

09.2;05.1

Использование спекловых изображений для определения локальных пластических деформаций, возникающих при многоциклового усталости стали 09Г2С

© А.П. Владимиров^{1,2}, Н.А. Друкаренко¹, К.Е. Мызнов²¹ Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, Россия² Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: var52@bk.ru

Поступило в Редакцию 4 марта 2021 г.

В окончательной редакции 16 апреля 2021 г.

Принято к публикации 4 мая 2021 г.

С использованием усредненных во времени спекловых изображений на образце из стали 09Г2С, изготовленном с двумя выточкам радиусом 2.5 мм, оценены пластические деформации, возникающие в зоне зарождения усталостной трещины. Показано, что усталостное разрушение возникает вследствие локализации необратимых процессов в области размером менее 1 мм, предельное значение растягивающих пластических деформаций имеет порядок 10^{-1} . В качестве предвестника разрушения предложено использовать уменьшение нормированной временной автокорреляционной функции интенсивности излучения до отрицательного значения.

Ключевые слова: спеклы, изображение, многоциклового усталость, деформация, разрушение.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.15.51232.18752

Актуальность изучения многоциклового усталости связана с тем, что от 50 до 70% деталей техники разрушаются вследствие этого типа усталости [1–3]. Несмотря на большую историю исследований [4–6] и многочисленные публикации [7,8], в настоящее время отсутствуют методы неразрушающего контроля и оценки остаточного ресурса деталей, работающих в условиях многоциклового усталости, которые удовлетворяли бы требованиям инженерной практики [2]. Сразу после создания лазеров и обнаружения спекловой структуры рассеянного излучения спеклограммы и голограммы были использованы для изучения усталостных явлений [9–11], однако из-за немоногоного изменения регистрируемых сигналов и трудоемкости методик они не получили широкого распространения. Указанные выше недостатки спекловых и голографических методов были преодолены в [12–14], а в работе [13] было дано теоретическое обоснование метода усредненных во времени спекловых изображений (спекл-картин в плоскости изображения объекта), продемонстрировано его использование для количественного определения необратимых деформаций, возникающих при испытании стали на многоциклового усталость, оценены погрешности измерений. Метод позволяет на базе порядка $10\ \mu\text{m}$ надежно определять относительные перемещения центров рассеяния поверхности на величину порядка 10 нм. В работе [14] показано, что метод по чувствительности и пространственному разрешению на один-два порядка превосходит имеющиеся традиционные методы корреляционной и голографической интерферометрии. В указанных выше работах [12–14] оптическая система позволяла определять проекцию вектора относительного перемещения точек поверхности на ее

нормаль. Кроме того, для локализации необратимых процессов на заранее известном месте были использованы образцы с острым надрезом типа Шарпи, с радиусом закругления на вершине надреза, равным 0.25 мм. Было показано, что в процессе зарождения трещины на вершине надреза возникает зона пластических деформаций размером менее 1 мм. В настоящей работе использовались образцы со слабым концентратором напряжений, а именно с двумя симметрично расположенными выточками с радиусами 2.5 мм. В ходе испытания образца на усталость впервые на малой базе порядка $10\ \mu\text{m}$ были определены изменения не одной, а трех компонент указанного вектора. Основной целью работы было определение предельных значений трех компонент вектора относительного перемещения точек поверхности. Отметим, что для изучения особенностей пластических деформаций можно использовать различные традиционные оптические [15–17] и неоптические [1,18–20] методы. Однако при их использовании для измерений на малых базах возникают большие методические трудности.

Ранее на основе модели отражающего объекта в виде совокупности точечных центров рассеяния, расположенных на ее поверхности, в работе [13] была решена задача о динамике спеклов в плоскости изображения периодически деформируемого объекта, были получены формулы для интенсивности излучения \tilde{I} в некоторой точке плоскости изображения и нормированной временной автокорреляционной функции $\eta(t_1, t_2)$ этой интенсивности. Предполагалось, что величина \tilde{I} является усредненной по времени интенсивностью излучения, а время усреднения равно или кратно периоду T цикличе-

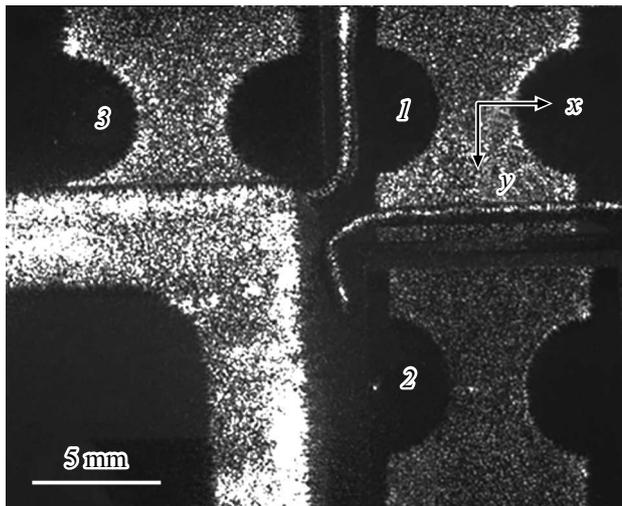


Рис. 1. Три спекловых изображения (1–3) образца на одном кадре.

ских нагрузок. Для \tilde{I} было получено

$$\tilde{I} = I_1 + I_2 \exp[-\sigma^2/2] \cos[x + \alpha], \quad (1)$$

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

В формуле (1) I_1, I_2, α — константы, x и σ^2 — среднее значение и дисперсия величины $k\Delta\mathbf{u}(\mathbf{I}_y + \mathbf{I})$, $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, $\Delta\mathbf{u}$ — вектор относительного перемещения двух центров рассеяния, расположенных в области, размер которой Δu равен линейному разрешению линзы, \mathbf{I}_y и \mathbf{I} — единичные векторы, направленные от центра области к источнику света и к центру линзы соответственно. В (2) $\eta_1 = \eta(u_x)$ — 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.

На рис. 1 приведен типичный кадр с тремя спекловыми изображениями плоской рабочей части образца толщиной 1.6 mm, соответствующими трем ракурсам наблюдения. Изображение, обозначенное цифрой 1, регистрировалось путем наблюдения по нормали поверхности. Изображения 2 и 3 формировались с использованием двух одинаковых призм, отклоняющих рассеянные объектом спекл-модулированные волны в сторону объектива телекамеры. Параметр шероховатости поверхности R_a , найденный с помощью интерференционного микроскопа WYKO NT-1100, был равен $0.8 \mu\text{m}$. До и после испытания образца на усталость для обнаружения трещин прибором WYKO NT-1100 регистрировались

трехмерные профили поверхности. Циклическое нагружение образцов проводилось на высокочастотной резонансной испытательной машине „MIKROTRON“ Rumul по схеме отнулевого растяжения при частоте нагружения $\sim 100 \text{ Hz}$ и двойной амплитуде 2.0 kN. Образец освещался лазерным модулем с длиной волны $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ мощностью 20 mW. В эксперименте была использована монохромная телекамера типа ВИДЕОСКАН-415M-USB с матрицей, содержащей 782×582 фотоэлемента размером $8.3 \times 8.3 \mu\text{m}$. Время усреднения 0.5 s соответствовало 53 циклам нагружения. Размер диафрагмы объектива телекамеры подбирался таким, чтобы минимальный размер спеклов был несколько больше размера фотоэлемента матрицы фотоприемников телекамеры. Значение η на фрагменте изображения размером в $m \times m$ пикселей определялось по формуле (38) из работы [13]. Оригинальное программное обеспечение текущие кадры (т.е. через 53 цикла деформации), а также кадры через каждые 1000 циклов нагружения записывало в отдельные файлы для их обработки после проведения опыта. Испытание образцов прекращалось при изменении резонансной частоты на 10%.

На рис. 2 приведены распределения величины η вдоль вертикальной линии на изображении 2 образца, размеры фрагмента изображения 5×5 пикселей. Линия проходила через область спеклового изображения, которая соответствовала участку поверхности вблизи выреза, где в конце опыта зародилась трещинка длиной порядка $100 \mu\text{m}$. Как видно из приведенных кривых, необратимые процессы протекают неоднородно, имеются локальные зоны с повышенным значением пластической деформации. Начиная примерно с 30 000 циклов в одной из таких зон начались необратимые процессы, уменьшающие величину η до отрицательных значений. Именно в этой зоне и была обнаружена трещина. Построение

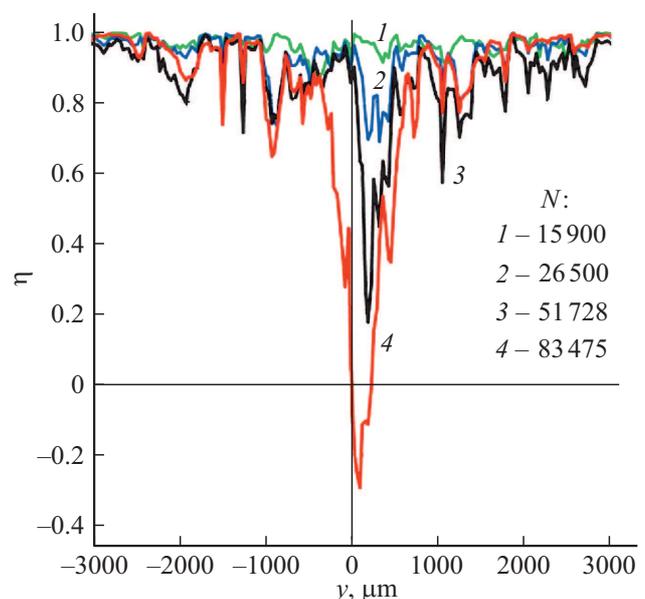


Рис. 2. Зависимости $\eta(y)$ для разных циклов $N(x \cong 3.0 \text{ mm})$.

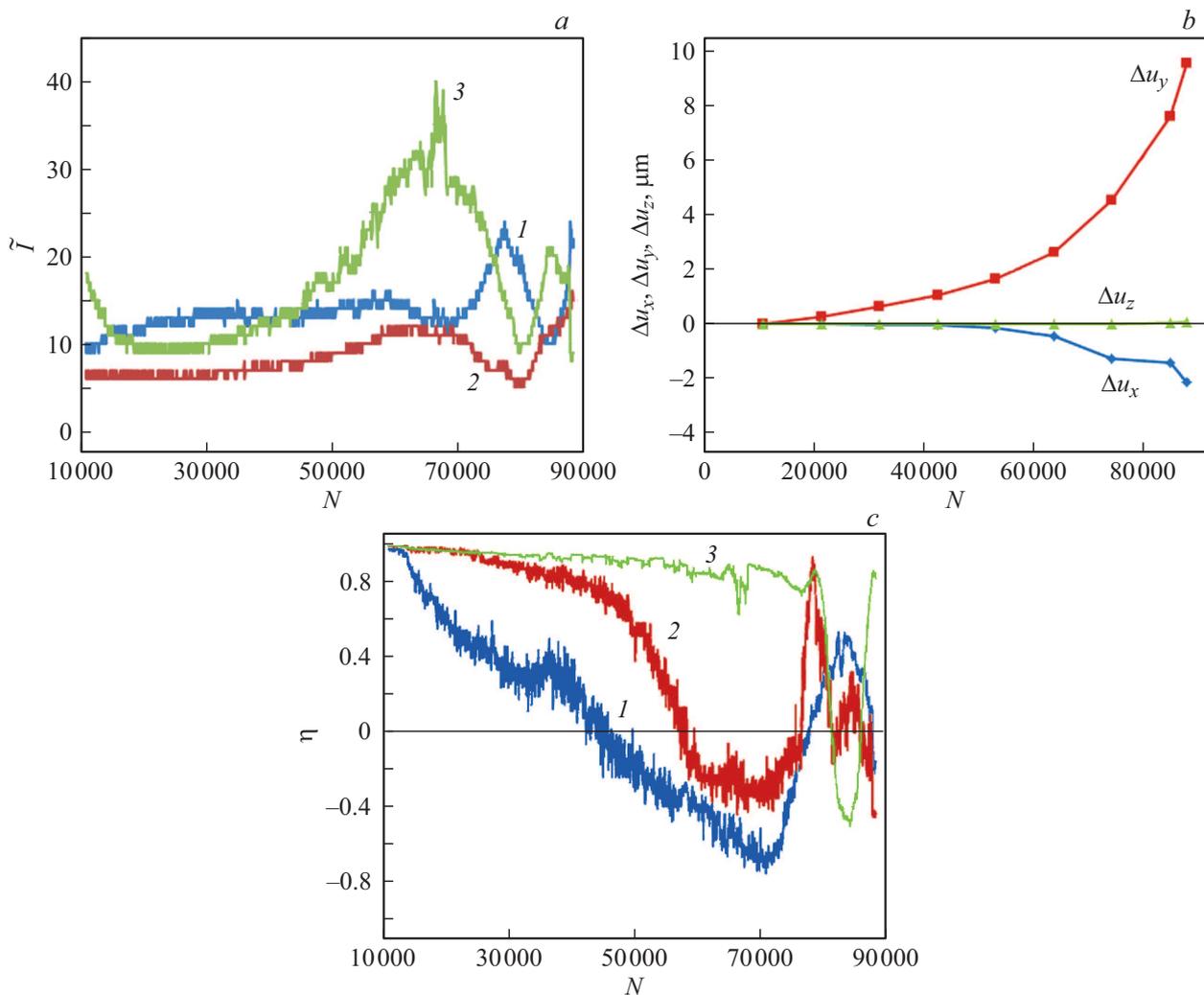


Рис. 3. *a* — зависимости $\tilde{I}(N)$ для трех ракурсов наблюдения (номера кривых соответствуют номерам изображений образца); *b* — зависимости компонент вектора $\Delta \mathbf{u}$ от числа циклов N ; *c* — зависимости параметра η от числа циклов N (номера кривых соответствуют номерам изображений образца).

аналогичной зависимости $\eta(y)$ вдоль линии, проходящей через участок, соответствующий центру образца, показало, что минимальное значение величины η , равное 0.38, достигается в одной из локализованных зон деформации. На рис. 3, *a* для трех ракурсов наблюдения приведены зависимости цифрового значения интенсивности излучения \tilde{I} от числа циклов нагружения N . Пиксели на трех изображениях соответствовали одной области зарождения трещины, а именно центру зоны локализованной деформации. Как видно из приведенных кривых, зависимости $\tilde{I}(N)$ являются квазипериодическими функциями. Согласно формуле (1), максимальным значениям \tilde{I} соответствуют значения аргумента косинуса $x + \alpha$, равные $\pm 2\pi n$ ($n = 1, 2, 3$). Минимальным значениям кривых отвечают значения аргумента, равные $\pm \pi(1 + 2n)$. Для трех кривых нами были построены зависимости n от N , все величины были взяты со знаком „плюс“. Экспериментальные зависимости $n(N)$ аппроксимировались полиномами третьей и четвертой степени, достоверность

аппроксимации была не менее 0.998. Далее из всех значений n вычитались их начальные значения n_0 . Затем с шагом 10 000 циклов по известным функциям определялись три значения величин $\Delta n = n - n_0$, соответствующие трем направлениям наблюдения. В результате решения трех уравнений $\Delta \mathbf{u}(\mathbf{I}_s + \mathbf{I}) = \lambda \Delta n$ с известными из опыта значениями компонент векторов \mathbf{I}_s, \mathbf{I} для каждого выбранного цикла определялись три компоненты $\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$ вектора $\Delta \mathbf{u}$. В уравнениях использовались единичный вектор $\mathbf{I}_s(0, -0.190, 0.981)$, единичные векторы $\mathbf{I}(0, 0, 1)$, $\mathbf{I}(0, 0.310, 0.951)$, $\mathbf{I}(0.308, 0, 0.982)$, соответствующие изображениям 1, 2 и 3. При решении системы уравнений знак величины Δn брался из физических соображений, а именно из условия достижения величиной Δu_z минимального значения. На рис. 3, *b* приведены совмещенные зависимости величин $\Delta u_x, \Delta u_y, \Delta u_z$ от числа циклов N . Видно, что максимальное относительное необратимое перемещение точек поверхности, усредненное как по времени, так и по

области размером $\Delta y = 66 \mu\text{m}$, приближается к $10 \mu\text{m}$. Следовательно, предельная растягивающая пластическая деформация поверхности, оцененная нами как $\Delta u_y / \Delta y$, достигает величины порядка 10^{-1} . Анализ зависимостей $\eta(y)$, найденных при разных значениях N , а также $\eta(N)$, соответствующих разным фрагментам изображения, показал, что в качестве предвестника разрушения элемента поверхности целесообразно использовать факт уменьшения величины η до отрицательного значения. На рис. 3, с для трех направлений наблюдения приведены зависимости $\eta(N)$, соответствующие зоне зарождения трещины, размер фрагмента изображения 3×3 пикселя. Из приведенных кривых следует, что при выборе подходящих направлений освещения и наблюдения можно зарегистрировать уменьшение η до нуля при значениях N , составляющих 50% от максимального значения N , равного 89 000 циклам. Полученные данные могут быть основой для создания в дальнейшем физических моделей многоциклового усталости материалов и методов неразрушающей диагностики остаточного ресурса деталей техники. Предельное значение растягивающей деформации, найденное в настоящей работе, по порядку величины совпадает с предельным значением деформации, возникающей при квазистатических испытаниях на разрыв стандартных образцов. Данное совпадение позволяет предположить, что методы неразрушающего контроля, способы оценки поврежденности объектов методами механики сплошных сред и методы численного расчета напряженно-деформированного состояния тел, разработанные для квазистатических нагружений, могут быть адаптированы для изучения явлений, возникающих при многоциклового усталости элементов конструкций.

Благодарности

Авторы благодарят И.С. Каманцева за помощь в проведении экспериментов.

Финансирование работы

Работа выполнена при частичной поддержке акта 211 Правительства РФ (соглашение № 02.А03.21.0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.А. Тупикин, Контроль. Диагностика, № 11, 53 (2003).
- [2] И.И. Новиков, В.А. Ермишин, *Физическая механика реальных материалов* (Наука, М., 2004).
- [3] J. Lasar, M. Hola, O. Cip, in *Book of abstracts. Conference PhotoMechanics* (Delft University, Netherlands, 2015), p. 64.
- [4] Г.Дж. Гаф, *Усталость металлов* (Глав. ред. лит-ры по черной металлургии, М.—Л., 1935).
- [5] В.Ф. Терентьев, *Усталость металлических материалов* (Наука, М., 2002).
- [6] Y. Murakami, *Metal fatigue: effects of small defects and nonmetallic inclusions* (Academic Press, 2019).
- [7] S.S. Manson, *Exp. Mech.*, **5** (7), 193 (1965).
- [8] J. Schijve, *Int. J. Fatigue*, **25** (8), 679 (2003).
- [9] Р.К. Эрф, *Голографические неразрушающие исследования* (Машиностроение, М., 1985).
- [10] E. Marom, R.K. Muller, *Int. J. Nondestructive Testing*, **3**, 171 (1971).
- [11] В.П. Козубенко, В.А. Потиченко, Ю.С. Бородин, *Проблемы прочности*, № 7, 103 (1989).
- [12] А.П. Владимиров, И.С. Каманцев, В.Е. Веселова, Э.С. Горкунов, С.В. Гладковский, *ЖТФ*, **86** (4), 85 (2016).
- [13] А.Р. Vladimirov, *Opt. Eng.*, **55** (12), 1217 (2016).
- [14] А.П. Владимиров, И.С. Каманцев, Н.А. Друкаренко, Л.А. Акашев, А.В. Дружинин, *Оптика и спектроскопия*, **127** (11), 870 (2019). DOI: 10.21883/OS.2019.11.48530.165-19
- [15] Л.Б. Зуев, В.И. Данилов, Н.М. Мних, *Завод. лаб.*, **56** (2), 90 (1990).
- [16] M.A. Sutton, J.-J. Ortu, H. Schreier, *Image correlation for shape, motion and deformation measurements* (University of South Carolina, Columbia, USA, 2009).
- [17] С.В. Панин, П.С. Любутин, В.В. Титков, *Анализ изображений в оптическом методе оценки деформации* (Изд-во СО РАН, Томск, 2017).
- [18] A. Gilanyi, K. Morishita, T. Sukegawa, M. Uesaka, K. Miya, *Fusion Eng. Design*, **42** (1-4), 485 (1998).
- [19] В.А. Ермишкин, Д.П. Мурат, В.В. Подбельский, *Автоматизация и современные технологии*, № 2, 11 (2008).
- [20] О.А. Плехов, И.А. Пантелеев, В.А. Леонтьев, *Физ. мезомеханика*, **12** (5), 37 (2009).