

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ОПТИЧЕСКОЙ СПЕКЛ-КОРРЕЛЯЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2004 г. Л. И. Муравский, доктор техн. наук; А. Н. Сахарук; А. П. Максименко, канд. техн. наук

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, г. Львов, Украина

E-mail: dep24@ah.ipm.lviv.ua

Предложен метод оптической спекл-корреляции для построения полей перемещений и деформаций на поверхностях образцов конструкционных материалов. Для реализации метода использованы компьютерные модели линейного коррелятора совместного преобразования (СП), коррелятора СП с медианным и локальным медианным порогами, а также коррелятора СП с фильтром выравнивания полос. Проанализированы погрешности перемещений поверхности на тестовых и реальных спекл-картинах. Представлены результаты расчетов полей перемещений деформированной поверхности дюралюминиевого образца, полученные с помощью разработанных компьютерных моделей коррелятора СП.

Коды OCIS: 070.4550, 100.2000, 120.4290.

Поступила в редакцию 22.12.2003.

Введение

Цифровая спекл-корреляция (ЦСК) является одним из интенсивно развивающихся направлений спекл-метрологии [1–3]. Методы ЦСК весьма эффективны при исследовании больших деформаций поверхностей образцов конструкционных материалов и процессов их разрушения, поскольку обладают возможностью прямой интерпретации локальных перемещений поверхности без применения сложных алгоритмов формирования пространственных фазовых полей, характерных для методов электронной спекл-интерферометрии. Наиболее оптимальные подходы к формированию пространственного распределения локальных поперечных перемещений поверхности исследуемого образца методами ЦСК базируются на разбиении цифровых спекл-изображений исходной и деформированной поверхностей (изображений 1 и 2 соответственно) на $M \times N$ квадратных равновеликих фрагментов с размерностью $2^p \times 2^p$ пикселей ($3 \leq p \leq 6$) с последующей кросс-корреляцией каждой пары m, n -х фрагментов изображений 1 и 2, где $m = 1, 2, \dots, M$; $n = 1, 2, \dots, N$. В результате формируется прямоугольная решетка корреляционных пиков, причем перемещение каждого m, n -го максимума из решетки пиков относительно своего исходного положения эквивалентно перемещению m, n -го фрагмента изображения 2, вызванного перемещением соответствующего фрагмента деформируемой поверхности образца, относительно m, n -го фрагмента изображения 1 [4, 5]. Для оценки таких перемещений разработаны алгоритмы вычисления координат максимумов корреляционных пиков с абсолютными погрешностями, составляющими сотые доли от размера пикселя [2–5].

Корреляция изображений деформируемых поверхностей вполне осуществима и оптическими

методами с использованием архитектур оптических корреляторов [6–8]. Преимущества таких методов по сравнению с методами ЦСК состоят в их высоком быстродействии и параллельности обработки информации. Вместе с тем, предложенные в [6–8] оптические схемы корреляции спекл-картин обеспечивали кросс-корреляцию всей исходной поверхности исследуемого образца, находящейся в поле анализа оптического коррелятора, со всей сдвинутой в заданном направлении или наклоненной поверхностью этого же образца. Однако исследование локальных перемещений множества фрагментов поверхности в этих работах не проводилось.

Теория

Нами предложен метод оптической спекл-корреляции, реализуемый в корреляторе совместного преобразования (СП) [9, 10]. В предлагаемом методе изображения 1 и 2, описываемые функциями $r(x, y)$ и $g(x, y)$ соответственно, разбивали на две одинаковые матрицы, состоящие из квадратных фрагментов с размерами фрагментов, равными $a \times a$. Пусть два фрагмента $r_{m,n}$ и $g_{m,n}$ расположены во входной плоскости (x, y) линейного (обычного) коррелятора СП таким образом, что их суммарное комплексное пропускание описывается выражением

$$t_{m,n}(x, y) = r_{m,n}(x + b, y + c) + g_{m,n}(x - x_m - b, y - y_n - c), \quad (1)$$

где M, N – парные числа, $x_m = ((M + 1)/2 - m)a$, $y_n = ((N + 1)/2 - n)a$, $2b$ – расстояние между фрагментами вдоль оси x , $2c$ – расстояние между фрагментами вдоль оси y . Взаимное расположение фрагментов изображений 1 и 2 в плоскости (x, y) коррелятора приведено на рис. 1.

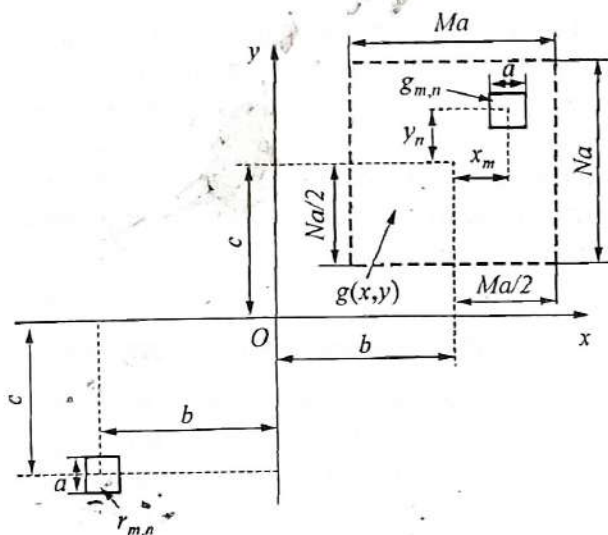


Рис. 1. Расположение фрагментов $r_{m,n}$ и $g_{m,n}$ изображений 1 и 2 во входной плоскости (x, y) коррелятора (пояснения в тексте).

При реализации операции корреляции фрагментов $r_{m,n}$ и $g_{m,n}$ допускается [4, 5], что каждому фрагменту $r_{m,n}$ можно найти идентичный ему фрагмент $g_{m,n}$ в изображении 2, смещенный на расстояние $\delta l_{m,n} = \sqrt{(\delta x_m)^2 + (\delta y_n)^2}$, т. е. $g'_{m,n} = r_{m,n}(x - \delta x_m, y - \delta y_n)$. Если $\delta x_m < a$, $\delta y_n < a$, то фрагмент $g_{m,n}$ можно представить в виде суммы части $\bar{g}_{m,n}$ смещенного фрагмента $g'_{m,n}$ и части $\bar{g}_{m\pm 1, n\pm 1}$ соседних фрагментов $g'_{m\pm 1, n\pm 1}$, попадающих в квадрат, занимаемый фрагментом $g_{m,n}$ (рис. 2), то есть

$$g_{m,n}(x - x_m - b, y - y_n - c) = \bar{g}_{m,n}(x - b - x_m - \delta x_m, y - c - y_n - \delta y_n) + \bar{g}_{m\pm 1, n\pm 1}(x - b - x_m - \delta x_m, y - c - y_n - \delta y_n). \quad (2)$$

При такой трактовке фрагментов $r_{m,n}$ и $g_{m,n}$ можно утверждать, что благодаря наличию $\bar{g}_{m,n}$ и соответствующей идентичной части во фрагменте $r_{m,n}$ в результате кросскорреляции фрагментов $\bar{g}_{m,n}$ и $r_{m,n}$ в первом порядке дифракции выходной плоскости коррелятора формируется корреляционное поле с размерами $2a \times 2a$, состоящее из пика и окружающих его шумовых компонент. Прямоугольную решетку таких пиков в плюс первом порядке дифракции при соблюдении масштабной инвариантности между плоскостями (x, y) и (x', y') можно описать выражением

$$\bar{C}^+(x', y') = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_{m,n}(x' - 2b - x_m - \delta x_m, y' - 2c - y_n - \delta y_n), \quad (3)$$

где $c_{m,n}(\dots)$ – комплексное амплитудное распределение m, n -го корреляционного поля в пределах квадрата размером $a \times a$ с центром в точке $(x' - 2b - x_m, y' - 2c -$

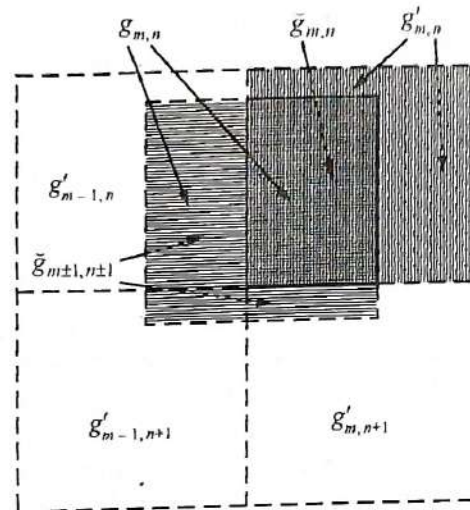


Рис. 2. Расположение фрагментов $g_{m,n}$, $g'_{m,n}$, $g'_{m-1,n}$, $g'_{m,n+1}$ и их составных частей $\bar{g}_{m,n}$, $\bar{g}_{m\pm 1, n\pm 1}$ во входной плоскости коррелятора СП.

$-y_n$). Причем этот квадрат расположен в окне, описываемом функцией $\tilde{W}_+(x', y') = \text{rect} \frac{x' - 2b - x_m}{a} \times \text{rect} \frac{y' - 2c - y_n}{a}$, а расстояния δx_m , δy_n характеризуют смещение максимума m, n -го корреляционного пика относительно центра корреляционного поля $c_{m,n}$. Такая же, но повернутая на π радиан, решетка формируется и в минус первом порядке дифракции. Как показывают выражения (1)–(3), расположение максимумов комплексных амплитуд $p_{m,n}$ корреляционных пиков в точках $(x' - 2b - x_m - \delta x_m, y' - 2c - y_n - \delta y_n)$ плоскости (x', y') соответствуют расположению центров $(x - b - x_m - \delta x_m, y - c - y_n - \delta y_n)$ смещенных фрагментов $g'_{m,n}$ в плоскости (x, y) . Такая решетка корреляционных пиков на выходе коррелятора приведена на рис. 3.

Рассмотренная процедура формирования решетки корреляционных пиков в линейном корреляторе СП может быть расширена и на такие корреляторы СП, в которых для повышения интенсивности

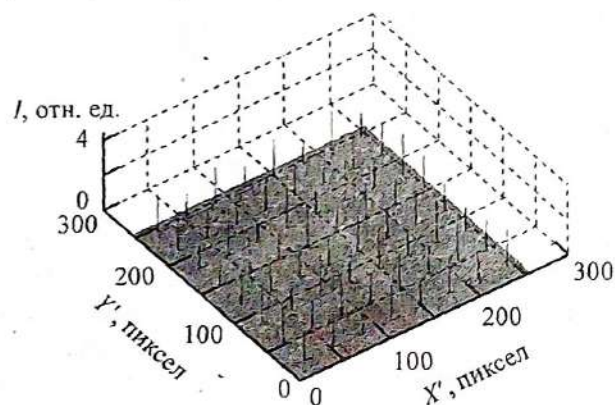


Рис. 3. Решетка корреляционных пиков на выходе коррелятора СП.

пика, снижения уровня интермодуляционных шумов, сужения пика и, как следствие, повышения точности определения координат пика используются операции линейных и нелинейных преобразований интерференционной картины совместного энергетического спектра (СЭС). Результаты компьютерного моделирования различных методов преобразования и фильтрации СЭС показали, что для формирования узких и интенсивных пиков при взаимной корреляции спекл-картин весьма эффективны корреляторы СП с медианной и локальной медианной пороговой классификацией [11], а также коррелятор СП с использованием фильтра корректирования полос дробной степени [12]. Методы преобразования СЭС в корреляторе СП с использованием медианного и локального медианного порогов основываются на бинаризации СЭС при использовании глобальной пороговой классификации, определяемой как медианное значение отсчетов совместного спектра, или локальной пороговой классификации, определяемой как медианное значение отсчетов одной локальной области спектра. Несмотря на экспериментально подтвержденную высокую эффективность этих методов, некоторые их особенности, в частности большие вычислительные затраты, влияние дифракционного центра, высокая вероятность ложной тревоги из-за наличия шумовых импульсных выбросов, ограничивают возможности бинарных корреляторов. Коррелятор СП с фильтром корректирования полос дробной степени (ФКПДС) устраняет вышеперечисленные недостатки. ФКПДС относится к классу аподизационных фильтров и описывается выражением [12]

$$H_F(u, v) = B(u, v) \left[A(u, v) + |R(u, v)|^m \right]^{-1},$$

где m – константа; $A(u, v)$, $B(u, v)$ – константы или функции, $R(u, v)$ – фурье-образ опорного (исходного) изображения. Если $m = 2$ и $A(u, v) \ll |R(u, v)|^2$, то ФКПДС становится фильтром корректирования полос или инверсным фильтром [13]. Для устранения нулевого дифракционного порядка дополнительно можно использовать метод вычитания изображения в фурье-плоскости [12]. Вместе с тем, в корреляторе СП с ФКПДС не учитывается влияние деформированного изображения (изображения 2) на выходной сигнал. Этот недостаток не оказывает существенного влияния на корреляционный отклик, если фрагмент $g_{m,n}$ смещен на малое расстояние относительно фрагмента $r_{m,n}$ без учета расстояния

$2\sqrt{b^2 + c^2}$ между ними. Однако при увеличении расстояния между $r_{m,n}$ и $g_{m,n}$ отсутствие информации о фрагменте $g_{m,n}$ в ФКПДС может существенно повлиять на уменьшение интенсивности пика и отношения пик/шум.

Таким образом, при использовании для преобразования СЭС рассмотренных методов пороговой классификации и фильтрации следует учитывать их особенности и при необходимости комбинировать процедуры пороговой бинаризации и фильтрации, реализуемые этими методами, для достижения оптимального результата.

Компьютерное моделирование

Для сравнительной оценки эффективности операций взаимной корреляции фрагментов $r_{m,n}$ и $g_{m,n}$ спекл-картин, осуществляемых указанными методами, были разработаны компьютерные модели линейного коррелятора СП (КСП1) и корреляторов СП с медианным порогом (КСП2), с локальным медианным порогом (КСП3) [11] и с фильтром корректирования полос (КСП4) [12]. Оценку систематической и случайной погрешностей измерения перемещения пиков на выходе КСП1–КСП4 производили с помощью программно смоделированных тестовых спекл-картин, для чего использовали алгоритм Хантли [13], модифицированный Сьодалом и Бенкертом [14]. Средний размер спекла выбирали равным 2 шагам между соседними пикселями вдоль оси x или y , причем шаги вдоль обоих направлений принимали одинаковыми. Исходная тестовая спекл-картина имитировала изображение 1, а для имитации изображения 2 передвигали тестовую спекл-картину на расстояние d вдоль направления, диагонального к осям x и y . Изображения 1 и 2 размерностью 256×256 пикселей разбивали на фрагменты $r_{m,n}$ и $g_{m,n}$ размерностью 32×32 пиксела и затем проводили их кросскорреляцию, используя компьютерные модели корреляторов КСП1–КСП4. Перемещения пиков вычисляли, используя алгоритм тригонометрической интерполяции (алгоритм 1), который впервые применен для задач спекл-корреляции Сьодалом и Бенкертом [14], а также алгоритм нахождения центра масс (алгоритм 2) [15], адаптированный нами применительно к данной задаче. Среднее значение перемещения изображения 2 определяли по формуле

$$\bar{d} = \sum_{m,n} d_{m,n} / MN,$$

используя для этого значения перемещений всех фрагментов $g_{m,n}$. За единицу отсчета при перемещении принимался шаг между соседними пикселями вдоль оси x или y . Систематическую погрешность $\bar{\theta}$ перемещения $\bar{d}$ определяли как среднее значение систематических погрешностей $\theta_{m,n}$ перемещений фрагментов $g_{m,n}$; а случайную погрешность $\bar{s}$ нахождения $\bar{d}$ – как среднее значение стандартных отклонений $s_{m,n}$ перемещений тех же фрагментов.

Для учета влияния на корреляционные пики входных шумов, присутствующих в изображениях

1 и 2, и выходных шумов в первом порядке дифракции корреляционного поля вычисляли отношения пик/выходной шум [16]

$$\mu_{m,n} = \left[|p_{m,n}|^2 - \left(\overline{|n_{i,j}|^2} \right)_{m,n} \right] / s \left[\left(\overline{|n_{i,j}|^2} \right)_{m,n} \right]$$

и пик/входной шум [17]

$$\eta = \overline{|p_{m,n}|^2} / \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \left(|p_{m,n}|^2 - \overline{|p_{m,n}|^2} \right)^2} / MN.$$

Здесь $\overline{|p_{m,n}|^2} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |p_{m,n}(x', y')|^2 / MN$; $p_{m,n}$ – комплексная амплитуда m, n -го пика; $\left(\overline{|n_{i,j}|^2} \right)_{m,n} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J |n_{i,j}(x', y')|_{m,n}^2 / (IJ - 1)$; $n_{i,j}$ – комплексная амплитуда i, j -го отсчета выходного шума; s – стандартное отклонение; $i = 1, \dots, i' - 1, i' + 1, I$; $j = 1, \dots, j' - 1, j' + 1, J$; i', j' – номера пиков; $I = J$.

При перемещении всего изображения 2 в заданном направлении, обусловленного поперечным перемещением всей недеформированной поверхности, целесообразно определять средние значения отношения пик/выходной шум

$$\bar{\mu} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \mu_{m,n} / MN$$

и отношения пик/входной шум

$$\bar{\eta} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \eta_{m,n} / MN,$$

поскольку благодаря вычислению $\bar{\mu}$ и $\bar{\eta}$ можно изучать характер изменения интенсивности пика и статистические характеристики шумов, а также определить допустимые пределы перемещений поверхностей.

Проведенные вычисления с использованием компьютерных моделей корреляторов (КСП1–КСП4) показали, что случайные погрешности резко возрастают при перемещении на расстояние, равное нецелому количеству шагов. Наибольшие флуктуации между случайными погрешностями для перемещений с целым и нецелым количеством шагов наблюдались в КСП1; для КСП2–КСП4 эти флуктуации были значительно меньшими. Кроме того, для всех корреляторов (КСП1–КСП4) при увеличении перемещения изображения 2 наблюдалось увеличение систематических и случайных погрешностей. Причем наибольшее увеличение погрешностей, не считая КСП1, наблюдается для КСП4, что можно объяснить влиянием шумов и помех, присутствующих в изображении 2, поскольку влияние изображения 2 в ФКПДС не учитывается.

Систематические и случайные погрешности вычислялись с использованием алгоритмов 1 и 2, при этом значения этих погрешностей, полученных при использовании алгоритма 1, приблизительно в 3–6 раз меньше значений погрешностей, полученных при использовании алгоритма 2. Однако время вычисления с использованием алгоритма 2 приблизительно на два порядка меньше. Таким образом, для высокоточных вычислений перемещений спекл-картин следует использовать алгоритм 1, а для быстрых вычислений без соблюдения высоких требований к точности вычислений – алгоритм 2.

Эксперимент и обсуждение результатов

Для проведения экспериментальных исследований поперечных перемещений поверхностей образцов методом оптической спекл-корреляции использовалась стандартная ПЗС-камера типа “FINE” Т392С с оптической системой, содержащей объектив “Вега-7”, причем параметры оптической системы подбирались таким образом, чтобы средний размер спекла в изображениях для длины волны $\lambda = 600$ нм составлял 2 шага (рис. 4). Изучали деформации поверхностей стальных балочных образцов (сталь 20), покрытых композитным слоем, и дюралюминиевых (Д16Т) пластин с концентраторами напряжений в виде усталостных трещин.

При изучении поперечных перемещений стальных балочных образцов поверхность балки размерами 20×20 мм освещали галогенной лампой КГМ12-20. Полученные изображения 1 и 2 размерностью 640×480 пикселей разбивали на фрагменты

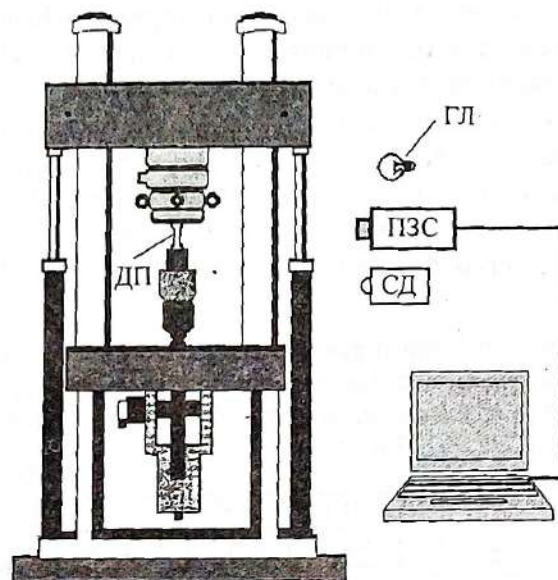


Рис. 4. Схема экспериментальной установки EU-40 для циклических нагрузок с оптической системой регистрации спекл-картин: ПЗС-видеокамера, СД – светодиод, ГЛ – галогенная лампа, ДП – дюралюминиевая пластина.

размерностью 32×32 пиксела и в результате кросс-корреляции между фрагментами в корреляторах КСП1–КСП4 формировали прямоугольные решетки корреляционных пиков. Результаты вычислений $\bar{\mu}$ и $\bar{\eta}$, приведенные в таблице, показали, что для корреляторов КСП2–КСП4 наблюдается постепенное уменьшение $\bar{\mu}$ и $\bar{\eta}$ при возрастании перемещения d фрагментов. Лишь для КСП1 такое уменьшение почти не заметно, что объясняется малыми значениями $\bar{\mu}$ и $\bar{\eta}$ для всех d . Как видно из таблицы, наибольшие значения $\bar{\mu}$ получаются в КСП4. В этом корреляторе наблюдаются также наименьшие значения $\bar{\eta}$, что объясняется отсутствием информации об изображении 2 в ФКПДС. Приведенные в таблице данные свидетельствуют, что для данного типа ПЗС-камеры наиболее предпочтительно применение КСП2 и КСП4. Меньшую эффективность КСП3 по сравнению с КСП2 можно объяснить низким качеством ПЗС-камеры, в частности малым динамическим диапазоном и большим уровнем помех в электронном тракте формирования видеосигнала.

Для исследования пространственных распределений деформаций на поверхности дюралюминиевых пластин в процессе их разрушения использовалась та же оптическая система формирования спекл-картин и та же ПЗС-камера. Однако в качестве источника излучения использовали светодиод L-44ID, благодаря чему значения $\mu_{m,n}$ в этом эксперименте превышали соответствующие значения $\mu_{m,n}$, полученные в предыдущем эксперименте. Для устранения перемещений всего образца относительно ПЗС-камеры изготавливали специальный кронштейн, позволяющий прикреплять оптическую систему и камеру к исследуемой пластине. К пластине с помощью установки для циклических нагрузок ЕУ-40 прикладывалась одноосная нагрузка растяжения. Нагрузку изменяли в пределах от 250 до 4000 кГ, шаг нагрузки составлял 250 кГ. Наблюдаемая площадь поверхности составляла 12×11 мм. Для вычисления перемещений поверхности использовали КСП2, поскольку в предыдущем эксперименте указанный коррелятор оказался наиболее эффективным. Для

Зависимости между перемещениями поверхности стального балочного образца, покрытого композитным материалом, и средними значениями μ и η , полученными в КСП1, КСП2, КСП3 и КСП4

d , мкм	КСП 1		КСП 2		КСП 3		КСП 4	
	$\bar{\mu}$	$\bar{\eta}$	$\bar{\mu}$	$\bar{\eta}$	$\bar{\mu}$	$\bar{\eta}$	$\bar{\mu}$	$\bar{\eta}$
10	3.85	3.82	36.5	10.1	27.8	2.4	60.6	7.4
20	3.7	3.8	22.2	8.7	16.2	2.4	29.2	6.8
30	3.6	3.8	18.4	9.3	14.3	2.7	20.9	2.0
40	3.5	3.7	21.7	6.9	18.3	2.6	24.5	1.6
60	3.4	3.7	17.6	7.8	14.2	2.9	19.5	2.6
80	3.2	3.6	17.7	5.6	15.1	2.7	19.4	1.4

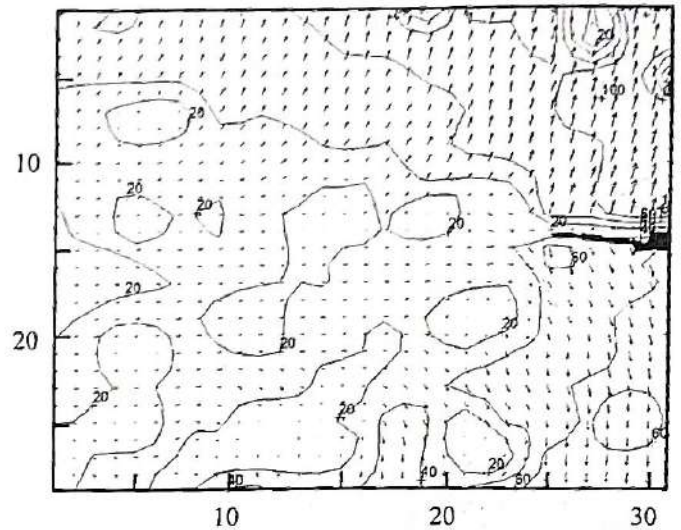


Рис. 5. Распределение смещений в дюралюминиевом образце после приложения нагрузки 3500 кГ.

вычисления координат максимумов корреляционных пиков использовали алгоритм 2. На рис. 5 приведена картина пространственного распределения перемещений поверхности образца дюралюминиевой пластины толщиной 1,5 мм в окрестности развивающейся трещины при нагрузке растяжения, равной 3500 кГ, относительно исходного положения пластины при отсутствии нагрузки. Стрелки показывают величину и направление поперечных перемещений на поверхности пластины. На рисунке приведены распределения изотет перемещений с шагом, равным 20 мкм. Полученная картина позволяет более глубоко и полно изучать процесс разрушения данного образца, используя для этого известные подходы и критерии [18].

Выводы

Исследование перемещений тестовых спекл-картин и спекл-картин поверхностей образцов конструкционных материалов показало принципиальную возможность эффективного использования архитектур коррелятора СП для построения пространственных полей поверхностных деформаций. Использованы процедуры нелинейной бинаризации и фильтрации СЭС, позволяющие значительно уменьшить ширину корреляционного пика, увеличить отношение сигнал/шум и тем самым повысить устойчивость коррелятора к входным шумам спекл-картин и выходным шумам корреляционных полей. На примере вычисления поля распределения перемещений поверхности деформированной дюралюминиевой пластины продемонстрирована возможность использования метода оптической спекл-корреляции для исследования поверхностных деформаций образцов конструкционных материалов. Предложенный метод может быть реали-

зоран не только на компьютерных моделях, но и при построении оптических или гибридных оптико-цифровых корреляторов, предназначенных для экспрессной количественной оценки напряженно-деформированного состояния различных материалов, а также процессов их разрушения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yamaguchi I. Theory and applications of speckle displacement and decorrelation // *Speckle Metrology* / Ed. by Sirohi R.S. N.Y.: Marcel Dekker Inc., 1993. P. 1–39.
2. Sjödahl M. Some recent advances in electronic speckle photography // *Opt. Las. Engin.* 1998. V. 29. P. 125–144.
3. Sjödahl M. Digital Speckle Photography // *Digital speckle pattern interferometry and related techniques* / Ed. by Rastogi P.K. Chichester: John Wiley and Sons, 2001. P. 289–336.
4. Chen D.J., Chiang F.P., Tan Y.S., Don H.S. Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method // *Appl. Opt.* 1993. V. 32. P. 1839–1849.
5. Sjödahl M., Benckert L.R. Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy // *Appl. Opt.* 1993. V. 32. P. 2278–2284.
6. Gorecki C. Phase correlation method for speckle in-plane motion analysis using digitally addressed SLM // *Proc. SPIE.* 1994. V. 1991. P. 189–192.
7. Thripati R., Pati G.S., Kumar A., Singh K. Three-dimensional displacement measurement using chirp modulation in a photorefractive correlator // *Opt. Engin.* 1998. V. 37. P. 2979–2987.
8. Thripati R., Pati G.S., Kumar A., Singh K. Object tilt measurement using a photorefractive speckle correlator: theoretical and experimental analysis // *Opt. Engin.* 1998. V. 37. P. 2988–2997.
9. Muravsky L.I., Maksymenko O.P., Sakharuk O.M., Filio N.V. Study of material strains by speckle-displacement correlation technique // *Int. Workshop "Optics in Computing – St. Petersburg"*. Book of abstr. SPb., 2002. P. 47–48.
10. Muravsky L.I., Maksymenko O.P., Sakharuk O.M. Comparative analysis of digital and optical speckle displacement techniques for study of in-plane surface strains // *Proc. SPIE.* 2003. V. 4933. P. 149–154.
11. Javidi B., Wang J. Binary nonlinear joint transform correlation with median and subset median thresholding // *Appl. Opt.* 1991. V. 30. P. 967–976.
12. Alam M.S. Fractional power fringe-adjusted joint transform correlation // *Opt. Engin.* 1995. V. 34. P. 3208–3216.
13. Huntley J.M. Speckle photography fringe analysis: assessment of current algorithms // *Appl. Opt.* 1989. V. 28. P. 4316–4322.
14. Sjödahl M., Benckert L.R. Electronic speckle photography: analysis of an algorithm giving the displacement with subpixel accuracy // *Appl. Opt.* 1993. V. 32. P. 2278–2284.
15. Хромов Л.И., Лебедев Н.В., Цыцулин А.К., Куликов А.Н. Твердотельное телевидение: Телевизионные системы с переменными параметрами на ПЗС и микропроцессорах // Под ред. Росселевича И.А. М.: Радио и связь, 1986. 184 с.
16. Horner J.L. Metrics for assessing pattern-recognition performance // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. P. 165–166.
17. Javidi B., Painchaud D. Distortion-invariant pattern recognition with Fourier-plane nonlinear filters // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. P. 318–331.
18. Панасюк В.В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. К.: Наукова Думка, 1991. 416 с.