

В. С. САВЕНКО

УО МГПУ им. И.П. Шамякина (г. Мозырь, Беларусь)

РАСЧЕТ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ У ГРАНИЦ КЛИНОВИДНОГО ДВОЙНИКА

Импульсный ток большой плотности, пропущенный через металл во время деформации выше предела текучести, вызывает ЭПД в том числе за счет пондеромоторных эффектов, которые обуславливают дополнительные механические напряжения ионного остова кристаллической решетки металла с новым видом взаимодействия винтовых двойникоующих дислокаций с препятствием. Возбуждение электронной подсистемы образца приводит к интенсивному размножению двойникоующих дислокаций на границах раздела и коллективному взаимодействию винтовых составляющих двойникоующих дислокаций с препятствием. В результате возникает не наблюдавшееся ранее явление кристаллографического отклонения двойников.

Двойники обычно зарождаются на дислокационных скоплениях и приводят к релаксации внутренних напряжений у отпечатка. До сих пор было известно, что релаксация внутренних напряжений может осуществляться за счет развития

скольжения, например, в областях кристалла, прилегающих к двойниковым границам. Впервые обнаружено, что под действием электрических импульсов действие одиночных импульсов тока амплитудой I_M порядка 1000 А и длительностью t_M порядка 1 мс приводит к релаксации внутренних напряжений в результате развития новых двойников, причем новые двойники возникают не только на скоплениях полных дислокаций, но и на границах двойниковых прослоек, т. е. на скоплениях двойнивающих дислокаций. Двойники, зарождаясь в местах концентрации напряжений, разряжают дислокационные скопления, тем самым уменьшают вероятность хрупкого разрушения в перенапряженных местах кристаллической решетки (рисунок 1).



Рисунок 1. – Зарождение двойника на двойниковой границе с малой степенью когерентности

В отсутствии внешних энергетических воздействий "ветвящиеся" двойники чаще зарождаются на двойниковых границах с малой степенью когерентности (рисунок 1). Искривление двойниковых границ вызвано избыточной концентрацией на них двойнивающих дислокаций. Повышенная плотность дислокаций на двойниковой границе ведет к локализации на ней внутренних напряжений, источниками которых являются двойнивающие дислокации. При этом в местах скопления дислокаций могут возникать напряжения, сравнимые по величине с порогом возникновения клиновидного двойника. Релаксация данных напряжений происходит через зарождение на двойниковой границе нового двойника, который развивается в новом энергетически выгодном направлении (рисунок 1).

Представим двойниковый дублет в виде совокупности краевых дислокаций, расположенных вдоль двух пересекающихся прямых OA и OB . Выберем начало системы координат в точке пересечения этих прямых. Ось OX направим параллельно линии, вдоль которой расположены двойники, а ось OY – перпендикулярно ей. Пусть векторы Бюргера дислокаций данного скопления направлены вдоль оси OX , тогда,

зная выражения для компонент тензора напряжений, создаваемых единичной дислокацией:

$$\sigma_{xx}^d = -\frac{bG}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(3x^2 + y^2)}{(x^2 + y^2)^2}, \quad \sigma_{yy}^d = \frac{bG}{2\pi(1-\nu)} \frac{y(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2}, \quad \sigma_{xy}^d = \frac{bG}{2\pi(1-\nu)} \frac{x(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2},$$

где b – вектор Бюргера, G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, и вводя обозначения: $A = \frac{bG}{2\pi(1-\nu)}$, $p = \frac{x}{d}$, $q = \frac{y}{d}$. Здесь d и h – проекции радиуса-вектора, соединяющего две близлежащие дислокации, соответственно на оси OX и OY для компонент тензоров напряжений σ_{ij}^{OA} , σ_{ij}^{OB} , создаваемых вдоль прямых OA и OB дислокационными скоплениями, находящимся в изотропной среде, можем записать: [1]

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^{OA} &= -hA \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(n+q)[3d^2(n+p)^2 + h^2(n+q)^2]}{[d^2(n+p)^2 + h^2(n+q)^2]^2}, \\ \sigma_{yy}^{OA} &= hA \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(n+q)[d^2(n+p)^2 - h^2(n+q)^2]}{[d^2(n+p)^2 + h^2(n+q)^2]^2}, \\ \sigma_{xy}^{OA} &= dA \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(n+p)[d^2(n+p)^2 - h^2(n+q)^2]}{[d^2(n+p)^2 + h^2(n+q)^2]^2}, \\ \sigma_{xx}^{OB} &= -hA \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(n-q)[3d^2(n+p)^2 + h^2(n-q)^2]}{[d^2(n+p)^2 + h^2(n-q)^2]^2}, \\ \sigma_{yy}^{OB} &= hA \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(n-q)[d^2(n+p)^2 - h^2(n-q)^2]}{[d^2(n+p)^2 + h^2(n-q)^2]^2}, \\ \sigma_{xy}^{OB} &= dA \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{(n+p)[d^2(n+p)^2 - h^2(n-q)^2]}{[d^2(n+p)^2 + h^2(n-q)^2]^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Очевидно, что поля напряжений, создаваемые обеими ветвями скоплений дислокаций, можно найти из соотношения $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^{OA} + \sigma_{ij}^{OB}$.

Дальнейшее решение поставленной задачи сводится к замене сумм (1) функциями от p и q . Для этого воспользуемся функцией, полученной из теории рядов Фурье:

$$\pi \operatorname{ctg} \pi M = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{n+M}, \quad (2)$$

где n – индекс суммирования, а M – произвольное.

Примем в данном соотношении $M = \frac{dp + ihq}{d + ih}$, тогда получим

$$\frac{\pi}{d + ih} \operatorname{ctg} \pi \frac{dp + ihq}{d + ih} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{d(n+p) + ih(n+q)}. \quad (3)$$

При $M = \frac{dp - ihq}{d - ih}$ будем иметь

$$\frac{\pi}{d - ih} \operatorname{ctg} \pi \frac{dp - ihq}{d - ih} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{d(n+p) - ih(n+q)}. \quad (4)$$

Находя сумму и разность выражений (3) и (4), получим

$$I_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n+p}{d^2(n+p)^2 + h^2(n+q)^2} = \frac{\pi}{d(d^2 + h^2)} \frac{d \sin \alpha + h \operatorname{sh} \beta}{\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha}, \quad (5)$$

$$I_2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{n+p}{d^2(n+p)^2 + h^2(n+q)^2} = \frac{\pi}{h(d^2 + h^2)} \frac{h \sin \alpha - d \operatorname{sh} \beta}{\operatorname{ch} \beta - \cos \alpha}. \quad (6)$$

Полученный результат может быть применен не только для расчета сил взаимодействия двойникового дублета с дислокациями, но и для определения энергии его взаимодействия с точечными дефектами и степени их концентрации у двойниковой границы, что представляет особый интерес с точки зрения программного упрочнения материала, интенсивно изучаемого в последнее время.

ЛИТЕРАТУРА

1. Savenko, V. S. Electroplastic effect under the simultaneous superposition and magnetic fields/ V. S. Savenko // Journal of applied physics. – 1999. – № 5. – P. 1–4 с.
2. Savenko, V. S. The contribution of ponderomotive factors to the realization of electroplastic deformation / V. S. Savenko, O. A. Troitsky, A. G. Silvonets // Izvestiya NAN RB. A series of physical and technical sciences, 1, 85–91 с.