

Масштабно-инвариантная самоорганизация флуктуаций полей деформации

© А.М. Авдеенко, Е.И. Кузько

Московский институт стали и сплавов (Технологический университет),
117936 Москва, Россия

(Поступила в окончательном виде 23 мая 2000 г.)

Методом сканирующей лазерной профилометрии исследовано развитие мезовозмущений полей деформации для поликристаллов алюминия, меди и железа в процессе нагружения. Установлен фрактальный характер мезовозмущений полей течения со степенным нарастанием интервала корреляций в процессе нагружения $\xi = \xi_0 \theta^{-\nu}$ (θ — безразмерный модуль упрочнения). Величина фундаментального структурного масштаба ξ_0 и индекс ν лежат в интервале $\xi_0 = 30 \dots 150 \mu\text{m}$, $\nu = 0.27 \dots 0.70$. Размерность рельефа деформации нарастает в процессе нагружения от $\sim 1.05 \dots 1.25$ в начальной стадии до $\sim 1.35 \dots 1.65$ при деформациях $\sim 0.30 \dots 0.35$ для всех материалов. Результаты свидетельствуют о существенно многоуровневом характере пластической деформации и возможности использования ренормгрупповых методов при ее описании.

Проблеме самоорганизации мезовозмущений пластического течения посвящен ряд работ [1–3]. Теоретическое описание в рамках ренормгруппового подхода предложено в [3,4], учет флуктуационных поправок для синтеза эффективной диаграммы деформации неоднородных сред проведен в работе [5]. Представляет интерес проведение комплексного экспериментального исследования динамики мезовозмущений полей деформации в процессе нагружения пластических материалов с помощью специально разработанной методики сканирующей лазерной профилометрии [6].

В качестве измерительного инструмента выступает световой луч. Система оптоэлектронного детектирования определяет знак отклонения высоты конкретной точки измеряемой поверхности от фокальной плоскости объектива, после чего эта точка выводится в фокальную плоскость перемещением образца относительно оптической системы. Все управление процессом измерения осуществляется персональной ЭВМ через аппаратуру сопряжения по специально написанной программе.

Поскольку в системе трехмерного позиционирования используются шаговые двигатели, процесс определения координат представляет собой простой подсчет числа шагов при известной величине каждого шага. По двум горизонтальным направлениям один шаг перемещения равен $1.667 \mu\text{m}$, а по вертикальному направлению, которое и является измеряемой величиной, — $1.25 \mu\text{m}$.

Экспериментально исследовался скейлинг рельефа пластического течения по мере развития неустойчивости при одноосном растяжении. Плоские образцы отожженной малоуглеродистой стали (С 0.08%), поликристаллической меди и алюминия были предварительно отполированы. Диаграмма растяжения со скоростью $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ при 293 К в истинных координатах $S-\varphi$ (рис. 1) аппроксимировалась методом наименьших квадратов выражением

$$S = S_0 \varphi^n, \quad (1)$$

где S — напряжение, нормированное на модуль Юнга E , φ — истинная деформация.

Параметр S_0 , показатель степени n , а также однородная деформация, измеренная после разрушения вне шейки (на участке постоянной толщины), φ_{hom} приведены в табл. 1. Из (1) вычислялся также безразмерный модуль упрочнения $\theta(\varphi) = dS/d\varphi$.

Неоднородность пластической деформации измеряли по профилю поверхности деформируемого образца с помощью лазерного профилографа. Погрешность измерения рельефа гладкой поверхности может быть уменьшена за счет использования более короткофокусного объектива и составляла в данном случае $\delta = \pm 1.25 \mu\text{m}$. Площадка сканирования представляла собой квадратную сетку с шагом l , стороной $L = (N - 1)l$ и общим числом точек отсчета N^2 . Один и тот же участок образца сканировали в исходном состоянии, и после 5–8 деформаций φ_i и образования макроскопической шейки образец доламывался и делались контрольные замеры.

Для коменсации "негоризонтальности" установки образца при измерении по экспериментально измеренному рельефу методом наименьших квадратов определялся макронаклон площадки в виде $Z(x, y) = Ax + By + C$,

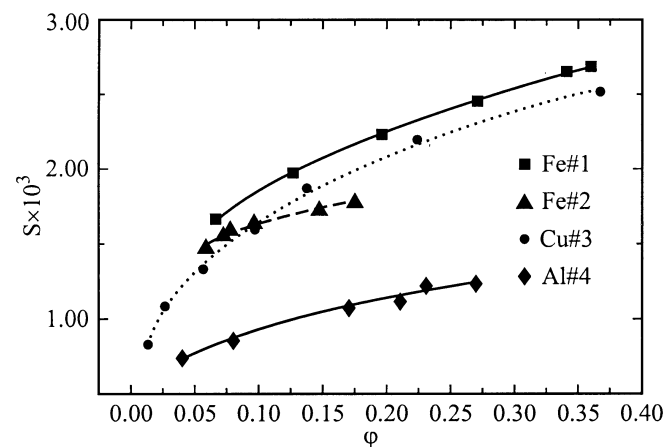


Рис. 1. Диаграмма деформации испытанных образцов в истинных координатах.

Таблица 1. Параметры диаграммы деформации

Образец	Модуль Юнга, E , ГПа	S_0	n	φ_{hom}
Fe#1	205	$(3.58 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	0.28 ± 0.01	0.34
Fe#2	205	$(2.34 \pm 0.07) \cdot 10^{-3}$	0.16 ± 0.02	0.19
Cu#3	128	$(3.53 \pm 0.07) \cdot 10^{-3}$	0.33 ± 0.01	0.37
Al#4	71	$(1.76 \pm 0.03) \cdot 10^{-3}$	0.27 ± 0.01	0.29

который в дальнейшем вычитался. Параметры измерения рельефа приведены в табл. 2.

Из двумерного массива относительных высот $h(\mathbf{r})$ в интервале длин волн от $2l$ до L традиционным методом вычислялся модуль Фурье-образа двумерного профиля рельефа

$$C(\mathbf{k}) = (2\pi L)^{-2} \left| \int h(\mathbf{r}) \exp^{i\mathbf{k}\mathbf{r}} d\mathbf{r} \right|, \quad (2)$$

где $\mathbf{k} = 2\pi\mathbf{n}/L$; $n = (n_1, n_2)$; $-N/2 < (n_1, n_2) \leq N/2$.

Поскольку $h(\mathbf{r})$ — вещественная функция, $C(n_1, n_1)$ симметрична относительно $(0,0)$, далее спектральный анализ производился для $0 \leq n_1 \leq N/2$, $-N/2 < n_2 \leq N/2$ за исключением величины $C(0, 0)$, так как это среднее значение высоты, которое не несет информации о рельефе. Для дальнейших вычислений использовался аналог спектральной функции одномерного профиля — усредненная по направлениям функция мощности

$$C^2(|\mathbf{k}|) = (2\pi|\mathbf{k}|)^{-1} \int_{|\mathbf{v}|=|\mathbf{k}|} |C(\mathbf{v})|^2 d\mathbf{v}, \quad (3)$$

$$0 < |\mathbf{k}| \leq \pi\sqrt{2}/l = k_{\text{max}}$$

и радиальный интервал корреляции

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\int |\mathbf{k}|^{-2} C_m^2(|\mathbf{k}|) d|\mathbf{k}|}{\int C_m^2(|\mathbf{k}|) d|\mathbf{k}|} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Рост деформации сопровождается снижением безразмерного модуля упрочнения $\theta(\varphi) = dS/d\varphi$. Радиальный интервал корреляции рельефа связан с ним соотношением

$$\xi = \xi_0 \theta^{-\nu}. \quad (5)$$

Линейная регрессия зависимости $\lg \xi(\lg \theta)$ дала значения $\nu = 0.27 \dots 0.7$ для образцов Fe#1, Fe#2, Cu, Al.

Максимуму энтропии флуктуаций соответствует $\nu = 0.5$. Фундаментальный структурный масштаб ξ_0 во всех случаях составлял $\xi_0 = 30 \dots 80 \mu\text{m}$.

Аппроксимация интегрального (кумулятивного) спектра в логарифмических координатах

$$Q(\mathbf{k}) = \int_{v \geq k} C^2(\mathbf{v}) d\mathbf{v} \sim |\mathbf{k}|^{-p}, \quad (6)$$

согласно [7,8] позволяет вычислить фрактальную размерность поверхности $D = 3 - p/2$, которая является характеристикой самоподобного поведения флуктуаций пластического течения. Такая аппроксимация выполнена методом наименьших квадратов в интервале $[k_1 \dots k_2]$, где измеренная зависимость $\lg Q(\lg |\mathbf{k}|)$ линейна (рис. 2). Нижняя граница соответствует длине волны $\lambda_1 = (2\pi k_1)^{-1} = 3 \text{ mm}$, а верхняя — волне $\lambda_2 = 0.3 \text{ mm}$. Изменения с деформацией спектра $Q(|\mathbf{k}|)$ и фрактальной размерности приведены на рис. 2 и 3. Резкий спад кумулятивного спектра для длин волн $\lambda < \lambda_2$ — следствие конечной чувствительности профилографа δ , т.е. амплитуда коротких волн $|C(\lambda < \lambda_2)| < \delta$.

Рост деформации для всех материалов сопровождался статистически значимым увеличением размерности рельефа от ~ 1.05 (Al), 1.18 (Cu), 1.25...1.30 (Fe) в начальном состоянии ($s = 0.02 \dots 0.06$) до ~ 1.65 (Al), ~ 1.32 (Cu), $\sim 1.60 \dots 1.62$ (Fe) в окрестности образования макрошейки.

Таким образом, измерения рельефа поверхности обнаруживают ранние стадии развития неустойчивости пластического течения. Переход от случайных неоднородностей с ростом их радиуса корреляции заканчивается появлением макроскопической шейки, когда радиус шейки сравним с половиной толщины образца [1]. Рельеф деформации, а следовательно, и мезовозмущения течения в широком интервале самоподобны с размерностью, увеличивающейся в процессе нагружения. Результаты свидетельствуют в пользу гипотезы многоуровневой деформации (например, [9]), когда неоднородный поворот масштабного уровня $(n - 1)$ генерирует дисторсию течения уровня n , которая в свою очередь определяет неоднородный поворот уровня $(n + 1)$ и т.д. [1–3].

Полученные данные свидетельствуют о возможности использования ренормгрупповых методов при описании самоорганизации мезовозмущений деформации [4,6]. Те-

Таблица 2. Параметры измерения рельефа

Образец	Шаг сетки l , μm	Площадь L^2 , mm^2	Общее число точек, N^2	Деформации φ_i	Размах высот, $h_{\text{max}} - h_{\text{min}}$, μm	
					$\varphi = 0$	φ_{max}
Fe #1	150	89.3	4096	0.06; 0.12; 0.20; 0.26; 0.32	80	105
Fe #2	100	41.0	4225	0.058; 0.071; 0.078; 0.095; 0.147; 0.175	35	67
Cu #3	150	92.2	4225	0.01; 0.03; 0.06; 0.10; 0.14; 0.22; 0.37	42	80
Al#4	75	92.2	16641	0.04; 0.08; 0.17; 0.21; 0.23; 0.27	22	78

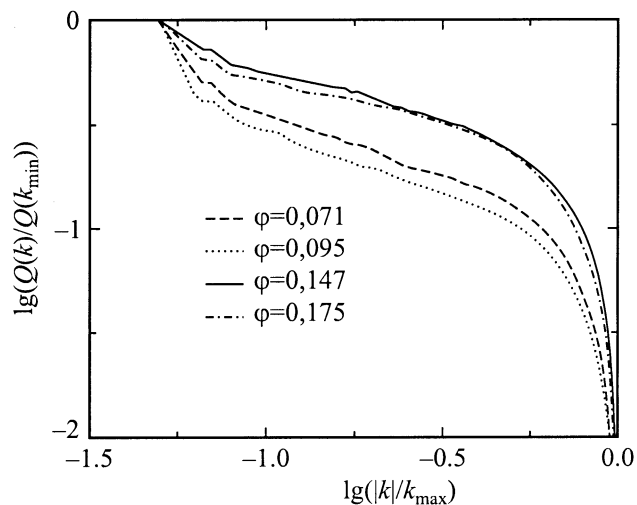


Рис. 2. Вид кумулятивного спектра для образца Fe#2 при разных степенях деформации.

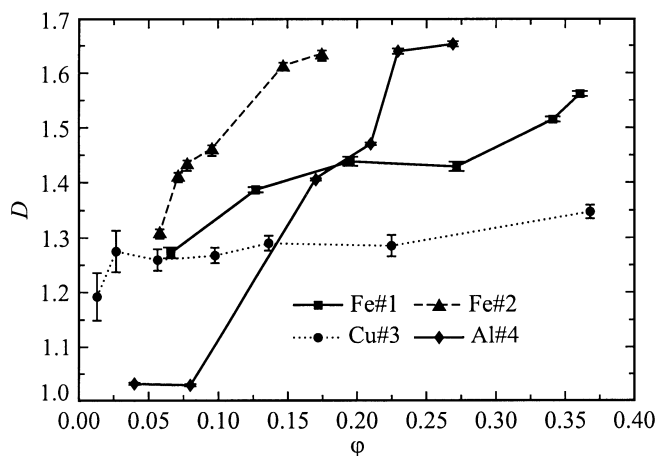


Рис. 3. Зависимость фрактальной размерности от истинной деформации.

кущий масштаб процесса деформации — интервал корреляций флуктуаций полей течения — параметризуется в процессе нагружения модулем упрочнения θ (при известной диаграмме $\sigma(s)$ — средней деформации s), поэтому может использоваться в виде универсальной переменной при построении системы уравнений, связывающей текущие динамические параметры системы, например, корреляционные функции мезовозмущений течения разного порядка, с процессом нагружения.

Список литературы

- [1] А.М. Авдеев. *Металлофизика* **12**, 1, 7 (1990).
- [2] В.Е. Панин, Е.Е. Дерюгин, Л.С. Деревягин, А.И. Лотков, Б.И. Суворов. *ФММ* **84**, 1, 35 (1997).
- [3] В.Е. Панин, П.В. Кузнецов, Е.Е. Дерюгин, С.В. Панин, Т.Ф. Епсуква. *ФММ* **84**, 2, 138 (1997).

- [4] Е.И. Кузько, А.В. Кудря, С.В. Стариков. *Завод. лаб.* **58**, 9, 63 (1992).
- [5] А.М. Авдеев. *Изв. АН СССР. Металлы* **1**, 64 (1991).
- [6] А.М. Авдеев, Ю.А. Крупин. *Механика композиционных материалов и конструкций* **4**, 134 (1999).
- [7] А.М. Авдеев, Е.И. Кузько, М.А. Штремель. *ФТТ* **36**, 10, 3158 (1994).
- [8] В.В. Mandelbrot, D.E. Passoja, A.J. Paullay. *Nature (London)* **308**, 721 (1984).
- [9] В.А. Лихачев, В.Г. Малинин. *Структурно-аналитическая теория прочности*. Наука, СПб (1993). 473 с.