

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 620.17.175.178.82

О ЗЕРНОГРАНИЧНОМ СОПРОТИВЛЕНИИ  
СДВИГУ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Р. И. Гарбер

При ползучести и других видах деформации поликристаллов наряду с деформацией зерен неизбежны процессы зернограничного сдвига [1]. Строение зернограничных областей в последние годы широко изучается на атомном уровне при помощи методов высокого разрешения, а также математического моделирования. Однако для макроскопических определенных сопротивлений зернограничному сдвигу необходимы макроскопические модели.

## 1. Модель вязкой прослойки

Начиная с 1947 г. принято пользоваться для этой цели моделью вязкой зернограничной прослойки, свойства которой описываются формулой Ньютона

$$s = \eta \frac{dv}{dx}, \quad (1)$$

где  $s$  — напряжение сдвига в плоскости границы зерна,  $\eta$  — динамический коэффициент вязкости,  $dv/dx$  — составляющая градиента скорости движения вязкой прослойки.

После ряда преобразований при определенных предположениях Ке [2] получил для сопротивления зернограничному сдвигу выражение

$$s = \eta G_H \frac{\delta}{a} \tau_0 e^{U/kT}, \quad (2)$$

где  $G_H$  — нерелаксированный модуль упругости на сдвиг материала зерна,  $\delta$  — толщина вязкой прослойки,  $a$  — поперечный размер зерна,  $\tau_0 e^{U/kT}$  — время релаксации,  $T$  — температура.

Недостатками модели вязкой прослойки являются, во-первых, отсутствие на границах зерен каких-либо однородных прослоек, что было установлено при исследованиях поликристаллических материалов на атомном уровне, например, в работе [3]. Во-вторых, отсутствие барьера, хотя эксперимент и современная теория зернограничных дислокаций говорят в пользу наличия стартовых напряжений, т. е. предельных напряжений, после достижения которых может возникнуть зернограничный сдвиг. В (1) и (2) сдвиг начинается с нулевых нагрузок. Отсутствие зернограничных прослоек делает неопределенной величину  $\delta$  (толщина прослойки).

Наконец, детальный анализ показывает, что, пользуясь выражением (2), можно прийти к заключению, что модуль сдвига вещества прослойки должен быть на 5 порядков меньше модуля сдвига вещества зерна. Такая прослойка не могла бы обеспечить сцепления между зернами поликристалла. Представление о вязкой прослойке между зернами поликристалла принято связывать с пиками Ке на кривых температурной зависимости внутреннего трения (ВТ). Пики Ке приписывают зернограничной релаксации [2, 4].

Положение пика на температурно-частотной шкале не должно смещаться, а высота пика не должна изменяться при изменении амплитуды колебаний. Последнее оказалось неверным.

В [5] исследовалось ВГ в алюминиевой проволоке диаметром 1 мм чистоты 99.999 %. Положение пика: 1 Гц, 285 °С. Высота пика  $Q^{-1}$  изменялась пропорционально амплитуде относительного сдвига  $\gamma$ ; в интервале значений  $\gamma$  от  $2 \cdot 10^{-7}$  до  $10^{-5}$  высота пика увеличивалась почти в 2 раза. Изменение высоты пика автор относит на счет изменения энергии активации по мере увеличения амплитуды деформации. Качественно такие изменения можно, по мнению автора [5], описать как результат увеличения количества подвижных зернограницных дислокаций по мере увеличения амплитуды напряжений. Однако и в этом случае из дислокационных представлений указать сопротивление сдвигу не представляется возможным.

## 2. Модель сухого трения

Согласно современным представлениям о строении зернограницных областей поликристаллов, естественно полагать, что сопротивление зернограницному сдвигу подобно сопротивлению относительному сдвигу прижатых твердых тел. На границе таких тел, кроме внешних сил, действуют также силы адгезии или когезии.

Для этой модели сопротивление относительному сдвигу можно определять по формуле Кулона

$$s = \mu (p + \sigma_{\perp}), \quad (3)$$

где  $\mu$  — коэффициент сухого трения,  $p$  — плотность сил когезии (адгезии),  $\sigma_{\perp}$  — соответствующая компонента тензора напряжений.

Плотность сил когезии, согласно [6, 7], можно определить как результат перекрытия флуктуирующих электромагнитных полей. В [8] эти вычисления доведены до зазоров порядка межатомных расстояний. Полученные в [8] значения  $p$  лежат для ряда различных веществ в интервале 0.1—0.5 модуля Юнга. Для монокристалльных нитей вольфрама были в эксперименте получены значения прочности, близкие к указанным в [9]. На границах зерен имеется большое количество дефектов, вакансий, дислокаций, примесей и значения  $p$  должны быть несколько меньшими.

На границах двойниковых прослоек кальцита были определены силы сухого трения при  $\sigma_{\perp} = 0$ ,  $s = 0.3 \div 0.06$  МПа, энергия поверхностного натяжения  $\alpha \approx 3.5 \cdot 10^{-2}$  Дж·м<sup>-2</sup> [10]. Отсюда  $p = 35$  МПа = 0.24 соответствующего модуля Юнга кальцита;  $\mu = (8.6 - 1.7) \cdot 10^{-3}$ .

Для экспериментального определения значения  $\mu$  и  $p$  рассмотрим модель бамбукового строения, представляющую собой столбик зеренкубиков с ребром  $a$ , связанных между собой коэзивными силами. Закрепим нижний кубик и приложим к верхнему кубику в плоскости верхней грани силу  $s$ . Это приведет к относительному сдвигу материала каждого кубика  $\gamma_{\text{к}} \approx s/G$ , где  $G$  — модуль упругости на сдвиг, и смещению каждого смежного кубика на величину  $\Delta x = \gamma_{\text{гр}} a$  в результате работы сил трения. Общий относительный сдвиг в расчете на одно зерно

$$\gamma = \gamma_{\text{з}} + \gamma_{\text{гр}}. \quad (4)$$

Упругая энергия деформации столбика

$$W_{\text{упр}} = n \frac{s^2}{2G} a^3. \quad (5)$$

Работа сил трения

$$W_{\text{тр}} = ns\gamma_{\text{гр}} a^3 / 2, \quad (6)$$

где  $n$  — общее число зерен в столбике.

Обратная добротность колебаний такого столбика

$$Q^{-1} = \frac{W_{\text{тр}}}{2\pi W_{\text{упр}}} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{\gamma}{\gamma_0} - 1 \right). \quad (7)$$

Из рис. 4 работы [5] можно заключить, что

$$\gamma = \gamma_0 + \beta Q^{-1}. \quad (8)$$

Из (7) и (8) получаем: при  $Q^{-1} \rightarrow 0$   $\gamma_s = \gamma_0$ ; где  $\gamma_0$  можно назвать стартовым относительным сдвигом,  $\gamma_0 G(T) = s_0$  — стартовое напряжение зернограничного сдвига.

Подставив  $s_0$  в (3) вместо  $\epsilon$  и варьируя  $\sigma_1$ , можно определить значения  $\mu$  и  $\rho$ , т. е. как коэффициент сухого трения, так и плотность сил адгезии на границах зерен поликристалла. По данным работы [5], в хорошо отожженном алюминии 99.999 %,  $\gamma_0 \approx 10^{-11}$ ,  $s_0 \approx 0.27$  Па. Столь низкие значения этих величин свидетельствуют о высокой степени совершенства использовавшихся в этой работе образцов. Примеси и дефекты должны приводить к значительному увеличению  $\gamma_0$  и  $s_0$ .

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Лифшиц И. М. ЖЭТФ, 1963, т. 44, № 4, с. 1349—1367.
- [2] Ke T. S. Phys. Rev., 1947, vol. 72, N 6, p. 534.
- [3] Гарбер Р. И., Дранова Ж. И., Михайловский И. М. ЖЭТФ, 1968, т. 54, № 3, с. 714—720.
- [4] Ke T. S., Cui P., van S. C., Huang Q. Phys. St. Sol. (A), 1984, vol. 86, N 2, p. 593—601.
- [5] Iwasaki K. Phys. St. Sol. (A), 1986, vol. 94, N 2, p. 601—607.
- [6] Лифшиц Е. М. ДАН СССР, 1955, т. 97, № 4, с. 643—646.
- [7] Лифшиц Е. М. ДАН СССР, 1955, т. 100, № 5, с. 879—881.
- [8] Неволин В. Н., Фазылов Ф. Р., Шермергор Т. Д. Поверхность, 1986, № 7, с. 76—81.
- [9] Гарбер Р. И., Дранова Ж. И., Михайловский И. М. ДАН СССР, 1967, т. 174, № 5, с. 1044—1047.
- [10] Бойко В. С., Гарбер Р. И., Кривенко Л. Ф. ФТТ, 1967, т. 9, № 2, с. 435—443.

Харьковский физико-технический  
институт АН УССР  
Харьков

Поступило в Редакцию  
28 июля 1987 г.

УДК 537.312.62

Физика твердого тела, том 30, в. 9, 1988  
Solid State Physics, vol. 30, № 9, 1988

## ОТКЛИК ВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОЕДИНЕНИЯ $\text{Nb}_3\text{Ge}$ НА ИОННЫЕ СМЕЩЕНИЯ

С. В. Столбов, М. Н. Рабинович

Взаимодействия, которые могут приводить к куперовскому спариванию в металлах, во многом определяются характером электронного отклика [1] (отклика на ионные смещения при электрон-фононном или поляронном механизмах сверхпроводимости). Это подтверждают эмпирические корреляции (см., например, [2]).

При объяснении экспериментальных данных и при расчетах обычно исходят из того, что основной вклад в электронную восприимчивость — характеристику отклика — вносят электронные состояния вблизи уровня Ферми  $E_F$  [3, 4]. Однако в соединениях переходных металлов более глубокие валентные  $d$ -состояния пространственно делокализованы (рис. 1). Поэтому именно они в основном должны обеспечивать отклик на ионные смещения. Ниже на примере соединения  $\text{Nb}_3\text{Ge}$  проверена эта гипотеза.