

УДК 539.37

ДИНАМИКА ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ ПЕТЕЛЬ

© Л.Е. Попов, С.И. Пуспешева, С.Н. Колупаева

Россия, Томск, Томский государственный архитектурно-строительный университет

Popov L.E., Puspeshcheva S.I., Kolupaeva S.N. The dynamics of prismatic loops in the surface layers of ordered alloys. The movement of dislocation prismatic loop which is formed at some stress concentrator near a crystal surface is considered. The prismatic loop gains a high kinetic energy in the field of the stress concentrator. It makes possible for this loop to penetrate into the crystal volume for a great distance.

В процессе пластической деформации генерация дислокаций может происходить в результате локальной потери сдвиговой устойчивости кристаллической решетки вблизи концентраторов напряжения [1 - 6]. Источником повышенного локального напряжения может являться микрошероховатость пуансона, вершина конуса или пирамиды индентора, частица высокопрочной фазы, особенность конфигурации межкристаллитной или межфазной границы и т. д. В силу закона сохранения вектора Бюргерса дислокации возникают в форме замкнутых призматических петель.

Дислокационная петля, сформировавшаяся у некоторого концентратора напряжений у поверхности кристалла, ускоряется в окрестности концентратора при напряжениях, достигающих иногда величин, близких к теоретическому пределу прочности кристалла [3, 7]. Дислокации приобретают в поле концентратора высокую кинетическую энергию, которая позволяет им проникать на значительное расстояние в объем кристалла [7, 8]. При пробеге от поверхности вглубь кристалла дислокация совершает работу против сил, обусловленных решеточным трением, упругими полями атомов примесей, дислокациями некомпланарных систем скольжения, рассеянием фононов и электронов проводимости. В сплавах с дальним атомным порядком и интерметаллидах дислокационная петля создает при своем движении антифазную границу. Вследствие этого дислокация испытывает силы поверхностного натяжения со стороны поверхности скольжения.

Если периметр призматической дислокационной петли, образовавшейся у концентратора, равен P , то уравнение динамики для дислокационной петли может быть записано в виде

$$P \cdot \frac{dE_k}{dt} = (-\tau_R \cdot b - \zeta - B \cdot v) \cdot P, \quad (1)$$

где E_k - кинетическая энергия единицы длины дислокации, ζ - средняя энергия антифазной границы, возникающей на поверхности скольжения, $\tau_R = \tau_f + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2}$ (τ_f - напряжение трения, G - модуль сдвига, b - модуль вектора Бюргерса, ρ - плотность дислокаций, α - параметр интенсивности междислокационных взаимодействий), B - коэффициент динамического торможения (вязкого трения, обуслов-

ленного рассеянием фононов и электронов при движении дислокации), l - пробег дислокации, v - скорость дислокации. Из (1) следует:

$$\frac{dE_k}{dl} = -\tau_R \cdot b - \zeta - B \cdot v. \quad (2)$$

Для полной энергии движущейся дислокации воспользуемся формулой $E = E_0 \cdot (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$. Имеем

$$v = c \cdot \sqrt{1 - (1 + E_k/E_0)^{-2}}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует:

$$\frac{dE_k}{dl} = -\tau_R \cdot b - \zeta - B \cdot c \cdot \sqrt{1 - \left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^{-2}}. \quad (4)$$

Воспользовавшись соотношениями

$$\frac{dE_k}{dt} = \frac{dE_k}{dl} \cdot \frac{dl}{dt}, \quad \frac{dl}{dt} = v, \quad \text{получим систему уравнений}$$

$$\begin{cases} \frac{dE_k}{dt} = \left(-\tau_R \cdot b - \zeta - B \cdot c \cdot \sqrt{1 - \left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^{-2}} \right) \cdot \left(c \cdot \sqrt{1 - \left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^{-2}} \right), \\ \frac{dl}{dt} = c \cdot \sqrt{1 - \left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^{-2}}. \end{cases} \quad (5)$$

Кинетическая энергия дислокации, образованной в поле высоких напряжений у концентратора, расходуется на совершение работы по преодолению сил поверхностного натяжения антифазной границы и сил трения. После некоторого пробега дислокационной петли ее кинетическая энергия уменьшается до нуля, дислокация останавливается, а затем, если $\zeta > \tau_R \cdot b$, начинается обратное движение к поверхности. При этом силы трения меняют знак, и система уравнений движения призматической петли (5) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{dE_k}{dt} = \left(-\tau_R \cdot b - \zeta - B \cdot c \cdot \sqrt{1 - \left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^{-2}} \right) \cdot \left(c \cdot \sqrt{1 - \left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^{-2}} \right), \\ \frac{dl}{dt} = -c \cdot \sqrt{1 - \left(1 + \frac{E_k}{E_0}\right)^{-2}}. \end{cases} \quad (6)$$

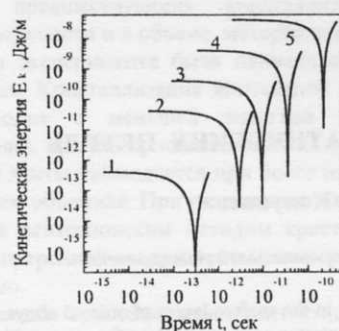


Рис. 1. Зависимость кинетической энергии дислокации от времени при различных значениях начальной кинетической энергии (Дж/м): 1 – $10^{-4} E_0$, 2 – $10^{-2} E_0$, 3 – $10^{-1} E_0$, 4 – E_0 , 5 – $10 E_0$.

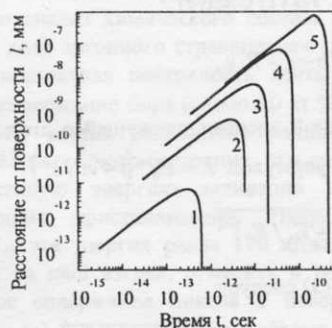


Рис. 2. Зависимость расстояния, пробегаемого дислокацией от поверхности от времени при различных значениях начальной кинетической энергии (Дж/м): 1 – $10^{-4} E_0$, 2 – $10^{-2} E_0$, 3 – $10^{-1} E_0$, 4 – E_0 , 5 – $10 E_0$.

Результаты расчетов, с использованием систем уравнений (5) и (6), приведены на рис. 1-4. Расчеты проведены для значений параметров, соответствующих сплавам на основе никеля: $G = 8 \cdot 10^{10}$ Па, $d = 8,8 \cdot 10^3$ кг/м, $b = 2,5 \cdot 10^{-10}$ м, $\rho = 10^{12}$ м⁻², $B = 10^{-6}$ Па·с, $\tau_f = 0,1 \cdot 10^7$ Па, $\zeta = 60 \cdot 10^{-3}$ Дж/м².

Дислокация, получив начальную энергию $E_k^{(0)}$, движется вглубь кристалла. Под действием поверхностных сил и сил трения ее кинетическая энергия уменьшается до нуля и дислокация останавливается. Затем под действием силы поверхностного натяжения (энергии антифазной границы) дислокация начинает двигаться к поверхности кристалла, при этом кинетическая энергия дислокационной петли увеличивается (рис. 1, 2). Чем меньше энергия антифазной границы, тем глубже дислокация проникает в кристалл (рис. 4). При увеличении энергии антифазной границы скорость движения дислокации уменьшается, действие сил трения становится значительнее (рис. 3).

Возникновение на поверхности кристалла призматических петель является одним из микромеханизмов изменения рельефа. При возвращении призматических петель на поверхность кристалла исходный рельеф частично восстанавливается. Такое восстановление рельефа после снятия деформирующего воздействия

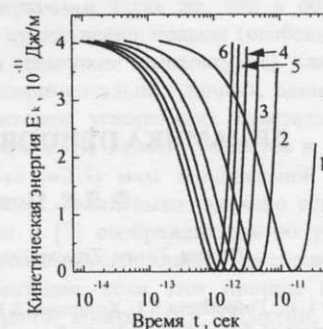


Рис. 3. Зависимость кинетической энергии дислокации от времени при различных значениях энергии антифазной границы (Дж/м²): 1 – 10^{-2} , 2 – $4 \cdot 10^{-2}$, 3 – $8 \cdot 10^{-2}$, 4 – $12 \cdot 10^{-2}$, 5 – $16 \cdot 10^{-2}$.

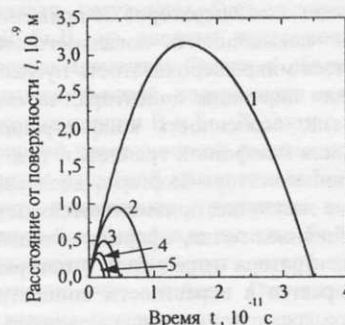


Рис. 4. Зависимость расстояния, пробегаемого дислокацией от поверхности от времени при различных значениях энергии антифазной границы (Дж/м²): 1 – 10^{-2} , 2 – $4 \cdot 10^{-2}$, 3 – $8 \cdot 10^{-2}$, 4 – $12 \cdot 10^{-2}$, 5 – $16 \cdot 10^{-2}$.

является, вероятно, одной из причин высокой износостойкости интерметаллидов и упорядоченных сплавов, а также материалов на их основе [9, 10].

ЛИТЕРАТУРА

1. Ashby M.F. The deformation of plastically non-homogeneous materials // Phil. Mag. 1970. V. 21. № 170. P. 399-424.
2. Ashby M.F. Work hardening of dispersion hardened crystals // Phil. Mag. 1966. V. 14. № 132. P. 1157-1178.
3. Боярская Ю.С., Грабо Д.З., Кац М.С. Физика процессов микроиндентирования. Кишинев, 1986. 294 с.
4. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Елсукова Т.Ф., Иванчин А.Г. Структурные уровни деформации твердых тел // Изв. вузов. Физика. 1982. № 6. С. 5-27.
5. Панин В.Е., Лихачев В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни твердых тел. Новосибирск: Наука, 1985. 229 с.
6. Ковалевская Т.А., Виноградова И.В., Попов Л.Е. Математическое моделирование пластической деформации гетерофазных сплавов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1992. 168 с.
7. Колупаева С.Н., Старенченко В.А., Попов Л.Е. Неустойчивости пластической деформации кристаллов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. 301 с.
8. Эффект дальнего действия в металлах при ионной имплантации / Ю.П. Шаркеев, С.Н. Колупаева, Н.В. Гирсова и др. // Металлы. 1998. № 1. С. 109-115.
9. Гринберг Б.А., Сюткина В.И. Новые методы упорядоченных сплавов. М.: Металлургия, 1985. 174 с.
10. Русин Н.М. Закономерности спекания и свойства алюминиевых сплавов с добавками переходных металлов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1996. 22 с.