

05;11

## О связи между макролокализацией пластического течения и дислокационной структурой

© Л.Б. Зуев, Т.М. Полетика, Г.Н. Нариманова

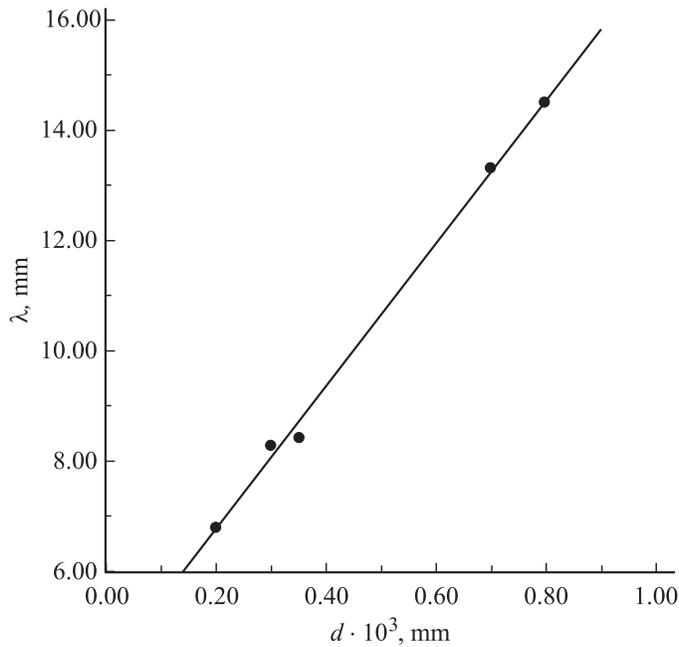
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск  
E-mail: levzuev@mail.tomsknet.ru

Поступило в Редакцию 15 января 2003 г.

Установлена количественная связь между пространственным периодом локализации пластической деформации (длиной волны локализованной деформации) и характеристиками дислокационной структуры циркониевого сплава. Показано, что длина волны локализованной деформации прямо пропорциональна среднему размеру элементов дислокационной субструктуры, возникающей в материале на разных стадиях пластического течения. Предложена количественная интерпретация установленного соотношения.

Проблема связи между макроскопической локализацией пластической деформации и дислокационными характеристиками деформируемой среды обсуждается достаточно давно [1–4]. Однако отсутствие прямых экспериментальных данных по этому поводу до сих пор препятствовало установлению формы и пониманию природы такого рода связи. В настоящей работе, проведенной на поликристаллических образцах с размером зерна  $\sim 3.5 \mu\text{m}$  из циркониевого сплава (1 wt.% Nb, 0.4 wt.% Fe, 1.2 wt.% Sn) [5], такая связь была проанализирована путем сопоставления длины волны локализованной деформации  $\lambda$ , определяемой аналогично [6] как расстояние между активными очагами пластической деформации на стадии параболического упрочнения, и среднего размера элементов дислокационной структуры  $\bar{d}$  при той же величине общей деформации.

Последняя характеристика для разных стадий деформации циркониевого сплава  $\bar{d}$  была получена электронно-микроскопическим анализом (метод тонких фольг), который показал, что для этого материала характерна следующая последовательность превращений дислокационных субструктур: хаотическое распределение дислокаций  $\rightarrow$  скопления дислокаций  $\rightarrow$  сетчатая субструктура  $\rightarrow$  ячеисто-сетчатая субструк-



Связь длины волны локализованной деформации  $\lambda$  и среднего размера дислокационной субструктуры  $\bar{d}$  для циркониевого сплава.

тура → полосовая субструктура → субструктура с непрерывными и дискретными разориентировками → фрагментированная структура [7]. При этом средний характерный размер элементов дислокационной субструктуры  $\bar{d}$  для ячеисто-сетчатой дислокационной субструктуры определялся как расстояние между сгущениями дислокаций, для полосовой субструктуры — как расстояние между субграницами, для фрагментированной — как размер фрагментов.

Оказалось, что между величинами  $\lambda$  и  $\bar{d}$  существует показанная на рисунке простая линейная (коэффициент корреляции  $\sim 0.9$ ) зависимость типа

$$\lambda = \lambda_0 + \alpha \cdot \bar{d}, \quad (1)$$

где безразмерный коэффициент пропорциональности  $\alpha \approx 1.3 \cdot 10^4$ , а константа  $\lambda_0 \approx 4.2 \text{ mm}$ .

Обсудим качественный смысл полученной зависимости. В работах [6,8] было показано, что локализация пластического течения является результатом самоорганизации элементарных актов пластической деформации в кристаллах и ее кинетика подчиняется так называемым реакционно-диффузионным уравнениям, описывающим изменения полей упругих напряжений и пластических деформаций. Входящий в эти уравнения диффузионно-подобный транспортный коэффициент  $D$  [6,8] определяет пространственную макроскопическую периодичность поля деформаций с помощью известного соотношения

$$\lambda^2 \approx D\Theta, \quad (2)$$

где  $\Theta$  — временной период процесса. Как было показано в [9], в диффузионном приближении коэффициент  $D$  для макроуровня задается соотношением, включающим пространственный масштаб нижележащего (мезоскопического) уровня  $\Lambda_{meso}$ ,

$$D = \Lambda_{meso} V_S = \frac{\Lambda_{meso}^2}{\tau}, \quad (3)$$

причем  $\tau$  — время релаксации дислокационных процессов, а  $V_S$  — скорость перераспределения упругих напряжений (скорость распространения звука). В этом случае, согласно [2]:

$$\lambda^2 \approx \Theta/\tau \cdot \Lambda_{meso}^2, \quad \text{или} \quad \lambda \approx \sqrt{\Theta/\tau} \cdot \Lambda_{meso}, \quad (4)$$

что при естественном условии  $\Lambda_{meso} \equiv \bar{d}$  соответствует экспериментальным данным.

Рассмотрим количественную сторону вопроса. Очевидно,  $\alpha \approx \sqrt{\Theta/\tau}$ , причем из экспериментальных данных [10]  $\Theta \approx 150$  s. Характерное время  $\tau$  можно грубо оценить в рамках теории термически активированных процессов пластической деформации [11] как

$$\tau \approx \omega_D^{-1} \cdot \exp \frac{U - \gamma\sigma}{k_B T}, \quad (5)$$

где энтальпия активации процесса элементарного сдвига в цирконии  $H = U - \gamma\sigma \approx 0.4$  eV [12], а  $\omega_D = 10^{13}$  s<sup>-1</sup> — дебаевская частота. При  $T = 300$  K, согласно (5),  $\tau \approx 9 \cdot 10^{-7}$  s, т.е.  $\alpha \approx \sqrt{\Theta/\tau} \approx 1.3 \cdot 10^4$ , что совпадает с наблюдаемым значением коэффициента пропорциональности в соотношении (1).

Полученные качественное согласование характера зависимости  $\lambda \sim \bar{d}$  и количественное совпадение экспериментально установленного и расчетного значений коэффициента  $\alpha$  указывают на взаимосвязь дислокационной структуры деформированного сплава и периодичности локализации деформации в нем. Это подтверждает высказанную ранее [9] идею о форме тесной количественной связи явлений, характерных для макро- и мезомасштабных уровней пластического течения, осуществляющуюся через диффузионно-подобные коэффициенты и задающиеся уравнением, аналогичным (3).

## Список литературы

- [1] *Estrin Yu.Z., Kubin L.P.* // Acta Met. 1986. V. 34. N 12. P. 2455–2464.
- [2] *Барахтин Б.К., Владимиров В.И., Иванов С.А.* и др. // ФММ. 1987. Т. 63. № 6. С. 1185–1191.
- [3] *Малыгин Г.А.* // ФТТ. 1989. Т. 31. № 1. С. 175–180.
- [4] *Ханнанов Ш.Х.* // ФММ. 1992. № 4. С. 14–23.
- [5] *Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г.* Циркониевые сплавы в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1994. 253 с.
- [6] *Zuev L.B.* // Ann. Phys. 2001. V. 10. N 11–12. P. 965–984.
- [7] *Полетика Т.М., Данилов В.И., Нариманова Г.Н.* и др. // ЖТФ. 2002. Т. 72. № 9. С. 57–62.
- [8] *Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С.* // Усп. физ. мет. 2002. Т. 3. С. 237–304.
- [9] *Зуев Л.Б.* // Металлофиз. и новейш. техн. 1996. Т. 18. № 5. С. 55–59.
- [10] *Данилов В.И., Заводчиков С.Ю., Баранникова С.А.* и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 1. С. 26–30.
- [11] *Лоули А., Микин Дж.* Микропластичность. М.: Металлургия, 1972. С. 62–76.
- [12] *Христенко И.Н., Папиров И.И., Тихинский Г.Ф.* и др. Природа пластической деформации циркония / Препринт ХФТИ № 76–51. Харьков, 1976. 29 с.