

07; 12

© 1990 г.

**ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ  
МЕТОДОМ ЧЕТЫРЕХЭКСПОЗИЦИОННОЙ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ***В. П. Щепинов, Н. Г. Власов, С. А. Новиков*

Рассматривается методика регистрации двух полей перемещений на одной спекл-фотографии, основанная на попарной корреляции четырех спекл-структур изображения поверхности деформируемого тела. Для разделения информации о перемещениях и получения требуемой декорреляции спекл-структур предлагается использовать две круговые или круговую и кольцевую опертурь. Анализируется контраст интерференционных полос, наблюдаемый при поточечном сканировании нерасширенным лазерным пучком четырехкратно экспонированной спекл-фотографии.

Приводятся примеры применения метода четырехэкспозиционной спекл-фотографии для определения направления перемещения и измерения линейной деформации при растяжении (сжатии) и изгибе.

**Введение**

Использование спекл-эффекта позволило развить ряд бесконтактных методов определения перемещений и их производных для точек поверхности деформируемых тел [1-4]. В наиболее распространенном из них методе спекл-фотографии запись поля перемещений осуществляется посредством регистрации на фотопластинке пары спекл-структур изображений (сфокусированных или несфокусированных) поверхности объекта, деформируемого между экспозициями. Регистрация с его помощью нескольких полей перемещений на одной спекл-фотографии, как это делается в голографической интерферометрии, либо с помощью нескольких опорных волн, либо на различных участках голограммы не представляется возможной из-за взаимной корреляции спекл-структур. Для декорреляции нескольких пар спекл-структур изображения поверхности тела можно использовать щелевую апертуру или непрозрачную маску с двумя отверстиями, которые располагаются перед объективом и могут поворачиваться вокруг его оси [5]. На спекл-фотографии в первом случае регистрируется так называемая ориентированная спекл-структура, а во втором — спекл-структура с пространственной несущей. Как следствие этого, появляется избирательная чувствительность к перемещениям, т. е. регистрируется только проекция вектора перемещения на направление щели или линии, соединяющей центры отверстий. Таким образом, теряется достоинство метода спекл-фотографии определять величину и направление (с точностью до знака) тангенциального перемещения точки поверхности тела.

В настоящей работе рассматриваются методики регистрации двух полей перемещений на одной спекл-фотографии, основанные на попарной корреляции четырех спекл-структур, и их применение для регистрации направления перемещений и измерения линейных деформаций.

**Основные соотношения**

Оптическая схема регистрации изображения диффузно-отражающей поверхности тела, расположенной в плоскости  $(x_1, y_1)$  и освещенной когерентным светом от источника  $S$ , показана на рис. 1. Расстояние от поверхности объекта до объектива, формирующего изображения,  $z_1$ , а от объектива до плоскости

изображения  $(x, y) - z_2$ . Объектив, имеющий функцию зрачка  $P_a(x_2, y_2)$ , располагается в плоскости  $(x_2, y_2)$ . Если комплексная амплитуда световой волны у поверхности объекта  $f(x_1, y_1)$ , то в рамках рассматриваемой ниже линейной пространственно-инвариантной системы выражение для амплитуды волны в плоскости регистрации  $g(x, y)$  принимает вид [6]

$$g(x, y) = \left\{ [f(x_1, y_1) \otimes h_1(x_1, y_1)] \exp \left[ -\frac{ik}{2f_0} (x_2^2 + y_2^2) \right] P_a(x_2, y_2) \right\} \otimes h_2(x_2, y_2), \quad (1)$$

где  $\otimes$  — знак интегральной операции свертки,  $f_0$  — фокусное расстояние объектива,  $k=2\pi/\lambda$  — волновое число ( $\lambda$  — длина волны света).

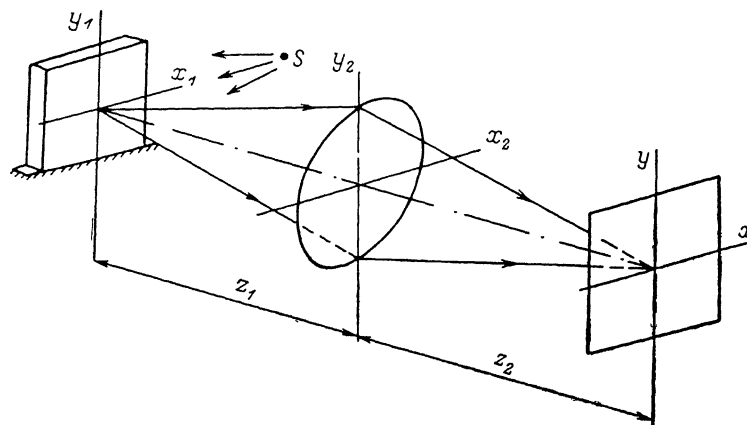


Рис. 1. Оптическая схема регистрации спекл-фотографий.

Выражение для импульсного отклика свободного пространства  $h_j(x_j, y_j)$  ( $j=1, 2$ ) записывается следующим образом:

$$h_j(x_j, y_j) = \frac{\exp(ikz_j)}{i\lambda z_j} \exp \left[ ik \frac{x_j^2 + y_j^2}{2z_j} \right].$$

После выполнения операций в предусмотренной выражением (1) последовательности получаем

$$g(x, y) \propto \exp \left[ \frac{ik}{2z_1} (x^2 + y^2) \right] \left\{ f \left( \frac{z_1}{z_2} x, \frac{z_1}{z_2} y \right) \exp \left[ \frac{ikz_1}{2z_2^2} (x^2 + y^2) \right] \right\} \otimes \{ \mathcal{F}_p(x, y) \}, \quad (2)$$

где

$$\mathcal{F}_p(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} P_a(x_2, y_2) \exp \left[ -\frac{ik}{z_2} (xx_2 + yy_2) \right] dx_2 dy_2$$

— Фурье-образ апертурной функции зрачка объектива.

Интенсивность в плоскости изображения  $I(x, y)$  определяется как квадрат модуля выражения (2). Принимая во внимание случайный характер комплексной амплитуды  $f(x, y)$ , обусловленный шероховатостью поверхности, получим [7]

$$I(x, y) \sim \left| f \left( \frac{z_1}{z_2} x, \frac{z_1}{z_2} y \right) \right|^2 \otimes |\mathcal{F}_p(x, y)|^2. \quad (3)$$

Структура изображения объекта, описываемая выражением (3), представляет собой хаотически расположенные темные и светлые пятна, называемые спеклами, минимальный поперечный размер которых обратно пропорционален относительноному отверстию объектива. Очевидно, что в случае осесимметричных апертурных функций зрачка спекл-структура изображения объекта также обладает круговой симметрией.

После линейной фотографической обработки экспонированный негатив (спекл-фотография) превращается в амплитудный транспарант с функцией пропускания  $t(x, y)$  вида

$$t(x, y) = b - cI(x, y), \quad (4)$$

где  $b, c$  — постоянные;  $\tau$  — длительность экспонирования.

Выражение (4) описывает световую волну непосредственно за спекл-фотографией при освещении ее плоской волной.

Рассмотрим теперь метод поточечного сканирования спекл-фотографии нерасширенных лазерным пучком. В плоскости  $(x_s, y_s)$ , удаленной на расстояние  $z_s$  от спекл-фотографии, выражение для световой волны  $\varphi(x_s, y_s)$  пропорционально свертке амплитудного пропускания с импульсным откликом свободного пространства  $h_s(x_s, y_s)$

$$\varphi(x_s, y_s) \propto t(x, y) \otimes h_s(x_s, y_s). \quad (5)$$

Подставляя (3) и (4) в (5) и умножая полученное выражение на комплексно-сопряженное, получим распределение интенсивности света  $I_0(x, y)$  в плоскости  $(x_s, y_s)$

$$I_0(x_s, y_s) = |\varphi(x_s, y_s)|^2 \propto \tau^2 \left| \left\{ \left| f\left(\frac{z_1}{z_2}x, \frac{z_1}{z_2}y\right) \right|^2 \otimes |\mathcal{F}_p(x, y)|^2 \right\} \otimes h_s(x_s, y_s) \right|^2. \quad (6)$$

В пределах освещенного лазерным лучом участка спекл-фотографии (диаметром 1—2 мм) плавно изменяющаяся функция  $|f((z_1/z_2)x, (z_1/z_2)y)|$  остается практически постоянной, что в свою очередь позволяет идентифицировать выражение (6) с дифракционным изображением спекл-структуры, которое пропорционально квадрату автокорреляционной апертурной функции [8]

$$I_0(x_s, y_s) \propto \tau^2 \{P_a(x, y) \otimes \otimes P_a(x, y)\}^2, \quad (7)$$

где  $\otimes \otimes$  — знак интегральной операции автокорреляции.

Из выражения (7) видно, что распределение интенсивности в пределах дифракционного изображения (гало) определяется в основном формой апертурной функции объектива. Это обстоятельство и предполагается использовать для пространственного разделения интерференционных полос (полос типа Юнга), связанных с каждым из двух полей перемещений.

Ограничимся в дальнейшем рассмотрении только осесимметричных апертурных функций, так как в противном случае возникает анизотропия чувствительности к перемещениям. Такими простейшими функциями являются круговая  $P_{01}(x, y)$

$$P_{01}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } \sqrt{x^2 + y^2} \leq D_1/2, \\ 0 & \text{при } \sqrt{x^2 + y^2} > D_1/2, \end{cases} \quad (8)$$

и кольцевая  $P_{02}(x, y)$

$$P_{02}(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{при } d_2/2 \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq D_2/2, \\ 0 & \text{при } d_2/2 > \sqrt{x^2 + y^2} > D_2/2. \end{cases} \quad (9)$$

Будем считать также, что объект исследования имеет плоскую форму и при его деформации преобладают тангенциальные поверхности компоненты перемещения. Это позволяет максимально упростить математические выкладки и выделить физическую сторону предлагаемого метода измерений перемещений.

### Две круговые апертуры

Пусть в результате воздействия на исследуемое тело, например механического, оно занимает ряд стационарных положений, попарное сравнение которых характеризуется двумя полями перемещений  $u_1(x, y)$  и  $u_2(x, y)$ . Предлагаемая методика сводится к двукратному применению метода двух экспо-

зиций, когда при первых двух экспозициях при численной апертуре объектива  $F_1=f_0/D_1$  регистрируются положения тела, соответствующие полю  $u_1(x, y)$ , а в течение двух других при численной апертуре  $F_2=f_0/D_2$  регистрируется поле перемещений  $u_2(x, y)$ . Порядок регистрации спекл-структур изображений тела, соответствующих различным его положениям, произволен и определяется условиями решаемой задачи. Значения  $F_1$  и  $F_2$  необходимо выбирать такими, чтобы они обеспечивали декорреляцию между соответствующими парами спекл-структур. На практике достаточно разницы между  $F_1$  и  $F_2$  в 1.5—2 ступени диафрагмы. Можно использовать и дополнительные средства декорреляции спекл-структур, такие как изменение направления освещения, поляризации света и др. [5, 9].

При поточечном сканировании такой четырехкратно экспонированной спекл-фотографии распределения интенсивности света  $I(x_s, y_s)$  в плоскости

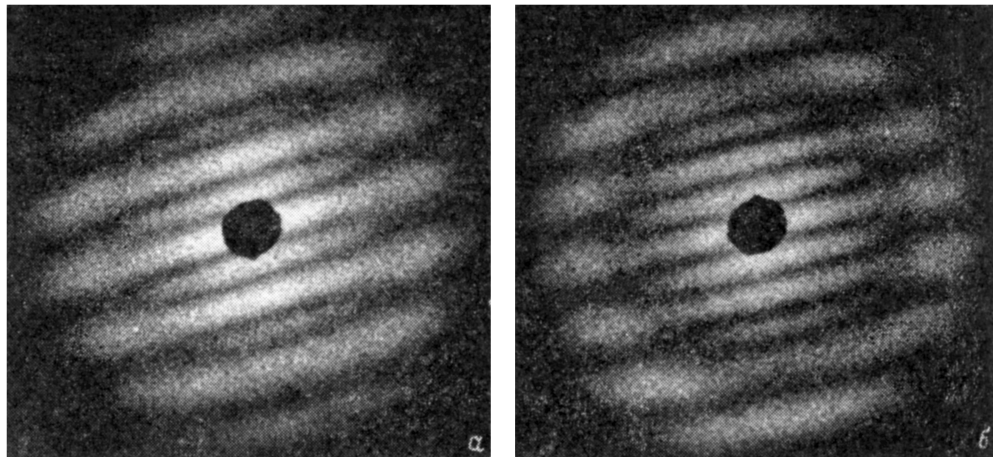


Рис. 2. Картины интерференционных полос, наблюдаемые при поточечном сканировании четырехэкспозиционных спекл-фотографий при регистрации с двумя круговыми апертурами (а), с круговой и кольцевой апертурами (б).

экрана являются результатом независимого сложения интенсивностей волн, дифрагированных каждой парой спекл-структур,

$$I(x_s, y_s) \sim I_{01}(x_s, y_s) \cos^2 \left[ \frac{\pi}{2} \frac{u_1 r_s}{\lambda z_s} \right] + \chi^2 \left( \frac{F_2}{F_1} \right)^2 I_{02}(x_s, y_s) \cos^2 \left[ \frac{\pi}{2} \frac{u_2 r_s}{\lambda z_s} \right], \quad (10)$$

где  $I_{0j}(x_s, y_s)$  ( $j=1, 2$ ) — интенсивность дифракционного изображения  $j$ -й спекл-структуры, описываемая выражением (7);  $r_s = \{x_s e_x, y_s e_y\}$  — радиус-вектор точки в плоскости экрана ( $e_x, e_y$  — единичные векторы в этой плоскости);  $\chi = \tau_2/\tau_1$  — отношение длительностей экспонирования при регистрации полей перемещений  $u_2(x, y)$  и  $u_1(x, y)$ . Из выражения (10) следует, что на экране формируются два концентрических дифракционных гало, причем в кольцевой области наблюдается только одна система полос, связанная с перемещением из поля  $u_1(x, y)$ , а в центральной области две системы полос. Однако если в процессе регистрации спекл-структур длительность экспонирования при численной апертуре  $F_2$  в  $\chi^2$  раз больше, чем при апертуре  $F_1$ , то в центральной области на экране наблюдается одна система полос, характеризующая перемещение рассматриваемой точки из поля  $u_2(x, y)$ . Типичная картина полос для этого случая представлена на рис. 2, а.

Контраст интерференционной картины описывается функцией видности  $V_j(x_s, y_s)$  ( $j=1, 2$ ), которая определяется через экстремальные значения интенсивности, описываемой выражением (10),

$$V_j(x_s, y_s) = \frac{I_{j \max}(x_s, y_s) - I_{j \min}(x_s, y_s)}{I_{j \max}(x_s, y_s) + I_{j \min}(x_s, y_s)}. \quad (11)$$

Очевидно, что контраст полос зависит не только от радиуса вектора точки в плоскости экрана  $r_s$ , но и от параметров схемы регистрации спекл-структур  $F_j$  и  $\kappa$ . Для случая схемы с единичным увеличением при  $F_1=4.5$ ,  $F_2=8$  и  $\kappa=(F_2/F_1)^2$  зависимости  $V_1(x_s, y_s)$  и  $V_2(x_s, y_s)$  для первого и второго полей перемещений показаны на рис. 3 кривыми 1 и 2 соответственно. Функция  $V_2(x_s, y_s)$  существует только во внутренней области и достигает своего максимума в центре дифракционной картины, а функция  $V_1(x_s, y_s)$  здесь минимальна и монотонно возрастает по мере приближения к границе внутренней области ( $|r_s|=F_2z_3$ ), достигая единичного значения в кольцевой области.

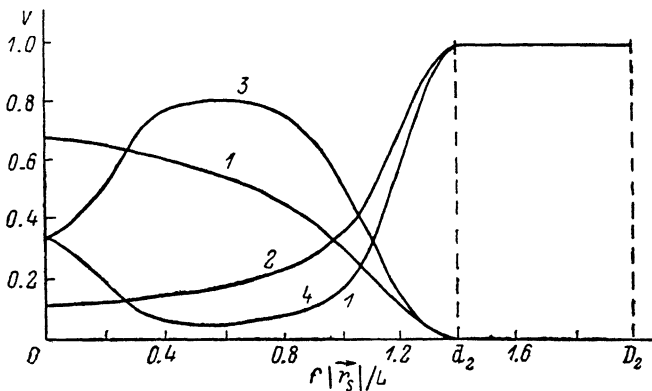


Рис. 3. Функции видности интерференционных полос, наблюдаемых при поточечном сканировании четырехэкспозиционных спекл-фотографий.

### Круговая и кольцевая апертуры

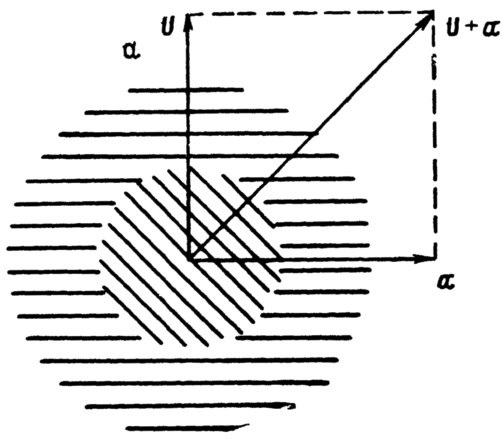
В отличие от предшествующего случая поле перемещений  $u_1(x, y)$  регистрируется при кольцевой апертуре (диаметры  $D_2$  и  $d_2$ ), а поле  $u_2(x, y)$  — при обычной круговой. Диаметр зрачка круговой апертуры равен диаметру средней затененной части кольцевой апертуры. Соотношение между величинами  $d_2$  и  $D_2$  целесообразно выбирать из условия приблизительного равенства линейных областей в гало, в которых образуются картины полос ( $d_2=0.5D_2$ ). Типичная картина полос, полученная этим методом, приведена на рис. 2, б.

Так же как и для круговых апертур, распределение интенсивности в плоскости экрана описывается выражением (10) с точностью до явного вида функций  $I_{0j}(x_s, y_s)$  и геометрического сомножителя перед вторым слагаемым. Зависимости видности интерференционных полос для случая  $d_2=0.5D_2$  и  $\kappa=(D_2/d_2)^2-1$  представлены на рис. 3 для первого и второго полей перемещений кривыми 3 и 4 соответственно. Выбранные параметры дают геометрические размеры дифракционных изображений, эквивалентные рассмотренному выше случаю с круговыми апертурами. Наблюдается смещение максимума функции  $V_2(x_s, y_s)$  из центра гало (кривая 4), что повышает достоверность измерений. Кроме того, в этой области интенсивность дифракционного изображения является почти постоянной функцией, что увеличивает точность измерений, особенно для максимумов интерференции [10]. Указанные обстоятельства свидетельствуют в пользу использования методики с кольцевой апертурой.

Однако метод спекл-фотографии часто используется совместно с методом голографической интерферометрии (при регистрации голограмм сфокусированных изображений) для независимого определения тангенциальных и нормальных к поверхности тела перемещений. Так как для определения нормальных перемещений производится фильтрация низших пространственных частот, то наличие непрозрачного центра в кольцевой апертуре делает невозможным использованием такого комбинированного подхода.

Рассмотренные методики регистрации двух полей перемещений на одной спекл-фотографии позволяют решать различные технические задачи и являются весьма эффективной альтернативой разработанным ранее методам, основанным на делении предметной волны по фронту и амплитуде [11, 12].

В спекл фотографии вектор тангенциального перемещения определяется с точностью до знака. Для нахождения направления перемещения предлагается с помощью деления волны от объекта по амплитуде осуществлять запись двух дважды экспонированных спекл-фотографий [13]. При этом одна из фотопластинок перед второй экспозицией смещается в известном направлении на фиксированную величину. Совместный анализ картин полос Юнга для одной и той же



точки на обеих спекл-фотографиях позволяет определить направление перемещения.

Рассмотрим применение методики двух круговых апертур для регистрации направления перемещения. Исходное состояние поверхности тела регистрируется в течение первой и второй экспозиций при численных апертурах  $F_2$  и  $F_1$  ( $F_1 < F_2$ ). После нагружения тела осуществляются две экспозиции — сначала при апертуре  $F_1$ , а затем после смещения фотопластинки в ее плоскости на фиксированную величину в известном направлении при апертуре  $F_2$ .

При поточечном сканировании такой спекл-фотографии во внутренней

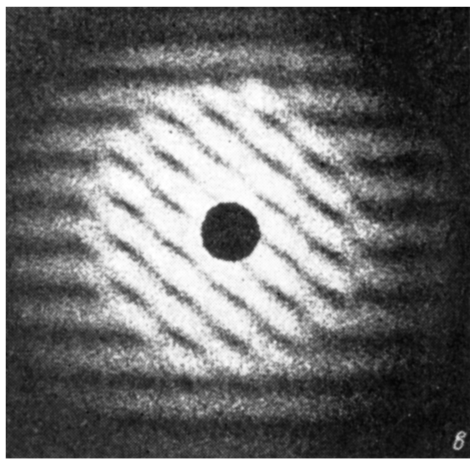
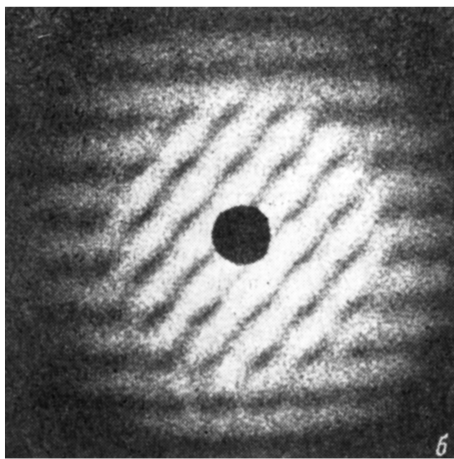


Рис. 4. Векторная диаграмма для определения направления перемещения (а) и картины полос для двух точек, равноудаленных от центра диска и лежащих на одном диаметре (б, в).

области гало наблюдается система полос, характеризующая перемещение рассматриваемой точки от деформации и смещения фотопластинки, а в кольцевой области — система полос, обусловленная только деформацией. Векторная диаграмма, приведенная на рис. 4, а, позволяет однозначно определить истинное направление вектора перемещения  $u$  рассматриваемой точки при известном векторе смещения фотопластинки  $a$ . На рис. 4, б и в показаны картины полос Юнга, полученные для двух точек поверхности диска, равноудаленных от его центра и лежащих на одном диаметре. Диск поворачивался вокруг оси, нормальной к его поверхности и проходящей через центр. Идентичность полос в кольцевых областях свидетельствует о равенстве величин перемещений в этих точках, а ортогональность полос при одинаковой их частоте в центральной области указывает на противоположность направлений перемещений этих точек.

В рассмотренных выше случаях дифракционное изображение точки спекл-фотографии, спроецированное на экран, модулируется двумя системами интерференционных полос, связанных с различными полями перемещений исследуемой точки поверхности тела. Введение постоянного фазового сдвига либо в центральную, либо в кольцевую область гало на этапе регистрации четырехэкспозиционной спекл-фотографии (например, с помощью клина) позволяет записать перемещения двух пространственно разнесенных точек поверхности тела. Поточечное сканирование таких спекл-фотографий позволяет одновременно наблюдать картины полос Юнга, соответствующие тангенциальным перемещениям точек, отстоящих друг от друга на заданном расстоянии и, следовательно, определять величину линейной деформации.

Пусть тело находится под действием одноосного растяжения (сжатия). Используем для регистрации схему с кольцевой и круговой апертурами при условии, что в кольцевой области апертуры расположен клин, сдвигающий изображение на величину  $\Delta_{AB}$  вдоль оси растяжения (сжатия)  $x$ . Величина линейной деформации  $\epsilon_x$  в этом случае определяется с помощью выражения

$$\epsilon_x = \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{\lambda L}{M \Delta_{AB}} \left( \frac{1}{\delta_{Bx}} - \frac{1}{\delta_{Ax}} \right),$$

где  $L$  — расстояние от спекл-фотографии до экрана,  $M$  — поперечное увеличение,  $\lambda$  — длина волны света сканирующего луча,  $\delta_{Ax}$  и  $\delta_{Bx}$  — расстояние между интерференционными полосами в кольцевой и центральных областях гало.

Картина интерференционных полос, соответствующая рассмотренному случаю, приведена на рис. 5. База измерений деформаций равна  $\Delta_{AB} = 2$  мм. Основными достоинствами этой методики является возможность измерения перемещений двух соседних точек поверхности тела посредством однократного сканирования спекл-фотографии и малость базы измерений.

Если плоскость регистрации оптически сопряжена с некоторой плоскостью, расположенной перед (или за) поверхностью тела, то метод спекл-фотографии может быть использован для определения углов поворота ( $\partial w / \partial x$ ) при изгибе пластин [14]. Реализация методики четырехэкспозиционной спекл-фотографии в схеме с расфокусировкой позволяет измерить кривизну изгибаемой поверхности ( $\partial^2 w / \partial x^2$ )

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\lambda L}{2M \Delta_{AB} T} \left( \frac{1}{\delta_{Bx}} - \frac{1}{\delta_{Ax}} \right),$$

где  $T$  — величина расфокусировки,  $w$  — нормальная компонента перемещения изгибаемой поверхности.

### Выводы

Четырехэкспозиционная спекл-фотография обеспечивает с изотропной чувствительностью измерение двух полей перемещений без деления предметной волны по фронту и амплитуде. Использование кольцевой и круговой апертур позволяет проводить эти измерения практически без снижения точности при одновременном повышении достоверности результатов за счет однократного сканирования. Приведенные примеры использования четырехэкспозиционной спекл-фотографии не исчерпывают их возможности. Например, использование

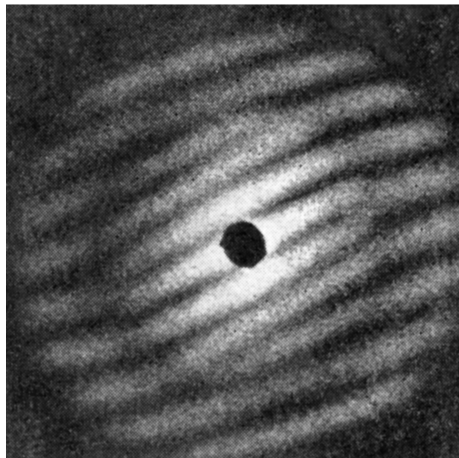


Рис. 5. Картина интерференционных полос для измерения деформаций на базе 2 мм.

рассмотренных методик эффективно для случаев, когда картины полос в кольцевой и центральной зонах гало соответствуют различным по природе полям перемещений рассматриваемой точки. К таким задачам относится регистрация процесса упруго-пластического деформирования [15, 16].

### Список литературы

- [1] *Leendertz J. A.* // *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 1970. Vol. 3. N 4. P. 214—217.
- [2] *Archbold E., Burch J. M., Ennos A. E.* // *Opt. Acta.* 1970. Vol. 17. N 12. P. 883—898.
- [3] *Speckle Metrology* / Ed. R. K. Ewf. New York: Academic Press, 1978. 331 p.
- [4] *Клименко И. С.* Голография сфокусированных изображений и спекл-интерферометрия. М.: Наука, 1985. 222 с.
- [5] *Франсон М.* Оптика спеклов. М.: Мир, 1980.
- [6] *Аблеков В. И., Зубков П. И., Фролов А. В.* Оптическая и оптоэлектронная обработка информации. М.: Машиностроение, 1976.
- [7] *Lowenthal S., Avsenault H.* // *JOSA.* 1970. Vol. 60. N 11. P. 1478—1483.
- [8] *Kheton R. P., Chiang F. P.* // *Appl. Opt.* 1976. Vol. 15. N 9. P. 2205—2215.
- [9] *Новиков С. А., Щепинов В. П., Яковлев В. В.* // Деформация и разрушение материалов атомной техники. М.: Энергоатомиздат, 1983. С. 54—61.
- [10] *Kaufmann G. H.* // *Opt. Laser Technol.* 1980. Vol. 12. N 4. P. 207—209.
- [11] *Hudson R. R., Setopoulos D. P.* // *Strain.* 1975. Vol. 11. N 3. P. 126—129.
- [12] *Fagon W. F.* // *Laser-77 Opto-Electronics Proc. Conf. Munich, 1977.* P. 456—461.
- [13] *Марти Л., Патиньо А., Островский Ю. И.* // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. Вып. 16. С. 970—973.
- [14] *Chiang F. P., Juang R. M.* // *Appl. Opt.* 1976. Vol. 15. N 9. P. 2199—2204.
- [15] *Новиков С. А., Щепинов В. П., Яковлев В. В.* // Физика и механика деформации и разрушения. М.: Атомиздат, 1980. Вып. 8. С. 75—88.
- [16] *Новиков С. А., Щепинов В. П., Аистов В. С.* // Динамика и прочность металлургических машин. М., 1984. С. 47—52.

Московский инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию  
17 июля 1989 г.