

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Член-корреспондент АН СССР И. А. ОДИНГ, М. Г. ЛОЗИНСКИЙ
и С. Г. ФЕДОТОВ

О ПЕРЕМЕЩЕНИИ ГРАНИЦ ЗЕРЕН НАГРЕТОГО МЕТАЛЛА

Используя метод выявления структуры металла путем нагревания шлифа в вакууме (¹⁻⁴), М. Г. Лозинский наблюдал (⁵) двойную систему границ полиэдров. В результате двух последовательных нагревов в вакууме высоколегированной хромоникельмолибденовой аустенитной стали (первого при температуре 1200° и выдержке в течение 15 мин. и второго при 1300° 10 мин.) он зафиксировал на шлифе этой стали две сетки, отображающие положение границы между полиэдрами аустенита при указанных температурах.

Несколько позже И. А. Одингом и М. Г. Лозинским было показано (⁶), что границы между полиэдрами, выявленные при нагревании шлифа в вакууме, сохраняются при последующем нагреве до более высокой температуры лишь в течение некоторого промежутка времени, после чего они «растворяются» и исчезают с шлифа. Это обстоятельство указало, что можно найти такие режимы выявления структуры металла путем нагрева его в вакууме, которые позволили бы более детально вскрыть механизм перемещения границ зерен в процессе их роста.

В данной работе приводятся результаты проведенных авторами исследований в области кинетики роста зерен стали У-12 и оловянистой бронзы при изотермической выдержке в рабочей камере с остаточным давлением порядка $5 \cdot 10^{-4}$ — $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. *.

На рис. 1 представлена микрофотография шлифа стали У-12 после выдержки в вакууме при температуре 1100° в течение 1 часа и на рис. 2 — микрофотография шлифа оловянистой бронзы (12 вес. % олова) после нагрева в вакууме при 780° в течение 15 мин.

На обоих шлифах четко видны последовательные положения границ растущего зерна в виде ряда дугообразных линий. Возникновение этих линий на поверхности образца, нагреваемого в вакууме, происходит вследствие избирательного испарения атомов, обладающих меньшей энергией связи в кристаллической решетке. В результате испарения образуется рельеф, выявляющий прежде всего очертания границ зерен при данной температуре, а также неоднородности внутреннего строения самих зерен.

Образующиеся границы зерен представляют собой углубления, своеобразные «канавки», глубина и ширина которых зависит от температуры и длительности выдержки, а также от состава образца. При изотермической выдержке в ряде случаев удается проследить кинетику роста зерен по следам расположения их границ в различных стадиях процесса.

* Нагрев образцов в вакууме производился путем пропускания по образцу переменного тока промышленной частоты, что обеспечивало быстрое повышение температуры до заданного значения. Например, при нагреве стальных образцов до 1100° эта температура достигалась за 1,5—2 мин.

На микрофотографиях рис. 1 и 2 первоначальные и промежуточные очертания границ зерен видны менее четко, нежели на последних ступенях перемещения. Это может быть объяснено различной скоростью испарения, протекающего более интенсивно с выступающих участков, нежели с выемок. На процесс выравнивания рельефа, повидимому, оказывают влияние также силы поверхностного натяжения.

Направление перемещения границ полиэдров и увеличения четкости рельефа границ указано стрелками. Из рассмотрения обеих микрофотографий можно сделать следующие заключения.

Во-первых, как правило, границы зерен, перемещаясь, сохраняют свою криволинейную форму, причем граница растущего зерна остается вогнутой в сторону продвижения фронта границ. Этим подтверждается теория, согласно которой причиной передвижения границы зерна является преимущественная задержка атомов при их обмене между двумя соседними зернами, так как часть сферы атомарного действия у границы зерна с вогнутой поверхностью будет больше, чем у зерна с выпуклой поверхностью, и, следовательно, вероятность задержки атомов, перешедших из зерна с выпуклой поверхностью в зерно с вогнутой поверхностью, будет также больше (⁷⁻¹⁰).

Правда, микрофотографии рис. 1 и 2 подтверждают еще, что некоторая нескомпенсированность обмена атомами может иметь место и при плоской границе — повидимому, из-за различия в ориентации соприкасающихся зерен (это особенно ярко видно на участке *a* рис. 1). Однако К. П. Бунин (⁷) правильно отмечает, что роль этого фактора мала и им можно пренебречь.

Во-вторых, неравенство контактных углов у трех соприкасающихся зерен также служит побуждающей причиной перемещения границ зерен (⁹). Перемещение границ зерен приводит, как правило, к выравниванию контактных углов до 120°. Углы α , β и γ на рис. 1 равны, соответственно, около 110, 129 и 121°. Отклонения углов от 120° не превышают 7—8%.

В-третьих, перемещение границ зерен происходит не непрерывно, а дискретно, по схеме: перемещение (скачок) — пауза. Доказательством такого механизма перемещения границ зерен для исследованных материалов (стали У-12 и оловянистой бронзы) служат зафиксированные на микрофотографиях последовательные положения границ зерен в виде дугообразных линий. Полученные следы границ могли появиться только во время паузы, так как селективное испарение атомов в вакууме может иметь место с достаточно четким микроструктурным эффектом лишь после некоторой минимальной выдержки.

Внимательное рассмотрение фронта движения границ зерен позволяет также отметить, что это перемещение не всегда происходит с одинаковой скоростью по всему фронту: наряду с линиями фронта, приблизительно параллельными друг другу, на представленных микрофотографиях можно наблюдать и пересекающиеся линии фронта.

Простым измерением можно установить, что расстояние между двумя соседними линиями фронта составляет для стали У-12 около 5—6 μ , или 1400—1700 параметров кристаллической решетки γ -железа, а для оловянистой бронзы около 3,0÷4,5 μ , или около 1000—1300 параметров кристаллической решетки. Повидимому, один «скачок» перемещения границы зерна и происходит на величину указанного выше порядка.

Можно полагать, что величина одного скачка перемещения границ зерен может происходить не только от нескомпенсированного обмена атомами между двумя соседними зернами. Повидимому, перемещение границы зерен происходит еще и таким способом, когда зерно с вогнутой поверхностью энергетически «подавляет» целую пограничную с ним полосу соседнего зерна с выпуклой поверхностью, заставляя атомы

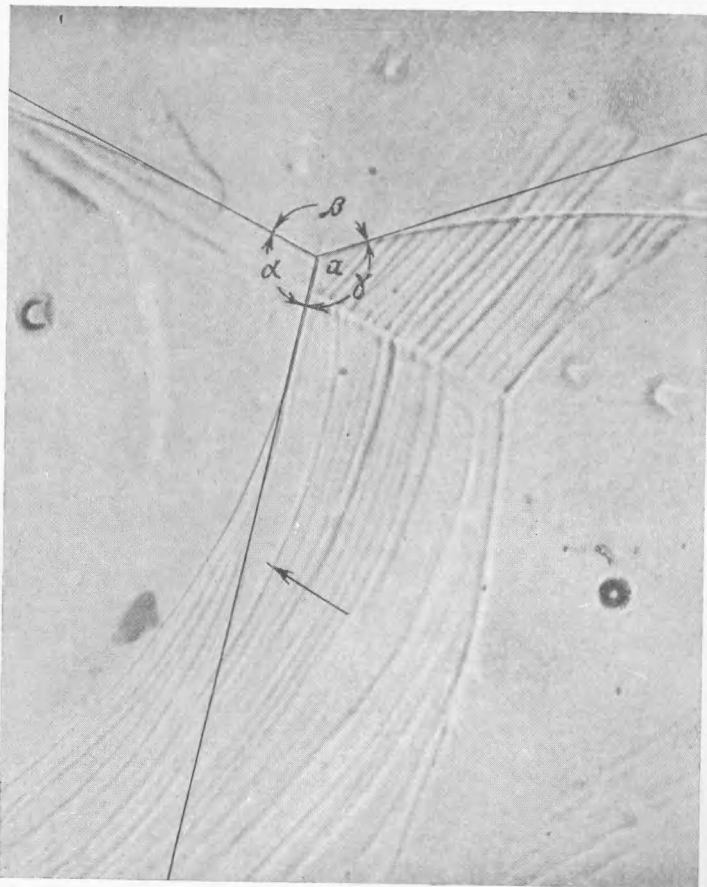


Рис. 1

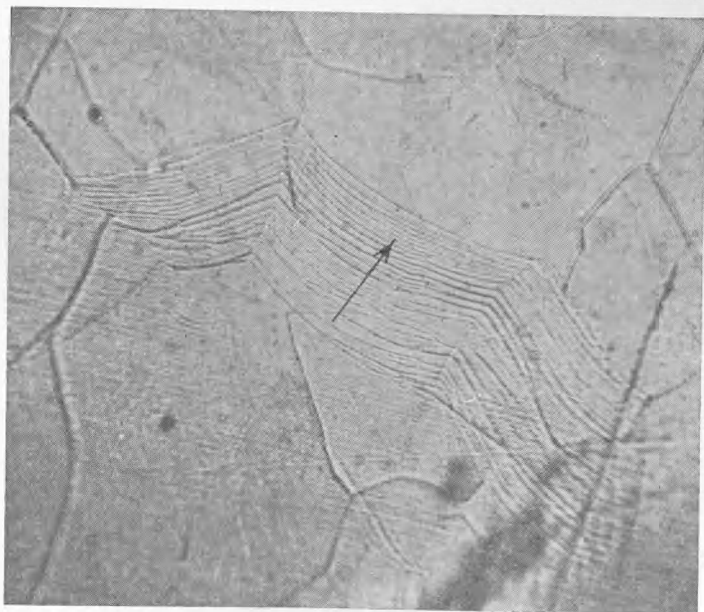


Рис. 2

в этой полосе перестроиться в соответствии со своей кристаллографической ориентацией.

Перемещение границ зерен из-за нескомпенсированного обмена атомами между двумя соседними зернами будет происходить постепенно и тем интенсивнее, чем интенсивнее процесс обмена. Этот процесс тождественен с растворно-осадительным механизмом пластической деформации, обнаруженным А. А. Бочваром ⁽¹¹⁾ и состоящим в перемещении вещества за счет переноса атомов.

Перемещение же границ зерен путем энергетического «подавления» одним зерном целой пограничной полосы другого зерна будет происходить скачком, путем одновременной перестройки целого объема кристаллической решетки, возможно путем такого же сдвига ее, какой наблюдается при пластической деформации и бездиффузионных фазовых превращениях.

По представленным микрофотографиям можно установить и среднюю линейную скорость передвижения границ зерен. Простым измерением, зная время выдержки при указанных температурах, можно вычислить, что у стали У-12 граница зерна перемещалась со средней линейной скоростью 0,10 ÷ 0,16 мм/час, а у оловянистой бронзы 0,30 ÷ 0,40 мм/час. Эти скорости значительно меньше тех, которые были установлены при исследовании рекристаллизации пластически деформированных металлов (алюминий, кадмий, олово, железо) и описаны в обстоятельных работах М. Корнфельда с сотр. ⁽¹²⁾. Это и понятно, так как в нашем случае изучался рост зерен у недеформированных металлов.

Наконец, считая, что каждая последовательная перестройка пограничной полосы происходит мгновенно, можно определить, что средняя продолжительность паузы для стали У-12 составила около 2—3 мин., а у оловянистой бронзы около 0,5 мин.

Институт машиноведения
Академии наук СССР

Поступило
11 V 1953

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. А. Байков, Собр. тр., 2, изд. АН СССР, 1948, стр. 62. ² Н. Чижевский, Н. Шульгин, Журн. Русск. металл. об-ва, № 4 (1915). ³ Л. И. Шупанов, Металлург, № 6 (1937). ⁴ К. Л. Малышев, И. В. Трубин, Тр. Уральск. фил. АН СССР, 10, 39 (1947). ⁵ М. Г. Лозинский, ДАН, 82, № 1, стр. 53 (1952). ⁶ И. А. Одинг, М. Г. Лозинский, ДАН, 89, № 2 (1953). ⁷ К. П. Бунин, Железоуглеродистые сплавы, 1949. ⁸ Т. Sutoki, Sci. Rep. Tohoku Imp. University, 17, 857 (1928). ⁹ D. Harker, E. Parker, Trans. Am. Soc. f. Metals, 34, 156 (1945). ¹⁰ С. S. Smith, Metals Technology, Jule (1948). ¹¹ А. А. Бочвар, Изв. АН СССР, ОТН, № 5 (1948). ¹² М. О. Корнфельд с сотр., Phys. Z. Sowjetunion, 6, 170, 329, 537, 647 (1934); 7, 432 (1935); 8, 528 (1935); 11, 302 (1937); 12, 301, 658 (1937).