Физика и техника высоких давлений 2000, том 10, № 1

PACS: 62.50.+p, 61.72.-y

В.В. Малашенко, Т.И. Малашенко

ВЛИЯНИЕ ДИСЛОКАЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НА ЗАРОЖДЕНИЕ МИКРОТРЕЩИНЫ В ГИДРОСТАТИЧЕСКИ СЖАТОМ КРИСТАЛЛЕ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины
83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

Статья поступила в редакцию 17 декабря 1999 года

Исследовано влияние гидростатического давления на зарождение микротрещин с учетом энергии дислокационного скопления. Получена аналитическая зависимость размеров микротрещины от величины гидростатического давления.

Известно, что дислокации играют важную роль на всех стадиях процесса разрушения – от зарождения первых микротрещин до полного разрыва образца [1–5]. Необходимая для возникновения микротрещин концентрация напряжений может достигаться в голове дислокационного скопления. В этом случае для инициирования трещины требуется небольшой пластический сдвиг. Для образования больших скоплений необходимы прочные барьеры, блокирующие дислокации (границы зерен, сидячие дислокации, включения).

Гидростатическое давление может оказывать существенное влияние на процесс возникновения и развития микротрещин. Экспериментально установлено, что давление препятствует их зарождению, воздействуя как на трещину, так и на порождающее ее скопление.

В работе [6] в рамках модели Стро исследован процесс зарождения микротрещины в гидростатически сжатом кристалле (ГСК). Показано, что существует некоторое критическое гидростатическое давление, выше которого гидростатическое сжатие начинает заметно влиять на количество трещинообразующих дислокаций, объединяющихся в трещину, и, следовательно, на величину возникшей микротрещины. В работе получены аналитическое выражение и численная величина критического давления p_c, показано, что при $p > p_c$ число дислокаций в трещине уменьшается с ростом гидростатического давления. Эти результаты справедливы для случая $m << N$ (где m, N – число дислокаций соответственно в микротрещине и в материнском скоплении), т.е. описывают начальную стадию зарождения микротрещины в ГСК.

Для изучения последующих стадий ее развития при энергетическом анализе рассматриваемого процесса необходим учет как энергии материнского скопления дислокаций, так и влияния сил молекулярного сцепления, что и было реализовано в настоящей работе.

Проанализируем плоское скопление раскалывающих дислокаций, прижатое к непреодолимому стопору внешним напряжением

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}^{*},$$

где $-p\delta_{ij}$ и τ_{ij}^{*} – соответственно гидростатическая и девиаторная компоненты тензора внешних напряжений. Считая для простоты среду изотропной, можно записать систему уравнений для определения плотности дислокаций в следующем виде:

$$D_0 \int_{-l}^{0} \frac{\rho^{(pu)}(\xi) d\xi}{x-\xi} = \tau_{ij}^* n_i b_j + \tau_{ij}^{(cr)}(x) n_i b_j \ ,$$

$$D \int_{0}^{C} \frac{\rho^{(cr)}(\xi) d\xi}{x'-\xi} = \left[\tau_{i'j'}^* - p\delta_{i'j'} + \tau_{i'j'}^{(pu)}(x')\right] n_{i'}^{(cr)} n_{j'}^{(cr)} - G(x').$$

Здесь величины с индексом (cr) относятся к трещине, с индексом (pu) – к дислокационному скоплению; $G(x)$ – силы молекулярного сцепления; D_0 и D – константы порядка μ (модуль сдвига); b – вектор Бюргерса; $\mathbf{n}$ – вектор нормали к скоплению или к трещине (в зависимости от индекса). Решая данную систему уравнений методами, изложенными в [1], получаем выражение для плотности дислокаций, которое мы не приводим здесь по причине его громоздкости. Оно позволяет определить число раскалывающих дислокаций путем минимизации свободной энергии варьированием по m:

$$\delta\left(F_{cr} + F_{cr}^{(pu)} + F_{pu} + A\right) = 0.$$

Здесь F_{cr}, F_{pu}, $F_{cr}^{(pu)}$ – энергия соответственно трещины, скопления и взаимодействия трещины с полем напряжения скопления. Выполняя варьирование и решая полученное уравнение относительно m, находим зависимость числа раскалывающих дислокаций в трещине от величины гидростатического давления

$$m = N \frac{\sqrt{1+S(p+p_c)}-1}{S(p+p_c)}.$$

Здесь S и p_c – величины, зависящие от внешних сдвиговых напряжений и не зависящие от гидростатического давления:

$$S = \frac{12\pi N}{t^2 \mu (1+\nu)} \left[1 - \frac{2}{3}\kappa \sqrt{\left(\frac{\tau_{ij}^*}{\mu}\right) n_i^{(pu)} \frac{b_j}{b} \frac{\left(1-\nu^2\right)N}{2\pi^3}}\right],$$

$$p_c = \frac{6\sqrt{N}}{S} \kappa \sqrt{\left(\frac{\tau_{ij}^*}{\mu}\right)\left(\frac{n_i}{\pi}\right)\left(\frac{b_j}{b}\right)\frac{1}{1-\nu^2}} \left[1 - 2\kappa \sqrt{\frac{\tau_{ij}^*}{\mu} n_i \frac{b_j}{b} \frac{\left(1-\nu^2\right)N}{\pi^3}}\right] - \tau_{nn}^* ,$$

где κ, t – безразмерные величины, $\kappa \sim 1$, $t \sim \sqrt{N}$.

Оценим порядок величин S и p_c. Для типичного значения $\tau \sim 10^{-3}$ μm получим $S \sim 10^{-9}$ Pa^{-1} и $p_c \sim 10^{-2}$–10^{-3} μm.

Функция, выражающая зависимость m от p, является непрерывной, положительной, ограниченной сверху (не превышает N) и монотонно убывающей с ростом давления. При значениях $p < p_c$ величина $S(p + p_c) \sim 10^{-1}$. Разложив по ней $m(p)$, получим $m \sim N$ независимо от значения p.

Используя связь C и m (C – длина микротрещины), найдем выражение, описывающее зависимость C от величины гидростатического давления:

$$C = 2C_0 \frac{\left[1 - \sqrt{1+S(p+p_c)} + 0.5S(p+p_c)\right]}{S^2 (p+p_c)^2},$$

Здесь $C_0 = \left[\frac{\pi D b \sin\varphi}{M - 2M_0\kappa}\right]^2$; $M_0 = \sqrt{\frac{N\mu\tau^*_{ij} n_i^{(pu)} b_j}{\pi(1-\nu)}}$; M – модуль сцепления, вычисленный в [1], $M = \sqrt{\pi\gamma E/(1-\nu^2)}$ (E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона, γ – коэффициент поверхностного натяжения, φ – угол между векторами $\mathbf{n}_{cr}$ и $\mathbf{n}_{pu}$).

Как следует из приведенного выражения, при $p < p_c$ длина микротрещины не зависит от величины гидростатического давления, а при $p >> p_c$ – обратно пропорциональна p.

1. *Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц*, Теория упругости, Наука, Москва (1965).
2. *Ж. Фридель*, Дислокации, Мир, Москва (1973).
3. *Б. Билби, Дж. Эшелби*, Разрушение, Т. 1, Мир, Москва (1973).
4. *Дж. Хирт, Н. Лоте*, Теория дислокаций, Атомиздат, Москва (1972).
5. *В.И. Владимиров*, Физика хрупкого разрушения, ИПМ АН УССР, Киев (1976).
6. *V.A. Solovev, V.A. Strelsov*, Phys. Stat. Sol. (a), **49**, K145 (1978).
7. *Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Б.М. Эфрос*, ФТВД **9**, № 3, 6 (1999).

V.V. Malashenko, T.I. Malashenko

INFLUENCE OF DISLOCATION INTERACTION ON MICROCRACK NUCLEATION IN HYDROPRESSED CRYSTAL

Hydrostatic pressure effect on nucleation of microcracks has been studied with the energy of dislocation pile-up taken into account. An analytical dependence of microcrack size on hydrostatic pressure value has been obtained.