

05;11;12

## **Метод определения неоднородных полей смещений с заданным разрешением на поверхности деформируемых материалов для задач физической мезомеханики**

© О.В. Семёнова, И.А. Зашивалова, О.А. Морозов

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
E-mail: sova@nifti.unn.ru

Поступило в Редакцию 20 ноября 2007 г.

Представлен метод определения деформаций и смещений на основе обработки экспериментальных изображений или пространственных распределений высот рельефа поверхности структурно-неоднородных материалов, подвергающихся деформированию, применимый на мезоскопическом масштабном уровне. Приведены результаты тестирования предложенного подхода, а также представлены результаты экспериментов применительно к металлическим образцам.

PACS: 68.35.Gy, 89.20.Ff

Несмотря на достаточно большое количество экспериментальных методов измерения деформаций, наибольшую популярность в задачах физической мезомеханики [1] получили неконтактные методы (спекл-интерферометрия и оптико-телевизионные методы) исследования поверхностных явлений процесса деформирования. Их особенностью является то, что они имеют возможность получать информацию о распределении смещений и деформаций участков поверхности без внесения искажений; способы обработки данных не являются технологически сложными, поскольку данные методы максимально автоматизированы и основная обработка возложена на вычислительные алгоритмы. Однако характерной чертой методов, связанных с компьютерной обработкой изображений поверхности, является ограничение значений измеряемых смещений величиной элемента разрешения регистрирующего устройства; такая дискретность представления может привести значительную

ошибку в расчетных задачах, например когда требуется перейти от смещений к распределению деформаций. В работах [2–4] представлен альтернативный метод определения деформаций и смещений, основанный на анализе изменения рельефа поверхности в процессе деформирования. Он обладает всеми положительными качествами вышеперечисленных методов и лишен недостатка, связанного с дискретностью представления данных.

Основой метода является вычислительная процедура, использующая многомерную оптимизацию функции среднеквадратичного рассогласования между рельефом поверхности, зарегистрированным какой-либо сканирующей аппаратурой после деформирующего воздействия, и модельным рельефом, значения деформаций на участках которого подбираются оптимальным образом. Следует отметить, что процедура не зависит от способа регистрации поверхности и позволяет получать информацию с различных масштабов и обрабатывать различные виды исходных данных (спекл-картины, распределения интенсивности, высоты рельефа поверхности).

Идея оптимизации функции среднеквадратичного рассогласования тесно связана с методами оптимального обнаружения. Два изображения  $f_1$  и  $f_2$  рельефов поверхности, зарегистрированные в исходном и деформированном состоянии, можно рассматривать [5] как реализации отсчетов некоторого случайного процесса на координатной сетке  $\Omega_k : \{j = j_1, j_2, \dots, j_n\}$  ( $k = 1, 2$ ). Далее под изображениями будут пониматься массивы данных, содержащие координаты и соответствующие им значения высот рельефов или интенсивностей изображений поверхности. Изображение  $f_2$  получено из  $f_1$  путем применения некоторого функционального преобразования  $T[\cdot]$ ; при этом положение и форма сеток  $\Omega_k$  могут изменяться, но индексные размеры  $M \times N$  остаются постоянными. В общем случае требуется оценить форму сетки  $\Omega_2$ , опираясь на значения интенсивности изображения в узлах сетки, и найти преобразование  $\Omega_1$  в  $\Omega_2$ .

Считая случайный процесс, образующий изображения  $f_1$  и  $f_2$ , стационарным, задача оптимального обнаружения изменений решается на основе оценки максимального правдоподобия относительно условной плотности распределения вероятностей  $\rho(f_1, f_2|T)$ , что в некотором приближении может быть сведено к минимизации среднего квадрата разности деформированного изображения и его оценки:

$$\hat{T} = \arg \max_{T[\cdot]} \rho(f_1, f_2|T) \rightarrow \hat{T} = \arg \min_{\Omega_k} \sum (f_2 - \hat{f}_2)^2.$$

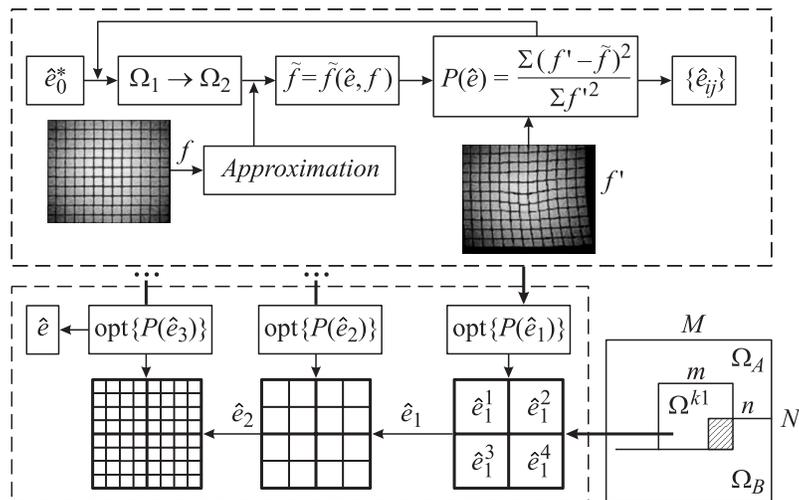


Рис. 1. Принципиальная схема вычислительной процедуры определения деформаций.

В данной работе предлагается алгоритм восстановления полей смещений и деформаций на поверхности структурно-неоднородных твердых тел, реализующий идею оптимального обнаружения. Вычислительная процедура (рис. 1) позволяет обрабатывать изображения большой размерности поверхности различных материалов и строить поля смещений и распределения деформаций с заданным разрешением.

Для оценки распределения деформаций на изображении размерности  $M \times N$  выделяется участок  $m \times n$  ( $m < M$ ,  $n < N$ ). В рамках этого участка определяются значения смещений или деформаций. Далее, перемещая выделенный участок методом скользящего окна по исходному изображению, оцениваются деформации участков всего изображения. В зависимости от положения участка на изображении применяется та или иная схема расчета деформаций.

Для первого выделенного участка используется базовый алгоритм, подробно описанный в работе [4]. Алгоритм включает в себя многошаговую процедуру последовательного уточнения значений деформаций. На каждом шаге деформации определяются на сетке с некоторым количеством узлов, количество участков разбиения увеличивается от

шага к шагу, а деформации, полученные на текущем шаге, являются начальным приближением для следующего (рис. 1). Максимальное количество участков разбиения ограничивается  $p \times q$ , где  $p$  и  $q$  могут принимать значение не более 10, поскольку дальнейшее увеличение размерности задачи приводит к резко возрастающей вычислительной сложности и к уменьшению эффективности используемых алгоритмов.

Для расчета деформаций используется процедура, основанная на применении методов многомерной оптимизации функционала средне-квадратичного рассогласования реального деформированного рельефа поверхности и приближаемого к нему модельного рельефа, построенного на основе реального недеформированного рельефа и оптимальным образом подобранных значений деформаций. Параметрами оптимизации выступают непосредственно значения деформаций или смещений на участках изображения рельефа поверхности.

При последующих сдвигах участка  $m \times n$  для определения деформаций используется базовый алгоритм только с максимальным разрешением  $p \times q$  без схемы последовательного уточнения. Рассмотрим ситуацию (рис. 1), когда участок перемещен на  $k$  отсчетов вдоль оси  $X$  и  $l$  отсчетов по оси  $Y$  на полной исследуемой области  $\Omega$  изображения рельефа поверхности, величина сдвига пропорциональна размеру участка разбиения рассматриваемой области, обозначим область данного участка как  $\Omega_{kl}$ . На данном этапе можно выделить две подобласти:  $\Omega_A$  и  $\Omega_B$ . Область  $\Omega_A$  представляет собой участок изображения, для которого вектор деформаций уже оценен на предыдущих шагах, а  $\Omega_B$  — область изображения поверхности, еще не охваченная процедурой расчета деформаций. Расчет деформаций производится на основе модифицированной схемы:

$$\tilde{\mathbf{e}}^* = \arg \left\{ \min P(\mathbf{e}^* | \tilde{\mathbf{e}}) = \frac{\int_{\Omega^{kl}} (f' - \tilde{f}[\tilde{\mathbf{e}}, \mathbf{e}^*, f])^2 d\Omega^{kl}}{\int_{\Omega} f'^2 d\Omega^{kl}} \right\},$$

$$\Omega^{kl} \subseteq \Omega, \quad \Omega_A \cup \Omega_B = \Omega,$$

$$\tilde{\mathbf{e}} = \{\tilde{e}_{ij} \in [\Omega^{kl} \cap \Omega_A]\}, \quad \mathbf{e}^* = \{e_{ij}^* \in [\Omega^{kl} \cap \Omega_B]\},$$

$$i = 0, 1, \dots, \frac{pM}{m}, \quad j = 0, 1, \dots, \frac{qN}{n},$$

где  $f'$  — в общем случае массив высот рельефа поверхности после деформирования;  $\tilde{f}[\tilde{\mathbf{e}}, \mathbf{e}^*, f]$  — модельный рельеф поверхности, постро-

енный на основе исходного недеформированного рельефа поверхности  $f$  с использованием известных с предыдущих шагов деформаций  $\tilde{e}_{ij}$ , входящих в рассматриваемую область  $\Omega^{kl}$ , и деформаций  $e_{ij}^*$ , подбираемых оптимальным образом. Компоненты вектора  $e_{ij}^*$  являются параметрами оптимизации на данном этапе.

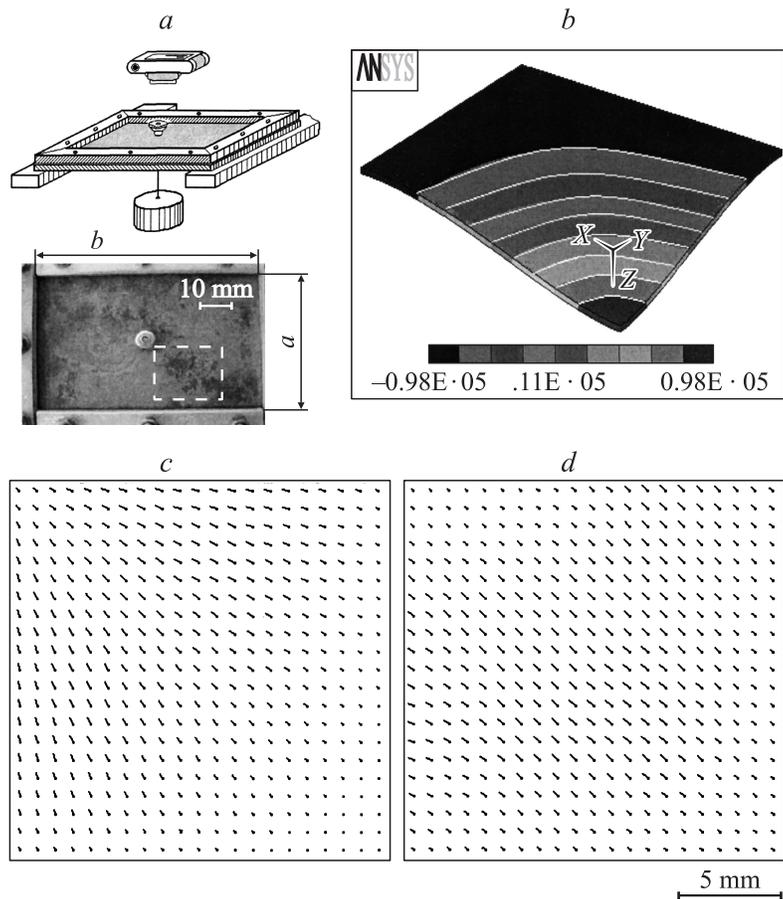
При использовании описанного алгоритма значительно уменьшается количество оптимизируемых параметров на каждом сдвиге рассматриваемого участка поверхности (кроме первого) и повышается результирующее разрешение с величины  $p \times q$  до  $\frac{pM}{m} \times \frac{qN}{n}$ .

При проведении тестовых экспериментов для апробации вышеописанного метода в качестве экспериментального образца была выбрана тонкая стальная пластинка размером  $a \times b$ , защемленная по всему контуру, под действием нагрузки, сосредоточенной в центре. Исходными данными для алгоритма определения полей смещений являлись фотоснимки участка (рис. 2, *a*) исследуемой поверхности, полученные цифровым фотоаппаратом. Пространственное разрешение изображений составляет 750 dpi. На рис. 2, *b* представлена модель прогиба одной четвертой части пластинки, рассчитанная компьютерной программой ANSYS Multiphysics. Результаты работы предложенного метода представлены в виде полей смещений, поскольку данная структурно-чувствительная характеристика процесса деформирования является наиболее наглядной.

Результаты эксперимента (рис. 2, *d*) сравнивались с полями смещений, рассчитанными программой ANSYS Multisphysics и по известным теоретическим формулам [6], справедливым для прямоугольной пластинки, подвергающейся малому прогибу (рис. 2, *c*).

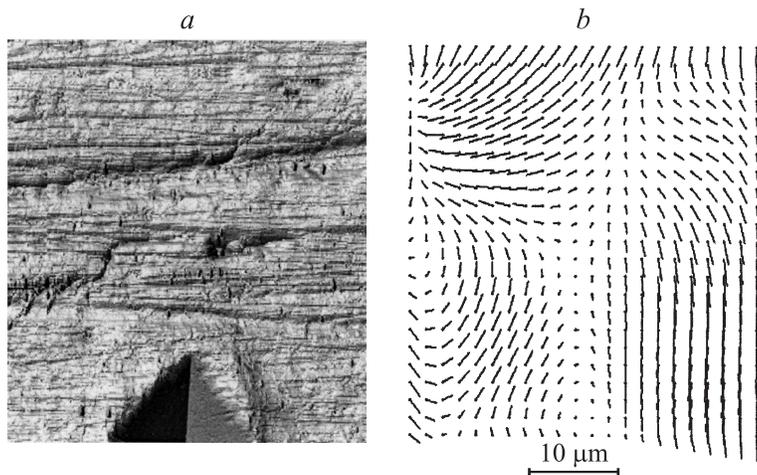
При проведении сравнительного анализа полей смещений были сделаны следующие выводы: для теоретического и экспериментального расчета вектора смещений имеют одинаковое направление и один порядок величины  $\sim 10 \mu\text{m}$ ; расчет среднеквадратичного отклонения экспериментально полученного распределения от теоретического показал, что интегральная точность составляет  $\sim 8\%$ .

Предлагаемый в работе подход применим для исследования распределения полей смещений в зоне концентратора. Для получения топографии поверхности оловянного образца использовался метод сканирующей зондовой микроскопии. Этот эксперимент демонстрирует возможности вышеизложенного метода, поскольку использует непосредственно распределение высот рельефа поверхности; кроме того, характерный



**Рис. 2.** *a* — схема тестового эксперимента; *b* — модель прогиба пластинки; *c* — теоретически рассчитанные поля смещений; *d* — поле смещений, полученное предложенным методом.

пространственный размер изучаемых процессов — несколько микрон. Все характеристики эксперимента, а также способы предварительной обработки поверхности оловянного образца и получения экспериментальных данных о топографии поверхности приведены в работе [3];



**Рис. 3.** Топографические данные (*a*) и поле смещений (*b*) в области реперной метки на поверхности оловянного образца.

там же представлены результаты расчета одномерного распределения деформаций вдоль реперной линии, нанесенной на образец. В данной работе рассматривается поведение поля смещений в зоне концентратора напряжения в области одной реперной метки (рис. 3, *a*). Максимальная величина смещений участков поверхности составляет около  $5\ \mu\text{m}$ .

Анализируя поле смещений (рис. 3, *b*), можно сделать вывод, что, действительно, нанесенные искусственным образом реперы искажают поверхность и вносят вклад в распределение структурно-чувствительных характеристик, поэтому наиболее перспективным является использование естественных особенностей поверхности для изучения свойств материалов. Получая данные о распределении полей смещений на различных масштабных уровнях и об эволюции процесса деформирования, можно делать выводы о механизмах развития деформации вблизи концентратора.

Таким образом, представленный в работе метод расчета деформаций и смещений на основе анализа изменений рельефа поверхности может служить инструментом для исследований поведения материалов на мезоскопическом масштабном уровне.

## Список литературы

- [1] Панин В.Е., Егорушкин В.Е. и др. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 1. 298 с.
- [2] Минеев С.А., Морозов О.А., Сотникова О.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 8. С. 18–23.
- [3] Минеев С.А., Морозов О.А., Сотникова О.В., Гущина Ю.Ю. // Поверхность. 2000. № 7. С. 96–98.
- [4] Семенова О.В., Морозов О.А. // Физическая мезомеханика. 2003. Т. 6. № 3. С. 99–105.
- [5] Ташлинский А.Г. Оценивание параметров пространственных деформаций последовательностей изображений. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 132 с.
- [6] Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.