

05.1

Энтропия волн локализованной пластической деформации

© Л.Б. Зуев

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

Поступило в Редакцию 15 июля 2004 г.

Рассмотрено изменение энтропии в процессах генерации и распространения волн локализованной пластической деформации. Показано, что при образовании таких волн энтропия уменьшается, что может рассматриваться как основание для отнесения процессов локализации пластической деформации твердых тел к процессам самоорганизации.

В наших работах [1–3] ранее было установлено, что локализация пластической деформации является общим свойством всех деформируемых сред и характеризуется макроскопическим масштабом — длиной волны λ . Количественные параметры волновых процессов для линейных стадий деформационного упрочнения следующие: скорость распространения обратно пропорциональна коэффициенту деформационного упрочнения $\theta = d\sigma/d\varepsilon$, т.е. $V_{aw} \sim 1/\theta$, волны имеют квадратичный закон дисперсии $\omega(k) = \vartheta(k - k_0)^2 + \omega_0$, очевидно, качественно эквивалентный известному в нелинейной механике [4] соотношению $\omega = 1 + k^2$. Скорость движения очагов на стадии предразрушения, когда $\sigma = \varepsilon^n$, пропорциональна квадрату показателя параболичности n , $V_{aw} = V^*(n - q)^2$. Длина волны локализованной деформации зависит от размера зерна D как $\lambda = \frac{\lambda_0}{1 + C \cdot \exp(-aD)}$, а от размера образца L как $\lambda \sim \ln L$.

При этом основные количественные параметры наблюдаемых волновых процессов лежат в следующих пределах: длина волны $3 \leq \lambda \leq 20$ mm, скорость распространения $10^{-5} \leq V_{aw} \leq 10^{-4}$ m/s и частота $3 \cdot 10^{-5} \leq \omega \leq 2 \cdot 10^{-3}$ Hz.

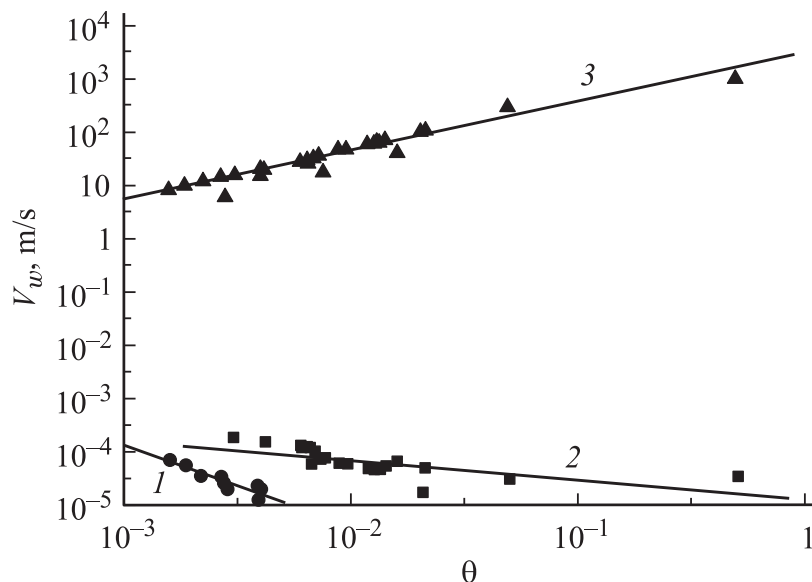
Волновые процессы при пластической деформации твердых тел известны давно и детально описаны в литературе [5,6]. Однако для них зависимость скорости распространения волн от коэффициента деформационного упрочнения типа имеет вид $V_{pw} \sim \theta^{1/2}$ [5], что кардинально отличается от зависимости для волн пластичности $V_{aw} \sim \theta^{-1}$. Принципиальный характер этого отличия позволяет считать, что в наших экспериментах обнаружен новый тип волновых процессов, связанных с пластической деформацией, — волны (точнее, автоволны [1–3]) локализации пластического течения. Существование подобных волн локализации пластической деформации было предсказано в [7], близкий подход развивается также авторами работ [8,9].

Из разных форм зависимости $V_w(\theta)$ для обсуждаемых типов волн вытекает еще одно отличие волновых процессов. Естественно предположить, что при пластическом течении $\dot{\epsilon} \sim V_w$. В то же время $\dot{\epsilon} = b\rho_m V_{dist}$ (ρ_m и V_{dist} — плотность и скорость подвижных дислокаций с вектором Бюргера b) и соответственно $\dot{\epsilon} \sim V_w$. В общем случае скорость движения дислокаций в области термически активированного процесса деформации определяется выражением [10] $V_{dist} \sim \exp(-G/k_B T)$, где термодинамический потенциал Гиббса $G = U - TS + A$, U — внутренняя энергия, S — энтропия процесса, A — механическая работа, а $k_B T$ имеет обычный смысл. В случае пластической деформации $A = -\gamma\sigma$, где γ — активационный объем. С учетом сказанного выше скорость деформации выражается как

$$\dot{\epsilon} \sim V_w \sim V_{dist} \sim \varepsilon_0 \exp\left(\frac{S}{k_B}\right) \exp\left(-\frac{U - \gamma\sigma}{k_B T}\right). \quad (1)$$

В случае, если $(U - \gamma\sigma)/k_B T \approx \text{const}$, очевидно, $\ln V_w \sim S$.

Скорость волн локализации деформации определялась на стадиях легкого скольжения монокристаллов и стадиях линейного деформационного упрочнения моно- и поликристаллов различных металлов и сплавов [1–3] по наклону графика зависимости положений очагов локализации деформации по длине образца от времени. Детали этой методики описаны в [3]. Скорость волн пластичности рассчитывалась



Скорость распространения волн локализованной пластической деформации на стадиях легкого скольжения (1), линейного упрочнения (2) и волн пластичности (3) как функция коэффициента деформационного упрочнения.

как [5] $V_{pw} \approx \sqrt{\theta/\rho_0}$, где ρ_0 — плотность материала, с использованием рассчитанных по кривым нагружения $\sigma(\varepsilon)$ значений коэффициента деформационного упрочнения θ и справочных данных о плотности исследуемых материалов.

Зависимости $V_w(\theta)$ для обоих типов волн, представленные на рисунке в координатах $\ln V_w - \ln \theta$, очевидно, эквивалентны зависимостям $S(\theta)$ для этих волновых процессов. В случае волн пластичности (прямая 3) энтропия возрастает ($\Delta S > 0$), что характерно для всех процессов с диссипацией энергии. Напротив, уменьшение энтропии ($\Delta S < 0$) для волн локализованной пластической деформации (прямая 1 для стадии легкого скольжения и 2 для линейного упрочнения) может считаться [11] типичным признаком процессов самоорганизации в деформируемой среде.

Согласно [12], энтропия системы определяется степенью ее упорядоченности, мерой которой является параметр порядка. Применительно к волнам локализации пластической деформации $S \sim \ln \theta$. Таким образом, есть основание полагать, что коэффициент деформационного упрочнения играет в процессах пластического течения роль своего рода параметра порядка.

Список литературы

- [1] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Горбатенко В.В. // ЖТФ. 1995. Т. 65. № 5. С. 91–103.
- [2] Zuev L.B. // Ann. Phys. 2001. V. 10. N 11–12. P. 965–984.
- [3] Зуев Л.Б., Данилов В.И., Семухин Б.С. // Успехи физики металлов. 2002. Т. 3. № 3. С. 237–304.
- [4] Косевич А.М., Ковалев А.С. Введение в нелинейную физическую механику. Киев: Наук. думка, 1989. 304 с.
- [5] Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах. М.: ИИЛ, 1955.
- [6] Шестопалов Л.М. Деформирование металлов и волны пластичности в них. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1958. 268 с.
- [7] Aifantis E.C. // Int. J. Non-Linear Mech. 1996. V. 31. N 6. P. 797–809.
- [8] Naimark O., Davydova M. // J. de Physique IV. 1996. V. 6. N 10. P. 259–267.
- [9] Наймарк О.Б. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 13. С. 81–87.
- [10] Инденбом В.Л., Орлов А.Н., Эстрин Ю.З. Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. Киев: Наук. думка, 1978. С. 93–112.
- [11] Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: Мир, 1991. 240 с.
- [12] Уайт Р., Джебелл Т. Дальний порядок в твердых телах. М.: Мир, 1982. 447 с.