

Рис. 1.1. Кристаллическая решетка:

*a* — объемно-центрированный куба (ОЦК); *b* — гранецентрированного куба (ГЦК); *c* — гексагональная плотноупакованная (ГПУ)

Кристаллическое строение сплава более сложное, чем чистого металла, и зависит от взаимодействия его компонентов при кристаллизации. Компоненты в твердом сплаве могут образовывать твердый раствор, химическое соединение и механическую смесь.

*Твердые растворы* — компоненты сплава взаимно растворяются один в другом. В твердом растворе один из входящих в состав сплава компонентов сохраняет присущую ему кристаллическую решетку, а второй компонент в виде отдельных атомов распределяется внутри кристаллической решетки.

*Химическое соединение* — компоненты сплава вступают в химическое взаимодействие, при этом образуется новая кристаллическая решетка. Компоненты имеют определенное соотношение по массе.

*Механическая смесь* — компоненты сплава обладают полной взаимной нерастворимостью и имеют различные кристаллические решетки. При этих условиях сплав будет состоять из смеси кристаллов составляющих ее компонентов. Механическая смесь имеет постоянную температуру плавления. Механическая смесь, образовавшаяся одновременной кристаллизацией из расплава, называется эвтектикой; в процессе превращения в твердом состоянии — эвтектоидом (например  $Fe_3C + Fe_{\gamma}C$  — ледебурит;  $Fe_3C + Fe_{\alpha}C$  — перлит).

### 3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ СПЛАВОВ

Процесс перехода сплава из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллических решеток (кристаллов) называется *первичной кристаллизацией*.

Свойства сплавов зависят от образующейся в процессе кристаллизации структуры. Под структурой понимают наблюдаемое кристаллическое строение сплава. Процесс кристаллизации начинается с образования кристаллических зародышей — центров кристаллизации. Скорость кристаллизации зависит от скорости зарождения центров кристаллизации и скорости роста кристаллов: чем больше число образующихся зародышей и скорость их роста, тем быстрее протекает процесс кристаллизации. Структура сплава зависит от формы, ориентировки кристаллических решеток в пространстве и скорости кристаллизации.

Центрами кристаллизации могут быть группы элементарных кристаллических решеток, неметаллические включения и тугоплавкие примеси. Кристаллизация сплава обычно начинается от стенок формы (изложницы). С наибольшей скоростью кристаллы растут в направлении, противоположном отводу теплоты, т. е. перпендикулярно к стенке формы.

Если при кристаллизации рост решеток не ограничивается, то получаются кристаллы неограниченного размера древовидной формы — дендриты (рис. 1.2). Так как процесс кристаллизации происходит из многих центров кристаллизации, то ветви дендритов при росте могут ограничивать друг друга и искажаться. Кристаллы неправильной формы называются *зернами*, или *кристаллитами*. Комплекс зерен — это *поликристаллическое тело* (рис. 1.3).

Зерна отличаются различной ориентацией кристаллических решеток; размер зерен составляет  $1-10^4$  мкм. Зерна повернуты относительно друг друга на десятки градусов. На границах зерен имеется поврежденный переходный слой толщиной порядка нескольких атомных слоев, свойства и химический состав которого могут отличаться от свойств тела зерна.

Кристаллические решетки зерна могут иметь различные структурные несовершенства: точечные, линейные и поверхностные, которые возникают в результате образования вакансий — мест не занятых атомами; дислоцированных атомов, вышедших из узла решетки; дислокаций, возникающих при появлении в кристалле незавершенных атомных плоскостей; примесных атомов, внедренных в кристаллическую решетку.

При наличии таких несовершенств зерно разделяется на блоки и имеет структуру, которая называется *микромозаичной*. Отдельные мозаики повернуты относительно друг друга на небольшой угол ( $\sim 1^\circ$ ). Решетки соседних блоков не совпадают по ориентации, что приводит к нарушению правильности решеток. Причина возникновения вакансий и дислокаций — нарушение правильности порядка

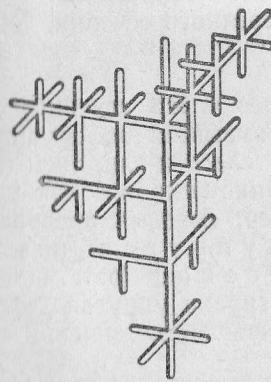


Рис. 1.2. Кристалл древовидной формы

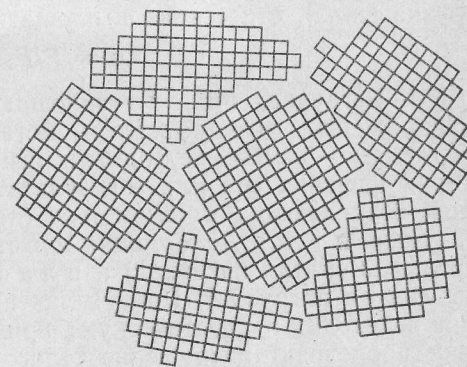


Рис. 1.3. Схема строения поликристалла

присоединения атомов при росте кристалла или сильное искажение решеток при пластическом деформировании.

Искажение кристаллической решетки и состояние грани зерен в металлах влияют на свойства зерен. Например, прочность может увеличиться вследствие искажения кристаллической решетки вблизи границ или уменьшиться в связи с наличием в них примесей, которые всегда присутствуют в расплаве.

Примеси, растворенные в жидком металле, могут также измельчить зерно и изменить его форму. Примеси при затвердевании в виде тонкого слоя осаждаются на поверхности растущего кристалла и ограничивают его рост. Чем больше скорости охлаждения и жардения центров кристаллизации, тем больше скорость кристаллизации и тем мелкозернистее структура сплава. При мелкозернистой структуре механические свойства сплава повышаются.

При переходе сплава из жидкого состояния в твердое происходит усадка, сопровождаемая уменьшением удельного объема зерна. В результате усадки между зернами в местах соприкосновения остаются дендриты, в междоузлиях пространств возникают микроступы, которые могут заполняться неметаллическими включениями (сульфидами, фосфидами и т. п.) или оставаться микроскопическими усадочными раковинами и порами. Такие включения и поры ухудшают механические свойства сплава, так как при его нагреве и приложении к нему нагрузок становятся очагами развития трещин, надрывов и тому подобных дефектов.

#### 4. СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

К основным свойствам металлов и сплавов относятся механические, физические, химические, технологические и эксплуатационные.

**Механические свойства.** Основные из них — прочность, пластичность, твердость и ударная вязкость. Внешняя нагрузка вызывает в твердом теле напряжение и деформацию. *Напряжение* — это нагрузка (сила), отнесенная к площади поперечного сечения, МПа:

$$\sigma = P/F,$$

где  $P$  — нагрузка, МН;  $F$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>. Напряжение, возникающее в металле, вызывает деформацию.

*Деформация* — изменение формы и размеров тела под влиянием воздействия внешних сил или в результате физико-механических процессов, возникающих в самом теле (например, фазовых превращений, усадки и т. п.). Деформация может быть упругая (исчезающая после снятия нагрузки) и пластическая (остающаяся после снятия нагрузки). При увеличении нагрузки упругая деформация переходит в пластическую; при дальнейшем повышении нагрузки происходит разрушение тела.

*Прочность* — это способность твердого тела сопротивляться деформации или разрушению под действием статических или динамических нагрузок. Прочность определяют с помощью специальных ме-

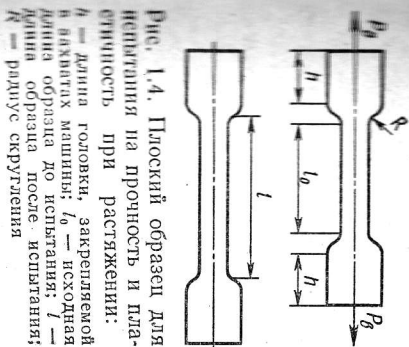


Рис. 1.4. Плоский образец для испытания на прочность и пластичность при растяжении:

$H$  — длина головок, закрепляемых в захватах машины;  $L$  — исходная длина образца до испытания;  $l$  — длина образца после испытания;  $d$  — радиус округления.

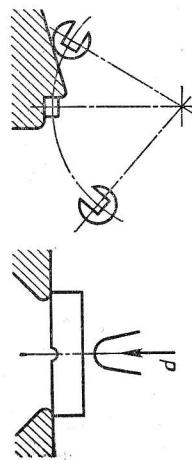


Рис. 1.5. Схемы испытания на ударную вязкость

плавляют на растяжение, сжатие, изгиб и кручение. Испытания на растяжение — обязательны. Прочность при статических нагрузках оценивается временным сопротивлением  $\sigma_n$  и пределом текучести  $\sigma_s$ ;  $\sigma_n$  — это условное напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца;  $\sigma_s$  — напряжение, при котором начинается пластическое течение металла. На рис. 1.4 представлен типовой образец прямоугольного сечения для испытаний на растяжение.

Прочность при динамических нагрузках оценивают по *ударной вязкости*, Дж/м<sup>2</sup> (рис. 1.5):

$$KV = A/F,$$

где  $A$  — работа, затраченная на разрушение образца, Дж;  $F$  — площадь образца в месте надреза, м<sup>2</sup>.

*Пластичность* — это способность материала получать остаточное изменение формы и размера без разрушения. Пластичность характеризуется относительным удлинением  $\delta$  при разрыве, %:

$$\delta = (l - l_0) 100/l,$$

где  $l$  — длина образца после разрыва, мм;  $l_0$  — первоначальная длина образца, мм.

*Твердость* — это способность материала сопротивляться внедрению в него другого, не получающего остаточных деформаций, тела. Значение твердости и ее размерность для одного и того же материала зависят от применяемого метода измерения. Значения твердости, определенные различными методами, пересчитывают по таблицам и эмпирическим формулам. Например, твердость по Бринеллю ( $HB$ , МПа) определяют из отношения нагрузки  $P$ , приложенной к шарикку, к площади поверхности полученного отпечатка шарика  $F_{отп}$ :

$$HB = P/F_{отп}.$$

На рис. 1.6 приведена схема, по которой замеряют твердость. **Физические свойства.** К физическим свойствам металлов и сплавов относятся температура плавления, плотность, температурный



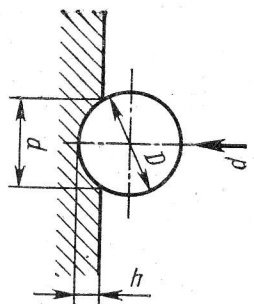


Рис. 1.6. Схема измерения твердости:  
D — диаметр шарика, мм; d — диаметр отпечатка, мм;  
h — глубина отпечатка, мм

коэффициент, электропропускание и теплопроводность. Физические свойства сплавов обусловлены их составом и структурой.

**Химические свойства.** К химическим свойствам относятся способ-

ность к химическому взаимодействию с агрессивными средами. Технологические свойства. Способность материала подвергаться различным методам горячей и холодной обработки определяют по его технологическим свойствам. К технологическим свойствам металлов и сплавов относятся литейные свойства, деформируемость, свариваемость и обрабатываемость режущим инструментом. Эти свойства позволяют производить формоизменяющую обработку и получать заготовки и детали машин.

**Литейные свойства** определяются жидкотекучестью, усадкой и склонностью к ликвации. **Деформируемость** — это способность принимать необходимую форму под влиянием внешней нагрузки без разрушения и при наименьшем сопротивлении нагрузке. **Свариваемость** — это способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения требуемого качества. **Эксплуатационные, или служебные свойства.** В зависимости от условий работы машины или конструкции определяют коррозионную стойкость; хладостойкость; жаропрочность, жаростойкость; антифрикционную способность материала.

**Коррозионная стойкость** — сопротивление сплава действию агрессивных кислотных и щелочных сред. **Хладостойкость** — способность сплава сохранять пластические свойства при температурах ниже 0 °С. **Жаропрочность** — способность сплава сохранять механические свойства при высоких температурах. **Жаростойкость** — способность сплава сопротивляться окислению в газовой среде при высоких температурах. **Антифрикционность** — способность сплава прирабатываться к другому сплаву.

Эти свойства определяются в зависимости от условий работы машины или конструкции специальными испытаниями.

**5. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ**

В сплавах при охлаждении и нагреве происходят изменения и образуются новые фазы и структуры. Эти изменения можно определить по диаграмме состояния. Диаграммой состояния называется графическое изображение, показывающее фазовый состав и структуру сплавов в зависимости от температуры и химической концентрации компонентов в условиях равновесия.

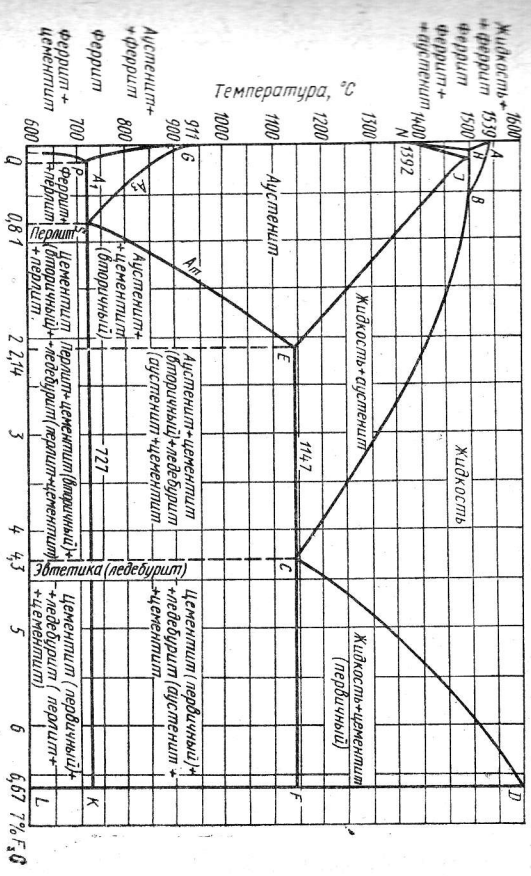


Рис. 1.7. Диаграмма состояния железо—цементит

**Фаза** — однородная часть системы, отделенная от других частей поверхностью раздела, при переходе через которую свойства сплава изменяются скачкообразно. Большое практическое значение имеет диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов (рис. 1.7). **Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов.** В зависимости от температуры и концентрации углерода железоуглеродистые сплавы имеют следующие составляющие:

**аустенит** — твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе с предельной концентрацией углерода 2,14% при температуре 1145 °С; с понижением температуры до 727 °С концентрация углерода уменьшается до 0,8%; сталь со структурной аустенита немагнитна и имеет высокие пластичность и вязкость;

**феррит** — твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе с предельной концентрацией углерода 0,02% при температуре 727 °С; феррит имеет малую твердость и высокую пластичность;

**цементит** — химическое соединение железа с углеродом  $Fe_3C$  (6,67% С); имеет большие твердость и хрупкость;

**перлит** — механическая смесь (эвтектоид) феррита и цементита, образующаяся при эвтектоидном распаде аустенита (0,8% С); сталь, имеющая структуру перлита, обладает большими прочностью и твердостью;

**ледебурит** (4,3% С) — механическая смесь (эвтектика) аустенита или перлита и цементита; ниже 727 °С аустенит превращается в перлит, при этом образуется смесь перлита и цементита;

**графит** — углерод в свободном состоянии, располагается в основной массе металла и имеет развитую объемную форму в виде пластинок; кроме пластинчатого графита можно получить графит компактных форм (шаровидный или хлопьевидный), образующийся

в результате распада цемента или выделяющийся из пересыщенных твердых растворов железа с углеродом. В железоуглеродистом сплаве графит образуется при содержании  $Si \geq 1,5\%$  и при очень медленном охлаждении. Графит мягок и обладает низкой прочностью.

**Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов.** Основные свойства сплава определяются содержанием главной примеси — углерода. Взаимодействие углерода с  $\alpha$ - или  $\gamma$ -модификациями железа приводит к образованию железоуглеродистых сплавов, различных по строению и свойствам. Построение диаграммы состояния железоуглерод (цементит) дает представление о температурных и концентрационных границах существования этих сплавов.

На диаграмме состояния железо—цементит (рис. 1.7) линия *ACD* — линия ликвидуса, выше нее сплав находится в жидком состоянии; линия *AECF* — линия солидуса, ниже нее сплав находится в твердом состоянии. При температурах, соответствующих линии *AECF* заканчивается первичная кристаллизация. В точке *C* при концентрации углерода 4,3% образуется эвтектика, которая носит название ледебурит. Линия *PSK* — эвтектоидная линия, на которой заканчивается процесс вторичной кристаллизации. Линия *PS* — линия нижних критических точек *A*. Линия *GSE* — начало процесса вторичной кристаллизации твердого раствора. Линия *GS* — линия верхних критических точек *A*; она показывает температуру выделения феррита из аустенита. Линия *SE* — линия верхних критических точек *A<sub>m</sub>*; она показывает температуру начала выделения вторичного цементита и является линией предельной растворимости углерода в аустените. Сплавы, содержащие до 2,14% C, условно называют сталями, более 2,14% C — чугунами. Сталь, содержащая 0,8% C, называется эвтектоидной сталью; сталь, содержащая менее 0,8% C — доэвтектоидной. Сталь, содержащая более 0,8% C — заэвтектоидной.

**Практическое применение диаграммы Fe—Fe<sub>3</sub>C.** Диаграмму Fe—Fe<sub>3</sub>C используют для определения видов и температурных интервалов термической обработки стали; для назначения температурного интервала при обработке давлением; для определения температуры плавления и заливки сплава и его литейных свойств (жидкости, усадки).

Основной процесс термической обработки является полиморфизм железа и его твердых растворов на базах  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железа. Полноразмерные превращения стали данного состава происходят в определенном интервале температур, ограниченном нижней *A<sub>1</sub>* и верхней *A<sub>2</sub>* и *A<sub>m</sub>* критическими точками.

В результате полиморфизма происходит перекристаллизация в твердом состоянии. Перекристаллизация — это изменение кристаллического строения стали при ее нагреве или при охлаждении до определенных температур.

Таким образом, *термическая обработка* заключается в нагреве сплавов до определенных температур, выдержке их при этих температурах и последующем охлаждении с различной скоростью. При этом изменяется структура сплава, а следовательно, и его свойства. Изменяя режим термической обработки, можно получить различные

физико-механические свойства и структуры железоуглеродистых сплавов.

Основные операции термической обработки — отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг и г — фазовая перекристаллизация, нагрев доэвтектоидной стали выше точки *A<sub>2</sub>*, заэвтектоидной выше точки *A<sub>m</sub>* с последующим охлаждением вместе с печью. При полном отжиге структура сплава состоит из феррита и перлита (доэвтектоидные стали) или из перлита и вторичного цемента (заэвтектоидные стали). Отжиг снимает внутреннее напряжение, понижает твердость и повышает пластичность, устраняет химическую неоднородность. Неполный отжиг — нагрев выше точки *A<sub>1</sub>*, но ниже *A<sub>2</sub>*; происходит неполная фазовая перекристаллизация.

Нормализация — нагрев выше точки *A<sub>2</sub>*, охлаждение на воздухе; измельчение зерна и повышение прочности.

Закалка — нагрев выше точки *A<sub>2</sub>*, быстрое охлаждение в воде или масле; повышение твердости и прочности.

Регулируя скорость охлаждения стали из аустенитного состояния, можно получать различные структуры: мартенсит, троостит, сорбит и перлит.

Структура мартенсита образуется при быстрым охлаждении в результате перехода решетки твердого раствора  $\gamma$ -железа (аустенита) в решетку твердого раствора  $\alpha$ -железа (феррита) без выделения углерода из раствора. Переход  $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо сопровождается изменением объема кристаллических решеток, что вызывает появление внутренних, дополнительных напряжений. Мартенсит представляет собой пересыщенный раствор углерода в  $\alpha$ -железе с искаженной кристаллической решеткой. Сплав со структурой мартенсита обладает большой твердостью и прочностью.

Структура троостита образуется при более медленном охлаждении и представляет собой смесь феррита и цемента с высокой дисперсностью. Троостит имеет меньшую твердость и прочность, чем мартенсит.

Структура сорбита образуется еще при более медленном охлаждении. Зерна феррита укрупняются, образуется мелкодисперсная феррито-карбидная смесь.

Структура перлита образуется в результате очень медленного охлаждения сплава вместе с печью и является у эвтектоидных сталей конечной структурной стадией аустенита; у доэвтектоидных сталей конечной структурной будет грубая смесь феррита и перлита; у заэвтектоидных сталей — смесь перлита и цемента.

Отпуск — нагрев ниже точки *A<sub>1</sub>* и медленное охлаждение; его применяют как сопутствующую операцию после закалки для получения более устойчивых структур. Высокий отпуск (нагрев до температуры 700 °C) применяют для повышения пластичности и обрабатываемости при небольшом снижении прочности закаленной стали; низкий отпуск (нагрев до температуры 250 °C) применяют для повышения вязкости закаленной стали при сохранении проч-



**Температурный интервал при горячей обработке давлением.** Этот интервал находится ниже линии солидуса на 100—150 °С (верхний предел) и выше линии критических точек  $A_3$  на 25—50 °С (нижний предел).

Температуру плавления определяют по линии ликвидуса. Температура заливки должна быть выше линии ликвидуса.

## 6. ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

На свойства железуглеродистых сплавов влияет наличие в них постоянных примесей (вредных — серы, фосфора, кислорода, азота, водорода; полезных — кремния, марганца и др.). Эти примеси могут попадать в сплав из природных соединений (руд), например, сера и фосфор; из металлургического лома — хром, никель и др.; в процессе раскисления — кремний и марганец.

**Влияние углерода.** Углерод в железуглеродистом сплаве находится главным образом в связанном состоянии в виде цементита. В свободном состоянии в виде графита он содержится в чугунах. С увеличением содержания углерода возрастает твердость, прочность и уменьшается пластичность.

**Влияние серы.** Сера является вредной примесью. Она образует легкоплавкую эвтектику  $FeS + Fe$ . При кристаллизации сплава легкоплавкая эвтектика расплывается по границам зерен и при повторном нагреве расплавляется, в результате чего нарушается связь между зернами, что приводит к образованию трещин и надрывов. Это явление носит название красноломкости. Допускается содержание серы до 0,06 %.

**Влияние фосфора.** Фосфор растворяется в  $\gamma$ - и  $\alpha$ -железе, искажает кристаллическую решетку и ухудшает пластические свойства сплава. Фосфор вызывает явление хладноломкости. Фосфор — вредная примесь, и его содержание в сталях не должно превышать 0,08 %. В чугуне допускается до 0,3 % P.

**Влияние азота, кислорода и водорода.** Эти элементы присутствуют в сплавах или в составе хрупких неметаллических включений, например оксидов  $FeO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , нитридов  $Fe_3N$ , или в свободном состоянии, при этом они располагаются в дефектных местах в виде молекулярного и атомарного газов. Неметаллические включения служат концентраторами напряжений и могут понизить механические свойства (прочность, пластичность).

Водород поглощается сталью в атомарном состоянии. При охлаждении сплава растворимость водорода уменьшается, и в молекулярной форме он накапливается в микропорах под высоким давлением. Таким образом, водород может стать причиной образования внутренних надрывов в металле (флокенов).

**Влияние кремния и марганца.** Кремний и марганец попадают в железуглеродистый сплав при его выплавке в процессе раскисления. Оксиды кремния ( $SiO_2$ ) связывают закись железа ( $FeO$ ) в силикаты ( $FeO \cdot SiO_2$ ) и удаляются вместе со шлаками.

Кремний, растворяясь в феррите, повышает предел текучести и уменьшает склонность к хладноломкости. Кремний способствует графитизации чугуна.

Марганец образует твердый раствор с железом и немного повышает твердость и прочность феррита. В присутствии серы он частично связывается с серой в сернистый марганец и переходит в шлак. При содержании марганца более 1,5 % снижаются пластические свойства стали. В сталях содержится обычно не более 0,4 % Si и 0,8 % Mn.

## 7. ОСНОВЫ КЛАССИФИКАЦИИ СТАЛЕЙ И ИХ МАРКИРОВКА

**Классификация сталей.** Стали классифицируют по химическому составу, качеству и назначению. По химическому составу классифицируют главным образом конструкционные стали. Конструкционными называют стали, предназначенные для изготовления деталей машин и металлургических конструкций. Конструкционные стали делят на углеродистые и легированные.

Углеродистые стали могут быть низкоуглеродистые  $C \leq 0,09 \pm 0,25 \%$ ; среднеуглеродистые  $C \leq 0,25 \pm 0,45 \%$  и высокоуглеродистые  $C \leq 0,45 \pm 0,75 \%$ . Легированные стали условно подразделяют на низколегированные с содержанием легирующих элементов в сумме 2,5—5 %; среднелегированные — до 10 % и высоколегированные — более 10 %.

Другие стали, например инструментальные, с особыми физико-химическими свойствами по химическому составу обычно не классифицируют.

Качество сталей определяется условиями металлургического производства и содержанием в них вредных примесей. Стали классифицируют на группы А, Б, В.

К г р у п п е А относят стали обыкновенного качества. Они могут иметь повышенное содержание серы (до 0,06 %) и фосфора (до 0,07 %).

Механические свойства сталей обыкновенного качества ниже механических свойств сталей других групп. Основным элементом, определяющим механические свойства этих сталей, является углерод. Их выплавляют в кислородных конвертерах и мартеновских печах. Стали обыкновенного качества подразделяют на спокойные (полностью раскисленные), кипящие (не полностью раскисленные) и полуспокойные (занимающие промежуточное положение между спокойными и кипящими). Спокойные, полуспокойные и кипящие стали обозначают в конце марки буквами соответственно «сп»; «пс» и «кп». К г р у п п е В относят качественные стали — углеродистые или легированные. В этих сталях содержание серы и фосфора не должно превышать 0,035 % каждого. Выплавляют их в основных мартеновских печах.

К г р у п п е В относят высококачественные стали, главным образом легированные, выплавляемые в электропечах. В этих сталях

содержание серы и фосфора не должно превышать 0,025 % каждо.

Особовысококачественные стали выплавляют в электропечах с последующими электрошлаковым переплавом, вакуумнодуговым переплавом и т. п. Содержание серы и фосфора — до 0,015 % каждо.

По назначению стали подразделяют на строительные, машиностроительные (конструкционные, общего назначения), инструментальные, машиностроительные специализированного назначения, с особыми физическими свойствами, с особыми химическими свойствами (устойчивые к коррозии).

Строительные стали — это углеродистые и некоторые низколегированные стали с наибольшим содержанием углерода; стали обыкновенного качества.

Для машиностроительных сталей (конструкционных) общепринятого назначения главной характеристикой являются их механические свойства, которые зависят от содержания углерода, изменяющегося в пределах 0,05—0,75 %.

Инструментальные стали имеют высокие твердость, прочность и износостойкость. Их используют для изготовления режущего и измерительного инструментов, штампов и т. д. Твердость и вязкость зависят от содержания в инструментальных сталях углерода.

Машиностроительные стали и сплавы специализированного назначения характеризуются их механическими свойствами при низких и высоких температурах; физическими, химическими и технологическими свойствами. Они могут быть использованы для эксплуатации в особых условиях (при температурах ниже 0 °С, при нагреве, динамических нагрузках и т. п.).

Стали и сплавы с особыми физическими свойствами получают в результате специального легирования и термической обработки. Их применяют в основном в приборостроении, электронной, радиотехнической промышленности и т. д.

Стали и сплавы с особыми химическими свойствами (стойкие к коррозии) содержат не менее 12,5—13 % Cr. Стали с высоким содержанием хрома и никеля — стойкие в агрессивных средах.

**Маркировка сталей.** Стали обыкновенного качества обозначают Ст0—Ст6. Чем выше номер, тем выше содержание углерода и прочностные свойства стали.

Качественные, высококачественные и особовысококачественные стали маркируют следующим образом. Содержание углерода указывается в начале марки цифрой, соответствующей его содержанию: в сотых долях процента для сталей, содержащих до 0,75 % С (конструкционные стали), и в десятых долях процента для сталей, имеющих более 0,75 % С (инструментальные стали). Соответственно сталь, содержащую до 0,1 % С, обозначают сталь 10, сталь с 0,5 % С — сталь 50, сталь с 1 % С — сталь У10.

Легированные элементы обозначают русскими буквами, например Н (никель); Г (марганец); Х (хром); С (кремний) и т. д. Если после буквы нет цифры, то сталь содержит 1—1,5 % легированного элемента,

кроме молибдена и ванадия, содержание которых в сталях обычно до 0,2—0,3 %, если стоит цифра, то она указывает содержание легированного элемента в процентах.

Различия в обозначении качественной стали по сравнению с высококачественной стали состоит в том, что в конце марки высококачественной стали ставят букву «А»: сталь 30ХНМ — качественная, а стали 30ХНМА и У10А — высококачественные. В конце марки особовысококачественной стали электрошлакового переплава стоит буква «Ш».

Для некоторых высококачественных сталей бывают следующие отклонения в обозначении. Все легированные стали и сплавы с особыми физическими свойствами всегда высококачественные, поэтому в марках этих сталей букву «А» не ставят. Шарикоподшипниковые стали обозначают в начале марки буквами «ШХ», затем стоит содержание хрома в десятых долях процента, например, сталь ШХ15. Быстрорежущие сложнотемпературные стали обозначают буквой «Р», следующая за ней цифра указывает на процентное содержание в ней вольфрама.

Электротехнические стали обозначают буквой «Э»; следующая за ней цифра указывает на процентное содержание в ней кремния.

### 8. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ

**Алюминий** — легкий металл (плотность 2700 кг/м<sup>3</sup>), обладает высокими теплопроводностью [200 Вт/(м·К)] и электропроводимостью (10<sup>-5</sup> См), стоек к коррозии. Температура плавления алюминия 658 °С.

Алюминиевые сплавы разделяют на деформируемые и литейные. Те и другие могут быть неупрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Деформируемые алюминиевые сплавы хорошо обрабатываются прокаткой, ковкой, штамповкой. К деформируемым алюминидным сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы системы Al—Mn (АМц), содержащие до 1,6 % Mn, и сплавы системы Al—Mg (АМг), содержащие до 5,8 % Mg. Эти сплавы обладают высокой пластичностью и невысокой прочностью.

К деформируемым алюминидным сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы системы Al—Cu—Mg с добавками некоторых элементов (дуралюмины, кованые сплавы), а также высокопрочные и жаропрочные сплавы сложного химического состава. Дуралюмины (Д16—Д18) содержат 3,8—4,8 % Cu, 0,4—1,8 % Mg, а также 0,4—0,9 % Mn, который повышает коррозионную стойкость сплавов. После термической обработки (закалка и естественное старение) эти сплавы имеют высокую прочность и удлинение. Кованые сплавы (АК6—АК8) содержат 1,8—4,8 % Cu, 0,4—0,8 % Mg, 0,4—1 % Mn, 0,6—1,2 % Si, хорошо деформируются в нагретом состоянии, обладают высокой прочностью после закалки и старения. Их используют для изготовления крыльчаток, рам, фитингов обработкой давлением.

18622 Д 304

БИБЛИОТЕКА

3876



Литые алюминиевые сплавы применяют для изготовления деталей машин и приборов литем. Наиболее широко используют сплавы алюминия с содержанием 10—13 % Si (системы Al—Si); Al12, Al14, Al19.

Сплавы алюминия с медью (системы Al—Cu, содержащие 4,5—5,3 % Cu) и марганцем (до 1 % Mn) обладают повышенной прочностью. Это сплавы Al17, Al19 и др. Их применяют для литья деталей, работающих при достаточно высоких нагрузках (кронштейны, арматура и др.).

Сплавы алюминия с магнием (системы Al—Mg, содержащие 9,5—11,5 % Mg) обладают хорошей коррозионной стойкостью и применяются для отливок, работающих во влажной атмосфере. Это сплавы Al18, Al113. Часто отливки из алюминиевых литейных сплавов подвергают термической обработке (закалке и старению) для повышения прочности, пластичности, снижения остаточных напряжений.

Алюминий применяют для приготовления печенных алюмино-иневых сплавов (САС) и спекаемых алюмино-иневых пудр (САП), из которых изготовляют детали методами порошковой металлургии, позволяющей получать детали с особыми свойствами — коррозионной стойкостью, прочностью, пористостью и т. д.

**Магний** — легкий металл (плотность 1740 кг/м<sup>3</sup>), температура его плавления 651 °С. Промышленный магний марки Mr 96 содержит 99,92 % Mg, марки Mr 95 — 99,82 % Mg. Магниевого сплавы разделяют на деформируемые и литейные, не упрочняемые и упрочняемые термической обработкой.

Деформируемые магниевые сплавы (МА) содержат до 2 % Mn, до 5 % Al, десятые доли процента цинка, например сплавы МА2, МА8, не упрочняемые термической обработкой; высокопрочные сплавы — до 9 % Al и 0,5 % Mn (сплав МА5). Жаропрочные магниевые сплавы содержат добавки циркония, никеля и др.

Литые магниевые сплавы (МЛ6, МЛ3) содержат 2,5—9 % Al и 0,5—1,5 % Zn, а также 0,15—0,5 % Mn, имеют невысокий модуль упругости ( $E = 43\,000 \text{ МПа}$ ) и вследствие этого хорошие демпфирующие свойства (гасят колебания конструкции). Однако эти сплавы обладают невысокой коррозионной стойкостью, и для ее повышения отливки оксидируют, покрывают лаками.

**Технически чистая медь** имеет плотность 8940 кг/м<sup>3</sup>, температуру плавления 1083 °С, обладает высокой пластичностью, коррозионной стойкостью, малым удельным электросопротивлением ( $7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), высокой теплопроводностью [385 Вт/(м·К)], и поэтому ее широко используют для изготовления электропроводов, деталей электрических машин и приборов, в химическом машиностроении. Медь по чистоте подразделяют на марки М0 (99,95 % Cu), М1 (99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu), М3 (99,5 % Cu), М4 (99 % Cu).

Медные сплавы разделяют на бронзы и латуни. Бронзы — это сплавы меди с оловом (4—33 % Sn), свинцом (30 % Pb), алюми-

нием (5—11 % Al), кремнием (4—5 % Si), сурьмой и фосфором. Латуни — это сплавы меди с цинком (до 50 % Zn) с небольшими добавками алюминия, кремния, никеля, марганца. Медные сплавы обозначают начальными буквами их названий (Л — латунь, Бр — бронза), после чего следует первые буквы основных названий элементов, образующих сплав, и цифры, указывающие количество легирующего элемента в процентах. Например, ЛЦ40Мц1,5 — латунь, содержащая 40 % Zn, 1,5 % Mn, остальное Cu.

Бронзы и латуни разделяют на деформируемые и литейные. Литейные бронзы и латуни отличаются от деформируемых тем, что в их состав вводят добавки, улучшающие литейные свойства сплава — повышающие жидкотекучесть, уменьшающие усадку. Однако эти добавки снижают пластические свойства литейных бронз и латуней по сравнению с деформируемыми.

**Титан** — тугоплавкий металл (температура плавления  $1665 \pm 5$  °С), плотность 4500 кг/м<sup>3</sup>. Временное сопротивление чистого титана  $\sigma_B = 250 \text{ МПа}$ , относительное удлинение  $\delta = 70$  %, он обладает высокой коррозионной стойкостью. Удельная прочность титана выше, чем у многих легированных конструктивных сталей. Поэтому при замене сталей титановыми сплавами можно при равной прочности уменьшить массу детали на 40 %. Однако титан имеет низкую жаропрочность, так как при температурах выше 550—600 °С легко окисляется и поглощает водород. Титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается, из него изготовляют сложные отливки, но обработка его резанием затруднительна.

Для получения сплавов с заданными свойствами титан легируют алюминием, молибденом и др. Наибольшее применение нашли сплавы, легированные алюминием, например сплав ВТ5 (до 5 % Al) с  $\sigma_B = 700 \div 900 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 10 \div 12$  %. Из этого сплава получают поковки, отливки.

Для получения требуемых механических свойств титановые сплавы подвергают термической обработке (отжигу, закалке и старению) в печах с защитной атмосферой. Титан и его сплавы используют для изготовления деталей самолетов, в химическом машиностроении, судостроении и других отраслях машиностроения.

## ПРОИЗВОДСТВО ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

## ГЛАВА I. СОВРЕМЕННОЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

## 1. СТРУКТУРА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА И ЕГО ПРОДУКЦИЯ

Металлургическое производство — это сложная система различных производств, базирующихся на месторождении руд, коксующихся углей, энергетических комплексах. Оно включает: шахты и карьеры по добыче руд и каменных углей; горно-обогатительные комбинаты, где обогатщают руды, подготавливая их к плавке; коксохимические заводы, где осуществляют подготовку углей, их коксование и извлечение из них полезных химических продуктов; энергетические цехи для получения сжатого воздуха (для дутья доменных печей), кислорода, очистки металлургических газов; доменные цехи для выплавки чугуна и ферросплавов или цехи для производства железорудных металлизированных окатышей; заводы для производства ферросплавов; сталелитейные цехи (конвертерные, маргеновские, электросталеплавильные) для производства стали; прокатные цехи, в которых слитки стали перерабатывают в сортовой прокат — балки, рельсы, прутки, проволоку, лист и т. д.

**Основная продукция черной металлургии:** чугуны — передельный, используемый для передела на сталь, и литейный — для производства фасонных чугунных отливок на машиностроительных заводах; железорудные металлизированные окатыши для выплавки стали; ферросплавы (сплавы железа с повышенным содержанием Mn, Si, V, Ti и т. д.) для выплавки легированных сталей; стальные слитки для производства сортового проката (рельсов, балок, прутков, полой, проволоки), а также листа, труб и т. д.; стальные слитки для изготовления крупных кованых валов, роторов турбин, дисков и т. д., называемые кузнечными слитками.

**Продукция цветной металлургии:** слитки цветных металлов для производства сортового проката (уголка, полосы, прутков и т. д.); слитки (чугунки) цветных металлов для изготовления отливок на машиностроительных заводах; лигатуры — сплавы цветных металлов с деформируемыми элементами, необходимые для производства сложных легированных сплавов для отливок; слитки чистых и особо чистых металлов для приборостроения, электронной техники и других отраслей машиностроения.

## 2. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Для производства чугуна, стали и цветных металлов используют руду, флюсы, топливо и огнеупорные материалы.

**Промышленной рудой** называют горную породу, из которой при данном уровне развития техники целесообразно извлекать металлы или их соединения. Например, в настоящее время целесообразно извлекать металлы из руд, если содержание их в руде составляет: железа на менее 30—60 %, меди 3—5 %, молибдена 0,005—0,02 %. Руда состоит из минералов, содержащих металл или его соединения, и пустой породы (т. е. различных примесей). Руды называют по одному или нескольким металлам, которые входят в их состав. Например, железные, медные, медно-никелевые и т. д.

В зависимости от содержания добываемого металла, руды бывают богатые и бедные. Бедные руды (с малым содержанием добываемого металла) обогащают, т. е. удаляют из руды часть пустой породы. В результате получают концентрат с повышенным содержанием добываемого металла. Использование концентрата увеличивает технико-экономические показатели работы металлургических печей.

**Флюсы** — это материалы, используемые в плавильную печь для образования легкоплавкого соединения с пустой породой руды или концентратом и золью топлива. Такое соединение называют шлаком.

Обычно шлак имеет меньшую плотность, чем металл, поэтому он расплывается в печи над металлом и может быть удален в процессе плавки. Шлак защищает металл от печных газов и воздуха. Шлак называют кислым, если в его составе преобладают кислотные оксиды ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), и основным, если в его составе больше основных оксидов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$  и др.).

**Топливом** в металлургических печах являются кокс, природный газ, мазут, доменный (колошниковый) газ.

Кокс получают на коксохимических заводах в коксовых печах сухой перетонкой при температуре 1000 °C (без доступа воздуха) каменного угля коксующихся сортов. В коксе содержится 80—88 % углерода, 8—12 % золы, 2—5 % влаги, 0,5—1,8 % серы, 0,02—0,2 % фосфора и до 1—2 % летучих продуктов. Для доменной плавки кокс должен содержать минимальное количество серы и золы. Куски кокса должны иметь размеры 25—60 мм. Кокс должен обладать достаточной прочностью, чтобы не разрушаться под действием шихтовых материалов.

**Природный газ** содержит 90—98 % углеводородов ( $\text{CH}_4$  и  $\text{C}_2\text{H}_6$ ) и 1 % азота. Мазут содержит 84—88 % углерода, 10—12 % водорода, небольшое количество серы и кислорода. Кроме того, используют доменный или колошниковый газ, побочный продукт доменного процесса.

**Огнеупорные материалы** применяют для изготовления внутреннего облицовочного слоя (футеровки) металлургических печей и ковшей для расплавленного металла. Огнеупорные материалы способны выдерживать нагрузки при высоких температурах, противостоять резким изменениям температур, химическому воздействию шлага и печных газов. Огнеупорность материала определяется температурой его размягчения. По химическим свойствам огнеупорные материалы разделяют на кислые, основные, нейтральные.



Материалы, содержащие большое количество кремнезема  $\text{SiO}_2$ , называют кислотными (динасовые, кварцелинистые), например, кварцевый песок (95 %  $\text{SiO}_2$ ), динасовый кирпич, огнеупорность которых 1690—1700 °С; материалы, содержащие основные оксиды ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ) — основными (мангезитовые, кирпич и металлургический порошок, мангезитохромитовый кирпич, огнеупорность которого более 2000 °С); содержащие большое количество  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  — нейтральными (хромомангезитовые, высокоглиноземные, шамотные, например шамотный кирпич, содержащий 50—60 %  $\text{SiO}_2$  и 30—40 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

При высоких температурах футеровка печи взаимодействует с флюсами и шлаками. Если в печи, выложенной основным огнеупорным материалом, применять кислые флюсы, то взаимодействие шлака и футеровки приведет к ее разрушению. То же произойдет, если в печи, выложенной огнеупорными материалами из кислых оксидов, применить основные шлаки. Поэтому в печах с кислой футеровкой используют кислые шлаки, а в печах с основной — основные.

Углеродистый кирпич и блоки содержат до 92 % С в виде графита, обладают высокой огнеупорностью. Применяются для кладки дещадки доменных печей, электролитных ванн для получения алюминия, тиглей для плавки и разливки медных сплавов.

## ГЛАВА II. ПРОИЗВОДСТВО ЧУГУНА

### 1. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ, И ИХ ПОДГОТОВКА К ПЛАВКЕ

Для выплавки чугуна в доменных печах используют железные руды, топливо, флюсы.

Железные руды содержат железо в различных соединениях: в виде оксидов  $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; гидроксидов  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , карбонатов  $\text{FeCO}_3$  и др., а также пустую породу, состоящую в основном из  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  и др. К железным рудам относятся магнитный железняк  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (55—60 % Fe), красный железняк  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (55—60 % Fe), бурый железняк, содержащий гидраты оксидов железа  $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (37—55 % Fe); шпатовые железняки, содержащие  $\text{FeCO}_3$  (30—40 % Fe).

Манганцевые руды применяют для выплавки сплава железа с марганцем — ферромарганца (10—82 % Mn), а также передельных чугунов, содержащих до 1 % Mn. Марганец в рудах содержится в виде оксидов и карбонатов:  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{MnCO}_3$  и др. Хромовые руды используют для производства феррохрома, металлургического хрома и огнеупорных материалов — хромомангезитов. Хромовые руды содержат хромит ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ), магнохромит ( $\text{Mg} \cdot \text{Fe} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_4$  (до 40 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )).

Комплексные руды используют для выплавки природно-легированных чугунов. Это железоманганцевые руды (до 20 % Mn), хромоникелевые руды (37—47 % Fe, до 2 % Cr, до 1 % Ni), железованадиевые руды (до 0,17—0,35 % V).

Топливом для доменной плавки служит кокс, позволяющий проводить необходимую температуру и создавать условия для восстановления железа из руды; в целях экономии часть кокса заменяют природным газом, мазутом, пылевидным топливом.

Флюсом при выплавке чугуна в доменных печах является известняк  $\text{CaCO}_3$  или доломитизированный известняк, содержащий  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ , так как в шлаки должно входить определенное количество основных оксидов ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ). Это необходимо для удаления серы из металла, в которой она переходит из кокса и железной руды при плавке. Рекомендуется, чтобы в шлаке отношение  $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) \approx 1$ .

Подготовка руд к доменной плавке осуществляется для повышения производительности доменной печи, снижения расхода кокса и улучшения качества чугуна. Цель этой подготовки состоит в увеличении содержания железа в шихте и уменьшении в ней вредных примесей — серы, фосфора, повышение ее однородности по кусковатости и химическому составу. Метод подготовки добываемой руды зависит от ее качества.

Дробление и сортировка руд по крупности служат для получения кусков оптимальной для плавки величины. Куски руды дробят и сортируют на дробилках и классификаторах.

Обогащение руды основано на различии физических свойств минералов, входящих в ее состав: плотностей составляющих, магнитных, физико-химических свойств минералов. Промывка руды водой позволяет отделить плотные составляющие руды от пустой породы (песка, глины). Гравитация (отсажка) — это отделение руды от пустой породы при пропускании струи воды через дно вибрирующего сита, на котором лежит руда: пустая порода вытесняется в верхний слой и уносится водой, а рудные минералы опускаются. Магнитная сепарация основана на различии магнитных свойств железосодержащих минералов и частиц пустой породы. Измельченную руду подвергают действию магнита, притягивающего железосодержащие минералы, отделяя их от пустой породы.

Окискование производят для переработки концентратов, полученных после обогащения, в кусковые материалы необходимых размеров. Применяют два способа окискования: агломерацию и окатывание. Агломерация. Шихту, состоящую из железной руды (40—50 %) известняка (15—20 %), возврата мелкого агломерата (20—30 %), коксовой мелочи (4—6 %), влаги (6—9 %), спекают на агломерационных машинах при температуре 1300—1500 °С. При спекании из руды удаляются вредные примеси (сера, мышьяк), разлагаются карбонаты, и получается кусковой пористый офломованный материал — агломерат.

Окатывание. Шихта из измельченных концентратов, флюса, топлива, увлажняется и при обработке во вращающихся барабанах, тарельчатых чашах (транзюлаторах) приобретает форму шариково-окатышей диаметром до 30 мм. Окатыши высушивают и обжигают при температуре 1200—1350 °С на обжиговых машинах, после чего они становятся прочными и пористыми. Использование агломерата

и окатышей неключает отдельную подачу флюса-известняка в доменную печь при плавке, так как флюс в необходимом количестве входит в их состав.

## 2. ВЫПЛАВКА ЧУГУНА

Чугун выплавляют в печах шахтного типа — доменных печах. Сущность процесса получения чугуна в доменных печах заключается в восстановлении оксидов железа, входящих в состав руды, при сгорании топлива в печи.

**Устройство доменной печи и ее работа.** Доменная печь (рис. 2.1) имеет стальной кожух, выложенный внутри огнеупорным шамотным кирпичом. Рабочее пространство печи включает колошник 6, шахту 5, распар 4, заплечики 3, горн 1, лещады 15. В верхней части загрузжак находится засыпной аппарат 8, через который в печь взвешивают, подают в вагонетки 9 подъемника, которые вывешиваются по мосту 12 к засыпному аппарату 8 и, опрокидываясь, шихту подают шихту в приемную воронку 7 распределителя шихты. При опускании малого конуса 10 засыпного аппарата шихта попадает в чашу 11, а при опускании большого конуса 13 — в доменную печь, что предотвращает выход газов из доменной печи в атмосферу. Для равномерного распределения шихты в доменной печи малый конус и приемная воронка после очередной загрузки поворачиваются на угол, кратный  $60^\circ$ .

При работе печи шихтовые материалы, проплавляясь, опускаются, а через загрузочное устройство в печь подаются новые порции шихты в таком количестве, чтобы весь полезный объем печи был заполнен. Полезный объем печи — это объем, занимаемый шихтой лещады до нижней кромки большого конуса засыпного аппарата при его опускании. Современные доменные печи имеют полезный объем 2000—5000 м<sup>3</sup>. Полезная высота доменной печи достигает 35 м.

В верхней части горна находятся фурумные устройства 14, через которые в печь поступает нагретый воздух, необходимый для горения топлива. Воздух нагревают для уменьшения потерь теплоты и снижения расхода кокса. Воздух поступает в доменную печь из воздухонагревателя, внутри которого имеются камера сгорания и насадка. Насадка выложена из огнеупорных кирпичей, так что между ними образуются вертикальные каналы. В камеру сгорания к горелке подается очищенный от пыли доменный газ, который сгорает и образует горячие газы.

Газы, проходя через насадку, нагревают ее и удаляются через дымовую трубу. Затем подача газа к горелке прекращается и через насадку пропускается воздух, подаваемый турбовоздухоудельной машиной. Воздух, проходя через насадку, нагревается до температуры 1000—1200 °С и поступает к фурумному устройству 14, а оттуда через фурумы 2 — в рабочее пространство. Доменная печь имеет не-

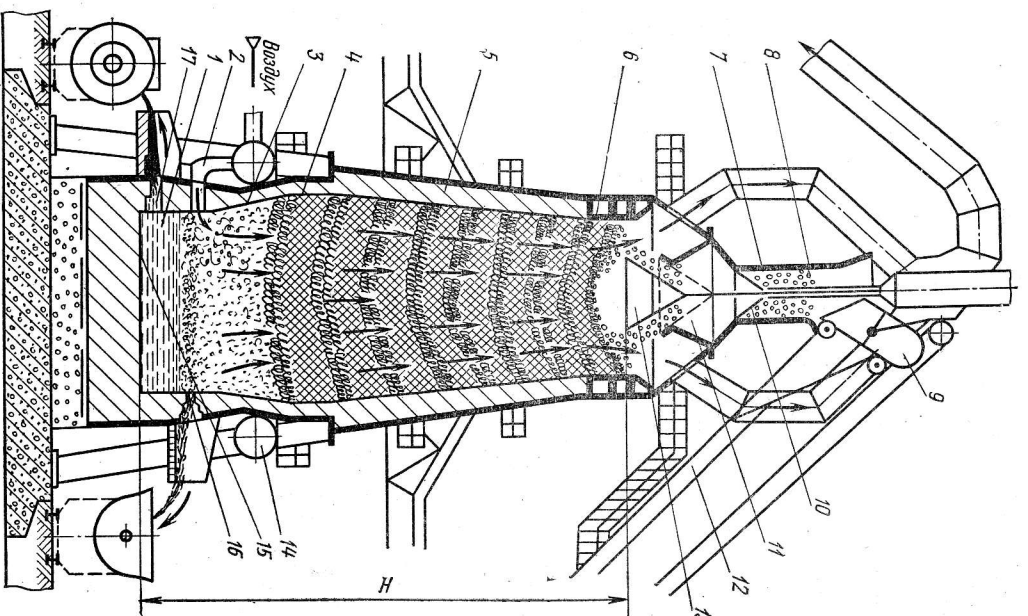


Рис. 2.1 Устройство доменной печи

сколько воздухонагревателей: в то время как в одних насадка нагревается, в других насадка отдает теплоту холодному воздуху, нагревая его. После охлаждения насадки воздухом нагреватели переключаются.

**Горение топлива.** Вблизи фурум (см. рис. 2.1) уголь кокса, взаимодействуя с кислородом воздуха, сгорает. В результате горения выделяется теплота и образуется газовый поток, содержащий CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и др. При этом в печи несколько выше уровня фурум развивается температура более 2000 °С. Горячие газы, поднимаясь, отдают теплоту шихтовым материалам и нагревают их, охлаждаясь до температуры 300—400 °С у колошника.





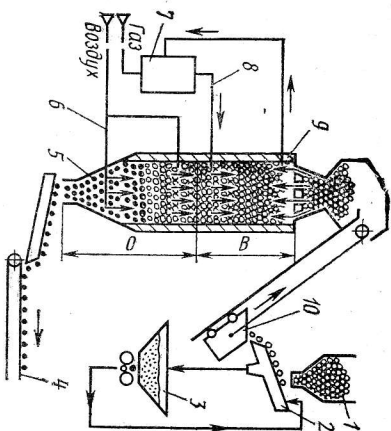


Рис. 2.2. Схема установки для прямого восстановления железа из руды и подучения металлизированных окатышей

рой смесь разлагается на водород и окись углерода. В восстановительной зоне печи *B* создается температура 1000—1100 °С, при которой водород и окись углерода восстанавливают железную руду в окатышах до твердого губчатого железа. В результате содержание железа в окатышах достигает 90—95%. Для охлаждения железных окатышей по трубопроводу *6* в зону охлаждения *O* печи подается ливку стали в электропечах.

## ГЛАВА III. ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ

### 1. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА

Основными материалами для производства стали являются переделанный чугуун и стальной лом (скрап). Содержание углерода и примесей в стали значительно ниже, чем в чугуне (табл. 2.1).

Поэтому *сущностью* любого *металлургического передела чугуна является снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе плавки.*

Примеси отличаются по своим физико-химическим свойствам, поэтому для удаления каждой из них в плавильном агрегате создают

Таблица 2.1

Состав переделного чугуна и низкоуглеродистой стали, %

Материал	C	Si	Mn	P	S
Переделный чугун	4—4,4	0,76—1,26	До 1,75	0,15—0,3	0,03—0,07
Сталь низкоуглеродистая	0,14—0,22	0,12—0,3	0,4—0,65	0,05	0,055

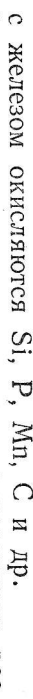
Выплавкой чугуна в доменных печах все более широко используют более экономичные процессы прямого восстановления железа из руды с последующей его плавкой в электропечах для получения стали.

Одни из таких процессов осуществляются на комбинате им. Д. И. Брежнева. Добытую окатыши (см. с. 23). Окатыши (рис. 2.2) из бункера *1* по грохоту *2* поступают в конвейер *10* шихтовальной машины и оттуда в шахтную печь *9*, работающую по принципу противотока. Прокаты от окатышей из грохота *2* попадают в бункер *3* с брикетировочным прессом и в виде окатышей вновь поступают на грохот *2*, подающий их в затрубное устройство. Для восстановления железа из окатышей в печь по трубопроводу *8* подают смесь природного и доменного газов, подвергнутой в

определенные условия, используя основные законы физической химии.

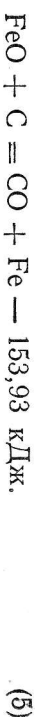
В соответствии с законом действующих масс скорость химических реакций пропорциональна концентрации реагирующих веществ.

Поскольку в наибольшем количестве в чугуне содержится железо, то оно окисляется в первую очередь при взаимодействии чугуна с кислородом в сталеплавильной печи



Одновременно с железом окисляются Si, P, Mn, C и др.

Образующийся оксид железа при высоких температурах растворяется в железе и отдает свой кислород более активным элементам—примесям в чугуне, окисляя их:



Чем больше оксида железа содержится в жидком металле, тем активнее окисляются примеси. Для ускорения окисления примесей в сталеплавильную печь добавляют железную руду, окатышу, содержащие много оксидов железа. Таким образом, основное количество примесей окисляется за счет кислорода оксида железа.

Скорость окисления примесей зависит не только от их концентрации, но и от температуры металла и подчиняется принципу Ле Шателье, в соответствии с которым химические реакции, выделяющие тепло, протекают интенсивнее при более низких температурах или при некотором понижении температуры, а реакции, поглощающие тепло, протекают активнее при высоких температурах или при некотором повышении температуры. Поэтому в начале плавки, когда температура металла невысока, интенсивнее идут процессы окисления кремния, фосфора, марганца, протекающие с выделением теплоты, а углерод интенсивно окисляется только при высокой температуре металла (в середине и конце плавки).

После расплавления шихты в сталеплавильной печи образуются две несмешивающиеся среды: жидкий металл и шлак. Металлы и шлак разделяются из-за различных плотностей. В соответствии с законом распределения (закон Нернста), если какое-либо вещество растворяется в двух соприкасающихся, но несмешивающихся жидкостях, то распределение вещества между этими жидкостями происходит до установления определенного соотношения (константы распределения) постоянной для данной температуры. Поэтому большинство компонентов (Mn, Si, P, S) и их соединения, растворимые в жидком металле и шлаке, будут распределяться между металлом и шлаком в определенном соотношении, характерном для данной температуры.

Нерастворимые соединения, в зависимости от плотности будут переходить либо в шлак, либо в металл. Изменяя состав шлака, можно менять соотношение между количеством примесей в металле



и шлаке так, что нежелательные примеси будут удаляться из металла в шлак. Убирая шлак с поверхности металла и наводя новый путем подачи флюса требуемого состава, можно удалить вредные примеси (серу, фосфор) из металла. Поэтому регулирование состава шлака с помощью флюсов является одним из основных путей управления металлургическими процессами.

Используя изложенные законы, процессы выплавки стали осуществляют в несколько этапов.

**Первый этап** — расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла. На этом этапе температура металла невысока; интенсивно происходит окисление железа, образование оксида железа и окисление примесей Si, P, Mn по реакциям (1)–(4). Наиболее важная задача этого этапа: удаление фосфора — одной из вредных примесей в стали. Для этого необходимо проведение плавки в основной печи, в которой можно использовать основной шлак, содержащий CaO. Выделяющийся по реакции (3) фосфорный ангидрид образует с оксидом железа нестойкое соединение (FeO)<sub>3</sub>·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Оксид кальция CaO — более сильное основание, чем оксид железа поэтому при невысоких температурах связывает ангидрид P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, переводя его в шлак:



Реакция образования фосфорного ангидрида протекает с выделением теплоты, поэтому в соответствии с принципом Ле Шателье для удаления фосфора из металла *необходимо невысокие температуры ванны металла и шлака*. Из реакций (3) и (6) следует также, что для удаления фосфора из металла необходимо *долгое время содержания в шлаке* FeO. Для повышения содержания FeO в шлаке в сталеплавильную печь в этот период плавки добавляют окалину, железную руду, наводя железистый шлак. По мере удаления фосфора из металла, в шлак содержание фосфора в шлаке возрастает. В соответствии с законом распределения удаление фосфора из металла замедляется. Поэтому для более полного удаления фосфора из металла с его зеркала убирают шлак, содержащий фосфор, и наводят новый со свежими добавками CaO.

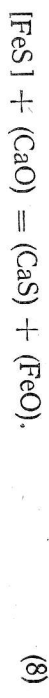
**Второй этап** — «кипение» металлургической ванны — начинается по мере ее прогрева до более высоких температур, чем на первом этапе. При повышении температуры металла в соответствии с принципом Ле Шателье более интенсивно протекает реакция (5) окисления углерода, поглощаясь в теплоты. Поскольку в металле содержится больше углерода, чем других примесей (см. табл. 2.1), то в соответствии с законом действующих масс для окисления углерода в металл вводят значительное количество руды, окалины или вылавляют кислород. Образующийся в металле оксид железа реагирует с углеродом по реакции (5), а пузырьки оксида углерода CO выделяются из жидкого металла, вызывая «кипение» ванны. При «кипении» уменьшается содержание углерода в металле до требуемого, выравнивается температура по объему ванны, частично удаляются неметаллические включения, прилипающие к всплывающим пузырькам

CO, а также другие газы, проникающие в пузырьки CO. Все это способствует повышению качества металла. Поэтому этап «кипения» ванны является основным в процессе выплавки стали.

В этот же период создаются условия для удаления серы из металла. Сера в стали находится в виде сульфида [FeS], который растворяется также в основном шлаке (FeS). Чем выше температура, тем больше количество FeS растворяется в шлаке, т. е. больше серы переходит из металла в шлак. Сульфид железа, растворенный в шлаке, взаимодействует с оксидом кальция, также растворенным в шлаке:



Эта же реакция протекает на границе металл — шлак между сульфидом железа в стали [FeS] и [CaO] в шлаке:



Образующееся соединение CaS растворимо в шлаке, но не растворяется в железе, поэтому сера удаляется в шлак.

Как следует из реакций (7) и (8), чем больше в шлаке (CaO) и меньше (FeO), тем полнее удаляется из стали сера. Поэтому при плавке в основных печах можно снизить содержание углерода и серы в стали, выплавлять сталь из шихты любого химического состава.

В сталеплавильных печах с кислой футеровкой нет условий для уменьшения количества фосфора и серы в стали, так как использовать основной шлак с высоким содержанием CaO нельзя из-за разрушения футеровки, а содержание (FeO) в шлаке недостаточно. Поэтому в кислых печах можно выплавить сталь только из шихтовых материалов с малым количеством серы и фосфора.

**Третий этап** (завершающий) — раскисление стали — заключается в восстановлении оксида железа, растворенного в жидком металле. При плавке повышение содержания кислорода в металле необходимо для окисления примесей, но в готовой стали кислород — вредная примесь, так как понижает механические свойства стали, особенно при высоких температурах. Сталь раскисляют двумя способами: осаждающим и диффузионным.

Осаждающее раскиснение осуществляют введением в жидкую сталь растворимых раскислителей (ферромарганца, ферросилиция, алюминия), содержащих элементы (Mn, Si, Al и др.), которые в данных условиях обладают большим средством к кислороду, чем железистые. В результате раскисления восстанавливается железо и образуются оксиды MnO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и другие, которые имеют меньшую плотность, чем сталь, и удаляются в шлак. Однако часть их может остаться в стали, что понижает ее свойства.

Диффузионное раскиснение осуществляют раскислителем шлака. Ферромарганец, ферросилиций и другие раскислители в мелкоразмелченном виде загружают на поверхность шлака. Раскислители, восстанавливая оксид железа, уменьшают его содержание в шлаке. В соответствии с законом распределения оксид железа, растворенный в стали, начнет переходить в шлак. Образующиеся при таком способе раскисления оксиды остаются в шлаке, а восстановленное же-

лезно переходит в сталь, что уменьшает содержание в ней неметаллических включений и повышает ее качество.

При плавке в кислородной печи процесс плавки протекает при высоком шлаке (55—58 %  $\text{SiO}_2$ ) и угловых для раскисления стали более благоприятные: кремнезем, обладающий сильными кислотными свойствами, связывает  $\text{FeO}$  в соединения типа  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ . После длительной выдержки под кислым шлаком содержание оксида железа в стали резко уменьшается и окончательно сталь раскисляется небольшой добавкой ферромарганца.

В зависимости от степени раскисленности выплавляют спокойные, кипящие и полуспокойные стали.

Спокойная сталь получается при полном раскислении в печи и ковше.

Кипящая сталь раскислена в печи неполностью. Ее благодаря взаимодействию  $\text{FeO}$  и углерода, содержащихся в металле, образующийся при реакции  $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$  оксид углерода выделяется из стали, способствуя удалению из стали азота и водорода. Газы выделяются в виде пузырьков, вызывая ее «кипение». Кипящая сталь практически не содержит неметаллических включений — порудков раскисления, поэтому обладает хорошей пластичностью.

Полуспокойная сталь имеет промежуточную раскисленность между спокойной и кипящей. Частично она раскисляется в печи и в ковше, а частично в изложнице благодаря взаимодействию оксида железа и углерода, содержащихся в стали.

Легирование стали осуществляют введением ферросплавов или чистых металлов в необходимом количестве в раслилав. Легирующие элементы, средство к кислороду которых меньше, чем у железа ( $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Cu}$ ), при плавке и разливке практически не окисляются и поэтому их вводят в печь в любое время плавки (обычно вместе с основной шихтой). Легирующие элементы, у которых средство к кислороду больше, чем у железа ( $\text{Si}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Ti}$  и др.), вводят в металл после или одновременно с раскислением, в конце плавки, а иногда непосредственно в ковш.

Чугун переделывают в сталь в различных по принципу действия металлургических агрегатах: мартеновских печах, кислородных конвертерах, дуговых электропечах.

## 2. ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ В МАРТЕНОВСКИХ ПЕЧАХ

### Устройство и работа мартеновской печи.

Мартеновская печь (рис. 2.3) — пламенная отражательная регенеративная печь. Она имеет рабочее плавильное пространство, ограниченный снизу подиной 12, сверху сводом 11, а с боков передней 5 и задней 10 стенками. Подина имеет форму ванны с откосами по направлению к стенкам печи. Футеровка печи может быть основной и кислой. Если в процессе плавки стали в шлаке преобладают основные окислы, процесс называют основным мартеновским процессом, а если кислым — кислым. Основную мартеновскую печь футеруют магнезитовым кирпичом, на который набивают магнезитовый порошок. Кислую мартеновскую печь футеруют динасовым кирпичом, а подину

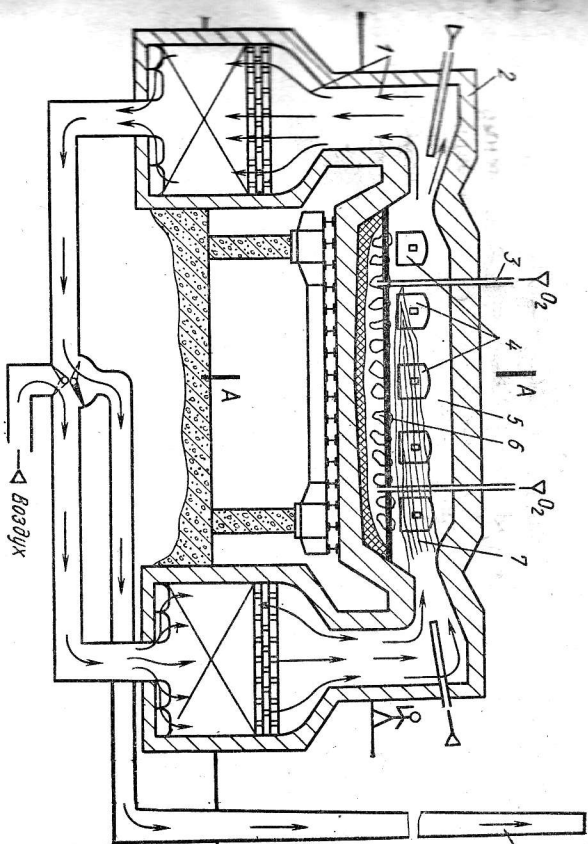
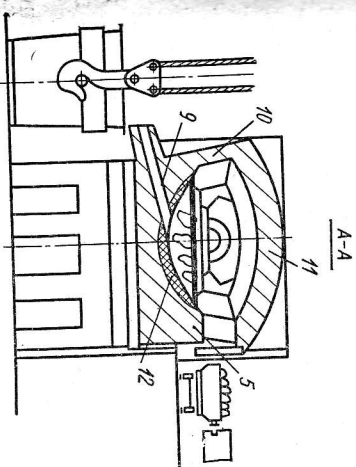


Рис. 2.3. Схема мартеновской печи



из кварцевого песка. Свод мартеновской печи делают из динасового кирпича или магнезитохромитового кирпича. В передней стенке печи имеются загрузочные окна 4 для подачи шихты и флюса, а в задней — отверстие 9 для выпуска готовой стали.

В нашей стране работают мартеновские печи вместимостью 200—900 т жидкой стали. Характеристикой рабочего пространства является площадь пода печи, которую условно подчитывают на уровне порогов загрузочных окон. Например, для печи вместимостью 900 т площадь пода составляет 115  $\text{m}^2$ . Головки печи 2 служат для смешения топлива (мазута или газа) с воздухом и подачи этой смеси в плавильное пространство.

Для подогрева воздуха и газа (при работе на низкокалорийном газе печь имеет два регенератора 1). Регенератор — это камера, в которой размещена насадка — огнеупорный кирпич, выложенный



в клетку. Отходящие из печи газы имеют температуру 1500—1600 °С. Попадая в регенераторы, газы нагревают насадку до 1250—1280 °С. Через один из регенераторов, например, правый, подают воздух, который, проходя через насадку, нагревается до температуры 1100—1200 °С и поступает в головку печи, где смешивается с топливным газом. На выходе из головки образуется факел 7, направленный на шихту 6. Отходящие газы проходят через противоположную головку (левую), очистные устройства (шлаковики), служащие для отделения от газа частиц шлага и пыли, и направляются во второй (левый) регенератор, нагревая его насадку. Охлажденные газы покидают печь через дымовую трубу 8. После охлаждения насадки правого регенератора переключают клапаны и поток газов в печи изменяет направление: через нагретые левый регенератор и головку в печь поступает воздух, а правый нагревается тепловой отходящих газов.

Факел имеет температуру 1750—1800 °С и нагревает рабочее пространство печи и шихту. Факел способствует окислению примесей шихты при плавке.

В зависимости от состава шихты, используемой при плавке, различают разновидности мартеновского процесса: 1) скрап-процесс, при котором шихта состоит из стального лома (скрапа) и 25—45 % чушкового переделного чугуна; процесс применяют на заводах, где нет доменных печей, но расположенных в промышленных центрах, где много металлолома; 2) скрап-рудиный процесс, при котором шихта состоит из жидкого чугуна (55—75 %), скрапа и железной руды; процесс применяют на металлургических заводах, имеющих доменные печи. Наибольшее количество стали производят скрап-рудиным процессом в мартеновских печах с основной футеровкой, что позволяет переделывать в сталь различные шихтовые материалы.

**Плавка стали скрап-рудиным процессом в основной мартеновской печи.** В печь с помощью завалочной машины загрузают железную руду и известняк и после их прогрева подают скрап. По окончании прогрева скрапа в печь заливают жидкий чугун, который взаимодействует с железной рудой и скрапом. В период плавки за счет окислов руды и скрапа интенсивно окисляются примеси чугуна: кремний, фосфор по реакции (б), марганец и частично углерод. Оксиды  $SiO_2$ ,  $P_2O_5$ ,  $MnO$ , а также  $CaO$  и известь образуют шлак с высоким содержанием  $FeO$  и  $MnO$  (железистый шлак).

После расквашивания шихты, окисления значительной части примесей и разогрева металла проводят период «кипения» ванны: в печь загружают железную руду или продувают ванну подаваемым по трубам 3 (см. рис. 2.3) кислородом. Углерод в металле интенсивно окисляется, образуется оксид углерода. В это время отключают подачу топлива и воздуха и удаляют шлак.

Для удаления из металла серы наводят новый шлак, подавая на зеркало металла известь с добавлением боксита или плавикового шпата для уменьшения вязкости шлага. Содержание  $CaO$  в шлаке возрастает, а  $FeO$  уменьшается. Это создает условия для ин-

тенсивного протекания реакций (7) и (8) и удаления из металла серы.

В период «кипения» углерод интенсивно окисляется. Поэтому в период «кипения» ванны шихта должна содержать избыток углерода (на 0,5—0,6 %) сверх заданного в выплавляемой стали. В процессе «кипания» металл доводится до заданного химического состава, его температура выравнивается по объему ванны, из него удаляются газы и неметаллические включения. Процесс «кипания» считают окончившимся, если содержание углерода в металле соответствует заданному, а содержание фосфора минимально.

После этого металл раскисляют путем окисления углерода металла, одновременно прекращают загрузку руды в печь, вследствие чего раскисление идет путем окисления — ферромарганец, ферросилиций, подается в ванну раскислители — ферромарганец, ферросилиций, алюминий; 2) окончательно раскисляют алюминием и ферросилицием в ковше при выпуске стали из печи. После отбора контрольных проб сталь выпускают в сталеразливочный ковш через отверстие в задней стенке печи.

В основных мартеновских печах выплавляют стали углеродистые, конструкционные, низко- и среднеуглеродистые (марганцовистые, хромистые), кроме высоколегированных сталей и сплавов, которые получают в плавильных электропечах.

**Кислый мартеновский процесс.** Этим способом выплавляют качественные стали. Поскольку в печах с кислой футеровкой нельзя навести основной шлак для удаления фосфора и серы, то применяют шихту с низким содержанием этих составляющих. Стали, выплавляемые в кислых мартеновских печах, содержат меньше водорода и азота, неметаллических включений, чем выплавляемые в основной печи. Поэтому кислая сталь имеет более высокие механические свойства, особенно ударную вязкость и пластичность, и ее используют для особо ответственных деталей: коленчатых валов крупных двигателей, роторов мощных турбин, шарикоподшипников.

Основные технико-экономические показатели производства стали в мартеновских печах следующие: производительность печи, определяемая весом стали с 1 м<sup>2</sup> площади пода в сутки (т/м<sup>2</sup> в сутки) и расход топлива на 1 т выплавляемой стали (кг/т). Средний вес стали с 1 м<sup>2</sup> площади пода в сутки составляет 10 т/м<sup>2</sup>, а расход основного топлива — до 80 кг/т.

**3. ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ В КИСЛОРОДНЫХ КОНВЕРТЕРАХ**

Кислородно-конвертерный процесс — это выплавка стали из жидкого чугуна в конвертере с основной футеровкой и продувкой кислородом через водоохлаждаемую фурму.

**Кислородный конвертер** — это сосуд грушевидной формы из сталеного листа, футерованный основным кирпичом. Вместимость конвертера 130—350 т жидкого чугуна. В процессе работы конвертер может поворачиваться на цапфах вокруг горизонтальной оси на 360 °С для завалки скрапа, заливки чугуна, слива стали и шлага. Шихтовыми материалами кислородно-конвертерного процесса являются жидкий переделный чугун (см. табл. 2.1), стальной лом

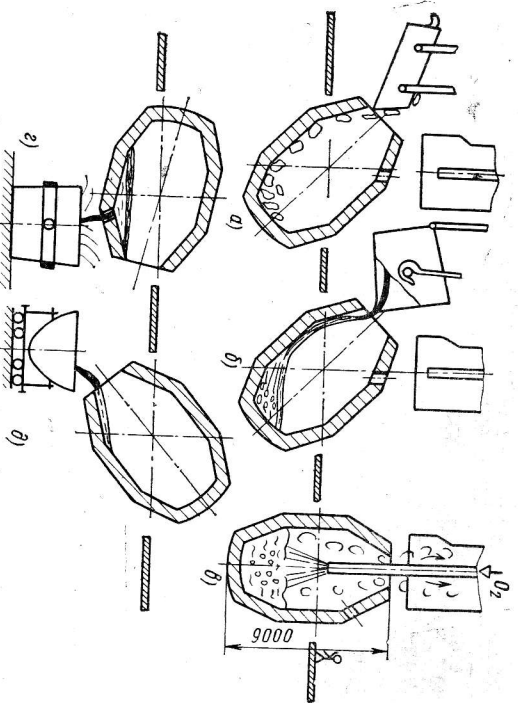


Рис. 2.4. Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородных конвертерах

(не более 30 %), известь для наведения шлака, железная руда, а также боксит ( $Al_2O_3$ ), плавиковый шпат ( $CaF_2$ ), которые применяют для разжижения шлака.

**Технология плавки.** Перед плавкой конвертер наклоняют, через горловину с помощью завалочных машин загружают скрап (рис. 2.4, а), заливает чугун при температуре 1250—1400 °С (рис. 2.4, б). После этого конвертер поворачивают в вертикальное рабочее положение (рис. 2.4, в), внутрь его вводят водоохлаждаемую фурму и через нее подают кислород под давлением 0,9—1,4 МПа. Одновременно с началом продувки в конвертер загружают известь, боксит, железную руду. Струи кислорода проникают в металл, вызывая его циркуляцию в конвертере и перемешивание со шлаком. Благодаря интенсивному окислению примесей чугуна при взаимодействии с кислородом в зоне под фурмой разбивается температура до 2400 °С.

В зоне контакта кислородной струи с чугуном в первую очередь окисляется железо, так как его концентрация во много раз выше, чем примесей. Образующийся оксид железа растворяется в шлаке и металле, обогащая металл кислородом. Кислород, растворенный в металле, окисляет кремний, марганец, углерод в металле, и содержание их понижается. При этом происходит разогрев ванны металла теплотой, выделяющейся при окислении примесей, подержание его в жидком состоянии.

В кислородном конвертере благодаря присутствию шлаков с большим содержанием  $CaO$  и  $FeO$ , перемешиванию металла и шлака создаются условия для удаления из металла фосфора по реакции (6) в начале продувки ванны кислородом, когда ее температура

еще невысока. В чугунах, перерабатываемых в конвертерах, не должно быть более 0,15 % P. При повышенном (до 0,3 %) содержании фосфора для его удаления необходимо сливать шлак и наводить новый, что снижает производительность конвертера.

Удаление серы из металла в шлак протекает в течение всей плавки по реакциям (7) и (8). Однако высокое содержание в шлаке  $FeO$  (до 7—20 %) затрудняет удаление серы из металла. Поэтому для перевода в сталь в кислородных конвертерах применяют чугун с содержанием до 0,07 % S.

Подачу кислорода заканчивают, когда содержание углерода в металле соответствует заданному. После этого конвертер поворачивают и выпускают сталь в ковш (рис. 2.4, з).

При выпуске стали из конвертера ее раскисляют в ковше осаждающим методом ферромарганцем, ферросилицием и алюминием; затем из конвертера сливают шлак (рис. 2.4, д).

В кислородных конвертерах выплавляют конструкционные стали с различным содержанием углерода, кипящие и спокойные.

В кислородных конвертерах трудно выплавлять стали, содержащие легкоокисляющиеся легирующие элементы, поэтому в них выплавляют низколегированные (до 2—3 % легирующих элементов) стали. Легирующие элементы вводят в ковш, расплавив их в электропечи, или твердые ферросплавыв вводят в ковш перед выпуском в него стали. Плавка в конвертерах вместимостью 130—300 т заканчивается через 25—50 мин. Кислородно-конвертерный процесс более производительный, чем плавка стали в мареновских печах.

#### 4. ПРОИЗВОДСТВО СТАЛИ В ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

Плавильные электропечи имеют преимущества по сравнению с другими плавильными агрегатами, так как в них можно получить высокому температуру металла, создавать окислительную, восстановительную, нейтральную атмосферу и вакуум, что позволяет выплавлять сталь любого состава, раскислять металл с образованием минимального количества неметаллических включений — продуктов раскисления. Поэтому электропечи используют для выплавки конструкционных, высоколегированных, инструментальных, специальных сталей и сплавов.

Плавильные электропечи бывают дуговыми и индукционными. **Дуговая плавильная электропечь** (рис. 2.5) питается трехфазным переменным током и имеет три цилиндрических электрода 9 из графитизированной массы. Электрический ток от трансформатора кабелями 7 подводится к электрододержателям 8, а через них — к электродам 9 и ванне металла. Между электродами и металлической шихтой 3 возникает электрическая дуга, электроэнергия превращается в теплоту, которая передается металлу и шлаку излучением. Рабочее напряжение 160—600 В, сила тока 1—10 кА. Во время работы печи длина дуги регулируется автоматическим путем перемещением электродов. Стальной ковш 4 печи футерован огнеупорным кирпичом 7, основным (магнезитовый, магнезитохромитовый) или



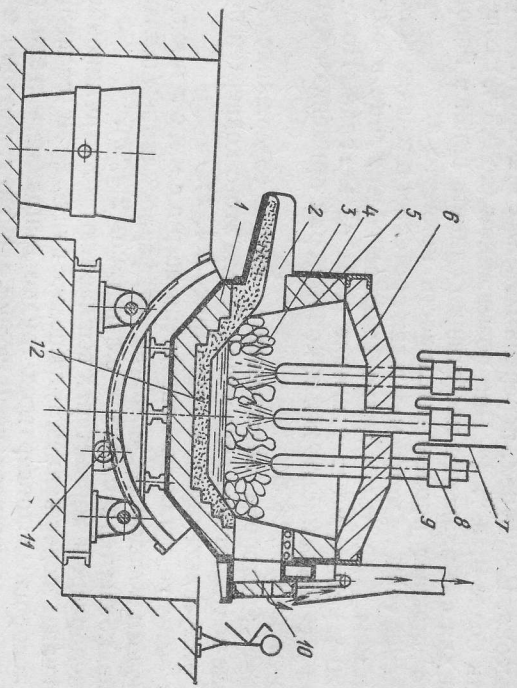


Рис. 2.5. Схема дуговой плавильной электропечи

кислым (динасовый). Подину 12 печи набивают огнеупорной массой. Плавильное пространство ограничено стенками 5, подиной 12 и сводом 6 из огнеупорного кирпича. Для управления ходом плавки имеются рабочее окно 10 и летка для выпуска готовой стали по желобу 2 в ковш.

Печь загружают при снятом своде. Механизмом 11 печь может наклоняться в сторону загрузочного окна и летки. Вместимость этих печей 0,5—400 т. В металлургических цехах используют электропечи с основной футеровкой, а в литейных с кислой.

В основной дуговой печи можно осуществлять плавку двух видов: на шихте из легированных отходов (методом передела) и на углеводистой шихте (с окислением примесей).

Плавку на шихте из легированных отходов ведут без окисления примесей. Шихта для такой плавки должна иметь меньше, чем в выплавляемой стали, марганца и кремния и низкое содержание фосфора. По сути это переплав. Однако в процессе плавки примеси (алюминий, титан, кремний, марганец, хром) окисляются. Кроме этого, шихта может содержать оксиды. После расплавления шихты из металла удаляют серу, навальную шлак, при необходимости науглероживают и доводят металл до заданного химического состава. Затем проводят диффузионное раскиснение, подавая на шлак мелкодробленый ферросилиций, алюминий, молотый кокс. Так выплавляют легированные стали из отходов машиностроительных заводов.

Плавку на углеводистой шихте применяют для производства конструкционных сталей. В печь загружают шихту: стальной лом (90%), чушковый переплавный чугу́н (до 10%), электроплавный бой или кокс для науглероживания металла и известь 2—3%.

Затем электроды опускают и включают ток; шихта под действием электродов плавится, металл накапливается на подине печи. Во время плавления шихты кислородом воздуха, оксидами шихты и окислы окисляются железо, кремний, фосфор, марганец и частично углерод. Оксид кальция из известки и оксиды железа образуют основной железный шлак, способствующий удалению фосфора из металла.

После нагрева металла и шлака до температуры 1500—1540 °С в печь загружают руду и известь и проводят период «кипения» металла; происходит дальнейшее окисление углерода. Когда содержание углерода будет меньше заданного на 0,1%, кипение прекращают и удаляют из печи шлак. Затем приступают к удалению серы и раскислению металла, доведению химического состава до заданного. Раскиснение производят осаждением и диффузионным методом. После удаления железистого шлака в печь подают силикомарганец и силикокальций — раскислители для осаждающего раскисления. Затем в печь загружают известь, плавиковый шпат и шпательный бой. После расплавления флюсов и образования высокоосновного шлака на его поверхность вводят раскислительную смесь для диффузионного раскисления (известь, плавиковый шпат, молотый кокс и ферросилиций), углерод кокса и кремний ферросилиция восстанавливают оксид железа в шлаке, содержание его в шлаке снижается, и кислород из металла по закону распределения переходит в шлак. По мере раскисления и понижения содержания FeO шлак становится почти белым. Раскисление под белым шлаком длится 30—60 мин.

В этот период создаются условия для удаления из металла серы, что объясняется высоким (до 55—60%) содержанием CaO в шлаке, низким (менее 0,5%) содержанием FeO и высокой температурой металла.

Для определения химического состава металла берут пробы и при необходимости в печь вводят ферросплавы для получения заданного химического состава металла, после чего выплавляют конечное раскисление стали алюминием и силикокальцием и выпускают металл из печи в ковш.

При выплавке легированных сталей в дуговых печах в сталь вводят легирующие элементы в виде ферросплавов. Порядок ввода определяется средством легирующих элементов к кислороду (см. с. 32). В дуговых печах выплавляют высококачественные углеродистые стали — конструкционные, инструментальные, жаропрочные и жаростойкие.

Индукционная тигельная плавильная печь (рис. 2.6) состоит из водоохлаждаемого индуктора 3, внутри которого находится тигель 4 с металлической шихтой. Через индуктор от генератора высокой частоты проходит однофазный переменный ток повышенной частоты (500—2000 Гц). Ток создает переменный магнитный поток, проникая куски металла в тигле, наводит в них мощные вихревые токи (Фуко), нагревающие металл 1 до расплавления и необходимых температур перегрева. Тигель изготовляют из кислых (кварцит) или основных (магнезитовый порошок) огнеупоров. Вместимость тигля

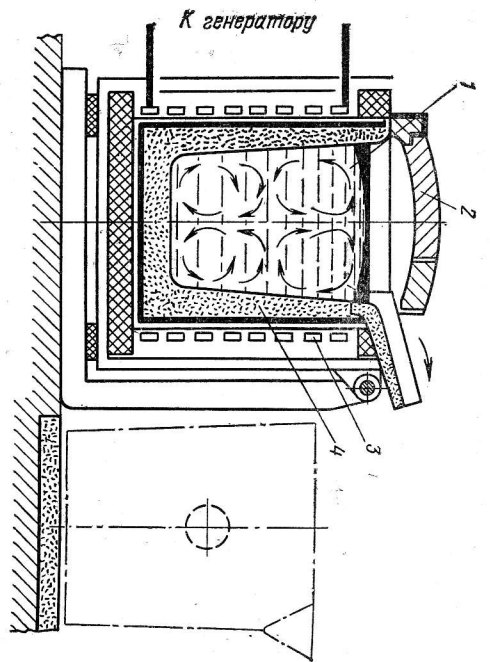


Рис. 2.6. Схема индукционной тигельной плавильной печи

60 кг — 25 т. Для уменьшения потерь теплоты печь имеет съемный свод 2.

Индукционные печи имеют преимущества перед дуговыми: в них отсутствует электрическая дуга, что позволяет выплавлять сталь с низким содержанием углерода, газов и малым угаром элементов; при плавке в металле возникают электродинамические силы, которые перемешивают металл в печи и способствуют выравниванию химического состава, всплыванию неметаллических включений; небольшие размеры печей позволяют помещать их в камеры, где можно создавать любую атмосферу или вакуум. Однако эти печи имеют малую стойкость футеровки, и температура шлака в них недостаточна для протекания металлургических процессов между металлом и шлаком. Эти преимущества и недостатки печей выплаивают возможность плавки в них; в индукционных печах выплаивают сталь и сплавы из легированных отходов металла с добавлением ферросплавов методом сплавления.

При загрузке тщательно подбирают химический состав шихты в соответствии с заданным, а необходимое количество ферросплавов для получения заданного химического состава металла загружают на дно тигля вместе с шихтой. После расплавления шихты на поверхности металла загружают шлаковую смесь для уменьшения тепловых потерь металла и уменьшения угара легирующих элементов, защитит его от насыщения газами. При плавке в кислой печи после расплавления и удаления плавильного шлака наводят шлак из боя стекла ( $SiO_2$ ). Металл раскисляют ферросилицием, ферромарганцем и алюминием перед выпуском его из печи.

В индукционных печах с основной футеровкой выплавляют высококачественные легированные стали с высоким содержанием марганца, никеля, титана, алюминия, а в печах с кислой футеровкой —

конструкционные, легированные другими элементами стали. В этих печах можно получать стали с низким содержанием углерода и безуглеродистые сплавы, так как в печах нет науглероживающей среды и науглероживания не происходит.

При вакуумной индукционной плавке индуктор с тиглем, дозатор шихты и изложницы помещают в вакуумные камеры. Плавка, введение легирующих добавок, раскислителей, разливка металла в изложницы производятся без нарушения вакуума в камере. Таким способом получают сплавы высокого качества с малым содержанием газов, неметаллических включений, сплавы, легированные любыми элементами.

### 5. РАЗЛИВКА СТАЛИ

Выплавленную сталь выпускают из плавильной печи в разливочный ковш, из которого ее разливают в изложницы или кристаллизаторы машины для непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). В изложницах или кристаллизаторах сталь затвердевает, и получают слитки, которые подвергают прокатке, ковке.

Изложницы — чулочные формы для изготовления слитков. Изложницы выполняют с квадратным, прямоугольным, круглым и многогранным поперечными сечениями. Слитки квадратного сечения переделывают на сортовой прокат (двутавровые балки, швеллеры, уголки и т. д.). Слитки прямоугольного сечения с отношением ширины к толщине 1,5—3 переделывают на лист. Из слитков круглого сечения изготавливают трубы, колеса. Многогранные слитки используют для поковки.

Для прокатки отливают слитки массой 200 кг — 25 т; для поковки отливают слитки массой до 300 т и более. Обычно углеродистые спокойные и кипящие стали разливают в слитки массой до 25 т, легированные и высококачественные стали — в слитки массой 500 кг — 7 т, а некоторые сорта высоколегированных сталей — в слитки массой несколько килограммов.

Сталь разливают в изложницы сверху, снизу (сифоном) и на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ).

В изложницы сверху (рис. 2.7, а) сталь разливают непосредственно из ковша 1.

При сифонной разливке (рис. 2.7, б) сталью заполняют одновременно несколько изложниц (4—60). Изложницы устанавливаются на поддоне 6, в центре которого располагается центральный литник 3, футерованный огнеупорными трубками 4, соединяющий каналы 7 с изложницами. Жидкая сталь 2 из ковша 1 поступает в центровой литник и снизу плавно без разбрызгивания заполняет изложницы 5. Поверхность слитка получается чистой, можно разливать большую массу металла одновременно в несколько слитков. Для обычных углеродистых сталей используют разливку сверху, а для легированных и высококачественных — разливку сифоном.



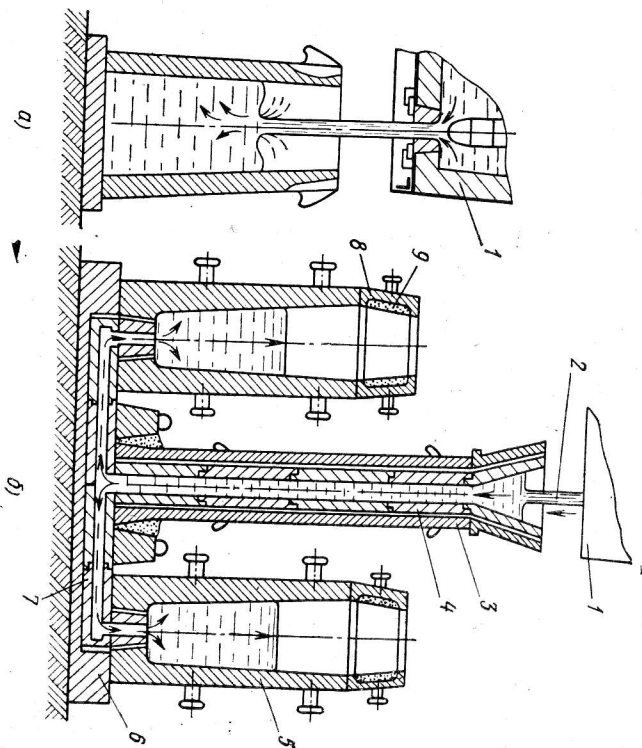


Рис. 2.7. Разливка стали в изложницу

Непрерывная разливка стали состоит в том, что жидкую сталь из ковша 1 через промежуточное разливочное устройство 2 непрерывно подают в водоохлаждаемую изложницу без дна — кристаллизатор 3, из нижней части которого вытягивается затвердевший слиток 4 (рис. 2.8). Перед заливкой металла в кристаллизатор вводят затравку, образующую его дно. Жидкий металл, попадая в кристаллизатор и на затравку, охлаждается, затвердевает, образуя корку, и соединяется с затравкой. Затравка тянущими валками 5 вытягивается из кристаллизатора вместе с затвердевающим слитком, сердцевина которого еще жидкая. Скорость вытягивания слитка из кристаллизатора зависит от его сечения. Например, скорость вытягивания слитков с сечением  $150 \times 500$  и  $300 \times 2000$  мм около 1 м/мин.

На выходе из кристаллизатора слиток охлаждается водой из форсунки в зоне 6 второго охлаждения. Затем затвердевший слиток подается в зону 7 резки, где он разрезается газовым резаком 8 на куски заданной длины. Таким способом отливается слитки с прямыми углами поперечным сечением  $(150 \times 150—400 \times 100)$  мм, с квадратным сечением  $(150 \times 150—400 \times 100)$  мм, круглые, в виде толстостенных труб. Вследствие направленного затвердевания и непрерывного литья при.usаке слитки непрерывной разливки имеют плотное строение и мелкозернистую структуру, в них отсутствуют усадочные раковины. Выход годных заготовок может достигать 96—98 % массы разливаемой стали.

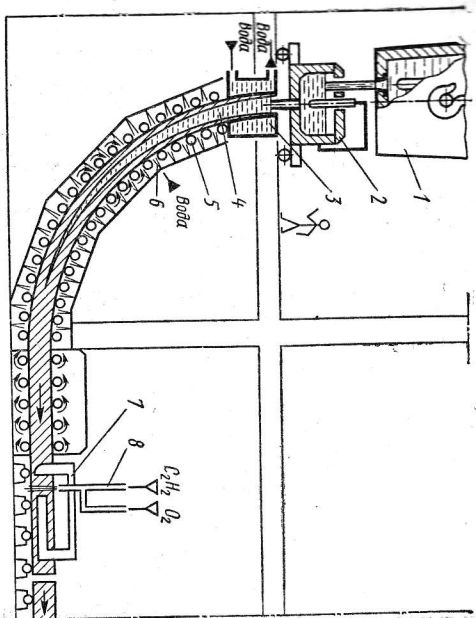


Рис. 2.8. Схема машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ)

Машины непрерывного литья могут иметь несколько кристаллизаторов, что позволяет одновременно получать несколько слитков, которые могут быть прокатаны на сортовых станах, минуя блюминги и слэбинги.

## 6. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ И СТРОЕНИЕ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ

Залитая в изложницу сталь отдает теплоту ее стенкам, поэтому затвердевание стали начинается у стенок изложницы. Толщина закристаллизовавшейся корки непрерывно увеличивается, при этом между жидкой сердцевинной слитка и твердой коркой металла располагается зона, в которой одновременно имеются растущие кристаллы и жидкий металл между ними. Кристаллизация слитка заканчивается вблизи его продольной оси.

Сталь затвердевает в виде кристаллов дендритной формы — дендритов. Размеры и форма дендритов зависят от условий кристаллизации. На строение стального слитка большое влияние оказывает степень раскисленности стали.

**Спокойная сталь** (рис. 2.9, а, з) затвердевает без выделения газов, в верхней части слитка образуется усадочная раковина 1, а в средней — усадочная осевая рыхлость.

Для устранения усадочных дефектов слитки спокойной стали отливают с прибавкой, которая образуется надставкой 8 (см. рис. 2.7, б) со стенками, футерованными огнеупорной массой 9 малой теплопроводности. Поэтому сталь в прибавке долгое время остается жидкой и плавает слиток, а усадочная раковина расплывается в прибавку. Слиток спокойной стали (рис. 2.9, а) имеет следующее строение: тонкую наружную корку А из мелких равноосных кристаллов; зону Б крупных столбчатых кристаллов (дендритов); кристаллов; конус осадков В крупных неориентированных кристаллов; конус осадков

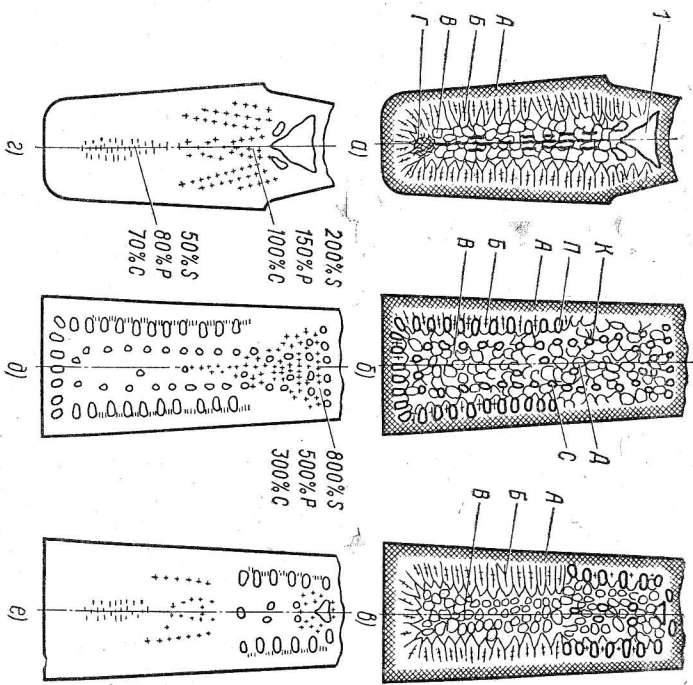


Рис. 2.9. Схема строения стальных слитков

ния *Г* — мелкокристаллическую зону у донной части слитка. Стальные слитки неоднородны по химическому составу. Химическая неоднородность, или ликвация, возникает вследствие уменьшения растворимости примесей в железе при его переходе из жидкого состояния в твердое. Ликвация бывает двух видов — дендритная и зональная.

Дендритная ликвация — неоднородность стали в пределах одного кристалла (дендрита) — центральной оси и ветвей. Например, при кристаллизации стали содержание серы на границах дендрита по сравнению с содержанием в центре увеличивается в 2 раза, фосфора — в 1,2 раза, а углерода уменьшается почти на половину.

Зональная ликвация — неоднородность состава стали в различных частях слитка. В верхней части слитка из-за конвекции жидкого металла содержание серы, фосфора и углерода увеличивается в несколько раз (рис. 2.9, *а*), а в нижней части — уменьшается. Зональная ликвация приводит к обраковке металла вследствие отклонения его свойств от заданных. Поэтому прибывшую и подприбыльную части слитка, а также донную его часть при прокатке отрезают.

В слитках кипящей стали (рис. 2.9, *б*, *в*) не образуется усадочная раковина: усадка стали расредоточена по пологостям газовых

пузырей, возникающих при кипении стали в изложнице. При прокатке слитка газы завариваются. Кипение стали влияет на зональную ликвацию в слитках, которая развита в них больше, чем в слитках спокойной стали. Углерод, сера и фосфор потоком металла выносятся в верхнюю часть слитка, от чего свойства стали в этой части слитка ухудшаются. Поэтому при прокатке отрезают только верхнюю часть слитка, так как в донной ликвация мала. Для уменьшения ликвации кипение после заполнения изложницы прекращают, накрывая слиток металлической крышкой («механическое закупоривание»), либо раскисляют металл алюминием или ферросилицием в верхней части слитка («химическое закупоривание»).

Слиток кипящей стали имеет следующее строение (рис. 2.9, *б*, *в*): плотную наружную корку *А* без пузырей, из мелких кристаллитов, зону сотовых пузырей *В*, вытянутых к оси слитка и расположенных между кристаллитами *В*, зону *В* неориентированных кристаллитов, промежуточную плотную зону *С*, зону вторичных круглых пузырей *К* и среднюю зону *Д* с отдельными пузырями, которых больше в верхней части слитка.

Полуспокойная сталь сохраняет преимущества спокойной и кипящей стали и не имеет их недостатков.

Полуспокойная сталь (рис. 2.9, *в*, *д*) частично раскисляется в печи и ковше, а частично — в изложнице. Слиток полуспокойной стали имеет в нижней части структуру спокойной стали, а в верхней — кипящей. Ликвация в верхней части слитков полуспокойной стали меньше, чем у кипящей, и близка к ликвации спокойной стали. Но слитки полуспокойной стали не имеют усадочной раковины.

## 7. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

Развитие машиностроения и приборостроения предъявляет возрастающие требования к качеству металла: его прочности, пластичности, газосодержанию. Улучшить эти показатели можно уменьшением в металле вредных примесей, газов, неметаллических включений. Для повышения качества металла используют обработку металла синтетическим шлаком, вакуумную дегазацию металла, плавку в вакуумных печах, электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумно-дуговой переплав (ВДП), вакуумно-индукционный переплав (ВИП), переплав металла в электроиндукционных печах.

Обработка металла синтетическим шлаком заключается в следующем. Синтетический шлак, состоящий из 55% CaO, 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, небольшого количества SiO<sub>2</sub>, MgO и минимума FeO, выплавляют в электропечи и заливают в ковш. В этот же ковш затем заливают сталь. При перемешивании стали и шлака поверхность их взаимодействует резко возрастает и реакция между ними протекает гораздо быстрее, чем в плавильной печи. Благодаря этому, а также низкому содержанию оксида железа в шлаке сталь, обработанная таким способом, содержит меньше серы, кислорода и неметаллических