

05

Изменения разориентировок границ зерен при эмиссии пар дислокаций

© М.Ю. Гуткин, И.А. Овидько, Н.В. Скиба

Институт проблем машиноведения РАН, С.-Петербург
E-mail: ovidko@def.ipme.ru

Поступило в Редакцию 11 октября 2001 г.

Предлагается новый геометрический микромеханизм изменения разориентировок границ зерен при (сверх)пластической деформации, а именно движение зернограницных дисклинаций, сопровождающееся эмиссией пар решеточных дислокаций. В рамках предлагаемых представлений проведен расчет энергетических характеристик процесса движения зернограницных дисклинаций.

Поведение зернограницных дисклинаций существенным образом влияет на свойства границ зерен в твердых телах (например, [1–7]). В частности, экспериментально наблюдаемые изменения разориентировок границ зерен при пластической деформации поликристаллов с мелким зерном и нанокристаллических материалов [8,9] обычно связываются с движением зернограницных дисклинаций, индуцированным поглощением решеточных дислокаций границами [2–4,7]. Однако в общем случае движение дисклинаций в границах зерен происходит не только при поглощении решеточных дислокаций границами, но и при эмиссии таких дислокаций границами. В настоящей работе предлагается и теоретически исследуется новый геометрический микромеханизм изменений разориентировок границ зерен при (сверх)пластической деформации, а именно движение зернограницных дисклинаций, обусловленное эмиссией пар решеточных дислокаций границами в прилегающие зерна.

Согласно представлениям теории дефектной структуры границ зерен [1–7], зернограницные дисклинации являются линейными дефектами, разделяющими участки границы с разными значениями разориентировки. При этом изменения разориентировки границ зерен во времени эффективно описываются как движение зернограницных дисклинаций [2,3].

В рамках предлагаемой в настоящей работе модели элементарный акт перемещения клиновой зернограницной дисклинации мощностью

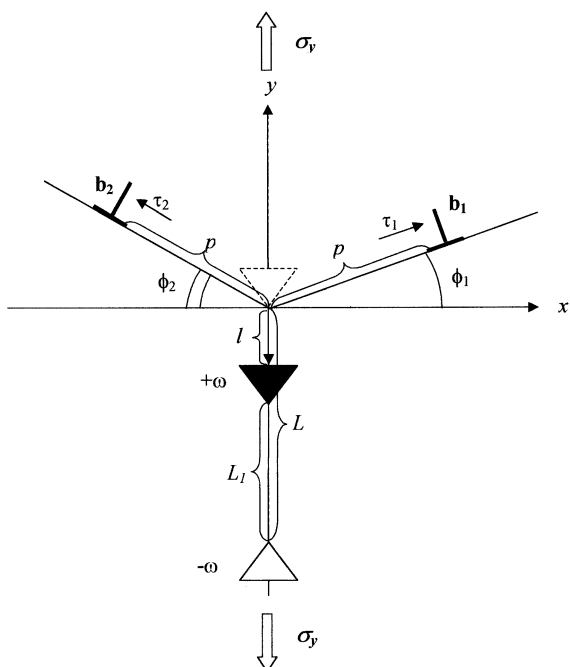


Рис. 1. Эмиссия пары решеточных дислокаций при перемещении зернограничной дисклинации.

ω на расстояние l сопровождается испусканием пары решеточных дислокаций с векторами Бюргерса \mathbf{b}_1 и \mathbf{b}_2 в прилегающие зерна (рис. 1), где $\mathbf{b}_1 + \mathbf{b}_2 = \mathbf{b}$ и $b = 2l \operatorname{tg}(\omega/2)$. Последовательное испускание таких дислокационных пар обеспечивает изменение разориентировки вдоль сколь угодно больших участков границ зерен и, в частности, может обеспечить вращение зерна как целого.

Рассмотрим энергетические характеристики предлагаемого микро-механизма движения зернограничных дисклинаций. При этом в качестве примера возьмем перемещение зернограничной дисклинации мощностью ω в суммарном поле экранирующих напряжений другой (неподвижной) дисклинации мощностью $-\omega$ и напряжений, создаваемых внешней механической нагрузкой (рис. 1). Результаты предлагаемого

теоретического анализа конкретной конфигурации дефектов (рис. 1) могут быть достаточно просто обобщены и на случаи с другими конфигурациями дисклинаций и дислокаций.

В соответствии с нашими расчетами (их изложение выходит за рамки настоящего краткого сообщения) разность энергий ΔW рассматриваемой конфигурации дефектов (рис. 1) после и до перемещения зернограничной дисклинации определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta W = & \frac{Db_1^2}{2} \left\{ \left(1 + \frac{b_2^2}{b_1^2} \right) \left(\ln \frac{R}{r_0} + 1 \right) - \frac{b^2}{b_1^2} \right. \\ & \left. + \frac{\omega^2 L_1^2}{b_1^2} \left[\ln \frac{R}{L_1} + \frac{1}{2} - \frac{L^2}{L_1^2} \left(\ln \frac{R}{L} + \frac{1}{2} \right) \right] \right\} \\ & - \frac{1}{2} \sigma_y p (b_1 \sin 2\phi_1 + b_2 \sin \phi_2) \\ & + \frac{1}{2} D\omega b_1 \cos \phi_1 \left(L \ln \frac{R^2 + L^2 + 2RL \sin \phi_1}{p^2 + L^2 + 2pL \sin \phi_1} - l \ln \frac{R^2 + l^2 + 2Rl \sin \phi_1}{p^2 + l^2 + 2pl \sin \phi_1} \right) \\ & + \frac{1}{2} D\omega b_2 \cos \phi_2 \left(L \ln \frac{R^2 + L^2 + 2RL \sin \phi_2}{p^2 + L^2 + 2pL \sin \phi_2} - l \ln \frac{R^2 + l^2 + 2Rl \sin \phi_2}{p^2 + l^2 + 2pl \sin \phi_2} \right) \\ & + \frac{1}{2} Db_1 b_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) \ln \frac{p^2 + R^2 + 2pR \cos(\phi_1 + \phi_2)}{2ep^2[1 + \cos(\phi_1 + \phi_2)]} \\ & + \frac{1}{2} Db_1 b_2 \frac{R^2 + p^2 + 2Rp[\cos(\phi_1 + \phi_2) - \sin^2(\phi_1 + \phi_2)]}{R^2 + p^2 + 2Rp \cos(\phi_1 + \phi_2)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $D = G/[2\pi(1 - \nu)]$, G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона, L — расстояние между дисклинациями (плечо диполя), $L_1 = L - l$, r_0 — радиус ядра дислокации, σ_y — действующее нормальное внешнее напряжение, ϕ_1 и ϕ_2 — углы между нормалью к плоскости границы и плоскостями скольжения соответственно первой и второй дислокации, R — радиус экранирования полей напряжений дефектов, p — перемещение каждой из дислокаций после их испускания (рис. 1).

Анализ формулы (1) показывает, что существуют достаточно широкие области значений параметров дефектной структуры (рис. 1),

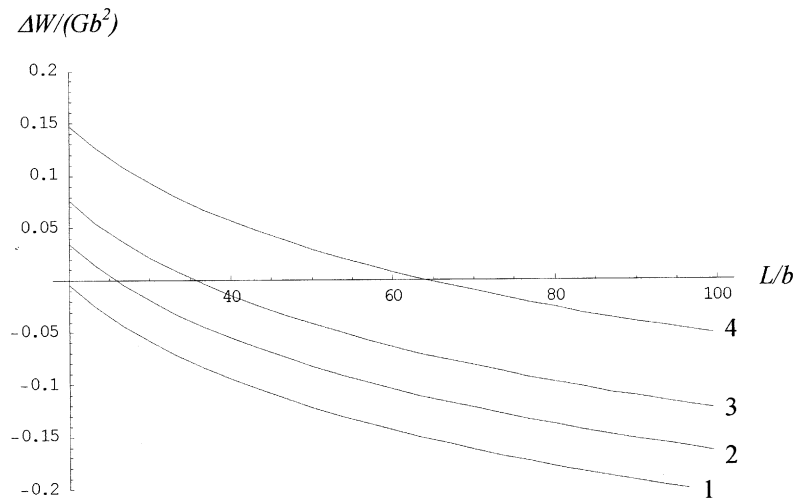


Рис. 2. Зависимость ΔW от L при следующих значениях углов $\phi_1 = 2^\circ$ (1), 20° (2), 30° (3), 45° (4), и $\phi_2 = 2^\circ$ (1), 30° (2), 40° (3), 45° (4).

при которых $\Delta W < 0$, т.е. исследуемый процесс перемещения зернограничной дисклинации (рис. 1) является энергетически выгодным. В качестве иллюстрации данного положения на рис. 2 приведена зависимость ΔW (в единицах Gb^2) от плеча дисклинационного диполя L при различных значениях углов ϕ_1 и ϕ_2 , под которыми происходит испускание дислокаций для следующих характеристических параметров исследуемой конфигурации дефектов: $R = 10^5 b$, $\omega = 0.1$, $p = 1b$, $\sigma_y = 10^{-3} G$. Данный график свидетельствует о том, что перемещение зернограничной дисклинации (рис. 1) становится энергетически выгодным, начиная с определенного значения плеча дисклинационного диполя L , которое зависит от углов испускания дислокаций ϕ_1 и ϕ_2 . Как видно из рис. 2, при углах $\phi_1 = \phi_2 = 2^\circ$ процесс становится выгодным с $L = 20b$, а при углах $\phi_1 = \phi_2 = 45^\circ$ — со значения $L = 65b$. Таким образом, чем меньше значение углов ϕ_1 и ϕ_2 , тем при меньшей величине плеча дисклинационного диполя L перемещение зернограничной дисклинации становится энергетически выгодным.

Таким образом, перемещение зернограницных дисклинаций, сопровождающееся эмиссией пар решеточных дисклинаций (рис. 1), представляет собой эффективный геометрический микромеханизм изменения разориентировок границ зерен при пластической деформации в поликристаллах с мелким зерном и нанокристаллических материалах. Представления об изменениях разориентировок границ зерен, связанных с эмиссией пар решеточных дислокаций, служат естественным объяснением экспериментальных данных [8,9] о вращении зерен при сверхпластической деформации. Вместе с тем требуются дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования для идентификации вклада обсуждаемого геометрического микромеханизма изменения разориентировок границ зерен в реальных пластически деформируемых материалах.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 01-02-16853), программы ИНТАС (грант 99-01216) и Фонда Фольксвагена (Volkswagen Foundation project 05019225), а также Отдела морских исследований США (Office of the US Naval Research, grant N00014-01-1-1020).

Список литературы

- [1] Рыбин В.В., Вергазов А.Н., Лихачев В.А. // ФММ 1974. V. 37. P. 620.
- [2] Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986.
- [3] Владимиров В.И., Романов А.Е. Дисклинация в кристаллах. Л.: Наука, 1986.
- [4] Nazarov A.A., Romanov A.E., Valiev R.Z. // Acta Metall. Mater. 1993. V. 41. P. 1033.
- [5] Gutkin M.Yu., Ovid'ko I.A. // Philos. Mag. 1994. A 74. P. 561.
- [6] Рыбин В.В., Зисман А.А. // Пробл. прочности. 1985. Т. 3. С. 70.
- [7] Гуткин М.Ю., Овидько И.А. Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурных и некристаллических материалах. СПб.: Янус, 2001.
- [8] Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. М.: Металлургия, 1987.
- [9] Zelin M.G., Mukherjee A.K. // Mater. Sci. Eng. 1995. A 208. P. 210.