

05

## Использование динамической спекл-интерферометрии для бесконтактной диагностики зарождения усталостной трещины и определения скорости ее роста

© А.П. Владимиров, И.С. Каманцев, В.Е. Веселова, Э.С. Горкунов, С.В. Гладковский

Институт машиноведения УрО РАН,  
620049 Екатеринбург, Россия  
e-mail: ks@imach.uran.ru

(Поступило в Редакцию 28 июля 2015 г.)

Проведены циклические испытания образцов из стали 09Г2С с контролем в режиме реального времени момента зарождения усталостной трещины и кинетики ее роста методом динамической спекл-интерферометрии. С использованием метода усреднения спеклов во времени выявлена связь между параметрами, характеризующими случайные и детерминированные изменения высот рельефа и спекловых изображений поверхности вблизи надреза в процессе зарождения усталостной трещины.

### Введение

В настоящее время в экспериментальной механике разрушения для определения макроскопических перемещений, упругих деформаций, поворотов, скорости движений объектов применяются различные когерентно-оптические методы, такие как голографическая интерферометрия [1], корреляционная [2] и динамическая спекл-интерферометрия [3], а также методы, основанные на смещении [4] и изменении спекл-полей [5]. Динамика спеклов нашла применение при изучении изменений микрорельефа поверхности при пластических деформациях отражающих объектов [6].

Исследования, проведенные в работах [7–9], показали, что при использовании указанных методов для изучения усталостных явлений возникают определенные проблемы, связанные с необходимостью регистрации большого числа голограмм и спеклограмм и немонотонным характером изменения регистрируемых параметров по мере увеличения числа циклов нагружения. По этой причине данные методы не нашли широкого применения для изучения процессов, протекающих в материалах при циклическом нагружении.

Данное ограничение может быть преодолено за счет использования методики усреднения спеклов во времени, которая может быть успешно использована при изучении многоциклового усталости металлов. Было показано [10], что усреднение спеклов во времени существенно упрощает эксперимент, так как позволяет изучать усталостные процессы без остановки циклического нагружения.

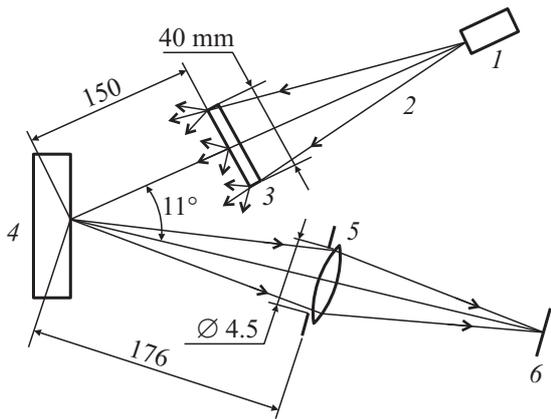
В работе [10] также была установлена связь между изменением рельефа в зоне зарождения макроскопического разрушения и изменением усредненного во времени спеклового изображения зоны. С позиций ключевых представлений механики разрушения изменение рельефа поверхности в вершине трещины в процессе циклического нагружения связано с формированием локализован-

ной зоны пластической деформаций (ЛЗПД) [11]. Размер и форма пластической зоны определяются рядом факторов: схемой напряженного состояния, сопротивлением материала пластической деформации, значением степенного коэффициента деформационного упрочнения и величиной действующего в вершине трещины коэффициента интенсивности напряжений  $K$  или его размаха  $\Delta K$  в случае циклического нагружения. При циклическом нагружении в вершине растущей трещины различают два типа ЛЗПД — более протяженную монотонную статическую пластическую зону и расположенную внутри нее циклическую пластическую зону [12].

Из результатов работы [10] следует, что размеры ЛЗПД, определенные с помощью профилометра и по изменению спекл-поля, с точностью  $\pm 44 \mu\text{m}$  совпадают. Поскольку после страгивания трещины изменение рельефа за ее вершиной постепенно стабилизируется, а затем и полностью прекращается, то данный эффект может быть использован для определения скорости роста усталостной трещины. Вместе с тем не был детально изучен процесс формирования ЛЗПД при зарождении усталостной трещины. Целью настоящей работы являлось изучение особенностей формирования ЛЗПД при зарождении усталостной трещины (УТ) методом динамической спекл-интерферометрии и отработка методики, позволяющей определять скорость роста трещины по приращению ЛЗПД в ее вершине.

### Образцы, техника и методика эксперимента

Объектами исследования являлись призматические образцы из низкоуглеродистой стали 09Г2С длиной 55 mm, шириной 5 и высотой 10 mm. С целью локализации места возможного зарождения усталостной трещины на образец наносился острый V-образный надрез глубиной 2 mm и радиусом скругления в его вершине 0.25 mm. После предварительной механической



**Рис. 1.** Схема оптической установки. 1 — лазерный модуль, 2 — освещающее излучение, 3 — матовое стекло, 4 — образец, 5 — линза с диафрагмой, 6 — матрица фотоприемников телекамеры.

обработки, включающей фрезерование и шлифовку с последующим отжигом в вакууме, наблюдаемая сторона подвергалась полировке для создания зеркальной поверхности с параметром шероховатости  $R_a$  в диапазоне 1–50 nm.

Циклическое нагружение образца проводили на высокочастотной резонансной испытательной машине MIKROTRON (RUMUL) по схеме трехточечного изгиба с максимальным усилием цикла 1.2 kN при частоте нагружения  $\approx 100$  Hz с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0.1$ .

Для регистрации спекл-полей использовали оптическую систему, схема и геометрические размеры которой показана на рис. 1. Оптическая установка размещалась на платформе испытательной машины. Объект 4 освещали пучком 2 от лазерного модуля 1 типа KLM-N650-40-5 с длиной волны 0.65  $\mu\text{m}$  и мощностью 40 mW. Поскольку при освещении зеркальной поверхности спеклы не образуются, то при использовании образцов с полированной поверхностью для формирования спекл-полей в освещающий пучок вводили матовое стекло 3. Картину спеклов регистрировали в плоскости изображения образца. Кратность увеличения, формируемого оптической системой, составляла 0.7. Размер диафрагмы у линзы 5 подбирали таким образом, чтобы минимальный размер спеклов был несколько больше размера фотоэлемента матрицы фотоприемников 6 телекамеры. В экспериментах использовали монохромную телекамеру ВИДЕОСКАН-415M-USB с матрицей, содержащей  $782 \times 582$  фотоэлемента размером  $8.3 \times 8.3 \mu\text{m}$ .

Особенностью метода усреднения спеклов является выбор времени экспозиции  $\tau_0$  используемой в эксперименте телекамеры равным или кратным периоду  $T$  циклического нагружения. При  $\tau_0 = T$  элемент матрицы фотоприемников телекамеры откликается на усредненную за промежуток времени  $T$  интенсивность излучения. Если в объекте отсутствуют необратимые процессы, то

при следующих интервалах времени длительностью  $T$  оцифрованные значения сигналов будут неизменными. Если же на какой-либо фазе колебания объекта возникнут необратимые процессы, изменяющие микрорельеф поверхности, а следовательно, и спекл-поле, то сигналы будут меняться.

При реализации экспериментов выбранное время экспозиции телекамеры соответствовало 50 циклам нагружения. Регистрацию кадров спекловых изображений в графическом формате BMP осуществляли через 1000–2500 циклов нагружения после стабилизации резонансной частоты испытательной машины. В качестве параметра, характеризующего изменение спеклов, был выбран коэффициент корреляции  $\eta$  двух 8-битных цифровых изображений одинакового размера. Цифровые изображения представляли собой двумерные матрицы, соответствующие одному участку кадра в начальный момент времени  $t_1$  и текущий момент времени  $t_2$  при значениях числа циклов нагружения  $N_1$  и  $N_2$  соответственно. Значения  $\eta$  находили по формуле

$$\eta = \frac{\frac{1}{nm} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})}{\left( \frac{1}{nm} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (A_{ij} - \bar{A})^2 \right)^{1/2} \left( \frac{1}{nm} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} (B_{ij} - \bar{B})^2 \right)^{1/2}}, \quad (1)$$

где  $i, j$  — номера элементов (пикселей) строки и номера строк матрицы соответственно,  $n, m$  — число пикселей строки и число строк матрицы,  $A_{ij}$  — числовое значение пикселя с номерами  $i$  и  $j$  при  $t_1$ ,  $B_{ij}$  — числовое значение этого пикселя в момент времени  $t_2$ ,  $\bar{A}$  — среднеарифметическая величина числовых значений элементов матрицы при  $t_1$ ,  $\bar{B}$  — среднеарифметическая величина числовых значений элементов матрицы в момент времени  $t_2$ .

Из формулы (1) следует, что при отсутствии каких-либо отличий в двух спекловых изображениях величина  $\eta$  равна единице. Опыт показал [10], что при случайном изменении высот рельефа относительно начальных значений в среднем на 100 nm, величина  $\eta$  уменьшается до нуля. Промежуточное значение коэффициента корреляции от единицы до нуля соответствует меньшим изменениям высот рельефа. Если интенсивности излучения в каждом пикселе меняются по закону косинуса с одинаковым периодом  $T$ , но с разными начальными фазами, то через время  $T/2$  значение  $\eta$  будет равно  $-1$ .

Для регистрации профилей поверхности и определения среднеарифметического отклонения высот рельефа на выбранном участке образец периодически снимался с испытательной машины для проведения исследований поверхности образцов на оптическом профилемере WYKO NT-1100 с погрешностью измерения высоты 3 nm. После страгивания трещины положение ее вершины определяли путем освещения образца источником белого света. Лазерное излучение при этом перекрывали.

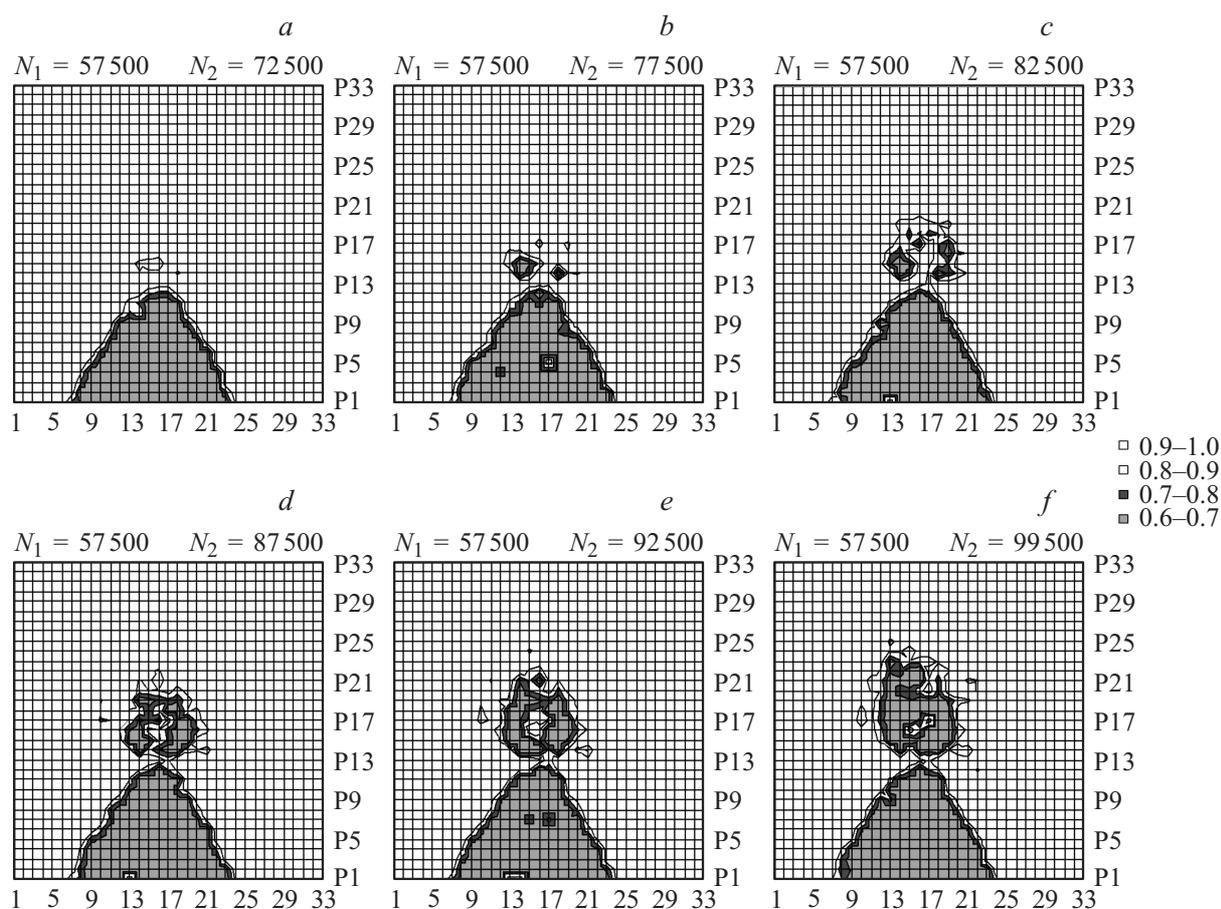


Рис. 2. Распределения величины  $\eta$  при разном количестве циклов нагружения.

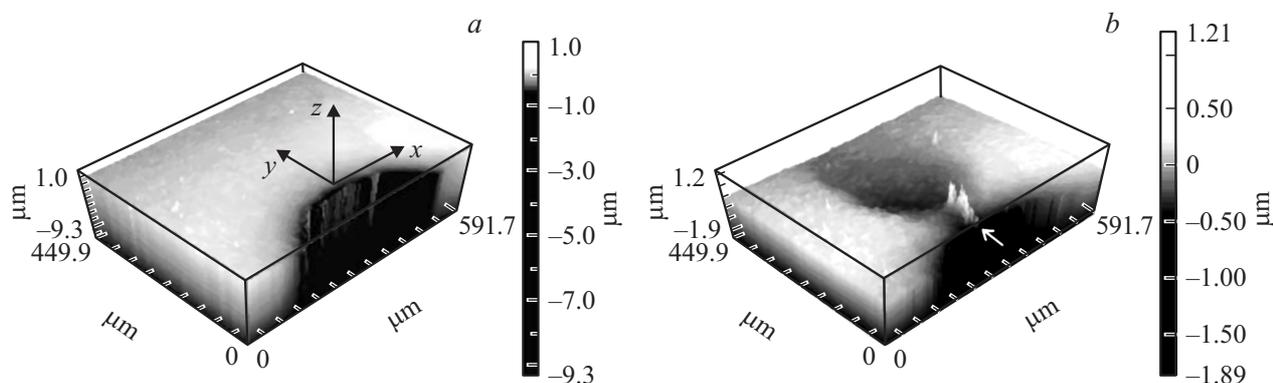
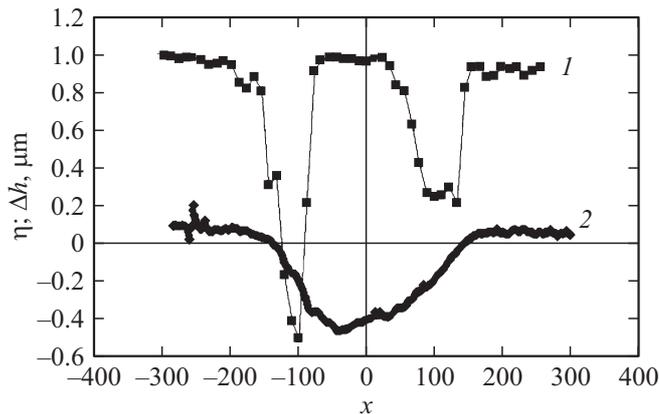


Рис. 3. Трехмерные профили поверхности вблизи надреза: а)  $N = 57\,500$ , б)  $N = 99\,500$ .

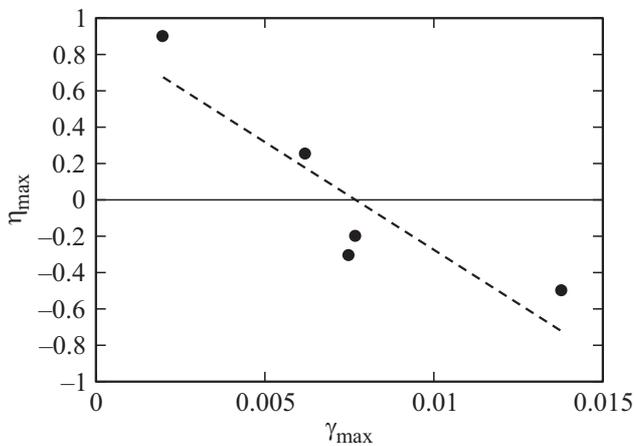
## Результаты и их обсуждение

На основе полученных экспериментальных данных были построены распределения коэффициентов корреляции спекловых изображений  $\eta$ . Типичные распределения величин  $\eta$  в диапазоне от 0.6 до 1.0 на разных этапах формирования ЛЗПД вблизи вершины надреза приведены на рис. 2, *a-f*. Как видно из приведенных на рисунке данных, первые изменения  $\eta$  вблизи изоб-

ражения вершины надреза появились при достижении числа циклов нагружения  $N = 77\,500$  (рис. 2, *b*). При дальнейшем нагружении происходило постепенное увеличение размера участка, в котором изменение величины  $\eta$  находилось в диапазоне 0.6–1.0. Сопоставление распределения величин  $\eta$  с трехмерным (рис. 3) и двумерными (рис. 4) профилями поверхности показало, что максимальные изменения величины  $\eta$ , обозначенные как  $\eta_{\max}$ , приходятся на наиболее крутые склоны впадины,



**Рис. 4.** Совмещенные зависимости коэффициента корреляции  $\eta$  (1) и разности высот рельефа  $\Delta h$  (2) от координаты  $x$ .



**Рис. 5.** Зависимость экспериментальных значений  $\eta_{\max}$  от  $\gamma_{\max}$ .

сформированной вблизи вершины надреза. На рис. 4 величина  $\Delta h$  есть разность высот рельефа, найденная по двум профилям поверхности, соответствующим циклам нагружения  $N_1 = 57\,500$  и  $N_2 = 99\,500$ . Значения  $\eta$  находили по цифровым изображениям размером в  $4 \times 4$  пикселя. Координата  $x$  соответствовала центру цифрового изображения.

Максимальная глубина впадины составила около  $1\ \mu\text{m}$ , а продольный и поперечные размеры равнялись сотням  $\mu\text{m}$ . На рис. 5 показана зависимость величины  $\eta_{\max}$  от максимального тангенса угла наклона поверхности  $\gamma_{\max}$ , построенная по пяти профилям поверхности. Величину  $\gamma_{\max}$  находили графическим способом по зависимости  $\Delta h(x)$ . Если величину  $\gamma_{\max}$  рассматривать как меру пластической деформации, то зависимость  $\eta_{\max}$  от  $\gamma_{\max}$  может быть использована для ее приблизительной оценки.

Из рис. 3, *b* следует, что на вершине надреза имеется обозначенная стрелкой зона размером около  $50\ \mu\text{m}$ , рельеф которой существенно отличается от окружающего. Внутри зоны наблюдаются неоднородности рельефа в виде характерных выступов с поперечным разме-

ром  $5\text{--}10\ \mu\text{m}$  и высотой до сотен нанометров. Наблюдение методом оптической микроскопии показало, что именно в этой зоне произошло зарождение усталостной трещины.

Сопоставление динамики спекл-полей и рельефа поверхности в промежутке от 57 500 до 99 500 циклов нагружения показало, что изменения величины  $\eta$  вызваны четырьмя факторами.

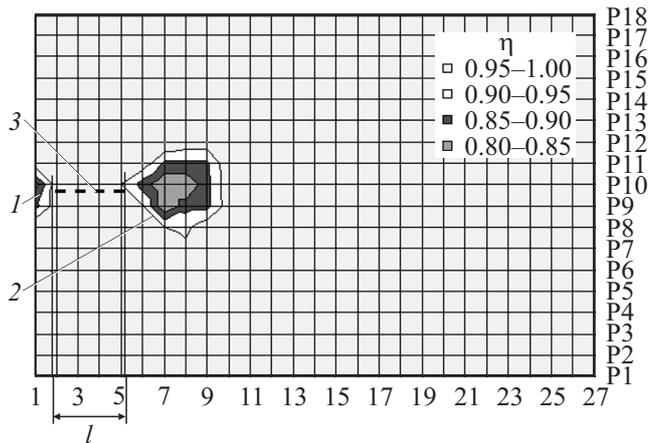
1. Малыми поступательными перемещениями объекта, по-видимому, связанными с появлением остаточных деформаций. Такие смещения вызывали уменьшение величины  $\eta$  от 1.0 до 0.99.

2. Малыми изменениями шероховатости поверхности в пределах впадины, приводящими к увеличению значения параметра  $R_a$  на десятки нанометров при уменьшении величины  $\eta$  примерно на 0.05.

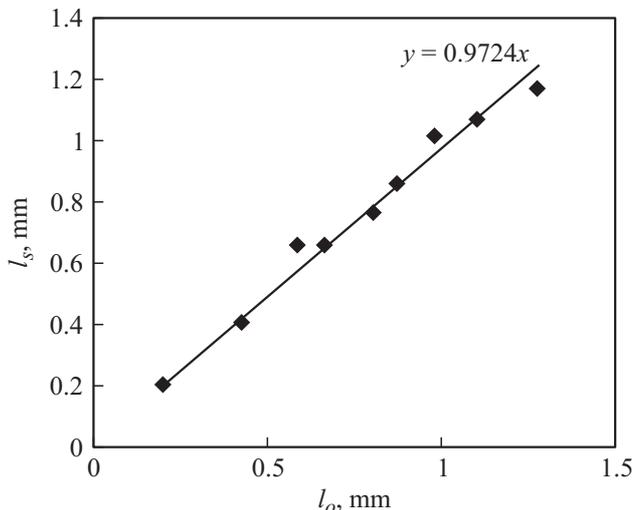
3. Хаотическими изменениями высоты рельефа на сотни нанометров в зоне зарождения усталостной трещины, приводящими к изменению величины  $\eta$  в этой зоне до 0.7–0.8.

4. Детерминированными изменениями рельефа в процессе формирования впадины глубиной около  $1\ \mu\text{m}$ , при которых наибольшие снижения величин  $\eta$  до отрицательных значений, равных  $-0.5$ , наблюдались на наиболее крутых склонах впадины.

Причину значительного изменения величины  $\eta$  для изображения участков, в которых рельеф поверхности изменяется не случайным образом, вероятно, можно объяснить на основе следующих рассуждений. Рассмотрим перемещение точек поверхности на малом участке, располагающемся на крутых склонах впадины, размер которого равен линейному разрешению линзы ( $11\ \mu\text{m}$ ). Перемещение участка можно в первом приближении рассматривать как сумму трех типов движения: поступательного по оси  $oz$ , однородной деформации и жесткого поворота вокруг оси, перпендикулярной оси  $oz$  (рис. 3, *a*). При освещении и наблюдении по нормали поверхности первые два типа движений не вызывают изменения разности фаз пар волн, отраженных от разных центров рассеяния, расположенных на участке. При жестком повороте участка возникают изменения разности фаз. Рассмотрим центры рассеяния, расположенные случайным образом в направлении оси поворота, но на одинаковом расстоянии друг от друга в направлении, перпендикулярном оси вращения. Начальные фазы волн, отраженных от таких центров, должны быть одинаковыми. Тогда при жестком повороте участка возникает интерференция многих волн, отраженных от указанных центров, как и в дифракционной решетке. Различие заключается в том, что квазипериодическое изменение интенсивности излучения в случае дифракционной решетки происходит в пространстве, а в наших экспериментах — в одном пикселе во времени. Поскольку в соседних пикселях имеет место аналогичная ситуация, то в них также возникают квазипериодические изменения сигналов. Элементарные оценки показывают, что если во всех пикселях имеют место периодические изменения



**Рис. 6.** Поле величины  $\eta$  в плоскости изображения образца: 1 — вершина выреза, 2 — приращение зоны пластической деформации, 3 — усталостная трещина. Шаг сетки по осям  $x$  и  $y$  равен 10 пикселям.



**Рис. 7.** Сравнение длины усталостной трещины, определенной по изменению спекл-поля ( $l_s$ ) и при освещении белым светом ( $l_o$ ).

интенсивности  $I$  с одинаковой частотой, но разной начальной фазой, то через  $1/2$  периода величина  $\eta$  принимает значение, равное  $-1$ . Сравнение сигналов в разных пикселях показало, что зависимости  $I = I(N)$  не являются строго периодическими, вследствие этого отрицательная корреляция спекл-полей достигает величины, равной лишь  $-0.5$ .

Результаты проведенных экспериментов показали, что изменения, происходящие в зоне пластических деформаций, удобно наблюдать путем сравнения кадров спекловых изображений, зафиксированных через 2500–5000 циклов. Анализ распределений величин  $\eta$ , найденных подобным образом, показал, что до  $N = 107\,500$  циклов нагружения все изменения наблюдались в пределах впадины. Начиная с  $N = 107\,500$

имело место смещение поля величины  $\eta$ , соответствующего приращению пластических деформаций. Было сделано предположение, что данный факт следует рассматривать как момент срагивания трещины. На рис. 6 приведено полученное в процессе распространения макротрещины распределение величины  $\eta$ , демонстрирующее приращение зоны пластической деформации. Наблюдения на полированном образце показали, что ближняя к надрезу граница зоны изменений величины  $\eta$  примерно совпадает с изображением вершины трещины. Было предположено, что данное обстоятельство может быть использовано для определения зависимости длины трещины  $l$  от числа циклов нагружения  $N$ .

Для проверки корректности указанного предположения было проведено сравнение двух зависимостей  $l$  от  $N$ , найденных методами динамической спекл-интерферометрии и традиционным оптическим методом. Первая зависимость определялась по изменению поля величины  $\eta$ , соответствующего приращению зоны пластических деформаций, а вторая при наблюдении поверхности образца, освещенного белым светом. Как видно из рис. 7, имеется хорошая корреляция данных по длине усталостной трещины, полученных разными способами.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали высокую эффективность использования динамической спекл-интерферометрии для изучения процесса роста усталостной трещины в металлических материалах при циклическом нагружении. Преимуществом определения длины и скорости роста усталостной трещины по корреляции спекловых изображений является возможность применения данного экспериментального подхода к образцам с шероховатой поверхностью, для которых выявление трещины оптическими методами затруднено.

## Заключение

При циклическом нагружении образца из стали 09Г2С с острым надрезом, проведенном в условиях многоциклового усталости, использование метода усреднения спеклов во времени позволило выявить связь между параметрами, характеризующими случайные и детерминированные изменения высот рельефа и спекловых изображений поверхности вблизи надреза в процессе зарождения трещины. Этими параметрами являются: величина  $R_a$ , изменение высоты рельефа поверхности  $\Delta h$ , коэффициент корреляции спекловых изображений  $\eta$ .

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Зарождение трещины в вершине надреза сопровождается постепенным формированием пластической зоны в виде впадины диаметром до  $500\text{--}700\ \mu\text{m}$  и глубиной  $\Delta h$  порядка  $1\ \mu\text{m}$ .

2. Величина коэффициента корреляции спекловых изображений  $\eta$  определяется следующими факторами,

перечисленные в порядке возрастания их роли: малыми поступательными перемещениями поверхности; малыми изменениями шероховатости поверхности в пределах пластической зоны (изменения  $R_a$  на десятки nm), значительными случайными изменениями рельефа в зоне зарождения трещины (изменения  $R_a$  на сотни nm на участке размером около  $50\text{--}100\ \mu\text{m}$ ), изменениями рельефа в пределах пластической зоны. Максимальные изменения величины  $\eta$  соответствуют участкам поверхности, расположенным на наиболее крутых склонах впадины.

3. Показана возможность определения скорости роста усталостной трещины без остановки циклического нагружения по распределениям параметра  $\eta$ , соответствующим приращению зоны пластической деформации за 2000 циклов нагружения.

Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП „Пластометрия“ ИМАШ УрО РАН при частичной финансовой поддержке РФФИ гранты № 14-08-31673мол\_а, № 16-08-01077\_а, № 16-38-00723\_мол\_а и проектов фундаментальных исследований УрО РАН (заявки № 15-10-1-22 и 15-7-1-20).

## Список литературы

- [1] Александров Е.Б., Бонч-Бруевич А.М. // ЖТФ. 1967. Т. 64. Вып. 2. С. 360–369.
- [2] Leendertz J.A. // J. Phys. E: Sci. Instrum. 1970. N 3. P. 214–218.
- [3] Vladimirov A.P., Mikushin V.I. // Proc. SPIE 3726. 1999. P. 38–43.
- [4] Yamaguchi I. // Optica Acta. 1991. N 28. P. 1359–1376.
- [5] Анисимов И.В., Козел С.М., Локишин Г.Р. // Опт. и спектр. 1969. Т. 27. Вып. 3. С. 483–491.
- [6] Владимиров А.П. Динамическая спекл-интерферометрия деформируемых тел. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. 241 с.
- [7] Маром Е. // Голографические неразрушающие исследования. М.: Машиностроение. 1979. С. 164–194.
- [8] Marom E., Muller R.K. // Intern. Journ. of Nondestructive Testing. 1971. Vol. 3. P. 171–187.
- [9] Козубенко В.П., Потиченко В.А., Бородин Ю.С. // Проблемы прочности. 1989. № 7. С. 103–107.
- [8] Владимиров А.П., Каманцев И.С., Ищенко А. В., Веселова В.Е., Горкунов Э.С., Гладковский С.В., Задворкин С.М. // Деформация и разрушение материалов. 2015. № 1. С. 21–26.
- [11] Брок Д. Основы механики разрушения. Пер. с англ. М.: Высшая школа, 1980. 368 с.
- [12] Клевцова Н.А., Фролова О.А., Клевцов Г.В. Разрушение аустенитных сталей и мартенситные превращения в пластических зонах. М.: Изд-во Академии Естествознания, 2005. 155 с.