

01;05.1

Синергетическая модель сверхпластической деформации материалов

© А.К. Емалетдинов

Уфимский технологический институт сервиса

Поступило в Редакцию 30 октября 1997 г.

Изучена синергетическая модель сверхпластической деформации ультрамелкозернистых материалов при высоких температурах как проявления коллективных мод движения и самоорганизации в системе стимулированного зернограничного проскальзывания. В развитии зернограничного проскальзывания возникает волновой фронт, который разделяет два стационарных состояния системы и приводит к появлению экспериментально наблюдаемой "бегающей шейки" на поверхности образца. В рамках синергетической модели получено объяснение масштабного эффекта проявления сверхпластичности.

Сверхпластичность неорганических материалов имеет большое практическое значение и проявляется при создании в них стабильной ультрамелкозернистой структуры и деформации в определенном температурно-скоростном интервале (обычно размер зерна $d_s \simeq 10-15 \mu\text{m}$, $T_s \simeq 0.5-0.6T_m$, $\dot{\epsilon}^p = 10^{-3}-10^{-1} \text{s}^{-1}$ [1-3]. К настоящему времени твердо установлено, что при СПД одновременно действуют три микромеханизма деформации: зернограничное проскальзывание (ЗПГ), внутризеренное дислокационное скольжение (ВДС) и диффузионная ползучесть (ДП) [1-4]. Зернограничное проскальзывание бывает двух видов [5]: собственное со скоростью V_0 и стимулированное решеточным скольжением со скоростью V_s : $V_s \gg V_0$. Как установлено в работах [6], при СП возникают коллективные моды в движении ансамблей зерен. Целью данной работы является исследование синергетической модели СПД как проявления зернограничных, автоколебательных, диссипативных структур.

Производство энтропии при СПД связано со скоростью необратимых деформаций — диссипативных процессов и их вкладом в полную деформацию. В оптимальном интервале скоростей деформирования (II область) вклады ЗПГ γ_g , ВДС γ_D и ДП γ_p соответственно равны [1,4]:

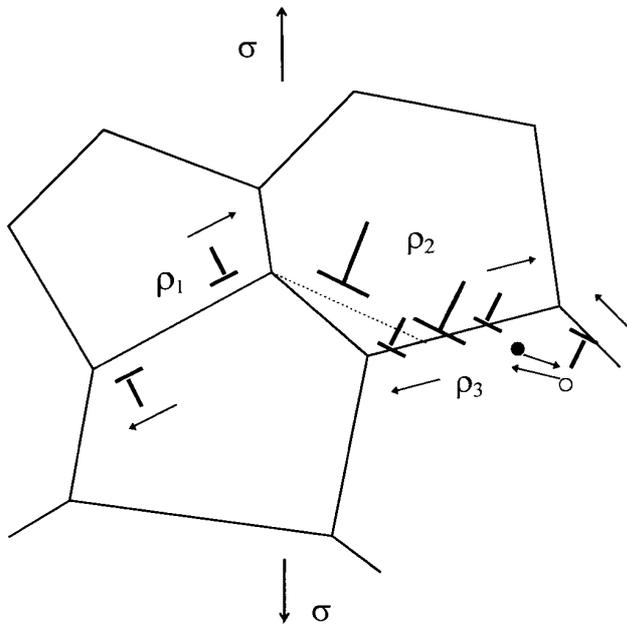


Рис. 1. Схема развития микромеханизмов, обеспечивающих сверхпластическую деформацию: ρ_1 — плотность зернограничных дефектов, ρ_2 — плотность решеточных дислокаций, ρ_3 — плотность внесенных зернограничных дефектов.

$\gamma_g \gtrsim 0.8$, $\gamma_D \lesssim 0.2$, $\gamma_p \rightarrow 0$. С позиций неравновесной термодинамики и синергетики [7] возникновение температурно-скоростного интервала проявления СП со сменой диссипативного процесса, контролирующего деформацию: I область — основные процессы одиночное дислокационное скольжение и ползучесть, II область — зернограничные процессы, III область — множественное дислокационное скольжение.

На основании предложенной в [4] физической модели СПД рассмотрим поликристаллическое тело, состоящее из равноосных зерен со средним размером d и деформируемое с оптимальной скоростью $\dot{\epsilon}^P$ (II область). Деформация обеспечивается зернограничными дефектами плотностью ρ_1 и решеточными дислокациями плотностью ρ_2 . Под действием дислокационного скольжения возникает стимулированное ЗПГ объемной плотностью ρ_3 (рис. 1). В режиме СПД возникают кол-

лективные моды в движении ансамблей зерен, когда зернограничное проскальзывание становится кооперированным процессом, включающим ЗПГ многих границ. Параметрами порядка, подчиняющими поведение системы зерен при СПД, будут коллективные, длинноволновые моды ЗПГ. Управляющими параметрами будут скорость деформирования $\dot{\epsilon}^p$ и температура T . Диаграмма взаимодействия дефектов имеет вид: $\rho_1 \xrightarrow{\tau_g} \rho_2 \xrightleftharpoons[\tau_0]{\tau_D} \rho_3$, где τ_g — время зарождения решеточной дислокации в границе, τ_D — время диссоциации решеточной дислокации на зернограничные дефекты в границе [4]. Запишем основные уравнения кинетики дислокаций в приближении времени релаксации в виде

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_1 &= A - \rho_1/\tau_g + \rho_2/\tau_D - k\rho_2\rho_3 + D_1\nabla^2\rho_1; \\ \dot{\rho}_2 &= -\rho_2/\tau_D + \rho_1/\tau_g; \\ \dot{\rho}_3 &= (\rho_* - \rho_3)/\tau_0 + k\rho_2\rho_3 - c\rho^2 + D_2\nabla^2\rho_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где τ_0 — время аннигиляции ЗГД в стоках (стыках границ зерен и т. п.), A — скорость зарождения дислокаций; k, c — нормировочные коэффициенты. Здесь учтена существенная пространственная неоднородность распределения дефектов и описываемая введением ”диффузионного члена”. В пределах одного зерна $\rho_1, \rho_3 = \text{const}$, градиенты возникают при рассмотрении соседних зерен. При эстафетном процессе передачи активной деформации от одних границ к соседним (рис. 1) возникают градиенты плотностей ρ_1 и ρ_3 , а коэффициенты ”диффузии” плотностей потоков дефектов будут определяться выражениями $D_1 \lesssim d^2/\tau_D$, $D_2 \lesssim d^2/\tau_g$. Начальные условия $(\rho_{10}, 0, 0)$.

Анализ системы проведем методами теории бифуркаций и отображений Пуанкаре [8]. Поиск стационарных точек системы и их анализ с помощью линеаризованной системы уравнений (1) показал, что существуют следующие стационарные состояния: две точки $(A\tau_0, A\tau_0\tau_D/\tau_g, 0)$, $(\rho_{s1}, \rho_{s2}, \rho_{s3})$ типа седла при $A > \tau_g/K\tau_D\tau_0^2$ и точка $(\rho_{F1}, \rho_{F2}, \rho_{F3})$ типа неустойчивый фокус, когда $\rho_* > \rho_{c*}$. Анализ решений уравнений кинетики (1) — пространственно-временных диссипативных структур — можно искать в виде разложений в ряд Фурье по плоским волнам $\rho \sim \sum_k \exp(pt + ikx)$. Характеристическое уравнение системы (1) имеет два вида решений: 1) однородное в пространстве; 2) периодическое, автоколебательное решение (режим бегающей ”шейки” [1–3]). Зарождение периодических решений происходит по типу

бифуркации Хопфа. Таким образом, существует критическая плотность границ активированного ЗГП, когда в системе возникает автоколебательный режим

$$\rho_{c*} = (k\tau_D A^2 \tau_0^2 / \tau_g^2)(1+z)/(3+z); \quad z = 2\tau_g / Ak\tau_0^2 \tau_D.$$

Для анализа вида волнового режима воспользуемся методом многомасштабных разложений [7] по малому параметру $D_1/D_2 \ll 1$. Переходя к медленным переменным в системе (1), получим в первом приближении уравнение ($t/\tau_0 = \tau$, $\xi = x/(D_2\tau_0)^{1/2}$, $\rho = \rho_3/\rho_*$)

$$\dot{\rho} = 1 + A\rho/(b_0 + d_0\rho_*\rho) - \alpha_0\rho - c\rho_*^2\rho^2 + \nabla^2\rho. \quad (2)$$

Уравнение (2) для медленной амплитуды кооперированного ЗГП имеет три установленные стационарные точки. Физически это означает, что система стабильна при минимальной и максимальной плотности зернограничных дефектов и неустойчива при ρ_{c2} . То есть в системе возникает фронт—"шейка", разделяющая два стационарных состояния системы: ρ_{c1} , ρ_{c3} . Решая уравнение (2) с автомодельной переменной $\xi = x - Vt$, где V — скорость фронта, и краевыми условиями ρ_{c2} ,

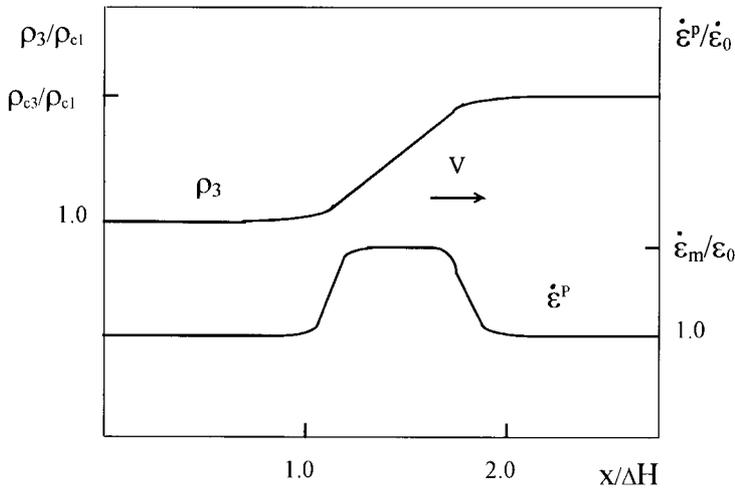


Рис. 2. График зависимости плотности зернограничных дефектов ρ_3/ρ_{c1} и скорости деформирования $\dot{\epsilon}^p/\dot{\epsilon}_0$ от расстояния $x/\Delta H$ в "бегающей шейке".

$\xi \rightarrow \pm\infty$, $\rho'_\xi = 0$, $\rho = \rho_{c1}$, получим неявное выражение для распределения дефектов ρ в виде $\xi = \int d\rho/F(\rho, \alpha_0, d_0, \rho_*, c, k)$, здесь $F(z)$ — заданная функция. В первом приближении

$$\rho(\xi) \lesssim \rho_{c1} + (\rho_{c3} - \rho_{c1}) / [1 + \exp(2\alpha_0(\rho_{c3} - \rho_{c1}))\xi/V]. \quad (3)$$

Ширина фронта определяется в первом приближении соотношением $\Delta H \simeq \tau_g D_2(\rho_{c3} - \rho_{c1}) / \rho_*(D_1\tau_0)^{1/2}$. Оценка V и ΔH при СПД имеет порядок $V \simeq 10^{-1}$ cm/s, $\Delta H \simeq 10^{-1}$ cm, что близко к экспериментальным данным [1–3]. Численное решение системы уравнений (1) приведено на рис. 2.

Возникновение диссипативных структур возможно только, когда размеры неравновесной системы (образца) L превысят некоторые критические значения [7]. При сверхпластичности минимальный размер системы L_c определяется условием появления коллективных мод и самоорганизации в системе стимулированного ЗГП, оно имеет вид

$$L_c = (F_1(d_0, f'(\rho_{c1}), g'(\rho_{c3}), V, \tau_g))^{1/2} \gtrsim (\Delta H \cdot V \cdot \tau_g)^{1/2},$$

где $f(z)$, $g(z)$ — правые части системы уравнений (1), $F_1(z)$ — заданная функция. Оценка L_c дает значение порядка 10^2 – 10^3 μm . В работе [6] действительно наблюдался выход из режима СПД, когда размер образца становился порядка 60 μm .

Список литературы

- [1] Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975. 280 с.
- [2] Грабский М.В. Структурная сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975. 280 с.
- [3] Тихонов А.С. Эффект сверхпластичности металлов и сплавов. М.: Наука, 1978. 141 с.
- [4] Кайбышев О.А., Валиев Р.З., Емалетдинов А.К. // ДАН СССР. 1984. Т. 279. № 2. С. 356–359.
- [5] Кайбышев О.А., Астанин В.В., Валиев Р.З. // ДАН СССР. 1979. Т. 245. С. 1357.
- [6] Астанин В.В. // ФММ. 1995. Т. 79. № 3. С. 166–179.
- [7] Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979. 512 с.
- [8] Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г. Качественная теория динамических систем второго порядка. М.: Наука, 1966. 326 с.