

05;11;12

Использование топографических данных для изучения эволюции распределения деформации на поверхности материалов в ходе пластической деформации

© С.А. Минеев, О.А. Морозов, О.В. Семенова

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

Поступило в Редакцию 15 октября 2001 г.

Приведена экспериментальная методика оценки функции распределения неоднородной деформации на поверхности пластически деформируемых материалов на мезоскопическом масштабном уровне, приведены результаты эксперимента на основе этой методики применительно к свинцовым образцам.

1. Введение. При исследованиях эволюции функции распределения деформации на поверхности пластически деформируемых твердых тел с пространственным разрешением, сравнимым со средним размером структурной неоднородности (мезоскопический масштабный уровень), в основном применяются неконтактные методы исследования: голографическая и спекл-интерферометрия [1] и методы, базирующиеся на распознавании образов [2]. В данной работе представлен альтернативный экспериментальный метод оценки распределения деформации на поверхности по топографическим данным, имеющий определенные преимущества по сравнению с традиционно используемыми подходами.

Информация обо всех компонентах тензора деформации на поверхности образца в процессе деформирования находит свое отражение в изменении рельефа поверхности материала. При проведении экспериментов по исследованию пластической деформации твердых тел предлагается регистрировать непосредственно топографию поверхности образцов на различных этапах деформирования. На сегодняшний день существует большое количество способов и соответствующего оборудования для получения топографических изображений поверхности

твердых тел в широком диапазоне разрешений (от микрометров до сантиметров).

Предлагаемый подход включает следующие этапы: выбор рабочей области поверхности образца и маркирование поверхности; сканирование профиля поверхности в районе опорных реперов; нагружение образца, последовательное повторение процедур сканирования поверхности и нагружения до достижения конечной стадии деформирования или разрушения образца; предварительная обработка сканов (фильтрация шумов, удаление тренда, центрирование относительно реперов) и выполнение процедуры восстановления распределения деформации на поверхности по сканам на соседних этапах деформирования. Большая часть перечисленных этапов укладывается в рамки стандартной схемы определения полей деформации на поверхности образцов, за исключением численной процедуры восстановления [3], которая является основой методики.

2. Теория. Экспериментально установлено, что пластическая деформация на поверхности образца распределяется неоднородно. В одномерном случае деформацию некоторого k -го участка поверхности образца можно представить в виде:

$$\varepsilon^k = \frac{l^k - l_0^k}{l_0^k}, \quad (1)$$

где l_0^k — линейный размер k -го элемента (участка) поверхности до воздействия, а l^k — после воздействия. Предполагается, что деформация в пределах участка линейна и учитывается только деформация растяжения/сжатия каждого из участков поверхности вдоль оси X . Тогда координаты каждого отсчета первичного профиля после деформирующего воздействия:

$$\begin{cases} X_0 = 0, \\ X_{i+1}^k = X_i^k(1 + \varepsilon_k), \quad 0 \leq i < m - 1, \end{cases} \quad (2)$$

где k — номер участка профиля поверхности, ε_k — относительная деформация k -го участка, m — количество точек профиля в пределах k -го участка. Имея в распоряжении массив высот профиля f и массив X координат соответствующих высот после деформирующего воздействия на базе специального метода интерполяции, можно построить модель деформированного профиля поверхности. Приемлемые результаты получаются с использованием кубической сплайн-интерполяции.

Корректное построение модели деформированного профиля поверхности открывает возможность для решения задачи восстановления распределения деформации на поверхности итерационными методами. Основой разработанного алгоритма восстановления является процедура многомерной оптимизации функции среднеквадратичного рассогласования между деформированным профилем и профилем, построенным из недеформированного процедурой решения прямой задачи на базе некоторой оценки распределения деформации с использованием методов Монте-Карло:

$$P(\varepsilon) = \frac{\sum_{l=0}^{N-1} (f'_l - \tilde{f}'_l[\varepsilon, f])^2}{\sum_{l=0}^{N-1} f_l^2}, \quad (3)$$

где f — недеформированный профиль; f' — деформированный профиль; \tilde{f}' — модель деформированного профиля; ε — оценка функции неоднородной деформации; $P(\varepsilon)$ — многомерная многоэкстремальная функция, вектор координат глобального минимума этой функции является искомой оценкой распределения деформации.

3. Эксперимент. Объектом исследования служил свинцовый образец в виде двойной лопатки (гантели) с размером рабочей части $19 \times 7 \times 3$ mm. Образец изготовлен посредством кристаллизации расплава в открытой форме и подвергнут закалке в жидком азоте сразу после затвердевания расплава. Закалка производилась для уменьшения размера кристаллитов и более плавного распределения деформаций по области исследования. На выбор области исследования повлияло наличие небольшой каверны, служившей концентратором напряжений, на оборотной стороне образца. Область выбиралась с расчетом будущего образования в ней шейки и последующего разрушения. Маркирование производилось с помощью стального индентора сферической формы в виде двух перпендикулярных оси растяжения линий, ограничивающих область исследования, размер которой составлял 10 mm.

Сканирование одномерных профилей поверхности производилось с помощью профилографа-профилометра, установленного на виброизолирующем стеллаже. К выходам измерительного блока подключался инструментальный усилитель напряжения, выходной сигнал которого оцифровывался для дальнейшей обработки. Специально разработанное программное обеспечение позволяет следить за изменением сканируемого датчиком профиля и начинать/прекращать запись отчетов профиля

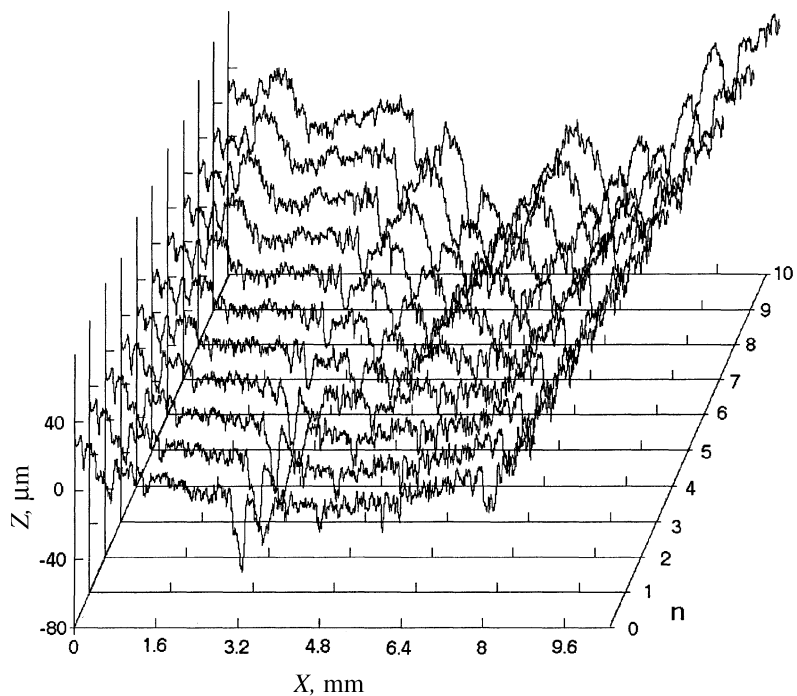


Рис. 1. Эволюция профиля поверхности одного и того же участка поверхности деформируемого образца (n — этапы деформирования).

при достижении начальной/конечной метки. Характерный полусферический профиль поверхности в районе метки позволял однозначно идентифицировать начальную и конечную метки.

Сканирование проводилось до образования шейки, в результате было получено 11 сканов профиля поверхности между метками, соответствующих различной степени деформации образца.

Нагружение образца производилось непосредственно в сканирующем устройстве с помощью специально разработанного электро-механического приспособления, позволяющего растягивать образец с минимальными поперечными смещениями образца относительно оси растяжения.

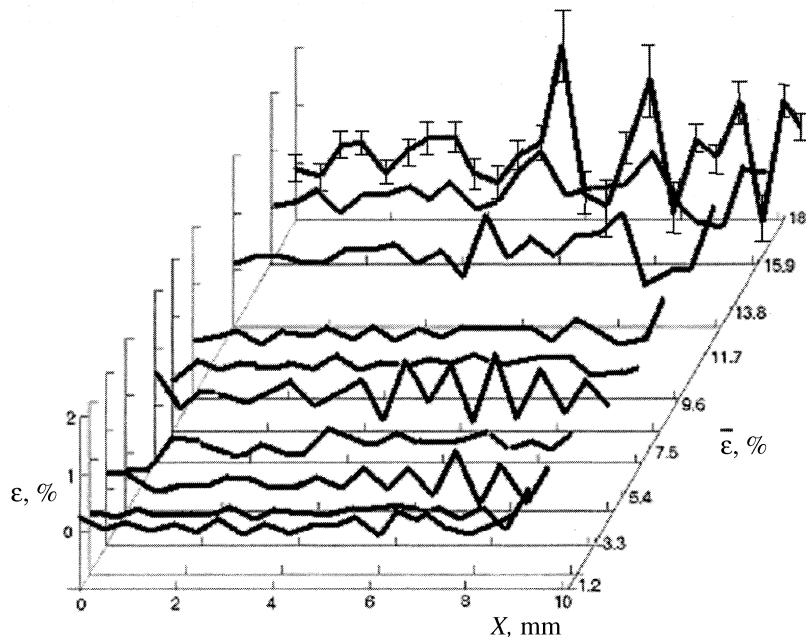


Рис. 2. Эволюция одномерного распределения деформаций на поверхности свинцового образца.

Скорость подвижного держателя 10 см/мин. После смещения подвижного держателя на 1 мм нагружение прекращалось, через 1 мин после выключения двигателя производилось сканирование. По завершении сканирования датчик помещался в исходную позицию со скоростью 60 мм/мин и снова производилось нагружение. Так как в нагружающей установке отсутствует стопорный механизм (после выключения двигателя на подвижный захват не действует растягивающая сила), измерялась остаточная деформация образца.

Особенности схемы сканирования вносили специфические искажения в снимаемые профили в виде шумов и трендов. После компенсации таких искажений с помощью цифровой обработки данных на оцифрованных профилях выделялись области между метками. Эти области и служили входными данными для процедуры восстановления

распределения деформаций на поверхности. На рис. 1 представлена эволюция профиля поверхности одного и того же участка поверхности деформируемого образца (профили поверхности после предварительной цифровой обработки).

Процедура восстановления распределения деформаций производилась для профилей на соседних этапах деформирования. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Установлено, что в результате решения задачи многомерной оптимизации вероятность реализаций отчета функции деформации на каждом участке профиля поверхности при фиксированном шаге нагружения с хорошей точностью подчиняется нормальному закону, что позволяет вычислить доверительный интервал для каждого отчета оценки распределения деформации. Стандартные отклонения приведены только на одном из графиков на рис. 2, чтобы не загромождать рисунок.

В результате проведения эксперимента обнаружена связь между полученными оценками распределения деформаций и макроэффектами, а именно: в области наибольшего разброса значений функции распределения деформаций на образце наблюдалось образование шейки и последующее разрушение. Однако прямая зависимость между этими явлениями не подтверждена и требует дальнейшего исследования.

4. Заключение. Представленный метод не требует предварительной обработки поверхности и может быть применен для исследования эволюции структуры в процессе деформирования любых материалов, на любых пространственных и временных масштабах, на основе данных, полученных как контактными, так и неконтактными методами измерения. Единственным ограничением является сохранение корреляции между профилями поверхности на соседних этапах деформирования. Экспериментальная методика подтвердила возможность построения количественных оценок эволюции распределения деформации на поверхности по топографическим данным механической профилометрии.

Список литературы

- [1] *Экспериментальная механика* / Под ред. А. Кобаяси. М.: Мир, 1990. Кн. 1. 616 с.
- [2] *Панин В.Е., Егорушкин В.Е.* и др. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск: Наука, 1995. Т. 2. 320 с.
- [3] *Минеев С.А., Морозов О.А., Сотникова О.В., Гущина Ю.Ю.* // Поверхность. 2000. № 7. С. 96–98.