

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Я. Е. ГЕГУЗИН и Н. Н. ОВЧАРЕНКО

**О СОСТОЯНИИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУРАХ**

(Представлено академиком Н. В. Беловым 7 VII 1954)

В данной работе изучалось состояние металлической поверхности при высоких температурах. Опыты проводились над образцами меди.

1. Проводившиеся эксперименты заключались в следующем. Поликристаллический образец меди тщательно полировался либо механическим способом (полировка на суконных дисках), либо электролитически, после чего подвергался отжигу в высоком вакууме ($\sim 10^{-5}$ мм). После очередного этапа отжига поверхность образца изучалась при помощи металлмикроскопа и микроинтерферометра типа МИИ-1. Для осуществления высокотемпературных экспозиций образец помещался в малоинерционную тонкостенную кварцевую ампулу, которая в начале экспозиции погружалась в разогретую до надлежащей температуры печь и удалялась из печи после окончания экспозиции; такой способ обеспечивал нагрев и охлаждение образца за весьма малые промежутки времени. Исследовавшийся образец помещался не непосредственно в кварцевую ампулу, а вместе с термпарой располагался в медной пробирке, в торцах которой были отверстия, необходимые для ее откачки. Применение медной пробирки было вызвано стремлением уменьшить общее испарение с поверхности меди и обеспечить вокруг образца атмосферу насыщенных паров меди.

2. Совокупность сделанных наблюдений при изучении временной и температурной зависимостей явлений, происходящих на поверхности, сводится к следующему.

1) После отжига при высокой температуре (850—950°) на поверхности образца вырисовываются контуры кристалликов, при этом на каждом из кристалликов отчетливо наблюдается ступенчатость («естественная шероховатость», см. рис.1*). Направление ступенек, их глубина и период на каждом из кристалликов иные и постоянны в пределах данного кристаллика. Будучи удаленной механической или электролитической полировкой, «естественная шероховатость»** воспроизводится на повторном отжиге.

2) Окисляемость отдельных градей ступенек различна и в пределах зерна неизменна.

3) При температурах более низких, чем 800°, описанные явления за времена порядка часов (2—3 часа) практически не наблюдаются.

* Фотографии, подобные изображенной на рис. 1, были опубликованы А. И. Одигом и М. Г. Лозинским (4).

** Заметим, что описываемая «естественная шероховатость», наблюдаемая на поверхности произвольного сечения кристалла плоскостью шлифа отнюдь не является предсказанной Я. И. Френкелем (1) шероховатостью кристаллических граней, характеризуемых малыми значениями поверхностного натяжения; на последних согласно (1) в результате тепловых флуктуаций должны возникать вицинальные грани с несколько повышенным поверхностным натяжением, в связи с чем кристаллические грани при повышении температуры должны становиться шероховатыми.

4) На ранних стадиях ($t = 1-10$ мин.) шероховатость появляется не в форме готовых ступенек, а в виде прерывистых линий, которые в пределах зерна параллельны; отдельные штрихи удлиняются с течением экспозиции (см. рис. 2). На некотором этапе (при $T = 850^\circ$, $t = 5$ мин.) неоформившиеся еще ступеньки исчезают, при этом их исчезновение сопровождается изменением контура зерен. На дальнейших этапах отжига очаги «естественной шероховатости» опять появляются, при этом их направления связаны с новой огранкой зерен. На описываемом этапе высота очагов шероховатости, определенная по излому интерференционных линий, порядка $5 \cdot 10^{-6}$ см.

5) На более далеких стадиях процесса наблюдается увеличение высоты ступенек и их периода; на некотором этапе (при $T = 950^\circ$, $t = 4,5$ часа) отчетливо оформленная «естественная шероховатость» отдельных зерен исчезает, что сопровождается возникновением нового видимого контура зерен. В поле шлифа отчетливо виден новый контур зерен и при некоторой дефокусировке оптики или при помощи интерферометра — контуры, предшествовавшие данному.

3. Описанные явления могут явиться результатом стремления к минимуму поверхностной энергии, который в связи с анизотропией коэффициента поверхностного натяжения может не совпадать с минимумом поверхности. В пользу такой точки зрения свидетельствуют фотографии (см. рис. 3), из которых следует, что в пределах естественной грани кристалла шероховатости нет; наблюдающаяся шероховатость связана с переходом с грани на грань. Об этом также свидетельствует неизменное в пределах зерна различие цветов окислов граней каждой ступеньки.

Возникновение шероховатости может быть на основании изложенных наблюдений описано как происходящее путем возникновения «зародышей шероховатости», имеющих форму шатра. Критический размер способного к росту зародыша может определяться конкуренцией двух тенденций: выигрыша энергии в связи с появлением боковых поверхностей шатра и проигрыша в связи с появлением торцевых поверхностей. Ориентация зародышей и направление их роста однозначно связаны с ориентацией данного монокристаллика. В связи с этим процесс рекристаллизации, ведущий к изменению ориентации монокристаллика относительно поверхности шлифа, и является причиной исчезновения возникших зародышей и даже сформировавшихся ступенек, которые, возникая сызнова, ориентируются в соответствии с новой ориентацией монокристалликов (см. рис. 4).

Наблюдаемые на некотором этапе контуры двух семейств границ зерен (см. рис. 2) могут быть объяснены фактом более интенсивного испарения меди из границ, в связи с чем на новом зерне наблюдаются углубления в том месте, где прежде проходила граница зерна.

Заметим, что изменение свободной энергии недеформированного поликристалла может происходить по двум причинам: уменьшение поверхностной энергии на границе металл — вакуум (появление «естественной шероховатости») и уменьшение межфазной поверхностной энергии (рекристаллизация). В наших опытах появление шероховатостей предшествовало собирательной рекристаллизации, что, видимо, может быть объяснено меньшей энергией активации поверхностной диффузии по сравнению с объемной диффузией, ответственной за процесс рекристаллизации.

Харьковский государственный университет
им. А. М. Горького

Поступило
14 IV 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Я. И. Френкель, ЖЭТФ, 16, в. 1 (1946). ² П. И. Лукирский, ДАН, 46, № 7, 300 (1945). ³ М. П. Шаскольская, см. А. В. Шубников, Как растут кристаллы, 1936. ⁴ А. И. Одинг, М. Г. Лозинский, ДАН, 86, № 4, 707 (1952).

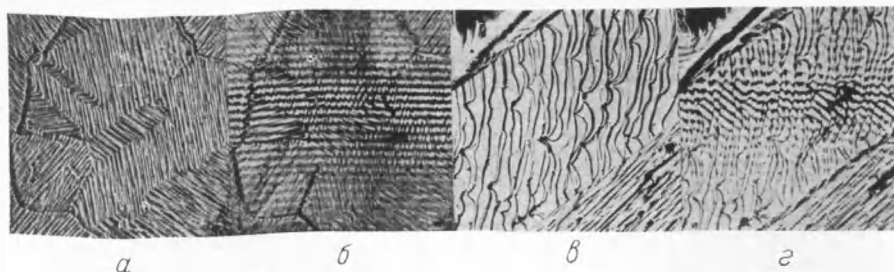


Рис. 1. *a* — $T = 900^\circ$, $t = 30$ мин.; *б* — то же, что *a*, с интерференционной картиной; *в* — $T = 950^\circ$, $t = 10$ час., *г* — то же, что *в*, с интерференционной картиной. $\times 270$

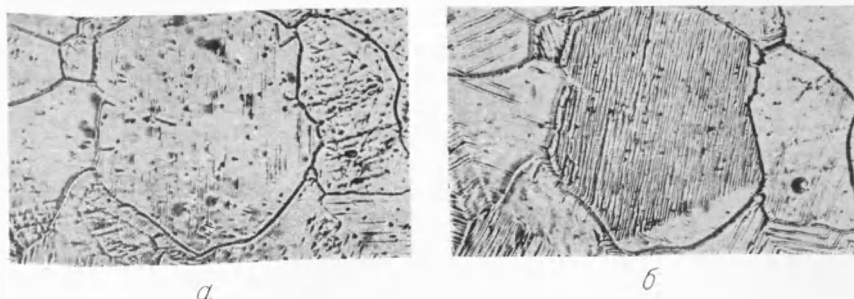


Рис. 2. *a* — $T = 950^\circ$, $t = 2$ мин.; *б* — $T = 950^\circ$, $t = 30$ мин. $\times 270$

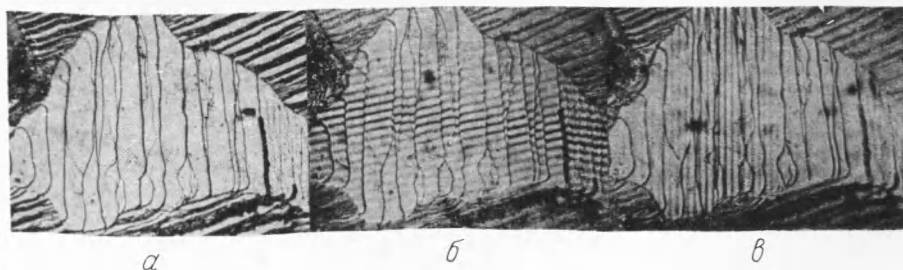


Рис. 3. *a* — $T = 950^\circ$, $t = 3,5$ час.; *б* — то же, что *a*, с интерференционной картиной; *в* — то же, что *a*, с интерференционной картиной. $\times 270$

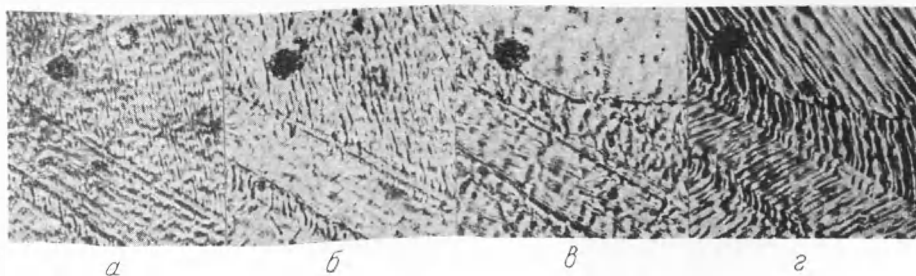


Рис. 4. *a* — $T = 850^\circ$, $t = 1$ мин.; *б* — $T = 850^\circ$, $t = 2$ мин.; *в* — $T = 850^\circ$, $t = 5$ мин.; *г* — $T = 850^\circ$, $t = 10$ мин. $\times 270$