

Лекция 5. Металлы и сплавы

Характеристика проводящих материалов

Металлами называются вещества, обладающие высокими электропроводностью, теплопроводностью, прочностью, а также характерным блеском. Металлы по сравнению с диэлектриками более мягкие (пластичные), потому что один слой кристалла легко скользит над другим. Скольжение слоев возникает не сразу, а последовательно от атома к атому.

Свойства металлов обусловлены строением их кристаллической решетки. Большинство металлов имеют гранецентрированную, объемно-центрированную кубическую или плотно упакованную гексагональную решетку (рис. 16).

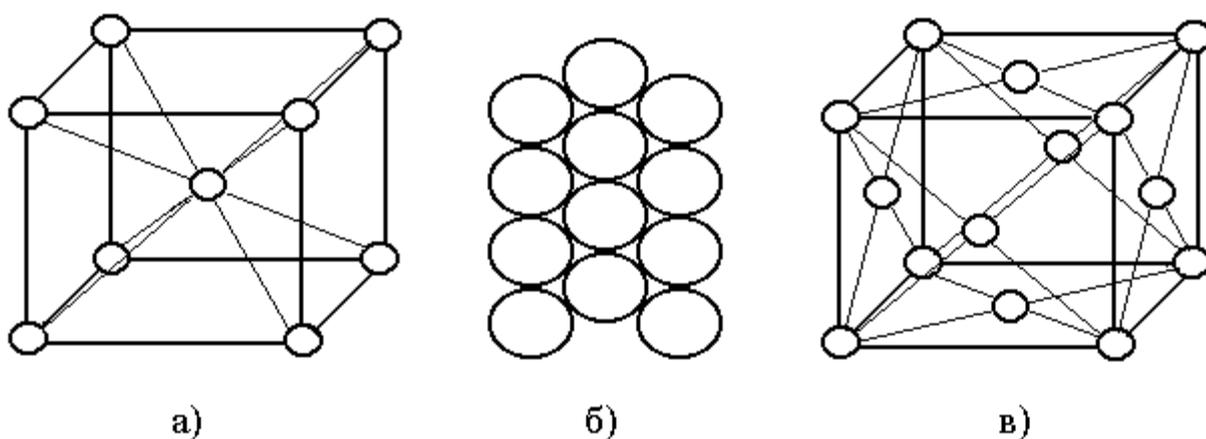


Рис. 16. Виды кристаллических решеток: а - объемноцентрированная решетка (железо при низких температурах); б - гексагональная решетка с плотной упаковкой; в - гранецентрированная решетка (железо при высоких температурах)

Образование вида решетки существенно зависит от угловой зависимости межатомных сил. Металлическая связь имеет ненаправленный характер, что приводит к повышению плотности упаковки. В металлах валентные электроны не локализируются в атомах, а свободно перемещаются внутри кристаллической решетки, образуя так называемый “электронный газ”. Атомы, отдав электроны, превращаются в положительно заряженные ионы, которые удерживаются в узлах кристаллической решетки электростатическим взаимодействием с электронами. Таким образом, электроны связывают положительные ионы в твердых телах. Свободные электроны (электроны проводимости) определяют электрические, магнитные, оптические и термические свойства (теплоемкость и теплопроводность). Свободные электроны играют значительную роль в ряде механических свойств металлов (сжимаемость, пластичность).

Выделение металлов в отдельный класс веществ связано с разделением веществ на проводники и изоляторы. Поскольку и ряд других веществ может обладать достаточно высокой проводимостью (полуметаллы,

полупроводники), то вводится понятие металлическое состояние, которое характеризуется достаточно большим количеством свободных (коллективизированных) электронов, причем их подвижность достаточно велика и вблизи температуры абсолютного нуля, а концентрация мало зависит от температуры.

Металлы находят применение не только в чистом виде, но и (в большинстве случаев) в виде различных сплавов. Металлическим сплавом называются однофазные или многофазные микроскопически однородные смеси различных металлов. Фазы, образующиеся при сплавлении двух или нескольких металлов, представляют собой либо твердые растворы, либо интерметаллические соединения (интерметаллиды). При образовании твердого раствора сохраняется кристаллическая решетка металла растворителя. Многие металлы, имеющие одинаковые типы кристаллической решетки, смешиваются друг с другом в любых пропорциях, образуя непрерывный ряд твердых растворов. Однако есть металлы, которые ограниченно растворяются друг в друге или вообще не растворяются в твердой фазе.

Существуют три типа структурных твердых растворов:

1) растворы замещения, когда атомы растворенного металла замещают в узлах кристаллической решетки атомы металла-растворителя, распределяясь среди них по определенному закону;

2) растворы внедрения, когда атомы растворенного металла не замещают атомы металла растворителя, а располагаются в межатомных промежутках его кристаллической решетки;

3) твердые растворы вычитания, которые образуются при недостатке одного из компонентов сплава.

Поскольку атомы растворителя и растворимого металла имеют отличные друг от друга радиусы, то кристаллические решетки твердого раствора замещения искажаются (рис. 17). Поэтому период решетки замещенного твердого раствора может быть меньше или больше периода решетки атомов растворителя.

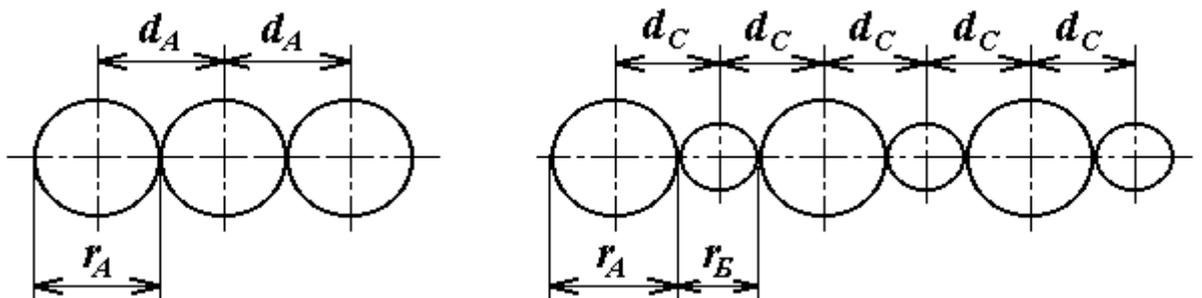


Рис. 17. Искажение строения твердого раствора замещения при атомных радиусах растворителя больше атомных радиусов растворенных элементов

В противоположность твердым растворам интерметаллиды имеют кристаллическую структуру, отличную от структур исходных металлов. Состав интерметаллических соединений не всегда подчиняется правилам валентности, но эти соединения имеют ярко выраженную индивидуальность свойств. Два металла могут образовывать между собой не одно, а несколько соединений, например, NaSn_3 , NaSn_2 , NaSn , Na_4Sn_3 , Na_2Sn , Na_4Sn и др., существующие лишь в определенных пределах состава и температуры. Электронное строение интерметаллических соединений имеет характерные свойства металлического состояния.

Зонная теория металлов

Природа металлического состояния может быть описана с помощью зонной теории твердого тела. Как известно, благодаря перекрытию волновых функций электронов соседних атомов, электроны в кристалле наделены свойствами свободных электронов – они делокализованы в пространстве, и их энергетический спектр непрерывен в пределах разрешенных зон. Согласно принципу Паули на каждом энергетическом уровне должно находиться не более двух электронов с противоположно направленными спинами. Поэтому возможность перемещения электрона под действием электрического поля связана не только со способностью непрерывно изменять свою энергию, но и с наличием свободных мест на соответствующих уровнях. Если концентрация свободных электронов равна N , то при температуре абсолютного нуля они займут $N/2$ самых низких энергетических уровней. Наиболее высокий из занятых уровней называется уровнем или поверхностью Ферми и обозначается ε_F . В электропроводности металла могут участвовать только электроны, имеющие энергию ε , близкую или превышающую энергию Ферми ($\varepsilon > \varepsilon_F$). Уровень Ферми, для металлов – это такой энергетический уровень, вероятность нахождения на котором заряженной частицы равна 0.5 при любой температуре тела.

Более полное и строгое объяснение электропроводности металлов дает зонная теория твердого тела. В отсутствие внешнего поля свободные электроны, расположенные вблизи дна зоны проводимости, ведут себя как свободные электроны с эффективной массой m^* и совершают хаотическое движение со скоростями порядка 10^5 м/с при $T=300$ К. Электроны испытывают рассеяние, т.е. изменяют направление и скорость своего движения при столкновении с узлами решетки, дефектами и атомами примесей. В результате рассеяния устанавливается их равновесное распределение во всех направлениях и направленного движения не происходит. Направленный перенос носителей может происходить либо за счет приложения электрического поля (дрейф носителей), либо из-за неравномерной концентрации носителей (диффузии носителей).

Электрическое поле напряженностью E создает силу F , действующую на единичный электрический заряд, помещенный в это поле:

$$F = e E. \quad (2.11)$$

Под действием электрического поля электроны приобретают ускорение eE / m^* , где m^* - эффективная масса носителей. Полученное ускорение создает скорость движения электрона между соударениями (дрейфовая скорость v_{dr}):

$$v_{dr} = e E \tau / m^*, \quad (2.12)$$

где τ - время свободного пробега между двумя столкновениями.

Дрейфовую скорость в единичном электрическом поле определяют термином подвижность μ :

$$\mu = L \tau / m^*. \quad (2.13)$$

Диффузионный перенос носителей возникает при существовании в некотором объеме кристалла градиента концентрации носителей dN/dx . Возникающая при этом сила стремится уравнивать концентрацию во всем объеме за счет хаотических перемещений носителей. Скорость переноса носителей v_{dif} имеет вид:

$$v_{dif} = - \frac{D_n}{N} \frac{dN}{dx}. \quad (2.14)$$

При термодинамическом равновесии коэффициент диффузии D носителей связан с подвижностью соотношением Эйнштейна:

$$D = \mu k T / e, \quad (2.15)$$

где k - постоянная Больцмана.

Подвижность можно определить как многократное повторение следующего процесса: ускорение носителя электрическим полем, рассеяние, изменение направления движения и снова ускорение... Подвижность носителей заряда зависит от многих факторов: температуры, концентрации примесных атомов и напряжения электрического поля. В принципе, электрон, энергия которого находится в разрешенной зоне в идеальной кристаллической решетке, может двигаться без рассеяния. Рассеяние вызывается отклонениями от идеальной периодической структуры (примеси и дефекты структуры, колебания ионов решетки). Наиболее важными механизмами, определяющими подвижность носителей в области $T \leq 300$ К являются рассеяние на акустических фононах и заряженных точечных дефектах.