

УДК 535.015, 535.321.9, 51-72

ПРИМЕНЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОЗРАЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ

А. В. Крайский, Е. М. Кудрявцев, Т. В. Миронова, Т. Т. Султанов

Предложена схема визуализации упругих напряжений в прозрачных материалах (оргстекло) по изменению оптического пути. Градиент оптического пути измерялся с помощью корреляционного метода. Модельный эксперимент проводился при различных конфигурациях поперечной статической нагрузки балки из оргстекла. Показано, что поле смещений фоновой структуры соответствует эпюрам напряжений при данной схеме нагрузки балки. Для процесса точечного нагрева кварцевого стекла проведено сравнение корреляционного метода с методом, основанным на эффекте фотоупругости.

Ключевые слова: градиент оптического пути, цифровая корреляция изображений, искусственные спеклы, деформации, фотоупругость.

Обычная схема визуализации напряжений на основе эффекта фотоупругости включает в себя два скрещенных поляроида, между которыми помещается исследуемый образец. Эффект зависит от величины двух компонент тензора показателя преломления, приведенного к диагональному виду, и проявляется только при довольно существенных нагрузках. С другой стороны, величина оптического пути в оргстекле при небольших нагрузках изменяется довольно заметно из-за большой величины коэффициента Пуассона для оргстекла. Поэтому представилось перспективным провести измерения с помощью корреляционного метода [1, 2].

В качестве цифровых изображений для корреляционной обработки брались кадры из киносъемки, с масштабом около 250 пикселей на сантиметр изображения в плоскости исследуемого объекта. Использовался фотоаппарат Olympus μ Tough. Первый пробный эксперимент проводился при локализованной, но не дозированной нагрузке. Балка из оргстекла сечением 5×5 мм одним концом была зажата в тисках горизонтально, другой

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: tania@itep.ru.

конец свободный. Нагрузка прилагалась вертикально вверх и вниз, точка приложения нагрузки смещалась вдоль балки с шагом 1 см. За балкой располагалась картина искусственных спеклов – фоновая структура [1, 2]. По фотографиям фоновой картины, сделанным сквозь балку, измерялся сдвиг фонового изображения при нагрузке по сравнению со свободным состоянием балки. Сканирование вдоль балки проводилось окном 32×32 пикселя примерно по центральной части изображения балки, так, чтобы изображение ее границ в расчетах не участвовало.

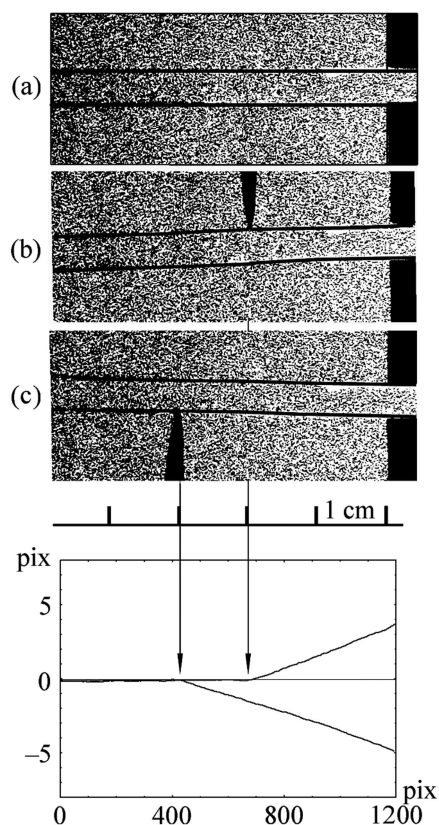


Рис. 1: Локализованная нагрузка балки: (a) ненагруженная балка, (b) нагруженная сверху, (c) снизу. Внизу графики смещений структуры фона. По оси абсцисс – координата вдоль балки в пикселях изображения, по оси ординат – величина вертикального смещения структуры фона в пикселях. Стрелки указывают места приложения нагрузки.

На рис. 1 показаны три состояния балки. Правый конец закреплен, левый – свободный. Первая фотография – ненагруженная балка, вторая – нагруженная сверху, третья – снизу. Внизу показаны графики измеренных смещений структуры фона. По оси абс-

цисс – координата вдоль балки в пикселях изображения, по оси ординат – величина вертикального смещения в пикселях. Стрелки указывают места приложения нагрузки. Видно, что место приложения нагрузки отслеживается довольно четко, а структура фона сдвигается в направлении, противоположном прилагаемой нагрузке.

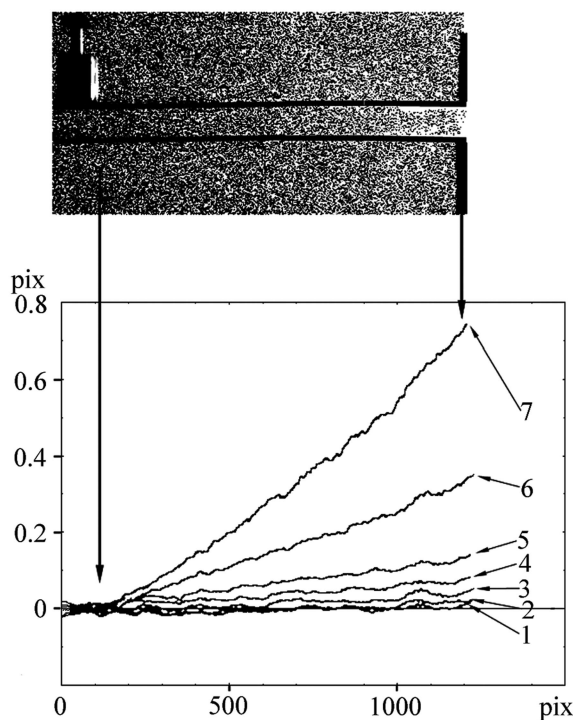


Рис. 2: Дозированная нагрузка балки. Горизонтальная ось – координаты вдоль балки в пикселях, вертикальная ось – вертикальное смещение структуры фона. Кривые 1–7 соответствуют различным нагрузкам: 1 – 1 г, 2 – 2 г, 3 – 5 г, 4 – 10 г, 5 – 20 г, 6 – 50 г, 7 – 100 г.

Для оценки чувствительности был проведен следующий эксперимент. Таким же образом закрепленная балка нагружалась в 5 см от места закрепления – на нее ставились разновесы от 1 до 100 г. Сканирование проводилось, как и в предыдущем случае, вдоль балки. Результат представлен на рис. 2. Кривые 1–7 соответствуют различным нагрузкам – от одного до ста граммов. Видно, что сдвиг фоновой картины приблизительно пропорционален приложенному весу и, следовательно, напряжениям в балке.

Распределение напряжений в балке – не просто линейная функция координаты, а имеет более сложную форму. Для более наглядной визуализации была взята более широкая полоса из оргстекла (сечение 5×25 мм). На рис. 3 вверху показана схема экспе-

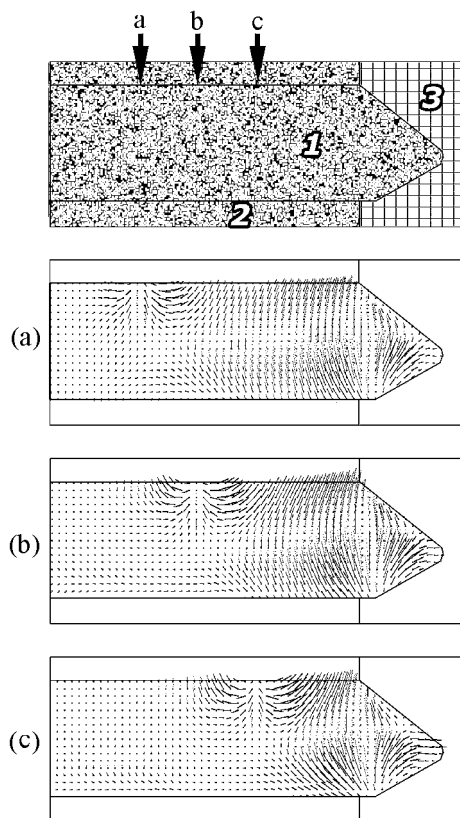


Рис. 3: Вверху – схема нагрузки балки (сечение 5×25 мм). (a, b, c) – точки приложения нагрузки. (1) область, фоновой картины, снятая сквозь оргстекло, по которой проводились измерения, (2) оставшаяся неизменной при нагрузке область фоновой картины, (3) тиски. (a), (b), (c) – векторное представление поля сдвигов фоновой структуры при соответствующих вариантах нагрузки.

римента. Балка (1) была закреплена в тисках (3) и нагружалась локально, вертикально вниз (a, b и c). Сравнивались два изображения – в нагруженном состоянии и в ненагруженном. Тем самым исключались напряжения, возникающие в пластине при сжатии в тисках. Изображение фоновой структуры в области (2) оставалось неизменным при нагрузке, а в области (1) изменялось в зависимости от приложенной нагрузки. На рис. 3((a), (b), (c)) показано векторное представление измеренных сдвигов фоновой структуры по полю пластины при трех вариантах точки приложения нагрузки.

Максимальные величины горизонтальных сдвигов – порядка одного пикселя и в положительном, и в отрицательном направлении. В поле вертикальных сдвигов преобладает направление вверх, максимальные сдвиги в области закрепления детали – до 3-х

пикселей. В окрестности точки приложения нагрузки локальный вертикальный сдвиг вниз, величина до одного пикселя.

Такой удобный способ визуализации напряжений оказывается возможным благодаря сравнительно низкому значению модуля упругости и большой величине коэффициента Пуассона для оргстекла ($E = 0.32 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\mu = 0.35$ [3, 4]), что приводит к заметной трапецевидности поперечного сечения балки при изгибающих нагрузках [5]. Для кварцевого стекла модуль упругости значительно больше, а коэффициент Пуассона в два раза меньше ($E = 7.5 \cdot 10^{10}$ Н/м², $\mu = 0.17$ [3]), и при такой же геометрии эксперимента, как та, результаты которой приведены на рис. 1, но с балкой из кварцевого стекла, максимальный сдвиг фоновой структуры составил 0.3 пикселя (для оргстекла ~ 5 пикселей).

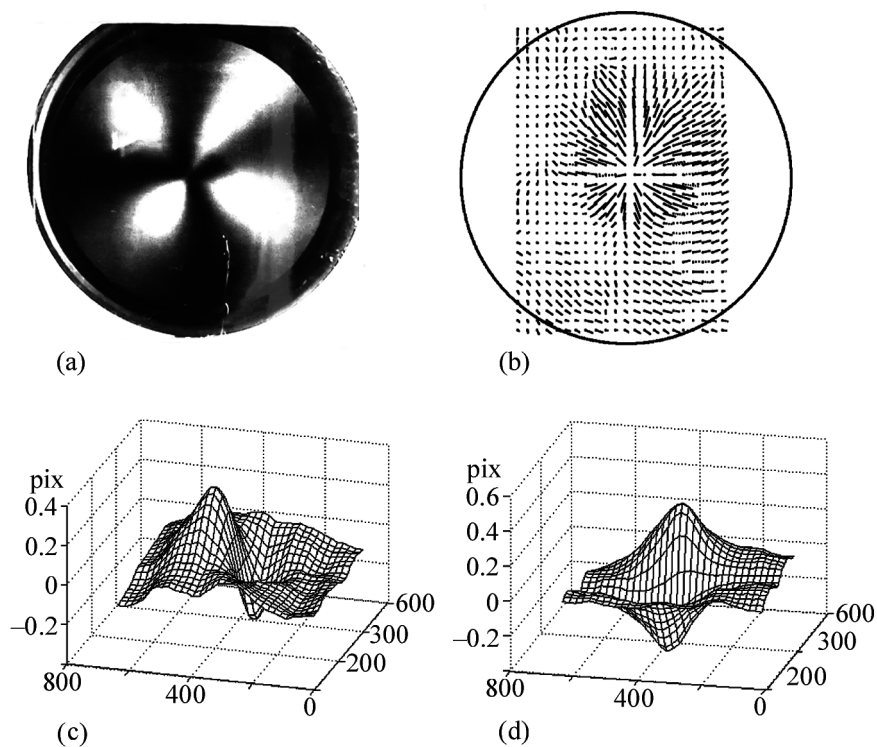


Рис. 4: (a) стекло в скрещенных поляризаторах после точечного нагрева в центральной точке, (b) векторное представление поля сдвигов фоновой структуры при корреляционной обработке, (c) горизонтальная компонента сдвига, (d) вертикальная компонента сдвига.

Для сравнения корреляционного метода визуализации напряжений с методом, основанным на эффекте фотоупругости, были проведены измерения сдвига фоновой струк-

туры в классическом демонстрационном эксперименте с точечным нагревом стекла. Стекло (толщиной 3 мм и размером $\sim 5 \times 5$ см) помещалось между скрещенными поляризаторами и нагревалось в центре острием жала паяльника, площадь контакта ~ 4 мм². В процессе нагрева проявлялась характерная крестообразная структура прошедшего через поляризаторы света, принимая через несколько десятков секунд вид, показанный на рис. 4(а). Для корреляционного анализа проводилась съемка такого же процесса нагрева стекла, но без поляризаторов, а с искусственной спекл-картиной в качестве фонового изображения. Результат обработки изображений показан на рис. 4 ((b), (c), (d)). Рис. 4(b) представляет собой векторное представление поля сдвигов фоновой структуры, окружность показывает размер поляроидов. Рис. 4(c) и 4(d) – горизонтальная и вертикальная компоненты сдвига фоновой структуры. Сдвиги не превышают 0.4 пикселей. Полученная картина сдвигов фоновой структуры соответствует градиентам оптического пути в стекле, возникающим при нагреве и расширении стекла. Отклонения от симметрии как на рис. 4(а), так и на рис. 4(b) (в правом верхнем секторе эффект более выражен) связаны, видимо, с тем, что паяльник, острием жала которого производился нагрев, подносился к стеклу не перпендикулярно, а под углом $\sim 30^\circ$, что привело к некоторой асимметрии распределения температуры.

Итак, показано, что корреляционную обработку фоновых изображений можно использовать для визуализации механических и тепловых деформаций прозрачных твердых тел. В частности, при поперечных нагрузках балки сечение поля смещений фоновой структуры соответствует эпюрам напряжений при данной схеме нагрузки. В отличие от метода, основанного на эффекте фотоупругости, корреляционный метод дает информацию о параметрах исследуемого образца, приводящих к изменению оптического пути. Это означает, что для исследований данным методом более удобны материалы с большими величинами коэффициента Пуассона и большими коэффициентами теплового расширения. Нужно также отметить, что корреляционный метод дает информацию о различиях между двумя состояниями объекта, что сразу исключает влияние остаточных напряжений, а также других добавочных деформаций (например, напряжений, возникающих при креплении исследуемой детали).

Работа частично поддержана Министерством образования и науки РФ, контракт 14.740.11.0081, и грантом поддержки научных школ НШ-3349.2012.2.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Meier, G.E.A., 1999, Hintergrund-Schlierenverfahren. Deutsche Patentanmeldung DE 199 42 856 A1.
- [2] В. Н. Боркова, А. В. Крайский, Т. В. Миронова, Т. Т. Султанов, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 38 (2006).
- [3] *Таблицы физических величин*. Справочник под редакцией И. К. Кикоина (М., Атомиздат, 1976).
- [4] Online materials information resource, www.matweb.com.
- [5] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Т. VII. Теория упругости* (М., Наука, 2007).

Поступила в редакцию 21 августа 2012 г.