

Р. И. ГАРБЕР и А. И. КОВАЛЕВ

ЭЛЕКТРОННО-МИКРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОС СКОЛЬЖЕНИЯ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 15 VIII 1952)

Отдельные работы по исследованию пластически деформированных металлов, выполненные при помощи электронного микроскопа ⁽¹⁾, не дали существенно новых сведений о полосах скольжения. Структура полос осталась невыясненной, так как в этих работах не была обнаружена и выделена единичная полоса скольжения.

Настоящее исследование было предпринято с целью изучения полос скольжения на каменной соли при помощи электронного микроскопа, так как оказалось, что каменная соль является наиболее подходящим объектом для такого рода исследований.

Образцы каменной соли размером $5 \times 5 \times 25$ мм³ выкалывались из куска природной соли, отжигались при 650° в течение суток, а затем деформировались растяжением или сжатием усилием в 110—120 г/мм². Это усилие превышает оптический предел упругости примерно в 1,5 раза, но значительно ниже механического предела упругости.

Для исследования рельефа поверхности деформированных образцов был применен метод контрастированных кварцевых реплик. Используя то обстоятельство, что каменная соль хорошо растворяется в воде, операция изготовления реплик была упрощена в целях уменьшения возможных искажений. Вначале исследуемые поверхности, представляющие собой плоскости спайности, оттенялись хромом в вакууме непосредственно, а затем здесь же покрывались слоем кварца из другого испарителя. Как показали опыты, пленка кварца достаточно прочно прилипла к хрому.

При просмотривании кристаллов с нанесенной репликой в поляризованном свете места, где полосы скольжения отсутствовали, освобождались от пленки кварца. Остальная часть пленки разрезалась острым лезвием на квадратики размером 2×2 мм² и отделялась от кристалла при его растворении в воде. Квадратики пленки улавливались на сетку, просушивались и вместе с сеточкой укладывались в объектодержатель.

Реплики просматривались в 50-киловольтном электронном микроскопе при увеличениях от $5000 \times$ до $8000 \times$. Картины, характеризующие рельеф следов полос скольжения, фотографировались. В том случае, когда та или иная полоса вызывала особый интерес, ее фотографировали участками на нескольких пластинках, а из отпечатков впоследствии монтировались панорамные изображения.

На рис. 1а представлен след полосы скольжения, обнаруженный на грани (100). Направление полосы параллельно диагонали [011] этой грани. Средняя часть профиля полосы вогнута, ширина этой

вогнутой части составляет 0,4 μ . По краям полосы видны валики шириной около 0,1 μ , окаймляющие вогнутую часть.

Подобный след полосы, обнаруженный на грани (100), изображен на рис. 1б. Кристалл деформирован растяжением. В отличие от предыдущей, эта полоса имеет в своей средней части не одну, а две вогнутых поверхности, которые, пересекаясь, образуют подобие гребня. По краям полосы расположены валики, как и на рис. 1а.

На рис. 1в изображены следы двух полос, обнаруженных на грани (100) неотожженного кристалла, деформированного сжатием. На этих следах заметна штриховка под углом примерно в 45° к направлению полос, но валики, окаймляющие полосу скольжения, отсутствуют.

На рис. 1г представлены следы нескольких систем полос скольжения, обнаруженных на грани (100) кристалла, протравленного после деформации водой. На рисунке заметны следы полосы шириной порядка 0,05 μ , сохраняющие форму профиля следов полос, представленных на предыдущих рисунках. Направления систем тонких полос различны и отличаются от направления [011] на небольшие углы в ту или другую сторону. В результате этого тонкие полосы часто пересекаются как друг с другом, так и с более толстыми полосами. Профиль следов полос скольжения у кристаллов, смоченных водой, несколько скруглен.

Судя по приведенным фотографиям, можно сказать, что они изображают следы единичных полос скольжения, а не их пакеты.

Так как грани (100) и $(\bar{1}00)$ параллельны плоскости сдвига, то, на первый взгляд, непонятна причина образования на них следа полосы скольжения. Однако можно допустить, что остаточные напряжения, появляющиеся в результате искажений решетки при сдвиге, ответственные за искажения плоскостей (100) и $(\bar{1}00)$. Под влиянием этих напряжений происходит образование валиков и впадин, наличие которых говорит о существовании третьей составляющей деформации в области сдвига.

Оценка величины всесторонних остаточных напряжений, сделанная в (2), вполне соответствует наблюдающимся искажениям граней (100) и $(\bar{1}00)$.

В некоторых случаях внутри области сдвига образуется штриховка (рис. 1в), обнаруженная на следах полос скольжения. Эта штриховка может быть связана с особыми условиями на поверхности кристалла и, следовательно, с возможным растрескиванием вследствие сдвигов, происходящих в области полосы скольжения.

Считая, что штриховка, наблюдаемая на полосах скольжения, является следами субмикроскопических трещинок, можно оценить их глубину, сравнивая работу деформации с энергией образования поверхности при растрескивании. Так как обнаруженные следы полос скольжения образовались при напряжениях значительно ниже механического предела упругости, то работа деформации будет весьма мало отличаться от упругой энергии деформированного кристалла. Это обстоятельство дает возможность допустить, что:

$$U_d \approx \frac{1}{2} s_{11} p^2, \quad (1)$$

где p — напряжение, s_{11} — соответствующая упругая константа.

Энергия трещин, образовавшихся при растрескивании поверхности, равна;

$$U_n = \sigma q = 2\sigma b h n N, \quad (2)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; b — расстояние между трещинами; h — глубина трещины; n — число трещин, приходящихся на единицу длины кристалла; N — число полос скольжения на 1 см^2 боковой поверхности образца.

Считая, что $U_n < U_d$ и подставляя численные значения: $p = 10^7 \text{ дин/см}^2$, $s_{11} = 23 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2/\text{дин}$, $\sigma = 315 \text{ эрг/см}^2$, $b = 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, $n = 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$, $N = 50 \text{ см}^{-2}$, получим:

$$h < 0,02 \text{ мм.}$$

Появление таких трещин может послужить причиной понижения прочности после образования полос скольжения⁽³⁾. Кроме того, то обстоятельство, что трещины неглубоки, хорошо согласуется с известными опытами по повышению прочности при растворении деформируемого кристалла с поверхности⁽⁴⁾.

Отсюда следует, что упрочняющее действие воды можно объяснить как следствие удаления трещин, возникающих при образовании полос скольжения.

Наличие у деформированного кристалла большого количества следов полос скольжения с шириной от $0,01$ до 1μ и выше говорит о том, что отдельные полосы скольжения могут заключать в себе как тонкие — от $0,01 \mu$, — так и толстые — вплоть до десятых миллиметра⁽⁵⁾ слои деформированного кристалла. Судя по форме рельефа, строение тонких полос скольжения не отличается от строения толстых полос, хорошо изученных ранее рядом авторов оптическими и другими методами.

Поступило
1 VIII 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. В. Якутович, Э. С. Яковлева и др. Сборн., посвящ. 70-летию акад. А. Ф. Иоффе, 1950, стр. 366. ² Р. И. Гарбер, ЖЭТФ, 8, в. 6, 746 (1938); 6, в. 2, 176 (1936). ³ А. В. Степанов, ЖЭТФ, 7, в. 5, 663 (1937); 7, в. 5, 669 (1937). ⁴ А. Ф. Иоффе, Физика кристаллов, 1929. ⁵ Н. А. Бриллиантов, В. И. Старцев, ЖЭТФ, 9, в. 5, 592 (1939).