

01;05

Напряженное состояние у поверхности кристалла, деформируемой сосредоточенной нагрузкой, при наличии клиновидного двойника

© О.М. Остриков

Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого,
246746 Гомель, Белоруссия
e-mail: ostrikov@gstu.gomel.by

(Поступило в Редакцию 23 января 2008 г. В окончательной редакции 22 мая 2008 г.)

На основании дислокационной макроскопической модели разработана методика расчета полей напряжений у двойника клиновидной формы находящегося у поверхности кристалла. Задача решена для случая действующей сосредоточенной нагрузки, приложенной к поверхности кристалла с содержащимся в нем двойником. Установлено, что сосредоточенная нагрузка приводит к росту уровня напряжений у клиновидного двойника и их локализации у той границы двойника, ближе к которой приложена нагрузка.

PACS: 61.72.Mn, 61.72.Bb

Введение

Задачи механики деформируемого твердого тела преимущественно решаются без учета напряжений, которые создают дефекты кристаллической решетки [1]. Это не всегда оправдано, так как приводит к завышенной оценке прочности деформируемого материала.

Особое значение при этом имеет учет напряжений, которые создают двумерные дефекты кристаллической решетки, так как, например, двойниковые границы являются концентраторами больших внутренних напряжений, способствующих зарождению трещин и последующему разрушению материала [2].

Целью настоящей работы стала демонстрация решения задачи локального деформирования поверхности упругого полупространства при наличии в нем клиновидного двойника.

Постановка задачи и ее решение

На рис. 1 схематически представлен клиновидный двойник длиной L и шириной у устья H с формой границ, описываемой функциями $f_1(y_0)$ и $f_2(y_0)$. Направим ось OX вдоль поверхности кристалла, а ось OY — перпендикулярно ей, вдоль направления развития двойника. Пусть поверхность деформируется в точке O вдоль оси OY внешней силой P , перпендикулярной поверхности. Пусть в точке O также действуют внешние тангенциальные силы Q . Тогда в упругом полупространстве будут действовать напряжения, которые могут быть определены по формулам [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^e(x, y) &= -\frac{2}{\pi} \left(\frac{x^2(Py + Qx)}{(x^2 + y^2)^2} \right); \\ \sigma_{yy}^e(x, y) &= -\frac{2}{\pi} \left(\frac{y^2(Py + Qx)}{(x^2 + y^2)^2} \right); \\ \sigma_{xy}^e(x, y) &= -\frac{2}{\pi} \left(\frac{xy(Py + Qx)}{(x^2 + y^2)^2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Напряженное состояние у клиновидного двойника может быть рассчитано из соотношения [4]:

$$\sigma_{ij}^{tw}(x, y) = \sigma_{ij}^{(1)}(x, y) + \sigma_{ij}^{(2)}(x, y), \quad (2)$$

где $\sigma_{ij}^{(1)}(x, y)$ и $\sigma_{ij}^{(2)}(x, y)$ — напряжения, создаваемые каждой границей двойника и определяемые криволиней-

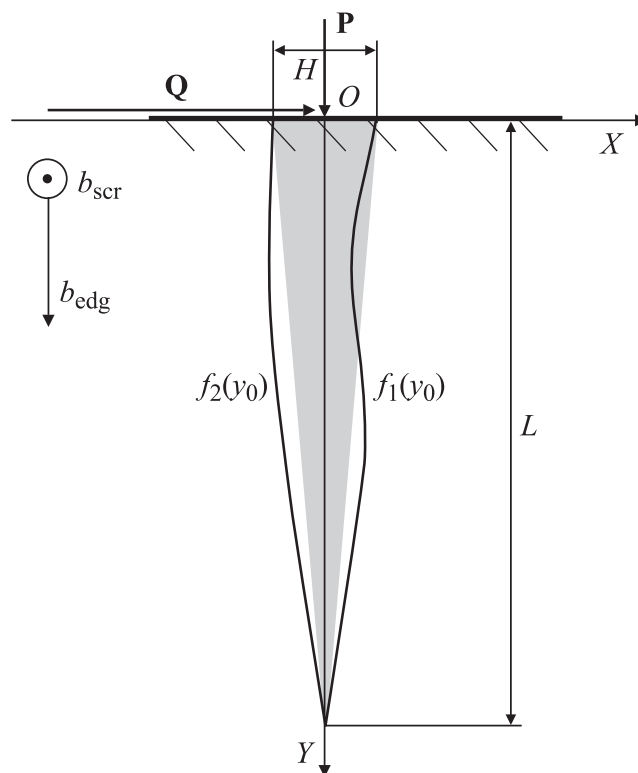


Рис. 1. Схематическое изображение клиновидного двойника у поверхности упругого полупространства и действующей на нее сосредоточенной нагрузки.

ными интегралами

$$\sigma_{ij}^{(1)} = \int_{L_1} \rho_1 \sigma_{ij}^{(1,0)} ds; \quad (3)$$

$$\sigma_{ij}^{(2)} = \int_{L_2} \rho_2 \sigma_{ij}^{(2,0)} ds, \quad (4)$$

где L_1 и L_2 — профили двойниковых границ, вдоль которых ведется интегрирование; ρ_1 и ρ_2 — плотность двойникующих дислокаций на двойниковых границах; $\sigma_{ij}^{(1,0)}$ и $\sigma_{ij}^{(2,0)}$ определяются из соотношений, приведенных в [5].

Криволинейные интегралы (3) и (4) сводятся к определенным интегралам вида

$$\sigma_{ij}^{(1)}(x, y) = \int_0^L \sqrt{1 + (f_1'(y_0))^2} \rho_1(y_0) \sigma_{ij}^{(1,0)}(x, y, y_0) dy_0; \quad (5)$$

$$\sigma_{ij}^{(2)}(x, y) = \int_0^L \sqrt{1 + (f_2'(y_0))^2} \rho_2(y_0) \sigma_{ij}^{(2,0)}(x, y, y_0) dy_0. \quad (6)$$

Результирующие напряжения в упругом полупространстве, деформируемом приложенной к поверхности сосредоточенной нагрузкой, при наличии клиновидного двойника будут определяться по формуле

$$\sigma_{ij}(x, y) = \sigma_{ij}^e(x, y) + \sigma_{ij}^{tw}(x, y). \quad (7)$$

Результаты и их обсуждение

В данной работе ограничимся только рассмотрением случая прямолинейных двойниковых границ. Тогда будем иметь [4]:

$$f_1(y_0) = \frac{H}{2} \left(1 - \frac{y_0}{L}\right); \quad (8)$$

$$f_2(y_0) = -\frac{H}{2} \left(1 - \frac{y_0}{L}\right). \quad (9)$$

На рис. 2 представлены результаты расчетов на примере распределения величины сдвиговой компоненты σ_{xy} тензора напряжений. Принималось $H = 31 \mu\text{m}$; $L = 100 \mu\text{m}$; $b_{\text{edg}} = 0.124 \text{ nm}$ (здесь b_{edg} — модуль краевой составляющей вектора Бюргера двойникующей дислокации); для железа: $a = 0.248 \text{ nm}$ [6] (здесь a — межатомное расстояние). Тогда, используя соотношение для расчета линейной плотности двойникующих дислокаций на двойниковых границах

$$\rho = \frac{H}{2aL}, \quad (10)$$

получим: $\rho = 0.625 \cdot 10^9 \text{ m}^{-1}$. В (5) и (6) примем этот параметр постоянным.

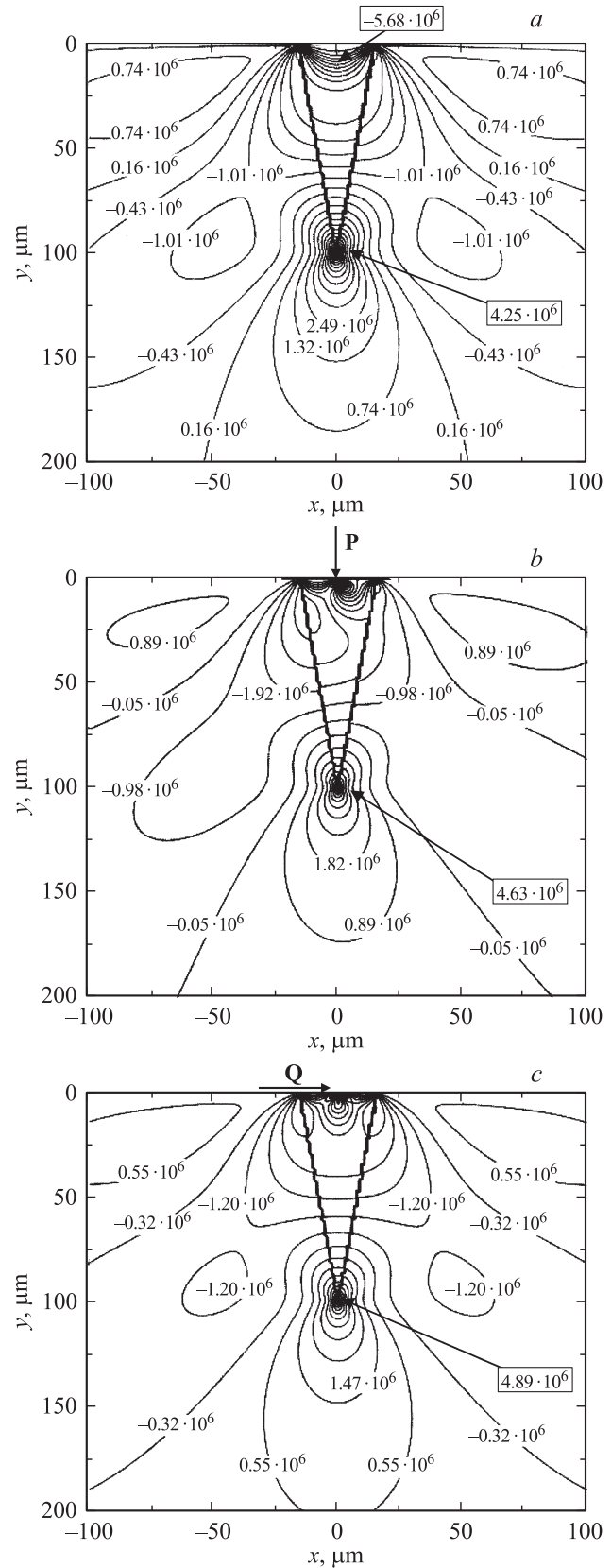


Рис. 2. Распределение напряжений σ_{xy} у клиновидного двойника: *a* — при отсутствии внешних напряжений; *b* — при действующей в точке *O* сосредоточенной нормальной силы **P**; *c* — при действующей в точке *O* сосредоточенной касательной силы **Q**.

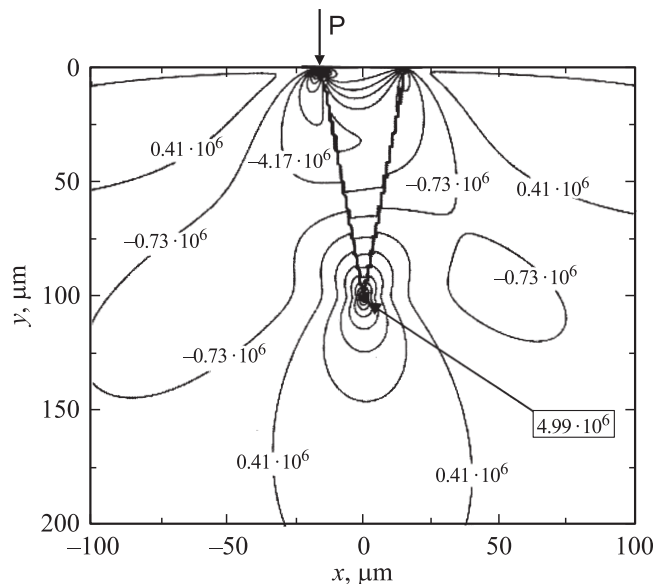


Рис. 3. Поля напряжений σ_{xy} у клиновидного двойника, находящегося у поверхности упругого полупространства, при действии нормальной силы на границе двойника.

На рис. 2, *a* показано распределение сдвиговых напряжений у клиновидного двойника при отсутствии внешних напряжений. Интересны два предельных случая, когда $P \neq 0, Q = 0$ и $P = 0, Q \neq 0$. На рис. 2, *b* показан случай распределения сдвиговых напряжений при $P = 100 \text{ N}, Q = 0$, а на рис. 2, *c* — вариант, когда $P = 0, Q = 100 \text{ N}$. Видно, что при $Q = 0$ повышается уровень сдвиговых напряжений у одной из двойниковых границ (рис. 2, *b*). При $P = 0$ напряжения σ_{xy} существенно не перераспределяются, но растет их общий уровень (рис. 2, *c*).

Интересна ситуация, когда внешняя сила действует не в точке O , а в другой точке на оси OX . В этом случае соотношения (1) необходимо привести к виду

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^e &= -\frac{2}{\pi} \left(\frac{(x-c)^2(Py + Q(x-c))}{((x-c)^2 + y^2)^2} \right); \\ \sigma_{yy}^e &= -\frac{2}{\pi} \left(\frac{y^2(Py + Q(x-c))}{((x-c)^2 + y^2)^2} \right); \\ \sigma_{xy}^e &= -\frac{2}{\pi} \left(\frac{(x-c)y(Py + Q(x-c))}{((x-c)^2 + y^2)^2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь c — расстояние от точки O до точки действия сосредоточенной силы.

В данном случае интересна ситуация, когда $c = H/2$ (или $c = -H/2$), т.е. когда внешняя сосредоточенная нагрузка действует на двойниковой границе. Тогда увеличивается локализация напряжений у границы, на которую действует нагрузка (рис. 3). Это приводит к интенсификации на данной границе процесса генерации двойникующих дислокаций, что в свою очередь ведет к искривлению двойниковой границы, делая ее выпуклой [7].

Заключение

Таким образом, в приближении непрерывного распределения двойникующих дислокаций на двойниковых границах, без использования модели тонкого двойника, рассчитаны поля напряжений у клиновидного двойника, находящегося у поверхности упругого полупространства. Рассмотрено влияние на напряженное состояние внешних сосредоточенных нормальных и касательных сил, приложенных к поверхности упругого полупространства. Показано, что действие внешних сосредоточенных сил приводит к увеличению общего уровня напряжений у двойника. Действие сосредоточенной силы на границе двойника приводит к локализации у нее напряжений, что может стать следствием активации на данной границе процессов генерации двойникующих дислокаций и последующего искривления двойниковых границы.

Список литературы

- [1] Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 712 с.
- [2] Остриков О.М. // Механика твердого тела. 2004. № 2. С. 104–113.
- [3] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
- [4] Остриков О.М. // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. 2006. № 2. С. 10–18.
- [5] Косевич А.М., Пастур Л.А. // ФТТ. 1961. Т. 3. Вып. 4. С. 1291–1297.
- [6] Новиков И.И., Розин К.М. Кристаллография и дефекты кристаллической решетки. М.: Металлургия, 1990. 336 с.
- [7] Остриков О.М. // Физика металлов и металловедение. 2000. Т. 90. № 1. С. 91–95.