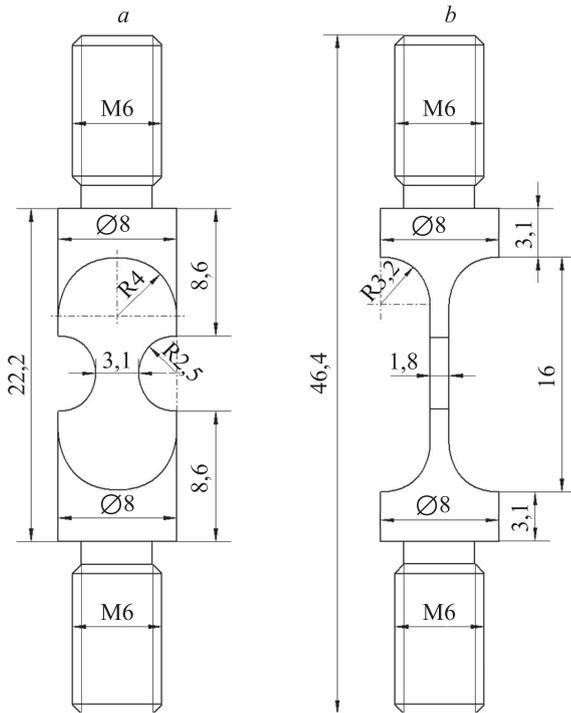


Рис. 3. Плоский образец из стали 09Г2С видов: спереди (а) и сбоку (b)

Fig. 3. Flat specimen from 09Г2С steel: front (a) and side (b) views

определены зависимости количества периодов Δn этих функций от числа циклов нагружения N . Аналогично получены зависимости $\Delta n(N)$, соответствующие участку поверхности в зоне зарождения трещины. Величина η , являющаяся коэффициентом корреляции цифровых значений интенсивности в моменты времени t_1 и t_2 , определена с точностью порядка 1 % [5, формула (38)].

Особенности локализации пластических деформаций при разных амплитудах прикладываемых усилий изучали по распределениям величины η в изображении образца, расположенного в верхней части кадра (рис. 2, а). Для визуализации приращений зон пласти-

ческих деформаций в начале опыта время t_1 выбрано после 50 циклов нагружения, а время t_2 — в пределах временного интервала, соответствующего постоянному значению амплитуды цикла в 1,1 кН. Размеры фрагментов изображения, равнялись 5×5 пикселям. Одному пикселу соответствует участок объекта, равный 66 мкм. Локализация деформаций при увеличении амплитуды цикла еще на 0,1 кН наблюдалась аналогичным образом. Для точного определения начала развития необратимых процессов время t_1 было выбрано до изменения амплитуды цикла, а время t_2 — после. На рис. 4 приведены типичные распределения величины η , полученные по рассмотренной методике, демонстрирующие зоны приращений пластических деформаций. Размер ΔY зоны приращенных пластических деформаций определим по расстоянию вдоль оси ou между верхней и нижней границами визуально наблюдаемой неоднородности в распределении величины η . Границу неоднородности определим по уровню $\eta = 0,6$, что примерно соответствует приращению пластической деформации на величину порядка 10^{-4} .

Результаты и их обсуждение

На рис. 5 приведены типичные совмещенные зависимости величины Δn от числа циклов нагружения N для центра образца, полученные двумя рассмотренными в разделе «Методика эксперимента» спекловыми методами. Зависимости были получены путем обработки кадров, зарегистрированных после увеличения амплитуды цикла от 1,1 до 1,2 кН. Видно, что имеется хорошая корреляция между значениями массивов Δn двух методов. Для разных амплитуд цикла коэффициенты корреляции двух массивов данных находятся в пределах от 0,86 до 0,996. По максимальным значениям Δn (2,4 и 2,25), приведенным на рис. 5, по формуле (2) с учетом конкретных значений угла θ , для двух методов имеем два значения Δu_d , равные 0,64 и 0,75 мкм. В качестве меры необратимой деформации ε_p рассчитаем отношение Δu_d к базе измерения. Получим, что соответствующее увеличению амплитуды цикла от 1,1

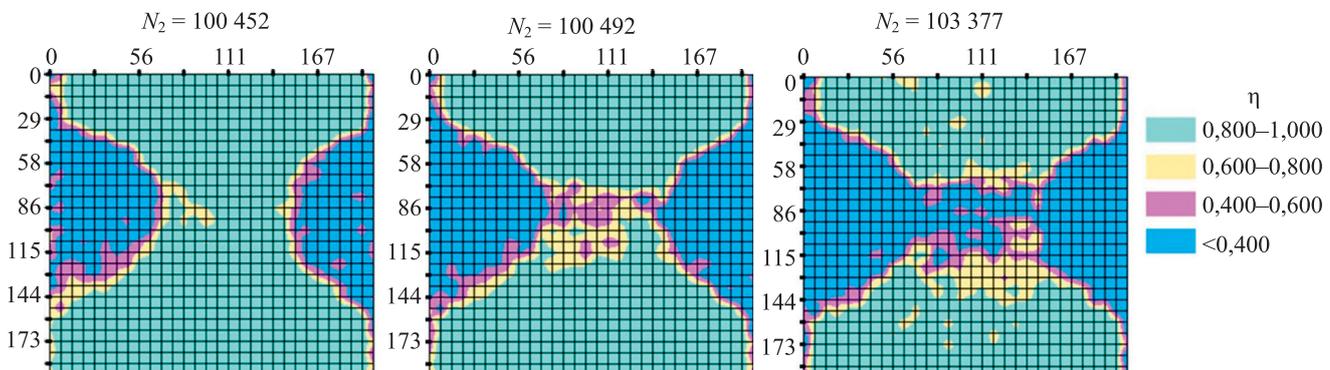


Рис. 4. Распределение величины $\eta(t_1, t_2)$ при увеличении амплитуды цикла от 1,1 до 1,2 кН и значении N_1 равном 99 751 циклов.

N_1 и N_2 — число циклов, соответствующее времени t_1 и t_2

Fig. 4. Distribution of the value of $\eta(t_1, t_2)$ when increasing the double cycle amplitude from 1.1 to 1.2 kN and the value of N_1 equal to 99,751 cycles.

N_1 and N_2 — number of cycles corresponding to time t_1 and t_2

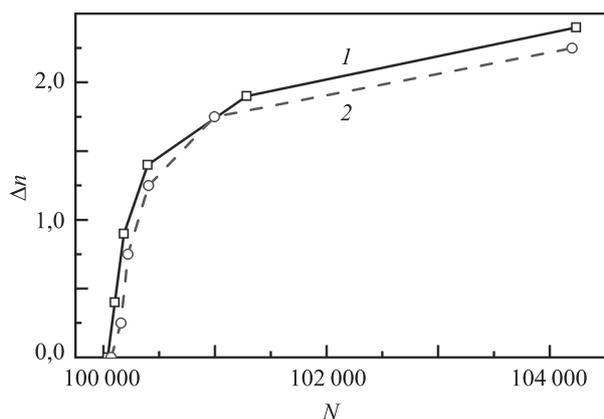


Рис. 5. Типичные зависимости величины Δn от числа циклов нагружения N , полученные двумя спекловыми методами: усредненных во времени спекловых изображений (кривая 1) и интерференции спекл-полей (кривая 2)

Fig. 5. Typical dependences of Δn value vs. the number of loading cycles N obtained by two speckle methods: time-averaged speckle images (curve 1) and speckle-field interference (curve 2)

до 1,2 кН значение ϵ_p на базе измерения 66 мкм, найденное по изменению величины \bar{I} , равно $0,97 \cdot 10^{-2}$, а на базе 470 мкм (расстояние между двумя освещенными участками на поверхности) по смещению полос — $1,6 \cdot 10^{-3}$. Оценка деформаций по всем амплитудам цикла показала, что деформации, найденные методом усредненных во времени спекловых изображений на порядок больше, чем найденные методом интерференции спекл-полей.

На рис. 6 приведены совмещенные зависимости величины, полученные методом усредненных во времени спекловых изображений, от числа циклов нагружения

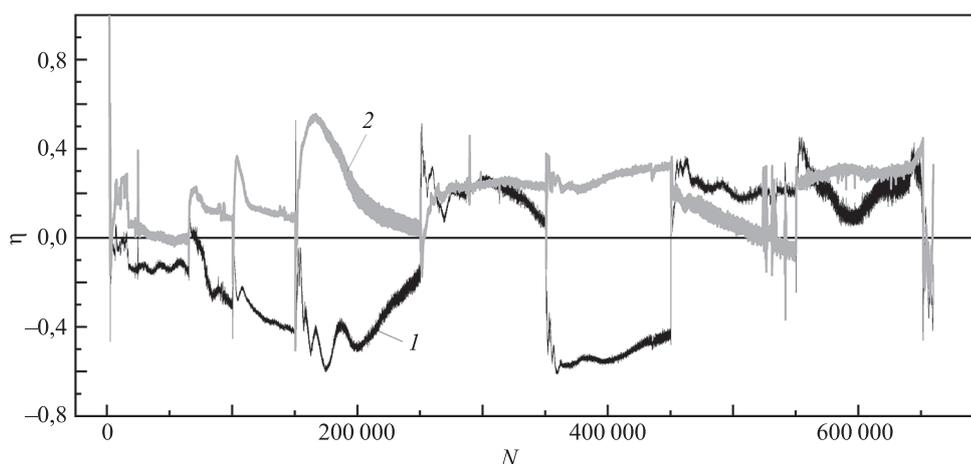


Рис. 6. Зависимости коэффициента корреляции η от числа циклов нагружения N для пикселей, находящихся в центре двух изображений рабочей части образца.

Направления наблюдения: под углами $88^\circ 12'$ (кривая 1) и $101^\circ 18'$ к оси oy

Fig. 6. Dependence of the correlation coefficient η vs. the number of loading cycles N for the pixels located in the center of two images of the working part of the specimen.

Observation directions: at angles of $88^\circ 12'$ (curve 1) and $101^\circ 18'$ (curve 2) to the oy axis

N для двух направлений наблюдения, кривые соответствуют центру рабочей части образца. По полученным зависимостям построены графики $\Delta n(N)$. Значения Δn определены по достижению η нуля, а также по минимальным отрицательным и максимальным положительным значениям η . Величина Δn для произвольного значения N определена с помощью линейной интерполяции данных по ближайшим двум значениям Δn . По двум зависимостям $\Delta n(N)$ путем решения системы двух уравнений, выведенных из формулы (1), с двумя неизвестными компонентами Δu_y и Δu_z вектора $\Delta \mathbf{u}$ построены зависимости $\Delta u_y(N)$ и $\Delta u_z(N)$ (рис. 7). Видно, что предельные значения растягивающих деформаций ϵ_{yy} найденных как отношение максимальных значений Δu_y к базе измерения 66 мкм, в центре образца равны 0,48, а в зоне зарождения трещины — 0,71, что в 1,5 раза больше, чем в центре образца. Полученные значения ϵ_{yy} имеют порядок 10^{-1} , что воспроизводит значение предельной растягивающей деформации в зоне зарождения трещины, приведенное в работе [7].

Значения ΔY определим по методике, описанной в разделе «Методика эксперимента». Анализ распределений величины η при амплитуде 1,1 кН показал, что уже в самом начале стабилизации резонансной частоты машины необратимые процессы возникают в небольшой зоне на месте возникновения макротрещины. Далее зона пластических деформаций быстро охватывает область длиной 3,3 мм рабочей части образца. Затем наблюдалась полная декорреляция всей картины спеклов, по-видимому, связанная как с притиркой системы «образец-машина» в процессе стабилизации резонансной частоты испытательной машины, так и с деформацией участков размером 66 мкм на всей наблюдаемой области на величину порядка 10^{-3} . В дальнейшем был выбран первый кадр после стабилизации резонансной частоты для сравнения с последующими кадрами. Аналогично выполнен анализ приращения длины зоны

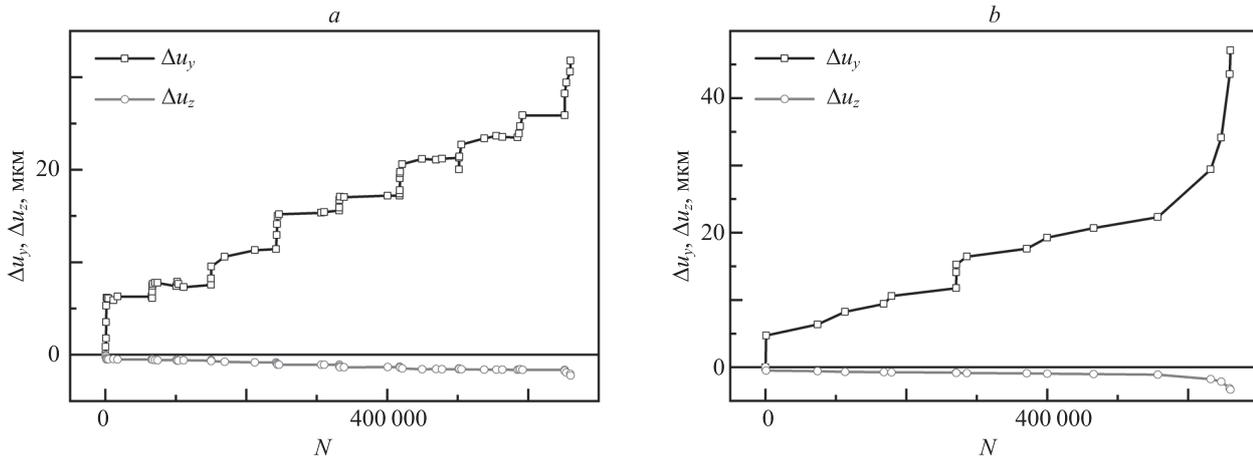


Рис. 7. Зависимости Δu_y , Δu_z от количества циклов N для участка, находящегося в центре рабочей части образца (а) и в зоне зарождения трещины (б)

Fig. 7. Dependences of Δu_y , Δu_z vs. the number of cycles N for the area located in the center of the working part of the specimen (а) and in the crack initiation zone (б)

необратимых процессов для остальных амплитуд цикла. Из приведенной на рис. 8 зависимости видно, что по мере увеличения амплитуды цикла первоначальное значение величины ΔY , равное 3,3 мм, достигается при амплитуде, равной 1,5 кН. После увеличения амплитуды цикла до 1,8 кН величина ΔY быстро увеличивается до 5,4 мм.

Данные, полученные в настоящей работе и в предыдущем опыте с острым надрезом типа Шарпи [12] на образце из стали 09Г2С, а также в работах [13–15], позволяют сделать выводы о накоплении повреждений при многоциклового усталости стали 09Г2С. Как известно [16, 17], многоциклового усталость возникает при напряжениях ниже, равных и превышающих предел текучести материала. Если максимальное напряжение цикла ниже предела текучести, в локальных областях матери-

ала найдутся участки, в которых напряжение превышает предел текучести. В этих областях может начаться так называемая циклическая ползучесть, характерная для циклически разупрочняющегося материала. Особенностью этой ползучести является резкое увеличение пластической деформации на начальной стадии усталости, затем постепенное ее уменьшение и подрастание с малой скоростью (рис. 4). Согласно ранее полученным данным, предельные пластические деформации циклически деформируемых образцов достигают значений 10^{-4} (в отдельных случаях 10^{-3}) [13]. В настоящей работе при использовании нового метода зафиксированы деформации порядка 10^{-2} при первых 780 циклах, и 10^{-1} на стадии предразрушения в центре образца, а также в зоне зарождения трещины (рис. 5). Причина полученных разных значений деформаций заключа-

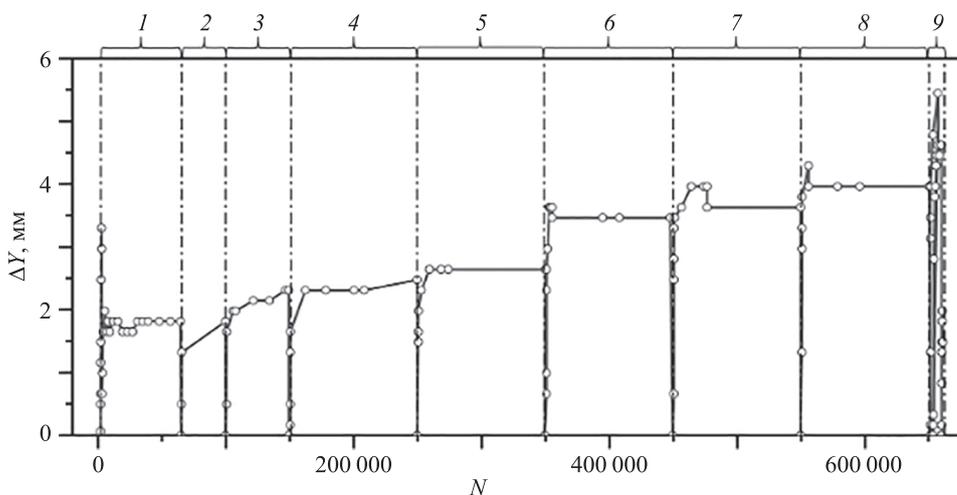


Рис. 8. Зависимость размера зоны приращенных пластических деформаций ΔY от количества циклов N . Числа сверху графика означают номера промежутков с постоянными значениями амплитуд цикла: 1 — 1 кН; 2 — 1,1 кН; 3 — 1,2 кН; 4 — 1,3 кН; 5 — 1,4 кН; 6 — 1,5 кН; 7 — 1,6 кН; 8 — 1,7 кН; 9 — 1,8 кН

Fig. 8. Dependence of the size of the incremented plastic deformation zone ΔY vs. the number of cycles N . The numbers at the top of the graph indicate the numbers of intervals with constant values of cycle amplitudes: 1 — 1 kN; 2 — 1.1 kN; 3 — 1.2 kN; 4 — 1.3 kN; 5 — 1.4 kN; 6 — 1.5 kN; 7 — 1.6 kN; 8 — 1.7 kN; 9 — 1.8 kN

ется в существенной разнице базы измерения: если в настоящей работе базы измерения были порядка 10^1 и 10^2 мкм, то в предыдущих работах до 100 мм и более.

По результатам анализа работ по циклической ползучести [18], разупрочнение материалов может быть вызвано структурно-фазовыми превращениями, накоплением усталостных повреждений и диссипативными процессами. В работе [9] представлены теоретические и экспериментальные данные, которые указывают на наличие нескольких m процессов, одновременно протекающих на поверхности образца с разной скоростью, которые вносят вклад в изменение величины Δu . Определение дисперсии и времени релаксации вкладов Δu_m в суммарное значение Δu по методике [9] является предметом дальнейших исследований.

Отметим, что в настоящее время не найдены конкретные механизмы усталостных повреждений, которые оказывают влияние на сталь 09Г2С. Выявление этих механизмов, анализ их влияния на изменение величин $\dot{\epsilon}$ и η , а также изучение эволюции не только пластических, но и упругих деформаций будут изучены в дальнейшем.

Совпадение по порядку величин предельных деформаций, возникающих при многоциклового усталости и в опытах на квазистатическое растяжение стандартных образцов, объясняет причину локализации деформаций, и причину не регистрации многоциклового усталости существующими методами неразрушающего контроля. Как показывает опыт, при испытании и эксплуатации образцов и деталей типичных размеров, в условиях многоциклового усталости имеют место абсолютные и относительные перемещения точек поверхности около 1 мкм. Тогда деформации металла порядка 10^{-1} будут в областях порядка 10^1 мкм, порядка 10^{-2} — в областях 10^2 мкм, а минимальные пластические деформации 10^{-3} — в областях 1 мм. Существующие методы контроля имеют базу измерения не менее 1 мм, но часто это сантиметры [13] и даже дециметры. Исходя из этого, большие деформации, возникающие в малых областях среды, как правило, регистрируются приборами в виде шума.

На основе сравнения данных, полученных двумя оптическими методами, можно сделать вывод о том, что при всех амплитудах цикла развитие пластических деформаций происходит по механизму циклической ползучести. Существует хорошая корреляция данных, полученных двумя разными спекловыми методами, однако деформация, оцененная новым методом, на порядок превышает значение деформации, рассчитанной известным методом. Различие растягивающих деформаций, оцененных двумя методами, объясняется использованием разных баз измерения, а также указывает на локализацию пластических деформаций на участках размером порядка 10^1 мкм.

Так как оптические методы контроля не всегда применимы на практике, то необходима модернизация существующих методов неразрушающего контроля, которые на данный момент не способны определять деформации на малых базах измерения. К таким методам можно отнести вихретоковый, акустический, магнито-

резистивный и тепловой. Модернизация возможна в направлении создания приборов с датчиками матричного типа с размером ячеек порядка 10^1 мкм.

Заключение

В работе использован плоский образец из стали 09Г2С с двумя симметричными боковыми вырезами. Образец применен для анализа развития пластических деформаций при многоциклового усталости.

Для определения пластических деформаций применены новый и известный спекловые методы: усредненных во времени спекловых изображений и интерференции двух спекл-полей. Преимуществами нового метода перед известным является меньшая база измерения, позволяющая выявлять деформации на более малоразмерных участках на поверхности объекта, и возможность оценки сразу нескольких компонент вектора относительного перемещения.

Визуализация зоны пластических деформаций осуществлена по распределению коэффициента корреляции интенсивностей излучения во фрагментах спекловых изображений размером 5×5 пикселей, взятых в начальный и текущий моменты времени. Показано, что в самом начале опыта при амплитуде цикла 1,0 кН первые признаки необратимых процессов обнаружены на месте будущей трещины. Затем в течение 780 циклов длина зоны пластических деформаций увеличилась до 3,3 мм. При последующих увеличениях амплитуды до 1,5 кН приращение длины зоны не наблюдалось, необратимые деформации протекали внутри указанной зоны. При увеличении амплитуды с 1,5 до 1,8 кН длина зоны увеличивалась до 5,4 мм. В пределах этой зоны пластические деформации протекали не равномерно, а в локализованных малых участках.

Получена высокая корреляция относительных перемещений, определяемых двумя методами на базах измерений 66 и 470 мкм соответственно. Обоиими методами обнаружено, что при увеличении амплитуды цикла накопление пластических деформаций осуществляется по механизму циклической ползучести циклически разупрочняющегося материала. Полученные результаты позволяют сделать вывод о корректности оценки деформаций новым методом. С использованием нового метода подтверждено значение предельной растягивающей деформации в зоне зарождения трещины порядка 10^{-1} .

Показано, что деформация, оцененная новым методом, на порядок превышает значение деформации, рассчитанной известным методом. Отмечено, что это связано с возникновением при многоциклового усталости локальных участков деформации размером порядка 10^1 мкм, регистрация которых традиционными методами, по причинам большой базы измерения, невозможна.

Вследствие не регистрации неоптическими методами неразрушающего контроля многоциклового усталости обоснована их модернизация путем разработки и использования датчиков матричного типа с размерами ячеек порядка 10^1 мкм.

Литература

References

1. Владимиров А.П. Динамическая спекл-интерферометрия микроскопических и макрокопических процессов в деформируемых средах // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2015. № 6. С. 27–57. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2015.6.027-057>
2. Новиков И.И., Ермишкин В.А. Физическая механика реальных материалов. М.: Наука, 2004. 328 с.
3. Горкунов Э.С., Саврай Р.А., Макаров А.В., Задворкин С.М. Магнитные методы оценки упругой и пластической деформации при циклическом нагружении стальных // *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2015. № 2. С. 6–15. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2015.2.006-015>
4. Горкунов Э.С., Поволоцкая А.М., Задворкин С.М., Путилова Е.А., Мушников А.Н., Базулин Е.Г., Вopilкин А.Х. Особенности поведения магнитных и акустических характеристик горячекатаной стали 08Г2Б при циклическом нагружении // *Дефектоскопия*. 2019. № 11. С. 21–31. <https://doi.org/10.1134/S0130308219110034>
5. Vladimirov A.P. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media // *Optical Engineering*. 2016. V. 55. N 12. P. 121727. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.12.121727>
6. Vladimirov A.P. Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue: Theory and some experiments // *AIP Conference Proceedings*. 2016. V. 1740. P. 040004. <https://doi.org/10.1063/1.4952663>
7. Владимиров А.П., Друкаренко Н.А., Мызнов К.Е. Использование спекловых изображений для определения локальных пластических деформаций, возникающих при многоциклового усталости стали 09Г2С // Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 15. С. 35–38. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.15.51232.18752>
8. Владимиров А.П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 240 с.
9. Владимиров А.П., Друкаренко Н.А., Михайленко Ю.А. Спекл-диагностика необратимых процессов, протекающих в некоторых живых и технических объектах // Оптические методы исследования потоков: Труды XVI Международной научно-технической конференции, 28 июня — 02 июля 2021. М.: Издательство «Перо», 2021. С. 51–62 [Электронный ресурс]. URL: <https://omfi-conf.ru/omfi2021/OMFI-2021-Proceedings.pdf> (дата обращения: 14.12.2022).
10. Vladimirov A.P. Speckle tomography of the living-cell functions // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2021. V. 63. N 8. P. 592–604. <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10082-y>
11. Vladimirov A.P. Dynamic speckle-interferometry of microscopic processes in thin biological objects // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015. V. 57. N 8-9. P. 564–576. <https://doi.org/10.1007/s11141-015-9540-2>
12. 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. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2018.3.13>
13. Троценко В.Т. Усталость и неупругость металлов. Киев: Наукова думка, 1971. 268 с.
14. Coffin L.F. *Symposium on Internal Stress and Fatigue of Metals*. Elsevier, 1959. 451 p.
15. Klesnil M., Lukác P. *Fatigue of Metallic Materials*. Elsevier, 1992. 270 p.
16. Гаф Г.Дж. Усталость металлов / пер. с англ. М., Л.: Гл. ред. лит. по черн. металлургии, 1935. 304 с.
17. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов: учебник. М.: Наука, 1989. 230 с.
18. Голуб В.П. Исследования в области циклической ползучести материалов (обзор) // Прикладная механика. 1987. Т. 23. № 12. С. 3–19.
1. Vladimirov A.P. Dynamic speckle interferometry of microscopic and macroscopic processes in deformable media. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, no. 6, pp. 27–57. (in Russian). <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2015.6.027-057>
2. Novikov I.I., Ermishkin V.A. *Physical Mechanics of Real Materials*. Moscow, Nauka Publ., 2004, 328 p. (in Russian)
3. Gorkunov E.S., Savrai R.A., Makarov A.V., Zadvorkin S.M. Magnetic techniques for estimating elastic and plastic strains in steels under cyclic loading. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*, 2015, no. 2, pp. 6–15. (in Russian). <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2015.2.006-015>
4. Gorkunov E.S., Povolotskaya A.M., Zadvorkin S.M., Putilova E.A., Mushnikov A.N., Bazulin E.G., Vopilkin A.K. Some features in the behavior of magnetic and acoustic characteristics of hot-rolled 08G2B steel under cyclic loading. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, no. 11, pp. 827–836. <https://doi.org/10.1134/S1061830919110044>
5. Vladimirov A.P. Speckle metrology of dynamic macro- and microprocesses in deformable media. *Optical Engineering*, 2016, vol. 55, no. 12, pp. 121727. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.12.121727>
6. Vladimirov A.P. Dynamic speckle interferometry of high-cycle material fatigue: Theory and some experiments. *AIP Conference Proceedings*, 2016, vol. 1740, pp. 040004. <https://doi.org/10.1063/1.4952663>
7. 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, no. 11, pp. 777–780. <https://doi.org/10.1134/S1063785021080137>
8. Vladimirov A.P. *Dynamic Speckle Interferometry of Deformable Bodies*. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004, 240 p. (in Russian)
9. Vladimirov A.P. Drukarenko N.A., Mikhailenko Yu.A. Speckle-diagnostics of irreversible processes occurring in some living and technical objects. *Proc. of the International Conference Optical Methods of Flow Investigation (OMFI 2021) 28 June – 2 July 2021*. Available at: <https://omfi-conf.ru/omfi2021/OMFI-2021-Proceedings.pdf> (accessed: 14.12.2022). (in Russian)
10. Vladimirov A.P. Speckle tomography of the living-cell functions. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2021, vol. 63, no. 8, pp. 592–604. <https://doi.org/10.1007/s11141-021-10082-y>
11. Vladimirov A.P. Dynamic speckle-interferometry of microscopic processes in thin biological objects. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2015, vol. 57, no. 8-9, pp. 564–576. <https://doi.org/10.1007/s11141-015-9540-2>
12. Vladimirov A.P., Ponosov Yu.S. Application of speckle dynamics and Raman light scattering to study the fracture features of pipe steel at high-cycle fatigue. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2018, no. 3, pp. 138–146. (in Russian). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2018.3.13>
13. Troshchenko V.T. *Fatigue and Inelasticity of Metals*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1971, 268 p. (in Russian)
14. Coffin L.F. *Symposium on Internal Stress and Fatigue of Metals*. Elsevier, 1959, 451 p.
15. Klesnil M., Lukác P. *Fatigue of Metallic Materials*. Elsevier, 1992, 270 p.
16. Gough H.J. *The Fatigue of Metals*. E. Benn, 1926, 304 p.
17. Botvina L.R. *Fracture Kinetics of Structural Materials*. Moscow, Nauka Publ., 1989, 230 p. (in Russian)
18. Golub V.P. Investigations into cyclic creep of materials (review). *Soviet Applied Mechanics*, 1987, vol. 23, no. 12, pp. 1107–1121. <https://doi.org/10.1007/BF00884887>

Авторы

Владимиров Александр Петрович — доктор технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник, Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, [sc 56204831400](https://orcid.org/0000-0001-6343-9772), <https://orcid.org/0000-0001-6343-9772>, vap52@bk.ru

Каманцев Иван Сергеевич — кандидат технических наук, заведующий сектором, старший научный сотрудник, Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, [sc 36696097700](https://orcid.org/0000-0003-0775-4043), <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>, ks@imach.uran.ru

Друкаренко Никита Александрович — младший научный сотрудник, Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук Екатеринбург, 620049, Российская Федерация, [sc 57200041012](https://orcid.org/0000-0002-5979-7398), <https://orcid.org/0000-0002-5979-7398>, targosk@ya.ru

Мызнов Константин Евгеньевич — младший научный сотрудник, Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, 620108, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0002-0411-1712>, myznov@imp.uran.ru

Наумов Константин Вячеславович — студент, Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5636-9857>, knaumov98@mail.ru

Authors

Alexandr P. Vladimirov — D.Sc., Senior Researcher, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620049, Russian Federation, [sc 56204831400](https://orcid.org/0000-0001-6343-9772), <https://orcid.org/0000-0001-6343-9772>, vap52@bk.ru

Ivan S. Kamantsev — PhD, Head of Sector, Senior Researcher, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, [sc 36696097700](https://orcid.org/0000-0003-0775-4043), <https://orcid.org/0000-0003-0775-4043>, ks@imach.uran.ru

Nikita A. Drukarenko — Junior Researcher, Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620049, Russian Federation, [sc 57200041012](https://orcid.org/0000-0002-5979-7398), <https://orcid.org/0000-0002-5979-7398>, targosk@ya.ru

Konstantin E. Myznov — Junior Researcher, Institute of Metal Physics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-0411-1712>, myznov@imp.uran.ru

Konstantin V. Naumov — Student, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, 620002, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5636-9857>, knaumov98@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 14.09.2023
Одобрена после рецензирования 12.12.2023
Принята к печати 20.01.2024*

*Received 14.09.2023
Approved after reviewing 12.12.2023
Accepted 20.01.2024*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»