

---

## ВВЕДЕНИЕ

**С**варка — это технологический процесс получения неразъемного соединения частей изделия путем прочного их сцепления, основанного на межатомном взаимодействии.

Сварка принадлежит к числу важнейших изобретений XIX в. Родиной этого изобретения является Россия. Начало развитию современных технологий сварки было положено изобретением электрической дуговой сварки талантливыми русскими изобретателями Николаем Николаевичем Бенардосом и Николаем Гавриловичем Славяновым.

И в настоящее время больше половины общего объема сварных конструкций (~60%) выполняется способами электрической дуговой сварки.

Современные технологии сварки преобразили суть и содержание многих технологических процессов производства машин и механизмов, строительства сооружений, судов и летательных аппаратов.

Сварка не только сыграла большую роль в развитии производства во всем мире, но и повлияла на ход истории, например, вкладом в выполнение планов первых пятилеток при индустриализации нашей страны, в оснащение Советской Армии могучей боевой техникой в грозные годы Великой Отечественной войны. Именно поэтому в 1981 г. решением ЮНЕСКО сварка была признана крупнейшим изобретением XIX в. и научно-техническая общественность мира отмечала 100-летие изобретения Н. Н. Бенардосом электросварки угольным электродом. А в 1988 г. отмечался еще один знаменательный юбилей — 100-летие создания

и промышленного применения Н. Г. Славяновым дуговой сварки металлическим электродом.

Мы можем гордиться тем, что российские и советские ученые внесли существенный вклад в развитие сварочных технологий. Россия и СССР являются родиной многих способов сварки: электрической дуговой, контактной точечной (Россия); электродуговой резки и сварки под водой (Россия и СССР); автоматической сварки под флюсом, сварки в среде углекислого газа, электрошлаковой сварки, диффузионной сварки, сварки трением (СССР).

В настоящее время сварка превратилась в крупный самостоятельный вид производства. Она применяется для создания и возведения принципиально новых конструкций и сооружений, ремонта машин и аппаратов, получения изделий со специальными свойствами. Сварные конструкции несут свою службу при сверхвысоких и сверхнизких температурах, при давлениях, значительно превосходящих атмосферное, и в условиях космического вакуума.

Сварку выполняют на воздухе, под водой, в вакууме. Летчики-космонавты Г. Шонин и В. Кубасов на борту космического корабля «Союз-6» впервые в мире осуществили сварку в условиях космического вакуума и невесомости. Космонавты В. Джанибеков и С. Савицкая на станции «Союз-7» в течение трех часов производили в открытом космосе сварку, резку и пайку металлов, доказав возможность проведения различных ремонтных работ космических аппаратов в полете.

Бурное развитие сварочной техники и технологии вызвало необходимость подготовки инженеров, специализирующихся в области сварки и родственных технологий. Такая подготовка ведется во многих странах мира и считается перспективной, поскольку без специалистов-сварщиков невозможно изготовление не только различных металлических сооружений и конструкций, но и таких изделий, как электронные приборы, космические аппараты, многие медицинские и бытовые предметы и т. д. В СССР В. П. Вологдин организовал в 1927 году в Дальневосточном государственном университете (г. Владивосток) подготовку инженеров-сварщиков. Из первого выпуска впо-

следствии вышли выдающиеся ученые и организаторы сварочного производства в СССР: Н. Н. Рыкалин, А. А. Ерохин, Г. К. Татур, Л. М. Яровинский, К. В. Любавский, Е. В. Соколов, И. С. Дмитриев.

Деятельность инженера-сварщика многогранна, разнообразны и требования, которые к нему предъявляются. Сварщики должны быть универсально образованными специалистами. Круг проблем, охватываемых ныне сваркой, требует обширных знаний в таких областях, как металлофизика, химия и физическая химия, физика высоких энергий, квантовая механика, вычислительная техника и др. В цепи технического прогресса сварка, как важный научно-технологический процесс, является его существенным звеном. И если отмирание некоторых производств происходит незаметно, безболезненно или с малыми, относительно несущественными последствиями, то удаление сварки из действующих на сегодняшний день технологий однозначно приведет к полной остановке технических и смежных с ними отраслей промышленности.

Создание и продвижение в жизнь новых материалов с все более ярким спектром характеристик неразрывно связано с усложнением и постоянным развитием служебных свойств машин и механизмов в самом широком понимании. И здесь без сварки не обойтись никаким образом.

Молодость сварки, ее широта и универсальность, высокая экономическая эффективность служат залогом плодотворного развития сварочной науки и техники. Глубоко символичен девиз известной немецкой фирмы BINZEL, выпускающей сварочное оборудование: «Мир вращается вокруг сварки».

---

## ГЛАВА ПЕРВАЯ

# СВАРИВАЕМЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1.1. МЕТАЛЛЫ

**В** настоящее время, несмотря на множество полимерных материалов и композиционных, разработанных на их основе, конструкционными материалами являются прежде всего материалы металлические. Именно они в наибольших объемах есть объект сварочных технологий.

#### 1.1.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТАЛЛОВ

Из известных в настоящее время 106 элементов 76 являются металлами. Металлы в твердом и отчасти в жидком состоянии обладают рядом характерных свойств:

- высокими тепло- и электропроводностью;
- положительным температурным коэффициентом электрического сопротивления (с повышением температуры электросопротивление чистых металлов возрастает);
- термоэлектронной эмиссией, т. е. способностью испускать электроны при нагреве;
- непрозрачны, имеют металлический блеск и хорошую отражательную способность;
- повышенной способностью к пластической деформации.

Все наиболее характерные свойства металлов объясняются наличием в них легкоподвижных коллективизированных электронов.

Атомы металлов имеют на внешнем энергетическом уровне небольшое число электронов. Связь внешних электронов с атомом характеризуется работой выхода электро-

нов (или потенциалом ионизации), т. е. работой, необходимой для удаления электронов из изолированного атома.

Если потенциал ионизации неметаллов, как правило, превышает 10 эВ при однократной ионизации (т. е. при отрыве одного электрона), то в случае металлов его величина составляет всего 4...9 эВ. Поэтому внешние электроны металлов слабо связаны с ядром и находятся в относительно свободном состоянии, образуя электронный газ.

Металлическое состояние возникает в комплексе атомов, когда при их сближении внешние электроны теряют связь с атомами, становятся общими, т. е. коллективизируются и свободно перемещаются между положительно заряженными и периодически расположеными ионами.

Все металлы и металлические сплавы — тела кристаллические, атомы (ионы) в металлах расположены закономерно, в отличие от аморфных тел, где атомы распределены хаотично.

Сила связи в металлах определяется силами отталкивания и притяжения между ионами и электронами (рис. 1.1а), вследствие чего она не имеет резко выраженного направленного характера. Атомы (ионы) располагаются в узлах кристаллической решетки на таком расстоянии друг от друга, которое обеспечивает минимальную энергию их взаимодействия (рис. 1.1б). Этому положению соответствует равновесное расстояние  $R_0$  (рис. 1.1а). Такое взаимодействие ионного скелета и электронного газа получило название *металлической связи*,

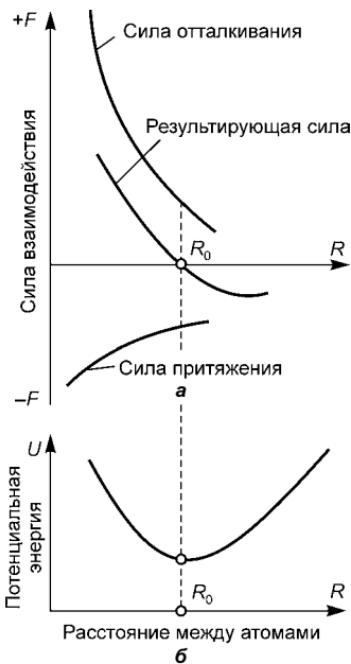


Рис. 1.1  
Силы взаимодействия двух атомов (а) и изменение потенциальной энергии атомов (б) в кристаллической решетке

которая представляет собой сочетание ковалентной и ионной связей.

Близжение атомов (ионов) на расстояние меньше  $R_0$  и удаление их на расстояние больше  $R_0$  осуществимы лишь при совершении определенной работы. Поэтому в металле атомы располагаются закономерно, образуя правильную кристаллическую решетку, что соответствует минимальной энергии взаимодействия атомов. Они занимают положение с минимальной потенциальной энергией.

Сказанное выше объясняет характерные свойства металлов.

Высокая электропроводность металлов объясняется присутствием в них свободных электронов, которые перемещаются в потенциальном поле решетки. С повышением температуры усиливаются колебания ионов (атомов), что затрудняет движение электронов, в результате чего электрическое сопротивление металлов возрастает.

Высокая теплопроводность металлов обусловливается в первую очередь большой подвижностью свободных электронов и в меньшей степени колебательным движением ионов, вследствие чего происходит быстрое выравнивание температуры в массе металла.

Высокая пластичность металлов объясняется периодичностью их атомной структуры и отсутствием направленности металлической связи. В процессе пластической деформации металла (ковка, прокатка и т. д.), т. е. при смещении одних его объемов относительно других, связь между атомами не нарушается. Кристаллы с ковалентной или ионной связью, иначе говоря, с направленной связью хрупки, так как при деформации эта связь нарушается.

Электроны в атоме распределены по энергетическим уровням. В порядке возрастания энергии эти уровни располагаются следующим образом:  $1s, 2s, 3s, 3p, 3d, 4s, 4p, 4d, 5s, 5p, 5d, 4f, 6s, 6p, 7s, 6d, 5f$ . В такой же последовательности должно происходить заполнение электронных уровней. Однако в металлах IV–VI периодов (от Sc до Ni, от V до Pd и от La до Pt и др.) заполнение электронами уровней  $3d, 4d$  и  $5d, 4f$  и  $5f$  происходит только после того, как уже заполнены следующие за ними уровни  $4s, 5s$  и  $6s$ .

Эти металлы с недостроенными  $d$ - или  $f$ -уровнями называются металлами переходных групп. Остальные металлы, имеющие полностью заполненные  $d$ - или  $f$ -уровни (либо свободные  $d$ -уровни, если это металлы малых атомных номеров), называются простыми.

Недостроенная внутренняя электронная  $d$ - или  $f$ -подгруппа определяет основные отличительные свойства переходных металлов от простых: переменную валентность, парамагнетизм, ферромагнетизм некоторых металлов (Fe, Ni, Co, Gd, Er, Tm, Ho), высокую температуру плавления.

Чистые металлы\* в подавляющем большинстве не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам, в частности, они обладают низкой прочностью, жаропрочностью, коррозионной стойкостью и т. п. Поэтому в качестве конструкционных материалов наиболее широко используются не чистые металлы, а их сплавы.

Сплавы получают сплавлением или спеканием\*\* двух или более металлов или металлов с неметаллами. Они обладают характерными свойствами, присущими металлическому состоянию. Химические элементы, образующие сплав, называют *компонентами*. Сплав может состоять из двух и более компонентов.

Для рассмотрения строения, превращений и свойств металлов и сплавов введены понятия *фаза* и *структура*. Совокупность фаз, находящихся в состоянии равновесия, называют *системой*.

**Фаза** представляет собой однородные составные части системы, имеющие одинаковый состав, одно и то же агрегатное состояние и отделенные от остальных частей поверхностью раздела. Например, однородный чистый металл или сплав является однофазной системой. Состояние, например, при температурах, близких к температуре

\* Понятие «чистый металл» весьма условное. Любой чистый металл содержит примеси и, следовательно, должен рассматриваться как сплав. Под термином «чистый металл» обычно понимают металл, содержащий 99,99...99,999% основного металла. Во всех остальных случаях подразумевается технически чистый металл с малым количеством примесей (99,5...99,9%), получаемый обычным заводским способом.

\*\* Некоторые сплавы получают без расплавления, т. е. без перевода в жидкое состояние, а в твердом виде — спеканием металлических порошков или химических соединений.

плавления, когда одновременно присутствуют жидкий сплав (металл) и его твердые кристаллы, будет представлять собой двухфазную систему.

Структура есть форма, размеры или характер взаимного расположения соответствующих фаз в металлах или сплавах. Таким образом, фазы — это структурные составляющие сплава.

Различают макроструктуру (строение металла или сплава, видимое невооруженным глазом или при небольшом увеличении — в 30...40 раз) и микроструктуру (строение металла или сплава, наблюдаемое с помощью микроскопа при большом увеличении).

Макроструктуру можно исследовать по излому и на специальных макрошлифах. Изучение излома — наиболее простой метод выявления кристаллического строения металлов. В отличие от аморфного тела (стекло, канифоль и др.) кристаллическое тело имеет зернистый (кристаллический) излом (рис. 1.2а). По излому можно судить о размере зерна, особенностях выплавки, термической обработке, а следовательно, и о некоторых свойствах металла. Вид излома используют в качестве критерия при определении склонности стали к хрупкому разрушению. Например, если

сломать напильник и гвоздь и сравнить вид изломов, то можно определить различие в характере их разрушения. Зернистый вид излома напильника свидетельствует о хрупком разрушении, тогда как в изломе гвоздя видны следы пластических деформаций.

При изучении макроструктуры на специальных макрошлифах (темплатах) образцы вырезают из крупных заготовок (слитков, поковок и т. д.) или изделий, поверхность которых шли-

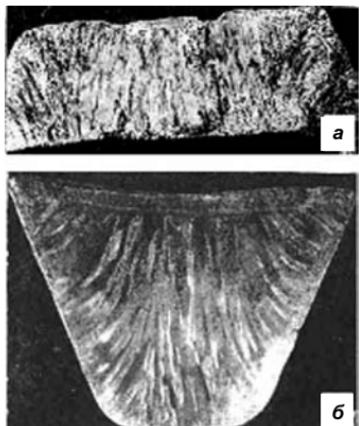


Рис. 1.2  
Макроструктура металлов:  
а — излом слитка цинка; б — макроструктура.

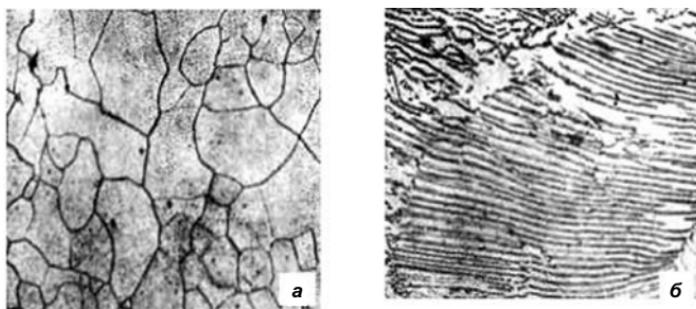


Рис. 1.3  
Микроструктура металлов:

а — чистого железа (зерна феррита); б — железа, содержащего 0,8% углерода — стали (пластины феррита (светлые) и карбида железа  $Fe_3C$  (темные)),  $\times 500$

фуру, полируют, а затем подвергают травлению специальными реактивами.

При исследовании макрошлифа можно определить форму и расположение зерен в литом металле (рис. 1.2б); волокна (деформированные кристаллиты) в поковках и штамповках; дефекты, нарушающие сплошность металла (усадочная рыхлость, газовые пузыри, раковины, трещины и т. д.); химическую неоднородность сплава, вызванную кристаллизацией или созданную термической или химико-термической обработкой.

Микроструктура показывает (рис. 1.3) взаимное расположение фаз, их форму и размеры. Для определения микроструктуры из исследуемого металла изготавливают макрошлиф, т. е. небольшой образец, одну из плоскостей которого тщательно шлифуют, полируют, а затем подвергают травлению специальными реактивами.

Микроструктуру металлов наблюдают в микроскопе — оптическом или электронном. Полезное увеличение в оптическом микроскопе не превышает 1000...1500 раз. Это позволяет наблюдать детали структуры, размеры которых больше  $1500...2000 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ).

Для изучения металлов в настоящее время широко применяют электронный микроскоп, полезное увеличение которого составляет до 100 000 раз. Использование электронных лучей, обладающих очень малой длиной волны

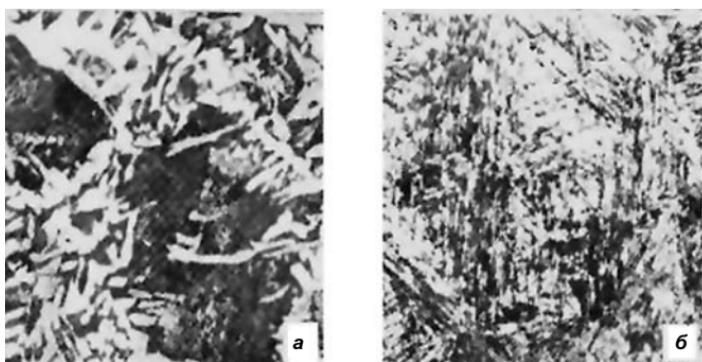


Рис. 1.4  
Микроструктура стали Ст. 5сп:

*а* — в исходном состоянии; *б* — после нагрева до 800°С и охлаждения со скоростью 600 град/с.

( $0,04\ldots0,12\cdot10^{-10}$  м), дает возможность различать детали изучаемого объекта размером до 3...5 Å.

Между микроструктурой и многими свойствами металлов и сплавов существует качественная зависимость. Например, структура обычного гвоздя, которую можно видеть на его шлифе, одна (рис. 1.4а). Если же гвоздь нагреть добела, а затем охладить в воде, сделать шлиф и посмотреть структуру, то она будет уже иной (рис. 1.4б). Закаленный гвоздь согнуть значительно труднее, чем обычный, ввиду разницы их механических свойств.

Одной из важнейших задач технологов-сварщиков является получение наиболее оптимальной структуры металла, обеспечивающей требуемые свойства сварного соединения.

### 1.1.2. ИДЕАЛИЗИРОВАННАЯ АТОМНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА МЕТАЛЛОВ

Металлы (если их получают обычным способом) представляют собой поликристаллические тела, состоящие из большого числа мелких ( $10^{-3}\ldots10^{-7}$  м) по-разному ориентированных относительно друг друга кристаллов. Вследствие условий кристаллизации они имеют неправильную форму и называются *кристаллитами*, или *зернами*.

Под атомно-кристаллической структурой понимают взаимное расположение атомов в кристалле. Кристалл состоит из атомов (ионов), расположенных в определенном порядке, который периодически повторяется в трех измерениях.

Для описания атомно-кристаллической структуры пользуются понятием пространственной, или кристаллической, решетки.

Кристаллическая решетка (рис. 1.5) представляет собой воображаемую пространственную сетку, в узлах которой расположены атомы (ионы), образующие металл (твердое кристаллическое тело). Подавляющее число технически важных металлов образуют одну из трех кристаллических решеток: кубическую объемноцентрированную, кубическую гранецентрированную или гексагональную.

В схемах кристаллов расположения или упаковки атомы (ионы) изображены сферами такой величины (рис. 1.5), что они касаются друг друга. Однако эти сферы не представляют собой несжимаемые объемы, поскольку очень маленькою размера ядра атома окружены электронными оболочками сравнительно невысокой плотности.

В кубической объемно-центрированной решетке (рис. 1.5а) атомы расположены в узлах ячейки, а один

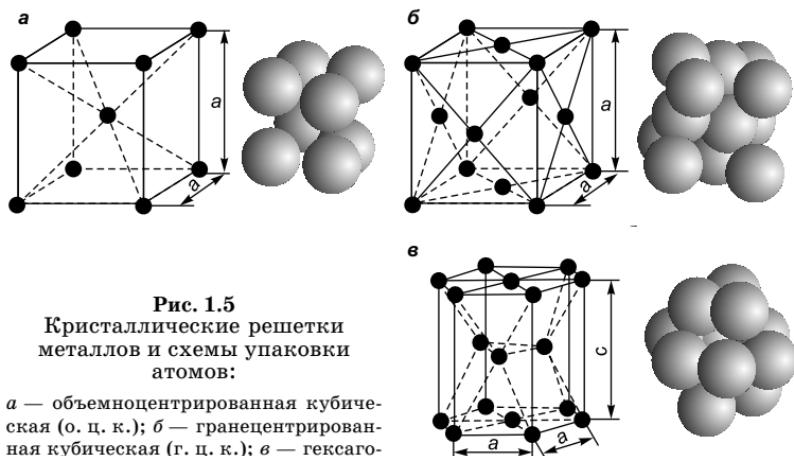


Рис. 1.5  
Кристаллические решетки металлов и схемы упаковки атомов:

а — объемноцентрированная кубическая (о. ц. к.); б — гранецентрированная кубическая (г. ц. к.); в — гексагональная плотноупакованная (г. п. у.).

атом — в центре объема куба. Кубическую объемно-центрированную решетку имеют металлы: Rb; K, Na, Li,  $Ti_{\beta}^*$ ,  $Tl_{\beta}$ ,  $Zr_{\beta}$ , Ta, W, V,  $Fe_{\alpha}$ , Cr, Nb, Ba и др.

В кубической гранецентрированной решетке (рис. 1.5б) атомы расположены в углах куба и в центре каждой грани. Решетку этого типа имеют металлы:  $Ca_{\alpha}$ , Ce,  $Sr_{\alpha}$ , Th, Pb, Sc, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Ir,  $Fe_{\gamma}$ , Cu  $Co_{\alpha}$  и др.

В гексагональной решетке (рис. 1.5в) атомы расположены в углах и центре шестиугольных оснований призмы, а три атома — в средней плоскости призмы. Такую упаковку атомов имеют металлы:  $Hf_{\alpha}$ , Mg,  $Ti_{\alpha}$ , Cd, Re, Os, Ru, Zn,  $Co_{\beta}$ , Be,  $Ca_{\alpha}$ , V,  $La_{\alpha}$ ,  $Tl_{\alpha}$ ,  $Zr_{\alpha}$  и др.

Размеры кристаллической решетки характеризуются периодами, под которыми понимают расстояние между ближайшими параллельными атомными плоскостями, образующими элементарную ячейку. Период решетки  $a$  изменяется в ангстремах и у металлов составляет от 1 до 7 Å.

### 1.1.3. РЕАЛЬНОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

Обычный кусок металла состоит из скопления большого числа маленьких кристаллов неправильной формы, называемых зернами (рис. 1.6а). Кристаллические решетки в отдельных зернах ориентированы относительно друг друга случайно\*\* (рис. 1.6б). Поверхности раздела зерен называются границами зерен (см. рис. 1.3а). Такой кусок металла является поликристаллом.

Границы между отдельными кристаллитами (зернами) представляют собой переходную область шириной 5...10 межатомных расстояний, в которой решетка кристалла, имеющего одну кристаллографическую ориентацию, переходит в решетку кристалла, имеющего иную кристаллографическую ориентацию. Поэтому на границе зерна атомы расположены менее упорядоченно, чем в объеме

\*  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  означают, что соответствующие металлы имеют разное кристаллическое строение при разных температурах.

\*\* В некоторых случаях, например при холодной прокатке, наблюдается преимущественная ориентировка зерен вдоль проката — *текстура*.

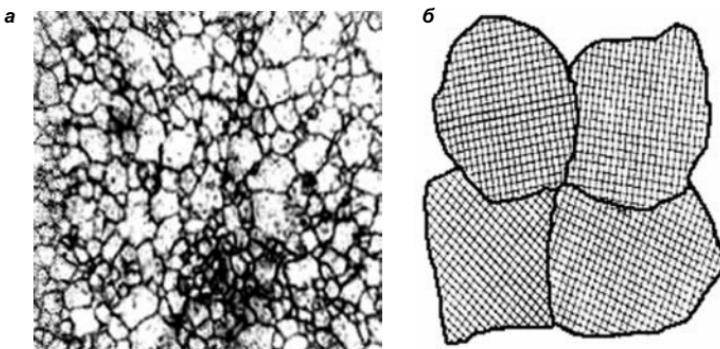


Рис. 1.6  
Структура поликристаллического твердого тела (а) и различная ориентация кристаллических решеток в зернах (б)

зерна. Кроме того, по границам зерен в технических металлах концентрируются примеси, что дополнительно нарушает порядок.

При определенных условиях, обычно при очень медленном контролируемом отводе тепла при кристаллизации ( затвердевании металла), может быть получен кусок металла, представляющий собой один кристалл, — его называют монокристаллом. В настоящее время выращивают монокристаллы массой несколько десятков килограммов и более (например, монокристаллы кремния).

Встречающиеся в природе кристаллы — как монокристаллы, так и зерна в поликристаллах — не отличаются строгой периодичностью расположения атомов, о которой говорилось выше, т. е. не являются идеальными кристаллами. Реальные кристаллы имеют те или иные несовершенства (дефекты) кристаллического строения.

В металлах наиболее распространены точечные и линейные дефекты кристаллов.

**Точечные дефекты** — это нарушения периодичности кристаллической решетки, во всех измерениях сопоставимые с размерами атома. К точечным дефектам (см. рис. 1.7), в частности, относят *вакансии* (узлы в кристаллической решетке, в которых отсутствуют атомы), *межузельные атомы* (атомы, находящиеся вне узлов кристаллической решетки), а также *примесные атомы*, которые могут или

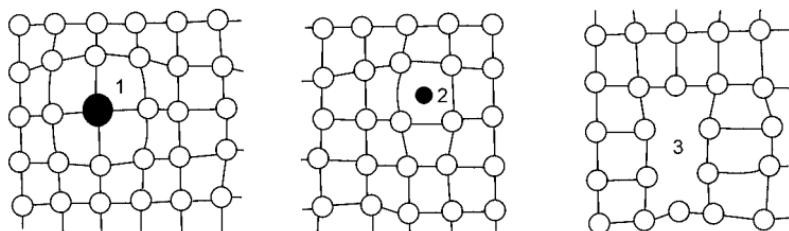


Рис. 1.7  
Схемы точечных дефектов в кристалле:

1 — примесный атом замещения; 2 — примесный атом внедрения; 3 — бивакансия.

замещать атомы основного металла (примеси замещения), или внедряться в наиболее свободные места решетки аналогично межузельным атомам (примеси, внедрения).

Точечные дефекты являются центрами локальных искажений в кристаллической решетке. Однако заметные смещения атомов, окружающих вакансию или межузельный атом, создаются только на расстоянии нескольких атомных диаметров от центра дефекта. Точечные дефекты всегда присутствуют в кристалле.

Вакансию могут объединяться, образуя пары — *бивакансию* и даже скопления вакансий. Перемещения вакансий по кристаллу, которые можно рассматривать и как встречное движение атомов, играют большую роль в ряде процессов в сплавах (диффузия, ползучесть).

**Линейные дефекты** в кристаллах характеризуются тем, что их поперечные размеры не превышают нескольких

межатомных расстояний, а длина может достигать размера кристалла.

К линейным дефектам относятся *дислокации* (рис. 1.8) — линии, вдоль и вблизи которых нарушено правильное, периодическое расположение атомных плоскостей кристалла. Дислокации не могут обрываться внутри кристалла — они должны быть либо

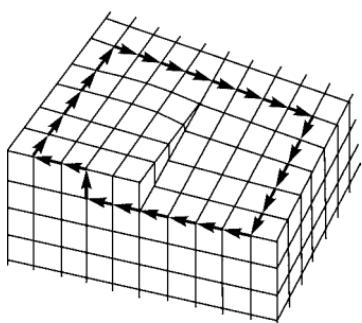


Рис. 1.8  
Линейная дислокация  
в кристаллической решетке

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)