

Лекция 2. Строение реальных металлов.

2.1. Дефекты строения кристаллических тел.

Из жидкого расплава можно вырастить монокристалл, т. е. кусок металла, представляющий собой один кристалл. Размеры монокристаллов невелики, их обычно используют в лабораториях для изучения свойств того или иного вещества.

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, различно ориентированных в пространстве, т. е. они имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы, обычно называемые *зернами*, имеют неправильную форму. Каждое зерно имеет свою ориентировку кристаллической решетки, отличную от ориентировки соседних зерен, вследствие чего свойства реальных металлов усредняются и явление анизотропии не наблюдается. Размер зерен бывает от 1 до 10000 мкм, чаще всего около 100 мкм. Зерна разориентированы, повернуты относительно друг друга на десятки градусов (рис. 1). На границах между зернами атомы не имеют правильного расположения. Здесь существует переходная область шириной в несколько атомных диаметров, в которой решетка одного зерна переходит в решетку другого зерна с иной ориентацией. Кроме того, здесь скапливаются примеси, включения и дефекты.

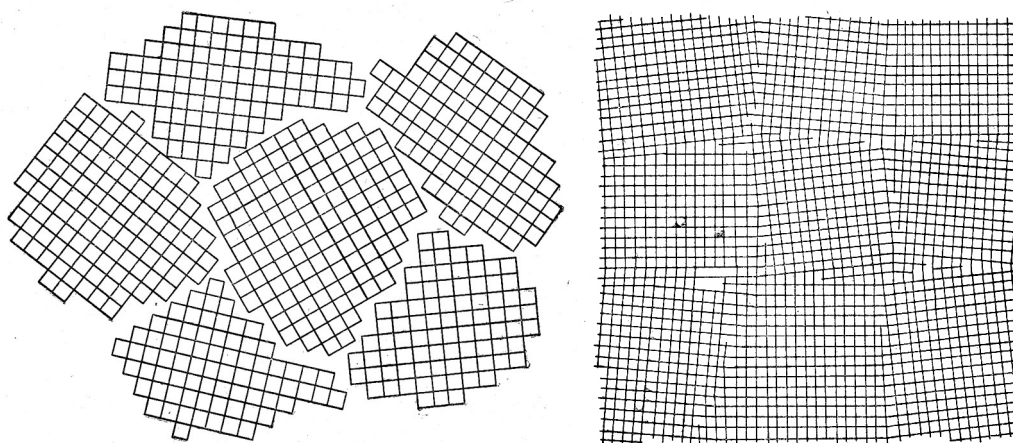


Рис 1, 2

Состояние границ зерен в металлах оказывает большое влияние на их свойства, в частности на прочность. Прочность может либо увеличиваться вследствие искажений кристаллической решетки вблизи границ, либо уменьшаться ввиду наличия примесей, концентрации дефектов.

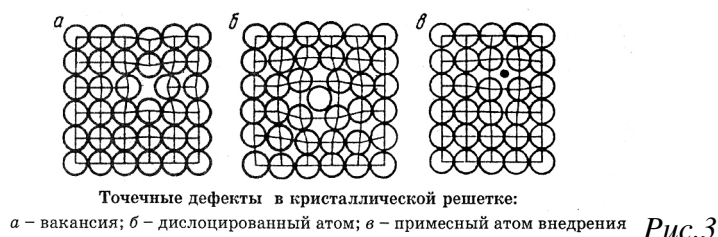
Если рассмотреть зерно при большом увеличении, то можно заметить, что внутри имеются участки, разориентированные друг относительно друга на несколько градусов. Такие участки называют *фрагментами*. Под электронным микроскопом видно, что каждый фрагмент содержит большое количество блоков размером $10^{-3} - 10^{-5}$ см, разориентированные на незначительные углы — в несколько минут. Такая структура называется блочной или мозаичной (рис. 2). Свойства металлов будут зависеть как от размеров блоков, фрагментов и зерен, так и от их взаимной ориентации.

Изучение строения металлов позволило установить, что внутреннее кристаллическое строение зерна не является правильным. В кристаллических решетках реальных металлов существуют различные дефекты (несовершенства), которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов. Различают следующие структурные несовершенства: точечные, линейные поверхностные и объемные.

2.2. Точечные дефекты.

Точечные, или нуль-мерные, дефекты — нарушения периодичности в изолированных друг от друга точках решетки; во всех трех измерениях они не превышают одного или нескольких междуатомных расстояний (параметров решетки). Различают:

- (а) *Вакансии* – отсутствие атома или иона в узле кристаллической решетки (рис.3, а).
- (б) *Внедренные* (или *междуузельные*, или *дислоцированные*) атомы – атомы, сместившиеся из узлов кристаллической решетки в междуузельные промежутки (рис.3, б).
- (с) *Примеси замещения* – заменяют частицы основного вещества в узлах решетки.
- (д) *Примеси внедрения* – занимают междуузлия (рис. 3, в).



Точечные дефекты приводят к локальным изменениям межатомных расстояний и, следовательно, к искажениям кристаллической решетки. При этом увеличивается сопротивление решетки дальнейшему смещению атомов, что способствует некоторому упрочнению кристаллов и повышает их электросопротивление.

2.3. Линейные дефекты.

Линейный дефект — это нарушение правильности структуры вдоль линии (не обязательно прямой). Поперечные размеры линейного дефекта не превышают одного или нескольких междуатомных расстояний, а длина может достигать размера кристалла.

К нестабильным линейным дефектам кристалла относятся цепочки точечных дефектов — вакансий или междуузельных атомов, но длительно существовать они не могут.

Устойчивыми, стабильными в кристалле являются *дислокации*, т.е. линейные искажения типа обрыва или сдвига атомных слоев, нарушающие правильность их чередования в решетке.

Как отмечено выше, пластическая деформация в кристалле происходит вдоль определенных плоскостей, в определенных направлениях. Распространяется она не мгновенно, а постепенно, т.е. в процессе пластической деформации в каждый момент в кристалле можно обнаружить движущуюся границу между областью, в которой уже прошла пластическая деформация (пластический сдвиг), и областью, где деформации еще нет. Эта граница и есть линия дислокации. Концы этой линии выходят на поверхность кристалла или же она образует внутри кристалла замкнутую *дислокационную петлю*. В зависимости от того, как расположены участки этой линии по отношению к вектору сдвига, различают краевые и винтовые дислокации.

Краевую дислокацию в кристалле можно представить как границу неполной атомной плоскости (рис. 4). На рисунке видно, что край оборванной плоскости в решетке образуется, если вдвинуть сверху полуплоскость между плоскостями идеального кристалла или оборвать полуплоскость снизу. Обратим внимание на то, что на рисунке показана лишь одна атомная сетка и выход дислокации на эту сетку. Структуру надо представлять себе протяженной, а дислокацию — линией, уходящей за плоскость чертежа.

Кристалл с краевой дислокацией можно образно представить себе как книгу, в которой одна из страниц наполовину оборвана. Ширина области дислокаций не превышает нескольких межуатомных расстояний.

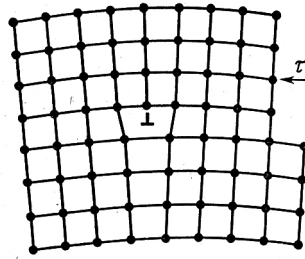
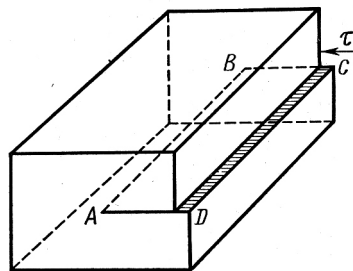


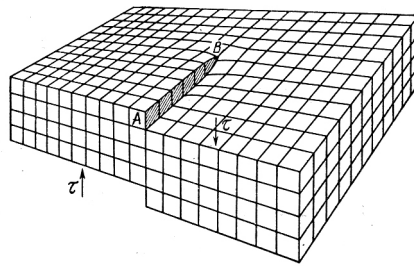
Схема краевой дислокации (τ — вектор сдвига)



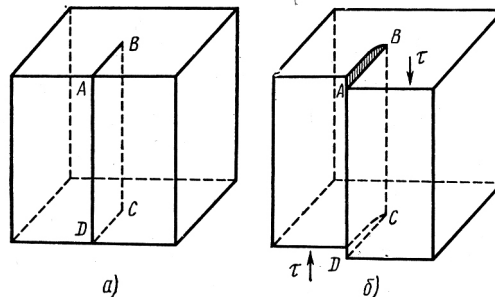
Сдвиг, создавший краевую дислокацию:
 AB — линия краевой дислокации, CD — ступенька на поверхности кристалла, τ — вектор сдвига

Рис.4

Винтовая дислокация (рис. 5) в кристалле тоже возникает при сдвиге одной части кристалла относительно другой, но в отличие от краевой линия винтовой дислокации параллельна вектору сдвига. Линия BC , отделяющая сдвинутую часть от несдвинутой, и есть линия винтовой дислокации.



Винтовая дислокация (τ — вектор сдвига)



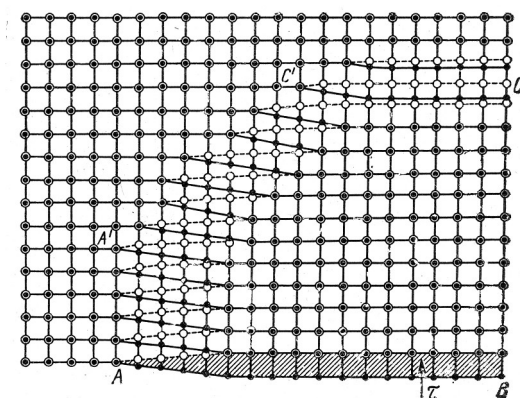
Сдвиг, создавший винтовую дислокацию:
 BC — линия винтовой дислокации, AB — ступенька на поверхности кристалла, τ — вектор сдвига

Рис.5

Кристалл, содержащий винтовую дислокацию, состоит не из параллельных атомных плоскостей, а как бы из одной-единственной атомной плоскости, закрученной как винтовая лестница. Ось этого винта ВС и есть линия винтовой дислокации. Выход винтовой дислокации на поверхность кристалла заканчивается незарастающей ступенькой. Если попробовать «залечить» винтовую дислокацию, добавив недостающую атомную плоскость, то ступенька только сдвинется на одно межплоскостное расстояние, но не ликвидируется.

Так же как для краевой дислокации, в случае винтовой дислокации искажения решетки сосредоточены вблизи линии дислокации в узкой области диаметром в несколько междуатомных расстояний.

В реальном кристалле область сдвига может быть ограничена более сложной, в общем случае криволинейной, границей АС (рис. 6), или *смешанной дислокацией*. На рисунке показана схема расположения атомов в области смешанной дислокации, причем выделены краевая (СС) и винтовая {А'А} компоненты.



Смешанная дислокация $AA'C$ в простой кубической решетке

Рис.6

Линия дислокации не может кончатся внутри кристалла. Она должна либо выходить на поверхность кристалла, либо разветвляться на другие дислокации, либо образовывать внутри кристалла замкнутую петлю.

2.4. Движение дислокаций.

Движение дислокаций связано с пластической деформацией кристалла.

Пусть под действием внешней силы в кристалле произошел сдвиг и границей области сдвига является краевая дислокация (рис. 7, а). Для того чтобы этот сдвиг распространялся дальше и дислокация передвинулась в плоскости скольжения на одно межплоскостное расстояние, не нужен перенос массы и не нужно разрывать связи во всех атомных плоскостях, пересекающих плоскость скольжения. Достаточно, чтобы разорвалась связь по одной соседней плоскости, тогда дислокация переместится на одно междуатомное расстояние вправо (рис. 7,б). При этом лишняя атомная полуплоскость сама никуда не перемещается, а как бы передает «эстафету» соседней плоскости: целостность плоскости, которая была оборванной, восстанавливается, а соседняя плоскость становится оборванной. Сдвиг происходит не одновременно по всей плоскости скольжения, а зарождается в слабом месте и постепенно распространяется по плоскости, так что в каждый момент в энергетически невыгодном положении находится лишь относительно небольшое количество атомов около границы между сдвинутой и несдвинутой частями кристалла. Граница зоны сдвига, т. е. линия дислокации, перемещается в плоскости скольжения «по эстафете». Когда скользящая краевая дислокация пересекает весь

кристалл и выходит на его поверхность, верхняя половина кристалла оказывается сдвинутой относительно нижней на одно межплоскостное расстояние, так что на боковой поверхности кристалла образуется ступенька, а на всем пути, где прошла дислокация, восстанавливается целостность решетки (рис. 7, в).

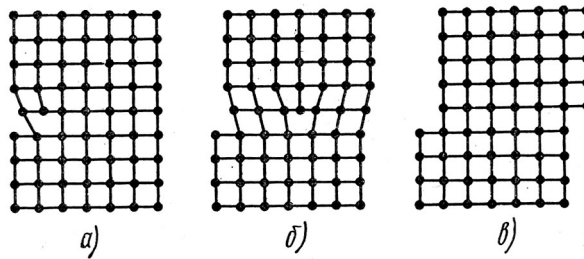


Схема пластического скольжения, осуществляемого перемещением краевой дислокации

Рис. 7

Плоскость, в которой движется краевая дислокация, — это *плоскость скольжения*, а направление вектора сдвига определяет *направление скольжения*.

Для винтовой дислокации однозначно определено только направление скольжения, совпадающее с осью дислокации, а плоскостью скольжения может быть любая атомная плоскость, содержащая это направление.

2.5. Плотность дислокаций

Дислокации образуются уже при кристаллизации металлов, а также в ходе пластической деформации и фазовых превращений. Плотность дислокаций может достигать большой величины. Под *плотностью дислокаций* ρ обычно понимают суммарную длину дислокаций Σl , приходящуюся на единицу объема V кристалла: $\rho = \Sigma l / V$. Таким образом, *плотность дислокаций* выражается в см^{-2} .

Плотность дислокаций может быть определена экспериментально при больших увеличениях подсчетом числа выходов дислокаций на единицу площади предварительно протравленного металлографического шлифа, а также при изучении структуры тонких пленок на просвет в электронном микроскопе.

2.6. Теоретическая и фактическая прочность.

Использование теории дислокаций позволило объяснить большое расхождение между теоретической и фактической прочностью металлов. Теоретическая прочность должна быть пропорциональна произведению сил межатомной связи на число атомов в сечении кристалла.

Расчетное усилие для смещения одной части кристалла относительно другой оказалось на 2-3 порядка выше фактически затрачиваемого при пластической деформации металла. Так, теоретическая прочность железа составляет около 13 000 МПа, а фактическая - всего 250 МПа.

Такое расхождение теоретической и фактической прочности объясняется тем, что деформация происходит не путем одновременного смещения целых атомных плоскостей, а за счет постепенного перемещения дислокаций, для которого требуется меньшее усилие.

Пластическая деформация кристаллических тел связана с количеством дислокаций, их шириной, подвижностью, степенью взаимодействия с дефектами решетки и т. д. Характер связи между атомами влияет на пластичность кристаллов. Так, в неметаллах с их жесткими направленными связями дислокации очень узкие, они требуют больших напряжений для старта – в 10^3 раз больше, чем для металлов. В результате хрупкое разрушение в неметаллах наступает раньше, чем сдвиг.

Таким образом, причиной низкой прочности реальных металлов является наличие в структуре материала дислокаций и других несовершенств кристаллического строения. Получение бездислокационных кристаллов приводит к резкому повышению прочности материалов (рис. 8). Левая ветвь кривой соответствует созданию совершенных бездислокационных нитевидных кристаллов (так называемых «усов»), прочность которых близка к теоретической.

При ограниченной плотности дислокаций и других искажений кристаллической решетки процесс сдвига происходит тем легче, чем больше дислокаций находится в объеме металла.



Рис. 8

С ростом напряжений возрастает число источников дислокаций в металле и их плотность увеличивается. Помимо параллельных дислокаций возникают дислокации в разных плоскостях и направлениях. Дислокации воздействуют друг на друга, мешают друг другу перемещаться, происходит их аннигиляция (взаимное уничтожение) и т. д. С повышением плотности дислокаций их движение становится все более затрудненным, что требует увеличения прилагаемой нагрузки для продолжения деформации. В результате металл упрочняется, что соответствует правой ветви кривой рис. 8.

Упрочнению способствуют и другие несовершенства кристаллического строения, также тормозящие движение дислокаций. К ним относятся атомы растворенных в металле примесей и легирующих элементов, частицы выделений второй фазы, границы зерен или блоков и т. д. На практике препятствие движению дислокаций, т. е. упрочнение, создается введением других элементов (легированием), наклепом, термической или термомеханической обработкой. Снижение температуры также препятствует свободному перемещению дислокаций. При низких температурах прочность растет, а пластичность падает. Металл становится более прочным, но хрупким.

Таким образом, повышение прочности металлов и сплавов может быть достигнуто двумя путями: (1) получением металлов с более близким к идеальному строением кристаллической решетки, т. е. металлов, в которых отсутствуют дефекты кристаллического строения или же их число крайне мало; (2) либо, наоборот, увеличением числа структурных несовершенств, препятствующих движению дислокаций.

2.7. Поверхностные дефекты.

Поверхностные, или двумерные, дефекты простираются в двух измерениях на расстояния, сравнимые с размером кристалла, а в третьем — составляют несколько параметров решетки. Таковы плоскости двойникования, границы зерен и блоков, стенки доменов, дефекты упаковки и, наконец, сама поверхность кристалла.

Соседние зерна по своему кристаллическому строению имеют неодинаковую пространственную ориентировку решеток. Блоки повернуты друг по отношению к другу на угол от нескольких секунд до нескольких минут, их размер 10^{-5} см. Фрагменты имеют угол разориентировки не более 5° . Если угловая разориентировка решеток соседних зерен меньше 5° , то такие границы называются малоугловыми границами. Такая граница показана на рис. 9.

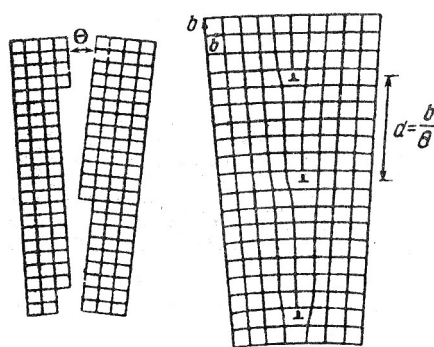


Рис. 9

Все субзеренные границы (границы фрагментов и блоков) - малоугловые. Строение границ зерен оказывает большое влияние на свойства металла.

2.8. Объемные дефекты.

Объемные, или трехмерные, дефекты — это пустоты, поры, частицы другой фазы, включения. Такие дефекты снижают прочность кристалла.

