

рошнин, Л. С. Ляхович. – М.: Metallurgiya, 1978. – С. 148–155.

4. Шариф, А. Исследование закономерностей формирования и свойств однофазных боридных слоев: автореф. ... дис. канд. техн. наук / А. Шариф. – Минск, 1980. – 18 с.

5. Андриюшечкин, В. И. Свойства и разрушения борированных сталей при кручении / В. И. Андриюшечкин, Л. К. Гушина // Физико-химическая механика материалов. – 1983. – № 6. – С. 108–109.

6. Фихтл, В. Борирование и его практическое применение / В. Фихтл // РЖМ. – 1980. – Т. 17, № 1. – С. 33–43, реф. 10484.

7. Fuchs, H. Thermische Behandlungen durch Borieren. Beispiele der industriellen Anwendungen // Deutsche Maschinenwelt. – 1977. – Vol. 56, № 11. – P. 5–8.

8. Получение и исследование свойств однофазных диффузионных покрытий / Б. С. Кухарев, С. Е. Ващев, В. В. Сурков, Н. Г. Кухарева; Белорус. гос. политехн. акад. – Минск, 1999. – С. 8. – Деп. в ВИНТИ 14.01.00. № 49-В00 // Указатель деп. рукописей 03.49В00.277.

9. Протасевич, В. Ф. Исследование аюмотермических смесей для двухфазного борирования / В. Ф. Протасевич, Б. С. Кухарев // Metallurgiya. – 1989. – № 23. –

С. 106–108.

10. Глазов, В. М. Микротвердость металлов / В. М. Глазов, В. Н. Вигдорович. – М.: Metallurgiya, 1969. – 247 с.

11. Вассерман, Г. Текстура металлических материалов / Г. Вассерман, И. Гревен. – М.: Metallurgiya, 1969. – 654 с.

12. Trans. AIME / V. Horta [et al.]. – 1969. – V. 245. – P. 2525–2529.

13. Morris, P. R. // I. Appl. Phys. – 1959. – V. 30, № 2. – P. 592–599.

14. Бородкина, М. М. Рентгенографический анализ текстуры металлов и сплавов / М. М. Бородкина, Э. Н. Спектор. – М.: Metallurgiya, 1981. – 271 с.

15. Туров, Ю. В. Исследование особенностей формирования и свойств боридных покрытий на сталях: автореф. ... дис. канд. техн. наук / Ю. В. Туров. – Минск, 1974. – 29 с.

16. Крукович, М. Г. Исследование жидкостных безэлектролизных процессов химико-термической обработки: автореф. ... дис. канд. техн. наук / М. Г. Крукович. – Минск, 1974. – 31 с.

Поступила 5.09.2006

УДК 548.24

## УСЛОВИЕ РАВНОВЕСИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЗАРОДЫШЕЙ ДВОЙНИКОВ

Канд. физ.-мат. наук, доц. **ОСТРИКОВ О. М.**

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого

Заклинившие нанодвойники наглядно представляют начальную стадию развития микродвойников [1]. Поэтому, исследуя нанодвойники, т. е. зародыши двойников, можно судить о характере зарождения двойникования, являющегося основным каналом пластической деформации кристаллов [2]. Немаловажную роль при развитии представлений зарождения двойников играет анализ условия равновесия их зародышей, в качестве которых выступают нанодвойники [1]. Это позволит определить условия исчезновения или дальнейшего развития двойниковых зародышей.

Цель данной работы – разработка дислока-

ционной модели нанодвойников и анализ условия их равновесия.

Пусть границы нанодвойника формы, близкой линзовидной, состоят из совокупности краевых либо винтовых дислокаций, расположенных друг относительно друга так, как это показано на рис. 1. Пусть также длина нанодвойника равна  $2L$ , а ширина –  $2H$ . Так как двойникующие дислокации являются частичными дислокациями Шокли [3], их вектор Бюргера имеет две составляющие: краевую  $b_v$  и винтовую  $b_b$ . Пусть у дислокаций, находящихся в положительной области оси  $OX$ , вектор  $b_v$  направлен вдоль оси  $OX$ , а вектор  $b_b$  – вдоль оси  $OZ$  так, чтобы декартова система координат

XYZ была правой (рис. 1), а у дислокаций, находящихся в отрицательной области оси OX, векторы Бюргера направлены в противоположную сторону.

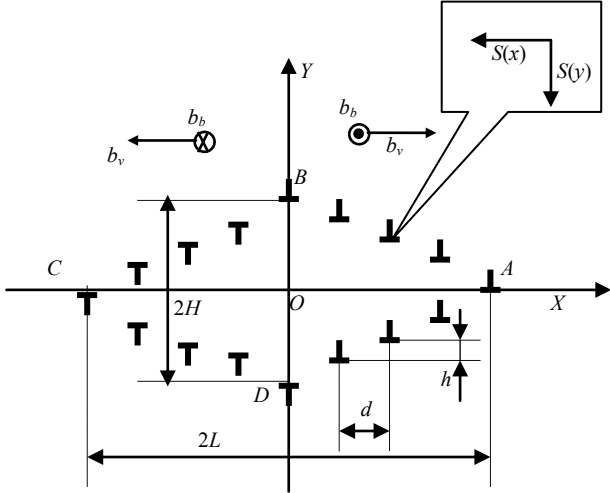


Рис. 1. Дислокационная модель нанодвойника

Тогда, исходя из известных соотношений для расчета полей напряжений у единичной дислокации [3, 4], можно вывести выражения для расчета полей напряжений у нанодвойника, которые имеют вид:

$$\sigma_{xx} = -\frac{\mu b_v}{2\pi(1-\nu)} \times \left( \sum_{n=0}^N \frac{(y+nh)[3(x+nd-L)^2 + (y+nh)^2]}{[(x+nd-L)^2 + (y+nh)^2]^2} - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(y+nh)[3(x-nd+L)^2 + (y+nh)^2]}{[(x-nd+L)^2 + (y+nh)^2]^2} + \sum_{n=1}^N \frac{(y-nh)[3(x+nd-L)^2 + (y-nh)^2]}{[(x+nd-L)^2 + (y-nh)^2]^2} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{(y-nh)[3(x-nd+L)^2 + (y-nh)^2]}{[(x-nd+L)^2 + (y-nh)^2]^2} \right);$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\mu b_v}{2\pi(1-\nu)} \times \left( \sum_{n=0}^N \frac{(y+nh)[(x+nd-L)^2 - (y+nh)^2]}{[(x+nd-L)^2 + (y+nh)^2]^2} - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(y+nh)[(x-nd+L)^2 - (y+nh)^2]}{[(x-nd+L)^2 + (y+nh)^2]^2} + \sum_{n=1}^N \frac{(y-nh)[(x+nd-L)^2 - (y-nh)^2]}{[(x+nd-L)^2 + (y-nh)^2]^2} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{(y-nh)[(x-nd+L)^2 - (y-nh)^2]}{[(x-nd+L)^2 + (y-nh)^2]^2} \right);$$

$$+ \sum_{n=1}^N \frac{(y-nh)[(x+nd-L)^2 - (y-nh)^2]}{[(x+nd-L)^2 + (y-nh)^2]^2} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{(y-nh)[(x-nd+L)^2 - (y-nh)^2]}{[(x-nd+L)^2 + (y-nh)^2]^2} \Big);$$

$$\sigma_{xx} = -\frac{\mu b_v \nu}{\pi(1-\nu)} \left( \sum_{n=0}^N \frac{y+nh}{(x+nd-L)^2 + (y+nh)^2} - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{y+nh}{(x-nd+L)^2 + (y+nh)^2} + \sum_{n=1}^N \frac{y-nh}{(x+nd-L)^2 + (y-nh)^2} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{y-nh}{(x-nd+L)^2 + (y-nh)^2} \right);$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\mu b_v}{2\pi(1-\nu)} \times$$

$$\times \left( \sum_{n=0}^N \frac{(x+nd-L)[(x+nd-L)^2 - (y+nh)^2]}{[(x+nd-L)^2 + (y+nh)^2]^2} - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{(x-nd+L)[(x-nd+L)^2 - (y+nh)^2]}{[(x-nd+L)^2 + (y+nh)^2]^2} + \sum_{n=1}^N \frac{(x+nd-L)[(x+nd-L)^2 - (y-nh)^2]}{[(x+nd-L)^2 + (y-nh)^2]^2} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{(x-nd+L)[(x-nd+L)^2 - (y-nh)^2]}{[(x-nd+L)^2 + (y-nh)^2]^2} \right); \quad (1)$$

$$\sigma_{zx} = -\frac{\mu b_b}{2\pi} \left( \sum_{n=0}^N \frac{y+nh}{(x+nd-L)^2 + (y+nh)^2} - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{y+nh}{(x-nd+L)^2 + (y+nh)^2} + \sum_{n=1}^N \frac{y-nh}{(x+nd-L)^2 + (y-nh)^2} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{y-nh}{(x-nd+L)^2 + (y-nh)^2} \right);$$

$$\sigma_{zy} = \frac{\mu b_b}{2\pi} \left( \sum_{n=0}^N \frac{x+nd-L}{(x+nd-L)^2 + (y+nh)^2} - \sum_{n=0}^{N-1} \frac{x-nd+L}{(x-nd+L)^2 + (y+nh)^2} + \sum_{n=1}^N \frac{x+nd-L}{(x+nd-L)^2 + (y-nh)^2} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{x-nd+L}{(x-nd+L)^2 + (y-nh)^2} \right);$$

$$+ \sum_{n=1}^N \frac{x + nd - L}{(x + nd - L)^2 + (y - nh)^2} - \sum_{n=1}^{N-1} \frac{x - nd + L}{(x - nd + L)^2 + (y - nh)^2} \Bigg\},$$

где  $\mu$  – модуль сдвига;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $n$  – индекс суммирования;  $N$  – число дислокаций на единичной границе нанодвойника;  $d, h$  – проекции на оси  $OX$  и  $OY$  соответственно отрезка, соединяющего две соседние дислокации (рис. 1).

В суммах (1) учтено, что в точках  $A, B, C$  и  $D$  (рис. 1) может находиться только одна дислокация. Каждая дислокация двойника развивается параллельно оси  $OX$  вдоль выделенной плоскости так, что  $h$  постоянно и равно межплоскостному расстоянию [2].

Согласно данным [5] условие равновесия двойника можно представить в виде:

$$b_\nu \sigma_{xy}(x, 0) + b_b \sigma_{xz}(x, 0) + S(x) + b_\nu \sigma_{xy}^e(x, 0) + b_b \sigma_{xz}^e(x, 0) = 0; \quad (2)$$

$$b_\nu \sigma_{xy}(0, y) + b_b \sigma_{xz}(0, y) + S(y) + b_\nu \sigma_{xy}^e(0, y) + b_b \sigma_{xz}^e(0, y) = 0, \quad (3)$$

где  $\sigma_{xy}, \sigma_{xz}$  берутся из (1);  $S(x), S(y)$  – силы сопротивления соответственно вдоль осей  $OX$  и  $OY$  (рис. 1), величина и направление которых в состоянии равновесия зависят от предшествовавшего равновесию направления движения двойникоующих дислокаций;  $\sigma_{xy}^e(x, 0), \sigma_{xz}^e(x, 0)$  – компоненты тензора внешних напряжений.

Результаты расчетов  $S(x)$  и  $S(y)$  при  $\sigma_{xy}^e(x, 0) = 0$  и  $\sigma_{xz}^e(x, 0) = 0$  представлены на рис. 2. Ход зависимостей  $S(x)$  и  $S(y)$  указывает на то, что силы сопротивления стремятся уменьшить параметры  $L$  и  $H$  нанодвойника при росте двойника. В то же время эти силы препятствуют процессу уменьшения размеров двойниковых зародышей. Поэтому заклинившийся линзовидный двойниковый зародыш при отсутствии внешних воздействий является устойчивым. При  $x \rightarrow \infty$  или  $y \rightarrow \infty$  сила  $S \rightarrow 0$ . Это свидетельствует о том, что наибольшие энергетические затраты для роста двойников необходимы на начальном этапе роста двойниковых зародышей.

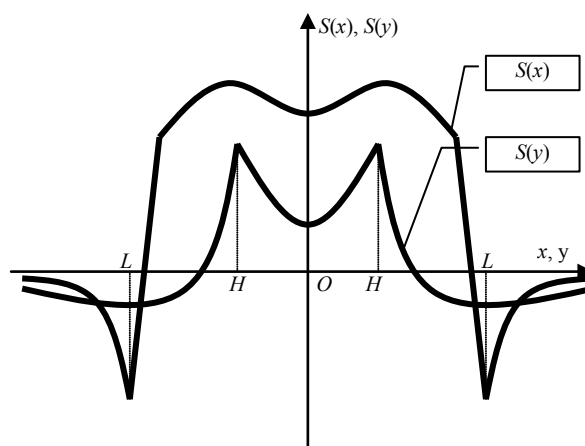


Рис. 2. Вид зависимостей  $S(x), S(y)$  при  $\sigma_{xy}^e(x, 0) = 0$  и  $\sigma_{xz}^e(x, 0) = 0$

Так как нанодвойники являются зародышами двойников, интересна эволюция сил сопротивления в процессе роста двойникового зародыша. Расчеты показали, что конфигурация зависимостей  $S(x)$  и  $S(y)$  не изменяется с ростом числа двойникоующих дислокаций на двойниковых границах при сохранении величины параметров  $d$  и  $h$ . При увеличении же данных параметров величина сил сопротивления стремится к нулю с уменьшением ширины пиков в положительной и отрицательной областях (рис. 2).

### ВЫВОД

Предложена дислокационная модель нанодвойника. На основании анализа условия равновесия рассмотрены силы сопротивления развитию двойникового зародыша. Установлено, что при отсутствии внешних напряжений силы сопротивления способствуют стабилизации формы двойникового зародыша.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Остриков, О. М.** Нанодвойникование монокристаллов висмута / О. М. Остриков // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. – 2002. – № 3. – С. 51–52.
2. **Классен-Неклюдова, М. В.** Механическое двойникование кристаллов / М. В. Классен-Неклюдова. – М.: АН СССР, 1960. – 261 с.
3. **Фридель, Ж.** Дислокации / Ж. Фридель. – М.: Мир, 1967. – 644 с.
4. **Хирт, Дж.** Теория дислокаций / Дж. Хирт, И. Лоте. – М.: Атомиздат, 1972. – 600 с.
5. **Косевич, А. М.** О дислокационной модели двойника / А. М. Косевич, Л. А. Пастур // Физика твердого тела. – 1961. – Т. 3, № 4. – С. 1290–1297.

Поступила 30.03.2006