

**В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Л.Н. Аксенова**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ:  
СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА**

**Справочное пособие**

Челябинск  
2014

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Челябинский государственный педагогический университет»

**В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Л.Н. Аксенова**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ:  
СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОИЗВОДСТВА**

**Справочное пособие**

Челябинск  
2014

ББК 30.4я2  
УДК 620.1 (03)  
Б 43

Белевитин, В.А. Конструкционные материалы: свойства и технологии производства [Текст]: справочное пособие / В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Л.Н. Аксенова. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2014. – 357 с.: ил.

ISBN 978-5-906777-19-5

В справочном пособии содержатся материалы по разделам «Строение и свойства конструкционных материалов» и «Технологии производства конструкционных материалов» дисциплинам «Материаловедение» «Технология конструкционных материалов». Подборка справочных материалов включает сведения по конструкционным материалам, их строению и свойствам, горнорудному, доменному, сталеплавильному, литейному производству и обработке металлов давлением соответственно специфике подготовки бакалавров профессионального обучения по направлению «Транспорт», специализация «Автомобили и автомобильное хозяйство». Приводятся иллюстрации справочных материалов – рисунки и графики, сведения об особенностях технологических процессов производства конструкционных материалов и т.д., недостаточно полно освещённых в учебной и учебно-методической литературе.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Транспорт», специализация «Автомобили и автомобильное хозяйство».

Рецензенты: Г.А. Орлов, д-р техн. наук, профессор  
Е.Н. Смирнов, д-р техн. наук, профессор

ISBN 978-5-906777-19-5

- © В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Л.Н. Аксенова, 2014
- © Издательство Челябинского государственного педагогического университета, 2014

## ВВЕДЕНИЕ

Решение многих практических вопросов обеспечения надёжности и работоспособности деталей машин и оборудования зависит от успешного усвоения курсов «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов», основная задача которых заключается в знании факторов, определяющих основные свойства конструкционных материалов и методы целенаправленного изменения этих свойств, в сведениях о современных способах получения конструкционных материалов, основах технологических процессов их изготовления, обработки и ремонта изделий и влиянии этих технологических методов на качество деталей и всей конструкции в целом.

Знания, умения и навыки, приобретенные в процессе изучения дисциплин «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов» формируют готовность студентов к освоению специальных дисциплин и, в конечном итоге, к их практической работе. В условиях активизации самостоятельной работы студентов, ограниченности отводимого на изучение данных дисциплин аудиторного времени и многообразия технологий изготовления и ремонта изделий машиностроения наличие справочного пособия позволяет активно закрепить и углубить основные теоретические положения этих курсов.

Данное справочное пособие, включающее основные сведения о строении и свойства конструкционных материалов, базовых технологиях производства конструкционных материалов, является законченным дополнением к учебной литературе по дисциплинам «Материаловедение» и «Технология конструкционных материалов».

# Глава 1

## СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

### ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

#### А

**Адсорбция** (от лат. ad – на, при и sorbeo – поглощаю) – одна из стадий процесса химико-термической обработки, при которой происходит сцепление активных атомов насыщающего элемента с обрабатываемой поверхностью. Следует отличать адсорбцию от абсорбции, при которой вещество диффундирует в объем жидкости или твердого тела (рис. 1.1). Термин «сорбция» объединяет оба понятия. Вещество, на поверхности которого происходит адсорбция, называется адсорбентом, а поглощаемое – адсорбатом. В зависимости от характера взаимодействия между молекулой адсорбата и адсорбентом адсорбцию принято подразделять на физическую адсорбцию (слабые взаимодействия) и химическую адсорбцию (хемосорбцию – сильные взаимодействия). Четкой границы между физической адсорбцией и хемосорбцией не существует.

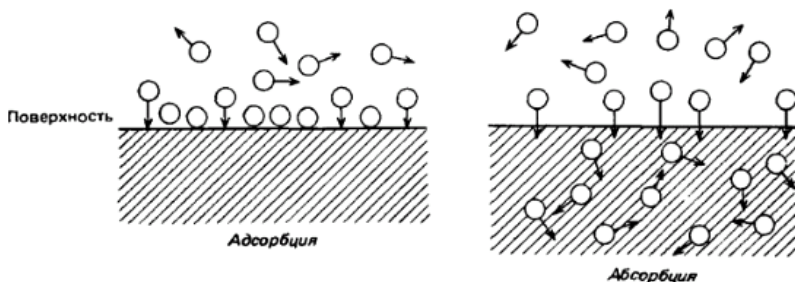


Рис. 1.1. Схема адсорбции и абсорбции

**Азотирование** – вид химико-термической обработки, при котором происходит процесс насыщения поверхностного слоя различных металлов или сплавов атомарным азотом при нагреве в соответствующей азотирующей среде. Поверхностный слой изделия, насыщенный азотом, имеет в своём составе растворённые нитриды и приобретает повышенную твердость, коррозионную стойкость на воздухе и в воде, износостойкость, усталостную прочность (выносливость) и высочайшую микротвёрдость. По микротвёрдости азотирование уступает только борированию, несколько превосходя цементацию и нитроцементацию. Азотированию подвергаются детали из углеродистой низколегированной и легированной сталей (рис. 1.2), а также чугун. Азотирование длится очень долго – до 90 ч, что является его основным недостатком. Азотирование проводят по одноступенчатому режиму при температуре 500–520°С с выдержкой до 90 ч или по двухступенчатому режиму – при 500–520°С (15–20 ч) и при 550–570°С (20–25 ч). Глубина азотированного слоя получается обычно 0,3–0,6 мм. Наибольшее распространение азотирование получило

при производстве деталей, работающих в условиях трения и при температурах до 500–600°C (коленчатые валы, шпиндельные валы, гильзы цилиндров и детали аппаратуры двигателей и др.).

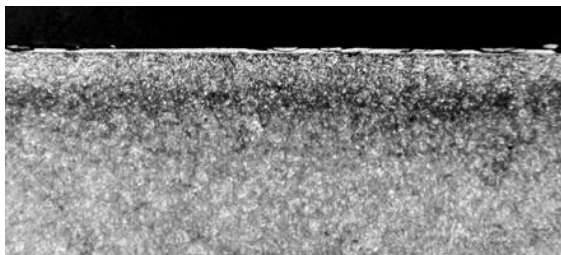


Рис. 1.2. Микроструктура азотированного слоя легированной стали,  $\times 500$

**Аллотропия** – (от др. греч. *αλλος* – «другой», *τροπος* – «поворот, свойство») – существование двух и более простых веществ одного и того же химического элемента, различных по строению и свойствам – так называемых аллотропных (или аллотропических) модификаций или форм. Явление аллотропии обусловлено либо различным составом молекул простого вещества (аллотропия состава), либо способом размещения атомов или молекул в кристаллической решётке (аллотропия формы). Для алмаза, очень твердого углеродного вещества, характерна гранецентрированная кубическая решетка (рис.1.3, а), тогда как атомы углерода в графите расположены совсем по-другому – они образуют слои, не очень прочно связанные друг с другом и каждый слой «выстлан» шестиугольниками из углеродных атомов, аналогичными бензольному кольцу (рис.1.3, б). Поскольку сцепление между слоями довольно слабое,

графит мягкий. Слои легко скользят один относительно другого, благодаря чему графит является хорошим смазочным материалом. Разные кристаллические формы одного и того же элемента, такие, как графит и алмаз, называют аллотропами.

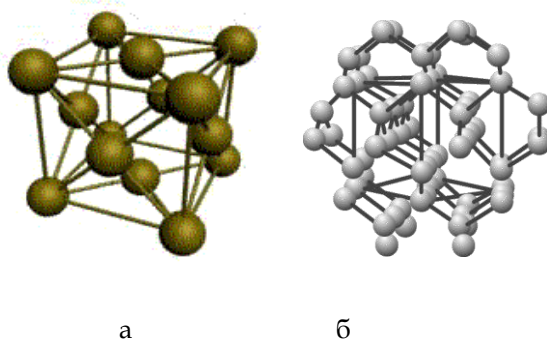


Рис. 1.3. Кристаллические формы алмаза (а) и графита (б)

Многие металлы в твердом состоянии при изменении температуры могут существовать в разных кристаллографических формах. Это явление называют полиморфизмом или аллотропией, а процесс – полиморфным или аллотропическим превращением.

**Анизотропия** (от др. греч. *ánisos* – неравный и *trópos* – направление) – неодинаковость механических и физических свойств твердого тела по разным кристаллографическим направлениям. Является основным отличительным признаком кристаллических тел, так как в них наблюдается зависимость свойств от направления, тогда как в изотропных (жидкостях, аморфных твёрдых телах) или псевдоизотропных (поликристаллы) телах свойства от направлений не зависят.



Наиболее сильно анизотропия выражена у металлов, имеющих симметричное кристаллическое строение. Металлы, применяемые в технике, обычно имеют поликристаллическое строение (рис. 1.4), т.е. состоят из очень большого количества мелких кристаллов, имеющих различную ориентацию кристаллической решетки. Эти кристаллы называются зернами или кристаллитами. В каждом отдельном зерне поликристалла наблюдается анизотропия, но вследствие различной ориентации решеток в зернах поликристалл имеет одинаковые свойства по разным направлениям и не обнаруживает анизотропии. Это свойство поликристаллического тела называется квазиизотропностью.

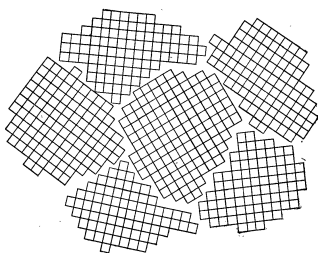
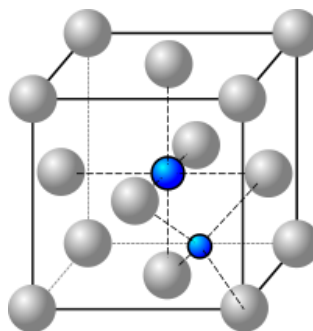
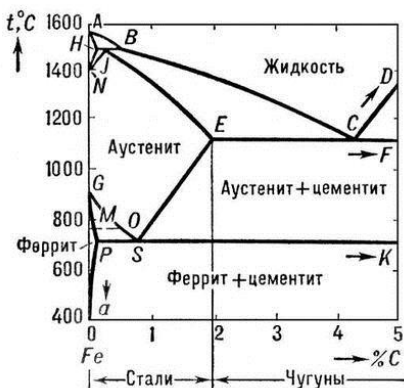


Рис. 1.4. Схема поликристаллического строения металла

**Аустенит** (обозначают А,  $\gamma$ -фаза) [по имени английского учёного У. Робертса-Остена (W. Roberts-Austen, 1843–1902)] – одна из высоко-температурных структурных составляющих железоуглеродистых сплавов, твердый раствор внедрения атомов углерода (до 2%, рис. 1.5, а) и легирующих элементов в  $\gamma$ -железе, имеющий гранецентрированную кубическую (ГЦК) решетку (рис. 1.5, б). Аустенит немагнитен, плотность его больше, чем у других структурных

составляющих стали, имеет твердость 200 НВ (по Бринеллю) при пластичности  $\delta=50\%$ , хорошо упрочняется наклепом. В углеродистых сталях и чугунах аустенит устойчив выше  $723^{\circ}\text{C}$ . В процессе охлаждения стали аустенит превращается в другие структурные составляющие. В железоуглеродистых сплавах, содержащих никель, марганец, хром в значительных количествах, аустенит может полностью сохраниться после охлаждения до комнатной температуры (например, хромоникелевые стали). В зависимости от состава стали и условий охлаждения аустенит может сохраниться частично в углеродистых или легированных сталях (остаточный аустенит).



а

б

Рис. 1.5. Фазовая диаграмма состояния сплавов железа с углеродом (а) и кристаллическая структура аустенита (б): атомы железа (серые) образуют ГЦК-решетку, а атомы углерода (темные) располагаются в межузловом пространстве (междуузлиях)

## Б

**Баббиты** [по имени американского изобретателя И. Баббита (I. Babbitt; 1799-1862)] – антифрикционные сплавы на оловянной или свинцовой основе, названные в честь И. Баббита, предложившего в 1839 г. сплав для заливки подшипников скольжения. Наиболее распространённые варианты сплава: 90% олова, 10% меди; 89% олова, 7% сурьмы, 4% меди; 80% свинца, 15% сурьмы, 5% олова. В качестве присадок используются сурьма, медь, никель, мышьяк, кадмий, теллур, кальций, натрий, магний. Температура плавления 300–440 °С. Баббиты построены по схеме Шарли: вязкая основа с мелкими твердыми включениями (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Микроструктура баббита B83 (а) и B16 (б)

Продолжительность работы подшипников зависит от толщины баббитового слоя, залитого на стальной вкладыш (рис. 1.7).

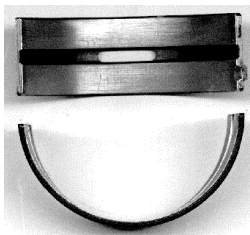


Рис. 1.7. Коренной подшипник коленвала двигателя с заливкой баббитом

**Бейнит** (по имени английского металлурга Э. Бейна, Edgar Bain) – метастабильная структура стали, образующаяся в результате как диффузионного, так и бездиффузионного превращения аустенита. Бейнит состоит из смеси частиц несколько пересыщенного углеродом феррита ( $\alpha$ -твердого раствора) и частиц карбидов, железа в частности. Бейнит подразделяется на две группы – игольчатый и зернистый (рис. 1.8).



Рис. 1.8. Бейнит игольчатый (а) и зернистый (б)

**Белый чугун** – чугун, в котором весь углерод находится в виде цементита (карбида железа  $Fe_3C$ ). В изломе имеет белый цвет и характерный металлический блеск. Представляет собой светло-серый, очень твёрдый, хрупкий, плохо поддающийся механической обработке металл. Белый чугун, предназначенный для переработки в сталь, называется передельным чугуном. Применяют белый чугун только в тех случаях, когда изделие имеет простую форму и работает в условиях повышенного абразивного износа (мельющие шары, цильпессы и т.д.).

**Бориды** – химические соединения металлов с бором, отличающиеся тугоплавкостью, высокой химической стойкостью в различных агрессивных средах и обладающие

высокой твердостью: микротвердость борида FeB составляет 20000 МПа, а борида Fe<sub>2</sub>B – 16500 МПа.

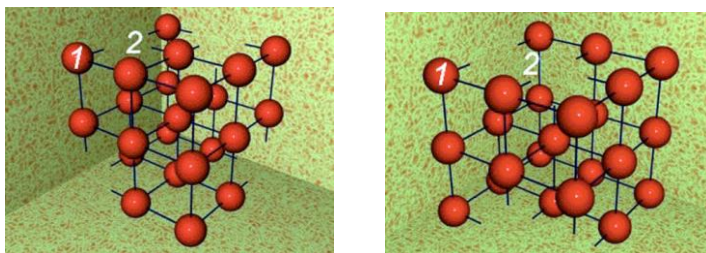
**Борирование** – процесс химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали атомарным бором при нагреве в соответствующей среде. Образующийся слой боридов толщиной 0,1–0,2 мм имеет высокую твердость (15 000–20 000 МПа.), износо- и коррозионную стойкость. Стойкость деталей после борирования увеличивается в 2–10 раз. Борирование превосходит цементацию по износостойкости минимум в 3 раза.

**Бронза** (от итал. bronzo) – сплавы меди с различными элементами, обычно с оловом в качестве основного легирующего компонента, но к бронзам также относят медные сплавы с алюминием, кремнием, бериллием, свинцом и другими элементами, за исключением цинка (это латунь) и никеля. Особенно ценными для машиностроения у бронзы являются антифрикционные свойства и стойкость против коррозии оловянных бронз. В развитых промышленных странах появилось большое число марок машинных бронз разного состава, содержавших до 10–15% олова, до 5–10% цинка, а также небольшие добавки свинца и фосфора. Бронзы используют для изготовления шестерен, направляющих втулок, подшипников скольжения, пружин, манометрических трубок и др. Особенно широко применяют алюминиевые бронзы, которые дешевле оловянных.

## В

**Вакансия** (от англ. vacancy) – точечный (нульмерный) дефект кристаллической решетки, при котором в узлах

решетки отсутствуют атомы, свободный, незанятый атомом, узел кристаллической решетки (рис. 1.9). При случайной встрече одиночные вакансии мигрируют, объединяются в пары – дивакансии. Точечный дефект – это нарушение кристаллической структуры, размеры которого во всех трех измерениях сравнимы с одним или несколькими межатомными расстояниями. Вакансия (дефект вычитания) влечет за собой местное упругое искажение кристаллической решетки, а именно ее сжатие на два межатомных расстояния (рис. 1.10).



а

б

Рис. 1.9. Вакансионный (а) и бивакансионный (б) точечный дефект кристаллической решетки:

1 – собственный атом в узле кристаллической решетки;

2 – вакансия для (а) и бивакансия для (б)

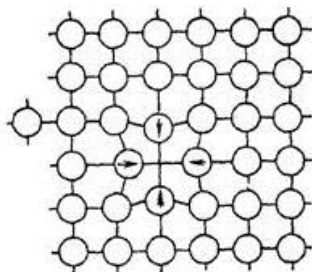


Рис. 1.10. Местное искажение кристаллической решетки вакансией

**Вещества аморфные** (от др. греч.  $\alpha$  «не-» и  $\mu\omicron\rho\phi\eta$  «вид, форма») – состояние вещества, атомная структура которых имеет ближний порядок и не имеет дальнего порядка, то есть с хаотическим расположением атомов в твердом и жидком состоянии (рис. 1.11, б). В отличие от кристаллов, стабильно-аморфные вещества не затвердевают с образованием кристаллической структуры (рис. 1.11, а) и не обнаруживают различных свойств в разных направлениях, то есть обладают изотропией свойств. Аморфные вещества не имеют определённой точки плавления: при повышении температуры стабильно-аморфные вещества постепенно размягчаются и выше температуры стеклования переходят в жидкое состояние.

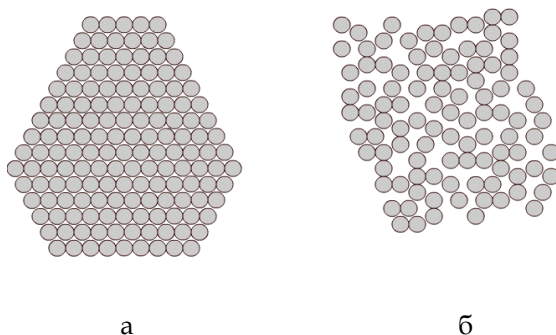


Рис. 1.11. Расположение атомов в кристаллическом (а) и аморфном (б) веществе

**Вещества кристаллические** – характеризуются закономерным и упорядоченным расположением тех частиц, из которых они состоят: атомов, молекул и ионов) – в строго определенных точках пространства (рис. 1.11, а). При соединении

этих точек прямыми линиями образуется пространственный каркас, называемый кристаллической решеткой. При нагреве такие вещества сохраняют кристаллическое строение до температуры плавления, при которой изотермически происходит процесс перехода в жидкое состояние. При охлаждении процесс идет в обратном направлении.

**Возврат** – процесс, происходящий при нагреве холоднодеформированного металла до температуры  $T = (0,25-0,30)T_{пл}$  от абсолютной температуры плавления  $T_{пл}$ , сопровождающийся частичным восстановлением механических и физических свойств без изменения микроструктуры деформированного металла, то есть не влияет на размеры и форму зерен, не препятствует образованию текстуры деформации. Небольшой нагрев вызывает ускорение движения атомов, снижение плотности дислокаций и частично остаточных напряжений, восстановление кристаллической решетки. Процесс частичного разупрочнения и восстановления механических и физических свойств холоднодеформированного металла называется отдыхом (первая стадия возврата).

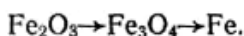
**Восстановление** (оксидов железа, кремния, марганца и др.) – физико-химический процесс получения металлов из их оксидов при помощи восстановителя – вещества, способного соединяться с кислородом, входящим в состав оксидов. Восстановителем может быть элемент или химическое соединение, которое обладает большей химической активностью или большим сродством к кислороду, чем металл восстанавливаемого оксида. В доменной печи восстановителями служат газы CO и H<sub>2</sub> и углерод кокса.



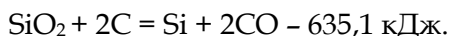
Восстановление оксидов твердым углеродом называется прямым, а газами – косвенным. Восстановление оксидов железа до железа протекает последовательно: при температуре выше 570°C



При более низких температурах оксид FeO неустойчив и превращается в Fe или Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и восстановление проходит следующие стадии:



Кроме оксидов железа железная руда может содержать кремнезем, а агломерат и силикаты – соединения кремнезема с другими оксидами. Оксид кремния (SiO<sub>2</sub>) намного устойчивее оксида железа, поэтому кремний восстанавливается только углеродом в нижней части печи при высоких температурах и с поглощением тепла, т.е.



Марганец, как и кремний, попадает в доменную печь либо с агломератом в виде силикатов марганца MnO·SiO<sub>2</sub> и (MnO)<sub>2</sub>·SiO<sub>2</sub>, либо с марганцевой и железной рудой в виде оксидов MnO<sub>2</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Восстановление марганца из его оксидов протекает постепенно по схеме:



**Восстановление косвенное** – восстановление оксидов газами. Для массового получения металлов используют углестермическое восстановление, т.е. восстановление углеродом и газами CO и H<sub>2</sub>.

**Восстановление прямое** – восстановление оксидов твердым углеродом. Восстановление твердым углеродом называют прямым восстановлением. Непосредственное

взаимодействие кусковых оксидов железа с твердым углеродом ограничено из-за недостаточного контакта кусковых материалов, поэтому реакция прямого восстановления идет через газовую фазу в два этапа.

**Выносливость** – способность материалов и конструкций сопротивляться действию циклических нагрузок. Зависимость между уровнем нагрузки (напряжений)  $\sigma$  и числом циклов  $N$ , соответствующим разрушению, представляется графически в виде кривой усталости (рис. 1.12).

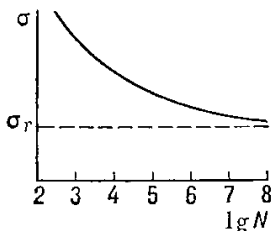


Рис. 1.12. Зависимость между уровнем нагрузки (напряжений)  $\sigma$  и соответствующим разрушению числом циклов  $N$

Пределом выносливости  $\sigma_r$  называется напряжение, соответствующее разрушению при заданном, большом числе циклов или – горизонтальной асимптоте кривой усталости. Выносливость зависит от свойств материала, вида цикла, вида напряжённого состояния, наличия концентраторов напряжений, состояния поверхности, свойств окружающей среды, размеров детали или конструкции и т.п. Предел выносливости  $\sigma_r$  может оказаться значительно ниже предела прочности  $\sigma_b$  или предела текучести  $\sigma_m$  материала. Высокая чувствительность предела выносливости  $\sigma_r$  к различным факторам требует повышенного внимания

к выбору допускаемых напряжений и коэффициентов запаса при циклических нагрузках.

**Вязкость твердых тел** – свойство твердых тел необратимо поглощать энергию при их пластическом деформировании, т.е. оказывать сопротивление распространению в нем трещин, количественными характеристиками которого в основном служат плотность энергии разрушения, т.е. работа, которую необходимо затратить на образование единицы новой поверхности, максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений около вершины трещины в месте ее страгивания (локального продвижения) в деформируемом материале и максимальное раскрытие между противоположными краями излома в ее тупиковой части при страгивании. Величина вязкости выражается в единицах работы, отнесенной к единице объема ( $\text{кгм}/\text{см}^3$ ) или, условно, к единице площади рабочего сечения данного образца ( $\text{кгм}/\text{см}^2$ ). Различают статическую, ударную и циклическую вязкость.

**Вязкость ударная** – свойство, определяющее склонность металлов к хрупкому разрушению при динамических нагрузках. Ударную вязкость оценивают по отношению работы, затраченной на ударный излом образца, к площади поперечного сечения образца в месте надреза. Единица измерения: Дж/м<sup>2</sup>. Ударную вязкость определяют при испытаниях на двухопорный изгиб (метод Шарпи) ударной пробы с надрезом обычно на маятниковом копре (рис. 1.13). В зависимости от вида надреза-концентратора в образце (U, V, T) ударную вязкость обозначают согласно виду концентратора: KCU, KCV, KCT.

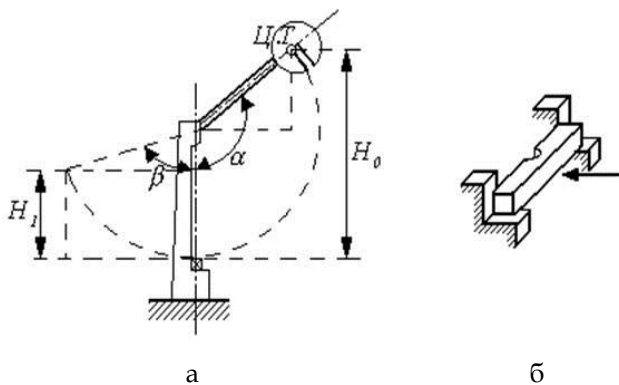


Рис. 1.13. Схема конструкции маятникового копра (а) и ударная проба с надрезом (б)

### Г

**Гомогенизация** (от греч.  $\acute{\omicron}\mu\omicron\upsilon\epsilon\nu\eta\varsigma$  – однородный) – в металлургии, создание однородной (гомогенной) структуры в сплавах путём ликвидации концентрационных микронеоднородностей, образующихся в сплавах при кристаллизации, диффузионной металлизации и др.

Для создания однородной (гомогенной) структуры сплавы подвергают термической обработке, так называемому диффузионному или гомогенизирующему отжигу, при котором за счёт процессов диффузии происходит выравнивание химического состава в микрообъёмах, соизмеримых с размером зёрен сплава, растворяются избыточные карбиды. Температура отжига обычно составляет 0,8–0,9 температуры плавления сплава. Длительность такого отжига колеблется от одного до нескольких десятков часов и определяется типом сплава, его структурой и степенью

ликвационной неоднородности. Гомогенизация улучшает технологическую пластичность сплавов, повышает стабильность механических свойств и уменьшает их анизотропию. Применяется, в основном, для легированных сталей: нагрев стали до температуры 1100–1200 °С, выдержка 15–20 часов, охлаждение с печью до 800–820 °С и затем охлаждение на воздухе. Диффузионному отжигу подвергают слитки легированной стали с целью устранения ликваций, повышения пластичности и вязкости. См. также **Отжиг диффузионный.**

**Графит** – кристаллическая полиморфная модификация углерода с гексагональной решеткой (см. рис. 1.3) имеет низкую твердость (3 НВ) и прочность; температура плавления 3500 °С.

**Графитизация** (graphitization) – процесс образования (выделения) графита в железных, никелевых, кобальтовых и др. металлических сплавах, в которых углерод содержится в виде нестойких химических соединений – карбидов. При повышенных температурах карбид полностью заменяется графитом. Скорость графитизации увеличивается с повышением температуры. Ускоряют графитизацию предварительной закалкой, деформацией, облучением. Графитизация стали обычно ухудшает её механические свойства (снижает прочность и пластичность), но вместе с тем графит, обладая смазочными свойствами, повышает износостойчивость изделий. Графитизацию железных сплавов используют при получении изделий из ковкого чугуна и графитизированной подшипниковой и штамповой стали. Графитизированная сталь (graphitized steel)

сочетает положительные свойства стали и чугуна, после закалки сочетает свойства закаленной стали и серого чугуна. Применяется для изготовления штампов, подшипников, литых коленчатых валов и др. деталей машин. В чугунах и графитизированной стали графит содержится в виде включений различных форм: пластинчатой, хлопьевидной и шаровидной (рис. 1.14).

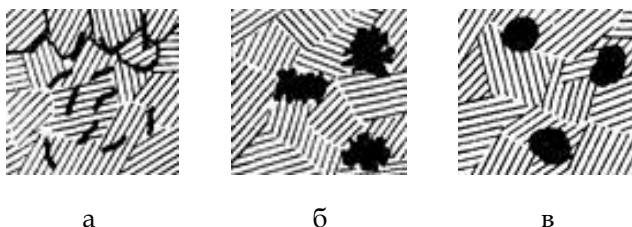


Рис. 1.14. Формы включений графита в графитизированной стали: пластинчатой (а), хлопьевидной (б) и шаровидной (в) (металлическая основа – перлит)

Для ускорения процесса графитизации в сплавы вводят специальные компоненты – графитизаторы (кремний или, реже, алюминий). Графитизацию можно приостановить введением добавок (хрома, марганца и др.), увеличивающих устойчивость карбидов. Иногда под графитизацией понимают образование графита в железоуглеродистых сплавах, не содержащих карбидов. Графит выделяется из пересыщенных углеродом сплавов при их затверждении и последующем охлаждении.

**Графитопласт** (ТУ 48-4802-150-97) – вид антифрикционной пластмассы с наполнителем в виде графита, искусственного либо природного происхождения. Материал получают в форме пресс-порошка и гранул, а также в виде

заливочных компаундов. Параметры графитопласта варьируются с учётом вида наполнителя и связующего. В качестве связующих веществ в графитопласте бывают фенолоальдегидные смолы, полиамиды, фторопласты и пр. Сфера использования графитопласта охватывает производство поршневых колец, шестерней, сальников, торцовых уплотнений, подшипников скольжения (втулки, в т.ч. сферические), ползунов и других изделий, работающих в условиях сухого трения при повышенных температурах до 500 °С.

## Д

**Дендрит** (от греч. δένδρον (dendron) – дерево) – древовидная форма зерна, образующаяся при первичной кристаллизации сплава (рис. 1.15, а). Рост дендрита происходит главным образом в направлении плоскостей с максимальной плотностью упаковки атомов, т.е. с минимальным межатомным расстоянием. После возникновения зародыша начинает расти ось первого (I) порядка – главная ось будущего дендритного кристалла. После этого перпендикулярно или под некоторым углом к ней растут оси второго (II) порядка, перпендикулярно к ним – оси третьего (III) порядка и т.д. При этом пространство между ветвями кристаллов и дендритами обогащается примесями, из-за затруднённого поступления в некоторые объёмы «питающей» жидкости при затвердевании образуются микропоры и микроскопические усадочные раковины, что ухудшает механические свойства материала. Так формируются неоднородные

по химическому составу и структуре зёрна при кристаллизации, казалось бы, чистого металла. В конечном счете образуются кристаллы в форме дендритов (рис. 1.15, б).

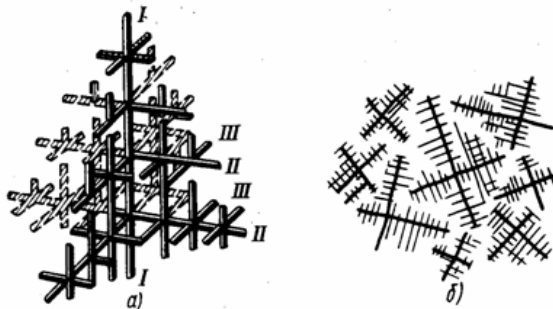


Рис. 1.15. Схема дендритного кристалла (а) и его роста (б)

### Дефекты кристаллического строения

**Дефекты линейные** – несовершенства, нарушения кристаллической структуры, размеры которых малы в двух измерениях, но имеют значительную протяженность в третьем измерении. Наиболее важный вид линейных дефектов – дислокации (лат. *dislocation* – смещение). См. **Дислокации**.

**Дефекты поверхностные** – несовершенства, размер которых мал только в одном направлении. К ним относятся границы между зёрнами, границы двойников.

**Дефекты точечные** – несовершенства, нарушения кристаллической структуры, размеры которых во всех трех измерениях сравнимы с одним или несколькими межузельными расстояниями. К ним относятся вакансии, межузельные атомы, примесные атомы.



**Деформация** (от лат. *deformatio* – искажение) – изменение формы или размеров тела (либо его части) в результате воздействий, вызывающих изменение относительного положения частиц данного тела. Деформация представляет собой результат изменения межатомных расстояний и перегруппировки блоков атомов. Простейшие виды деформации: растяжение, сжатие, сдвиг, кручение, изгиб.

**Деформация изгиб** – вид деформации, при которой нарушается прямолинейность главной оси тела (рис. 1.16). Деформации изгиба испытывают все тела, подвешенные на одной или нескольких опорах. Каждый материал способен воспринимать определенный уровень нагрузки, твердые тела в большинстве случаев способны выдерживать не только свой вес, но и заданную нагрузку. В зависимости от способа приложения нагрузки при изгибе различают чистый и косой изгибы.

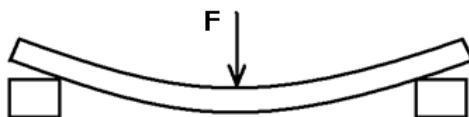


Рис. 1.16. Схема изгиба образца

**Деформация кручения** – вид деформации, при которой к телу приложен крутящий момент, вызванный парой сил, действующих в перпендикулярной плоскости оси тела (рис. 1.17). На кручение работают валы машин и пружины.

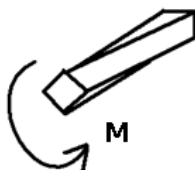


Рис. 1.17. Схема кручения образца

**Деформация растяжения** – вид деформации, при которой нагрузка прикладывается продольно от тела, то есть соосно или параллельно точкам крепления тела (рис. 1.18). Проще всего растяжение рассмотреть на буксировочном тросе для автомобилей. Трос имеет две точки крепления к буксиру и буксируемому объекту, по мере начала движения трос выпрямляется и начинает тянуть буксируемый объект. В натянутом состоянии трос подвергается деформации растяжения, если нагрузка меньше предельных значений, которые может он выдержать, то после снятия нагрузки трос восстановит свою форму.



Рис. 1.18. Схема растяжения образца

**Деформация сдвиг (среза)** – вид деформации, при которой нагрузка прикладывается параллельно основанию тела (рис. 1.19). В ходе деформации сдвига одна плоскость тела смещается в пространстве относительно другой. На предельные нагрузки сдвига испытываются все крепежные элементы – болты, шпильки.

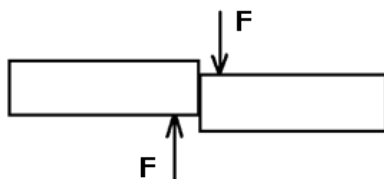


Рис. 1.19. Схема сдвига образца

**Деформация сжатия** – вид деформации, аналогичный растяжению, с одним отличием в способе приложения нагрузки, ее прикладывают соосно, но по направлению к телу (рис. 1.20). Сдавливание объекта с двух сторон приводит к уменьшению его длины и одновременному упрочнению, приложение больших нагрузок образует в теле материала утолщения типа «бочка».



Рис. 1.20. Схема сжатия образца

**Деформация горячая** (hot deformation) – обработка металлов давлением (ковка, прокатка и т.п.) после нагрева заготовки до температуры, при которой одновременно протекают два взаимно противоположных процесса: деформация, сопровождающаяся наклепом (повышением плотности дислокаций) и рекристаллизация, сопровождающаяся разупрочнением (снятием наклепа – уменьшением плотности дислокаций). Горячую деформацию в зависимости от состава сплава и скорости деформации обычно проводят при температурах  $(0,7-0,75) T_{пл.}$  от абсолютной

температуры плавления  $T_{пл}$ . Если холодная деформация характеризуется изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла (рис. 1.21, а), то при горячей деформации во всем объеме деформируемой заготовки успевает произойти процесс рекристаллизации и микроструктура после горячей обработки давлением оказывается равноосной, без следов упрочнения (рис. 1.21, б). В случае неполного протекания процесса рекристаллизации имеет место теплая деформация.

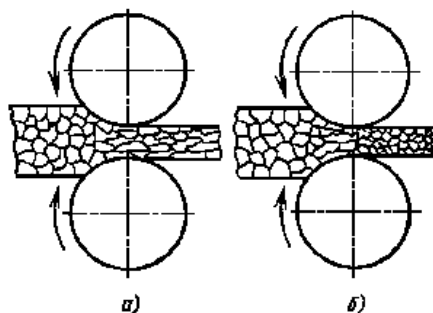


Рис. 1.21. Схема изменения микроструктуры металла при деформации: а) холодной; б) горячей

**Деформация остаточная** – (permanent deformation) – деформация, которая после прекращения действий внешней силы сохраняется в деформируемом теле в виде *пластической деформации*. Деформация остаточная – синоним *пластической деформации*.

**Деформация пластическая** – остаточная деформация, образуемая в результате воздействия силовых факторов, при которой не наступает макроскопических

нарушений в материале. Деформация пластическая – одно из важнейших свойств материалов, обеспечивающее возможность изготовления из них изделий (например, при обработке давлением – ковке, прокатке, штамповке и т.п.). Пластическая деформация вызывает изменения формы и размеров деформируемого тела, сохраняющихся после снятия нагрузки. Основным механизмом пластической деформации – сдвиг атомов (рис. 1.22).

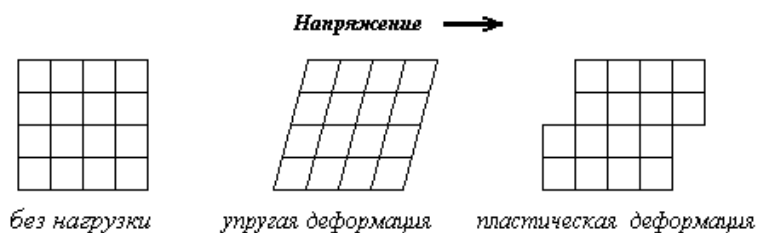


Рис. 1.22. Схема деформирования кристаллической решетки

Сдвиг одной части кристаллической решетки относительно другой не сопровождается разрывом межатомных связей, а происходит путем движения (скольжения) дислокаций. Механизм пластической деформации, основанный на скольжении дислокаций, может быть сопоставлен с перемещением по полу ковра, на котором специально сделана складка (рис. 1.23). Перемещение складки, требующее сравнительно небольших усилий, приводит к перемещению всего ковra в том же направлении. Функцию складки в металлических кристаллах выполняют дислокации. Перемещение дислокации на одно межатомное расстояние происходит без разрыва атомных связей и требует

лишь небольшого смещения атомов (на расстояние меньше межатомного) вблизи ядра дислокации.

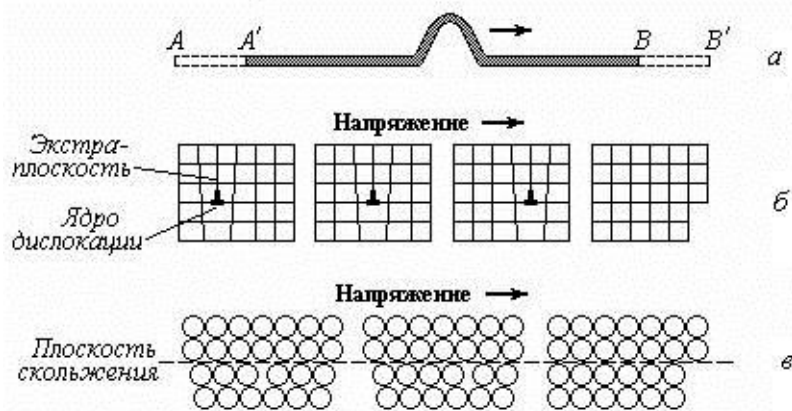


Рис. 1.23. Схема пластической деформации скольжением дислокаций: а) складка ковра в качестве модели скольжения (AA' – начальное положение, BB' – конечное положение); б) перемещение дислокации при скольжении; в) смещение атома вблизи ядра скольжения

**Деформация упругая** – после прекращения действия внешних сил форма, свойства и структура металла восстанавливаются. В основе упругой деформации лежат обратимые смещения атомов металлов от положения равновесия, т.е. атомы не выходят за пределы межатомных связей. Упругая деформация не вызывает заметных остаточных изменений в структуре и свойствах металла. Под действием прилагаемой нагрузки происходит незначительное относительное, обратимое смещение атомов.

**Деформация холодная** – обработка металла давлением, осуществляемая при температурах ниже температуры

рекристаллизации (комнатной или незначительно отличающейся от неё температуре), характеризуется изменением формы, упрочнением (наклепом) металла и изменением его физико-химических и механических свойств, по мере увеличения степени деформации возрастают характеристики прочности, а характеристики пластичности (удлинения и ударной вязкости) снижаются. Холодная деформация сопровождается изменением формы зерен, которые вытягиваются в направлении наиболее интенсивного течения металла, образуя строчечную микроструктуру (рис. 1.21, а).

**Деформирование** (deforming, straining) – воздействие на изделие или материал, приводящее к их деформации.

**Деформирование пластическое** – приводящее к пластической деформации воздействие на изделие или материал: осадка, обжатие, раздача, вдавливание, вытяжка, растяжка, правка, накатка.

**Деформирование поверхностное пластическое** – обработка металлов давлением, при которой упруго-пластически деформируется только поверхностный слой, вид отделочно-упрочняющей обработки, при котором не образуется стружка. После поверхностного пластического деформирования (ППД) в результате наклёпа упрочняется поверхностный слой, повышается износостойкость, усталостная прочность, стойкость к коррозионным воздействиям и т.д. Применением ППД удаётся повысить запасы прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках (оси, валы, зубчатые колеса, подшипники,

поршни, цилиндры и т.п.), в 1,5–3 раза и увеличить срок службы деталей в десятки раз.

**Диаграмма состояния** (фазовая диаграмма) – графическое изображение равновесного фазового состояния сплавов в координатах температура – химический состав. Диаграммы состояния строят для условий равновесия, т.е. такого состояния сплава, которое достигается при очень малых скоростях охлаждения или длительном нагреве. Диаграммы состояния сплавов в равновесном состоянии являются теоретическими диаграммами, так как истинное равновесие в практических условиях достигается редко. В большинстве случаев сплавы находятся в метастабильном состоянии, т.е. в состоянии с ограниченной устойчивостью. Температуры, соответствующие фазовым превращениям, называют критическими точками. Некоторые критические точки имеют названия, например, точки, отвечающие началу кристаллизации, называют точками *ликвидус*, а концу кристаллизации – точками *солидус*. Основные типы диаграмм состояния:

– Диаграмма состояния сплавов с отсутствием растворимости компонентов в твердом состоянии (I рода, диаграмма состояния сплавов механических смесей из чистых компонентов, рис. 1.24);

– Диаграмма состояния сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (II рода, диаграмма состояния сплавов твердых растворов с неограниченной растворимостью, рис. 1.25);



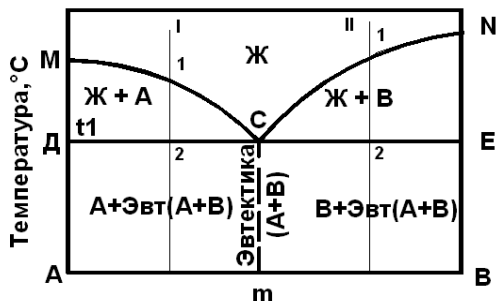


Рис. 1.24. Диаграмма состояния I рода сплавов, образующих механическую смесь из чистых компонентов

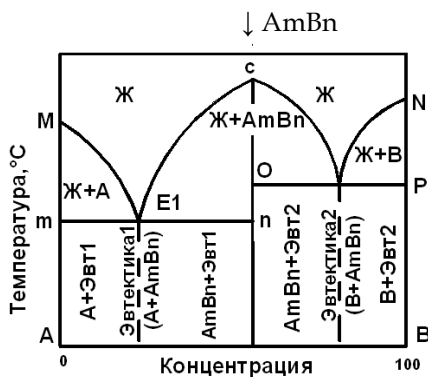


Рис. 1.25. Диаграмма состояния II рода сплавов с неограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии

- Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (III рода, рис. 1.26);
- Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химические соединения (IV рода, рис. 1.27).

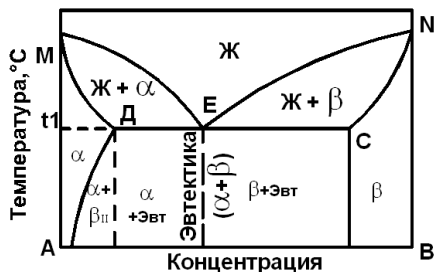


Рис. 1.26. Диаграмма состояния III рода сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии

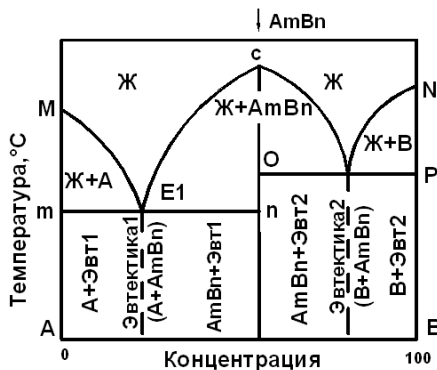


Рис. 1.27. Диаграмма состояния IV рода с устойчивыми химическими соединениями

**Диаметр критический** ( $D_k$ ) – величина, которой пользуются для практической оценки прокаливаемости – это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в данном охладителе. Каждой закалочной среде соответствует свой критический диаметр. Очевидно, чем интенсивнее охлаждает закалочная среда, тем больше величина критического диаметра. На рис. 1.28 показана глубина закалки (незаштрихованная

часть сечения) закаленных в воде и масле образцов различного диаметра одной и той же стали. Распределение закаленной и незакаленной зон показывает, что для каждого охладителя есть максимальное сечение, прокаливающееся насквозь ( $D_K$ ), причем  $D_{KM} < D_{KB}$ , т.к. масло охлаждает медленнее, чем вода.

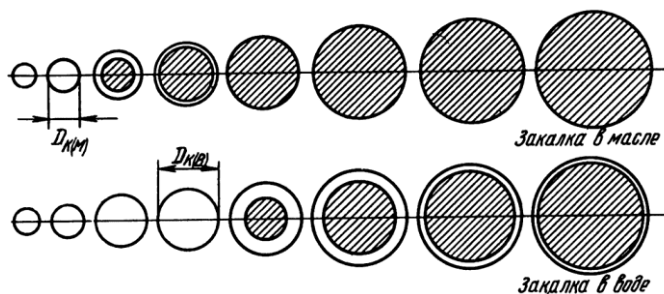


Рис. 1.28. Прокаливаемость прутков различного размера при закалке в воде и масле (заштрихована незакаленная сердцевина)

**Дислокации** (от англ. dislokation – смещение, сдвиг) – это линейные дефекты (искажения) кристаллической решетки, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено правильное расположение атомных плоскостей, причем длина линии на несколько порядков больше её ширины (рис. 1.29). Мерой искажения кристаллической решетки служит так называемый вектор Бюргера, который получается, если провести замкнутый контур вокруг любого произвольного участка в идеальной решетке, а затем этот же путь повторить в реальном кристалле, заключив дислокацию внутрь контура.

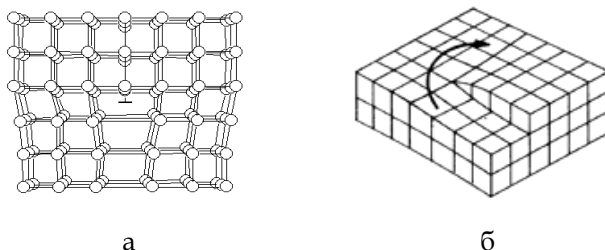


Рис. 1.29. Линейный дефект кристаллического строения – краевая дислокация (а) и винтовая дислокация (б)

Краевая дислокация характеризуется тем, что в какую-то часть кристаллической решетки как бы внедрена добавочная атомная плоскость, получившая название экстраплоскости. Поперечное сечение края экстраплоскости, называемой линией дислокации, состоит из наиболее упруго искаженной области кристаллической решетки размером от 2 до 5 периодов, а длина линии дислокации может достигать многих десятков тысяч периодов решетки. Кристалл с винтовой дислокацией можно рассматривать состоящим из одной атомной плоскости, закрученной в виде геликоида или винтовой лестницы без ступенек. Наиболее распространена так называемая смешанная дислокация, которая является любой комбинацией краевой и винтовой дислокаций. Дислокации образуются при кристаллизации металлов, а также в ходе пластической деформации и фазовых превращений. Плотность дислокаций может достигать большой величины. Под плотностью дислокаций  $r$  (см/см<sup>3</sup> или см<sup>-2</sup>) обычно понимают суммарную длину дислокаций  $S$  на единицу объема  $V$  кристалла:

$$r = S / V.$$

Плотность и расположение дислокации значительно влияют на механические и другие свойства металлов и сплавов. Основные виды дислокаций: краевые и винтовые.

**Диффузия** – перемещение атомов в кристаллическом теле на расстояния, превышающие средние межатомные параметры кристаллической решетки. Диффундировать могут как собственные атомы кристаллической решетки (самодиффузия или гомодиффузия), так и атомы или ионы других химических элементов, присутствующих в кристаллической решетке (примесная или гетеродиффузия), а также точечные дефекты структуры кристалла – междоузельные атомы и вакансии. Основными механизмами диффузии в твердом теле являются:

– **вакансионный механизм**, который заключается в миграции атомов по узлам кристаллической решётки при помощи вакансий. В любом кристалле существуют вакансии – незанятые позиции в кристаллической решетке. Один из соседних атомов может перескочить на место вакансии и занять её место, оставив, в свою очередь, вакансию на своей прежней позиции. Так происходит перемещение по решетке атомов и вакансий, а, значит, и массоперенос, интенсивность которого растет с увеличением количества вакансий;

– **межузельный механизм**, при котором перенос вещества осуществляется межузельными атомами. Диффузия по такому механизму происходит интенсивно, если в кристалле по каким-то причинам присутствует большое количество межузельных атомов, и они легко перемещаются по решетке;

– **прямой обмен атомами местами**, который заключается в том, что два соседних атома прыжком обмениваются местами в решетке кристалла.

В любом процессе диффузии в твердом теле, как правило, имеют место все перечисленные механизмы движения атомов и ионов, хотя и в разном соотношении. Практическое применение диффузии в твердом теле – диффузионное насыщение поверхности стальных изделий – цементация (рис. 1.30), хромирование и т.п.

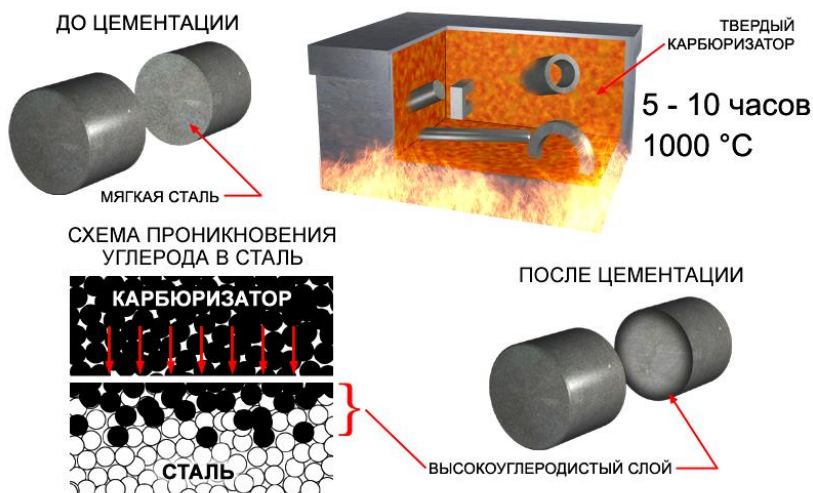


Рис. 1.30. Процесс цементации стального изделия

**Дюралюмины (Dural)** – сплавы на основе алюминия, легированные медью (4,5% массы), магнием (1,6%), марганцем (0,7%) и другими элементами, упрочняемые термической обработкой и последующим старением. Дюралюмины характеризуются сочетанием высокой статической прочности

(до 450–500 МПа) при комнатной и повышенной (до 150–175 °С) температурах, высоких усталостной прочности и вязкости разрушения.

Недостаток дюралюминов – низкая коррозионная стойкость, изделия требуют тщательной защиты от коррозии. Листы дюралюминов, как правило, плакируют чистым алюминием. Дюралюминий – основной конструкционный материал в авиации и космонавтике, а также в машиностроении, т.е. областях с высокими требованиями к весовой отдаче (рис. 1.31). В число дюралюминов входят российские сплавы следующих марок: Д1, Д16, Д18, В65, Д19, В17, ВАД1. Аналоги дюралюминов в Европе (Великобритания и Швейцария) – алюминиевые сплавы марок Hiduminium и Avional.



Рис. 1.31. Кузов автомобиля из дюралюминия

## Ж

**Жаропрочность** – способность конструкционного материала при высоких температурах сопротивляться пластической деформации и разрушению. Жаропрочные материалы используются для изготовления деталей, работающих при высоких температурах, когда имеет место явление ползучести.

В качестве современных жаропрочных материалов можно отметить перлитные, мартенситные и аустенитные жаропрочные стали, никелевые и кобальтовые жаропрочные сплавы, тугоплавкие металлы. Повышения жаропрочности достигают легированием твердого раствора, приводящим к увеличению энергии связи между атомами, в результате чего процессы диффузии и самодиффузии задерживаются, а температура рекристаллизации возрастает, созданием у сплава специальной структуры, состоящей из вкрапленных в основной твердый раствор и по границам зерен дисперсных карбидных и особенно интерметаллидных фаз. Такая структура получается в результате закалки с высоких температур и последующего старения. Наличие равномерно распределенных дисперсных избыточных фаз затрудняет пластическую деформацию при высоких температурах. Чем крупнее зерно, тем выше жаропрочность. Для изготовления жаропрочных деталей, не требующих сварки (клапаны двигателей внутреннего сгорания), применяются хромокремнистые стали – сильхромы: 40X10C2M, 40X9C2, X6C.

**Жаростойкость** (окалиностойкость) – способность металлов и сплавов сопротивляться окислению и газовой



коррозии при высоких температурах. Повышение жаростойкости достигается главным образом введением в сталь хрома, а также алюминия и кремния, т.е. элементов, находящихся в твёрдом растворе и образующих в процессе нагрева защитные плёнки оксидов. Чем выше содержание хрома, тем более жаростойки стали (например, сталь 15Х25Т является окалиностойкой до температуры 1100–1150 °С). Высокой жаростойкостью обладают сильхромы, сплавы на основе никеля – нихромы, стали 08Х17Т, 36Х18Н25С2, 15Х6СЮ.

**Железо** – химический элемент с порядковым номером 26 в периодической системе Д.И. Менделеева, металл, температура плавления 1539°С, плотность 7,78 т/м, существует в четырех аллотропических формах: Fe<sub>α</sub>, Fe<sub>β</sub>, Fe<sub>γ</sub>, Fe<sub>δ</sub>. Железо – важнейший металл современной техники, однако в чистом виде из-за низкой прочности практически не используется. Железо применяется главным образом в виде различных по составу и свойствам сплавов, среди которых доминирующее положение занимают стали и чугуны.

**Железо техническое** (армко-железо) – низкоуглеродистый сплав, содержащий до 0,025% С и минимальное количество серы, фосфора, марганца и других примесей. Техническое железо имеет высокую магнитную проницаемость ( $m = 4500$  Гс/Э), является электротехническим магнитно-мягким материалом (марки Э, ЭА, ЭАА) и применяется для сердечников, полюсных наконечников, электромагнитов, пластин аккумуляторов.

**Железографит** – пористый антифрикционный металлокерамический материал на основе железа с добавками до 7 % графита. Из него изготавливают подшипники и втулки для различных узлов машин и механизмов.

**Жидкотекучесть** – способность металлов и сплавов в расплавленном состоянии заполнять литейную форму и воспроизводить очертания отливки при заполнении полости литейной формы. Мерой жидкотекучести в пробах постоянного сечения является длина полученного прутка для выбранных условий заливки и охлаждения сплава (рис. 1.32).

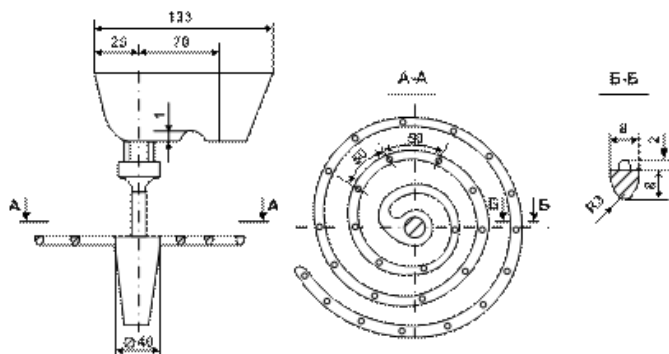


Рис. 1.32. Технологическая проба для определения жидкотекучести

### 3

**Закаливаемость** – способность сплавов образовывать неравновесную пересыщенную структуру при охлаждении со скоростью выше критической. Стали в результате закалки приобретают высокую твёрдость (структуру мартенсита), закаливаемость определяется главным образом количеством углерода в стали, например, при увеличении содержания углерода с 0,3 до 0,7% твёрдость углеродистой стали возрастает с 30 до 65 HRC (дальнейшее увеличение содержания углерода не влечёт за собой роста твёрдости). При содержании углерода меньше 0,4% закаливаемость

повышают легированием стали никелем, марганцем, хромом, кремнием. Закаливаемость следует отличать от прокаливаемости (См. **Прокаливаемость**), характеризующей глубину образования мартенсита (пересыщенного твердого раствора углерода в  $\alpha$ -железе.) в структуре стали при закалке с представленной на рис. 1.33 микроструктурой.

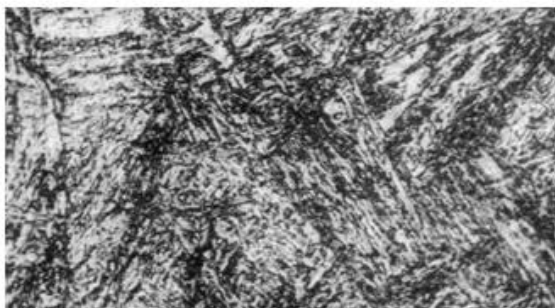


Рис. 1.33. Микроструктура мартенсита,  $\times 500$

**Закалка** – вид термической обработки, при которой в сплавах образуется неравновесная пересыщенная структура.

**Закалка сталей** – процесс термической обработки, в результате которого исходная структура при нагреве и выдержке полностью или частично превращается в аустенит, а при охлаждении претерпевает мартенситное превращение. Основное назначение закалки – получение стали с высокими твердостью, прочностью, износостойкостью и другими свойствами. Качество закалки зависит от температуры и скорости нагрева, времени выдержки и скорости охлаждения. Температуру нагрева под закалку для большинства сталей, в том числе и легированных, определяют по положению критических точек  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$ . Для углеродистых

сталей температуру заковки можно легко установить по диаграмме Fe-C. Быстрорежущие, нержавеющие и другие специальные стали закаливают при более высоких температурах нагрева, чем углеродистые и низколегированные конструкционные и инструментальные. Существует несколько способов заковки, применяемых в зависимости от состава стали, характера обрабатываемой детали, твердости, которую необходимо получить, и условий охлаждения (рис. 1.34).

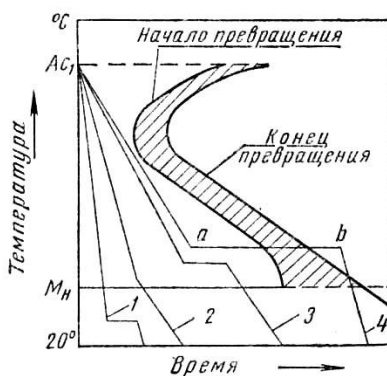


Рис. 1.34. Кривые охлаждения для различных способов заковки:  
 1 – заковка в одной среде; 2 – заковка в двух средах;  
 3 – ступенчатая заковка; 4 – изотермическая заковка

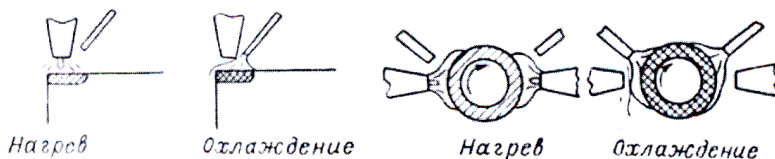
**Заковка сталей газопламенная** – операция термической обработки, при которой осуществляется скоростной нагрев поверхности, который обеспечивается пламенем мощной газовой горелки. Нагрев осуществляется ацетилено-кислородным, газокислородным или керосино-кислородным пламенем с температурой 3000–3200 °C. Структура поверхностного слоя после заковки состоит из мартенсита

и феррита. Толщина закаленного слоя 2–4 мм, твердость 50–56 HRC. Метод применяется для закалки крупных изделий, имеющих сложную поверхность (косозубые шестерни, червяки), используется в массовом и индивидуальном производстве, а также при ремонтных работах. Основные способы газопламенной закалки представлены на рис. 1.35. При нагреве крупных изделий горелки и охлаждающие устройства перемещаются вдоль изделия, или – наоборот. Недостатки метода: невысокая производительность; сложность регулирования глубины закаленного слоя и температуры нагрева (возможность перегрева).

*Циклические процессы*

1. Стационарный способ

2. Вращательный способ



*Непрерывные процессы*

3. Непрерывно-последовательный способ

4. Комбинированный способ

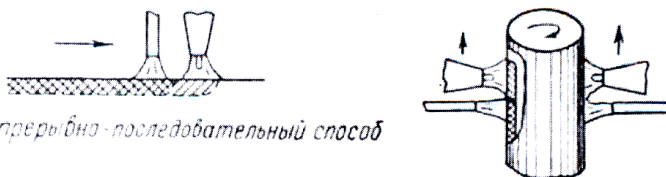


Рис. 1.35. Основные способы газопламенной закалки

**Закалка сталей изотермическая** – охлаждение проводят в ваннах с расплавом солей, имеющих температуру на 50–100 °С выше температуры начала мартенситного превращения, что несколько превышает температуру начала мартенситного превращения. Изотермическую закалку проводят так же, как ступенчатую, но с более длительной выдержкой при температуре горячей ванны (250–300 °С), чтобы обеспечить полный распад аустенита. Выдержка, необходимая для полного распада аустенита, определяется по точкам а и b и по S-образной кривой (см. рис. 1.34). В результате такой закалки сталь приобретает структуру бейнита (игольчатого троостита – устаревшее название, рис. 1.36) с твердостью HRC45–55 и с сохранением необходимой пластичности.



Рис. 1.36. Структура бейнита

После изотермической закалки охлаждать сталь можно с любой скоростью. В качестве охлаждающей среды используют расплавленные соли: 55%  $\text{KNO}_3$  + 45%  $\text{NaNO}_2$  (температура плавления 137 °С) и 55%  $\text{KNO}_3$  + 45%  $\text{NaNO}_3$  (температура плавления 218 °С), допускающие перегрев до необходимой температуры. Изотермическая закалка имеет

следующие преимущества перед обычной: минимальное коробление стали и отсутствие трещин; большая вязкость стали. В настоящее время широко используют ступенчатую и изотермическую светлую закалки (в печах с защитной средой).

**Закалка сталей индукционная** – поверхностная закалка токами высокой частоты (ТВЧ); деталь помещают в индуктор 2, через который пропускают переменный ток, возникает электромагнитное поле, в поверхностном слое детали 1 наводятся вихревые токи или токи Фуко, что обеспечивает его быстрый нагрев в течение 3–5 с и получение мелкозернистого аустенита, а при охлаждении с использованием спрейера 3 – дисперсного мартенсита (рис. 1.37). Высокая скорость нагрева смещает фазовые превращения в область более высоких температур.

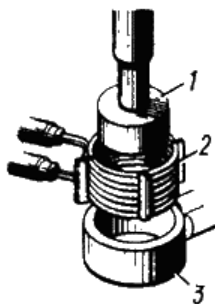


Рис. 1.37. Схема технологического процесса закалки ТВЧ (обозначения в тексте)

**Закалка сталей непрерывная** (в одном охладителе) – охлаждение проводят в воде, или масле, или специальных охладителях со скоростью больше критической. Закалка

в одном охладителе – наиболее простой и распространенный способ. Деталь, нагретую до температуры закалки, погружают в закалочную жидкость, где она находится до полного охлаждения. Этот способ используют при закалке несложных деталей, изготовленных из углеродистых и легированных сталей. Детали из углеродистых сталей охлаждаются в воде (за исключением деталей диаметром не более 3–5 мм), а детали из легированных сталей – в масле. Можно использовать такой способ и при механизированной закалке, когда детали автоматически поступают из агрегата в закалочную жидкость. Для высокоуглеродистых сталей такой способ закалки неприемлем, так как в процессе закалки создаются большие внутренние напряжения. Высокоуглеродистые стали закаливают с подстуживанием, т.е. нагретую деталь перед охлаждением некоторое время выдерживают на воздухе. Это уменьшает внутренние напряжения в деталях и гарантирует их защиту от образования трещин.

**Закалка сталей прерывистая** (в двух средах) – охлаждение проводят сначала в воде до температуры около 350 °С, а затем в масле. Такая закалка позволяет уменьшить внутренние напряжения, деформацию и коробление. Закалка в двух средах или прерывистая закалка – это способ, при котором деталь сначала охлаждают в одной закалочной быстроохлаждающей среде – воде, а затем переносят ее в медленно охлаждающую среду – масло. Он применяется при закалке инструмента, изготовленного из высокоуглеродистой стали. Недостаток прерывистой закалки заключается в том, что трудно установить время пребывания детали



в первой охлаждающей жидкости, так как оно очень незначительно (1 сек. на каждые 5–6 мм диаметра или толщины детали). Излишняя выдержка в воде ведет к увеличению коробления и появлению трещин. Применение прерывистой закалки требует от термиста высокой квалификации и опыта.

**Закалка сталей самоотпуском** – закалка с охлаждением в воде части изделия и последующим нагревом ее за счет теплоты той части изделия, которая не погружалась в воду. Способ, заключающийся в том, что детали выдерживают в охлаждающей среде не до полного охлаждения, т.е. в определенный момент охлаждение прекращают, чтобы сохранить в сердцевине детали тепло, необходимое для самоотпуска. Этот момент устанавливается опытным путем, поэтому качество термической обработки будет во многом зависеть от мастерства термиста. Контроль за температурой отпуска при этом способе закалки осуществляется по цветам побежалости, возникающим на светлой поверхности детали. Появление цветов побежалости при температуре 200–300 °С объясняется образованием на поверхности стали тонкой пленки окисла, цвет которого зависит от его толщины. Например, за небольшой промежуток времени при 220 °С сталь покрывается слоем окисла, толщиной 400–450 ангстрем, который придает поверхности светло-желтый цвет. Закалку с самоотпуском применяют только для закалки ударного инструмента – зубил, бородков, кернов и т.д., так как у такого инструмента твердость должна равномерно и постепенно понижаться (от рабочей части к хвостовой).

**Закалка сталей струйчатая** – закалка осуществляется охлаждением деталей, нагретых до температуры закалки, струей воды. Такой способ применяют для закалки внутренних поверхностей, высадочных штампов, матриц и другого штампового инструмента, у которого рабочая поверхность должна иметь структуру мартенсита. При струйчатой закалке паровая рубашка не образуется, что обеспечивает более глубокую прокаливаемость, чем при простой закалке в воде. Скорость охлаждения при этом зависит от температуры, напора воды, диаметра и количества отверстий в брызгале и от угла, образованного струей воды с охлаждаемой поверхностью детали.

**Закалка сталей ступенчатая** – охлаждение проводят в расплаве солей с температурой на 50–100 °С выше температуры начала мартенситного превращения для снижения температуры аустенита переохлажденного, затем на воздухе. За время короткой выдержки в горячей среде (масле) температура выравнивается, причем это происходит раньше, чем начинается мартенситное превращение. После этого осуществляется окончательное, обычно медленное охлаждение, во время которого деталь закаливается. Ступенчатая закалка способствует уменьшению внутренних напряжений, происходящих благодаря незначительной скорости охлаждения. В результате уменьшается деформация деталей и почти полностью исключается возможность появления закалочных трещин.

**Зерно** – часть структуры металла или сплава, имеющая определенное направление формирования кристаллической решетки в виде скопления большого числа мелких

кристаллов неправильной формы, которые называются зёрнами или кристаллитами. Процесс зарождения и роста зёрен при кристаллизации (твердении) металла представлен на рис. 1.38. В недеформированном металле зёрна состоят из блоков (субзёрен), развёрнутых друг относительно друга на углы порядка угловых минут; эти блоки разделены субграницами (рис. 1.39, а). Форма и размеры субзёрен и их угловая разориентировка, а также протяжённость субграниц – важные характеристики структуры металла или сплава. При обработке давлением (прокатке, ковке), особенно, если она ведется без нагрева, большинство зерен металла приобретает примерно одинаковую ориентировку – так называемую текстуру (рис. 1.39, б), после чего металл становится анизотропным.



Рис. 1.38. Процесс кристаллизации (твердения) металла

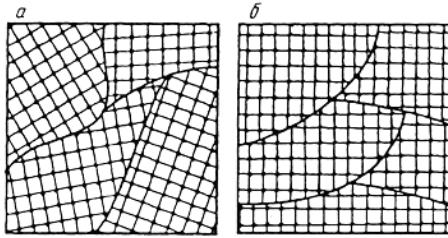


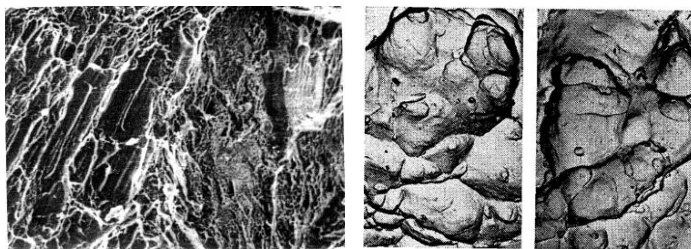
Рис. 1.39. Зёрненная структура металла или сплава до (а) и после (б) деформации

**Зоны Гинье – Престона** – микроскопические объемы с резко повышенной концентрацией растворенного компонента в твердом растворе. Гинье во Франции и Престон в Англии впервые обнаружили такие образования в дюралюминии в 1938 г.

## И

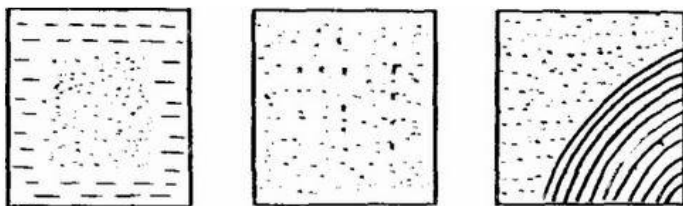
**Излом** – естественное или искусственное разрушение металла или сплава с образованием поверхностей раздела. Различают изломы: хрупкий (например, у закаленных сталей); вязкий со следами местной пластической деформации на поверхности излома; усталостный – после разрушения в результате многократного нагружения (рис. 1.40). Анализ и правильное «чтение» изломов играют важную роль при установлении причин аварий и поломок.

**Излом вязкий** (Shear fracture) – характерный для пластичных материалов тип излома, при котором разрушение происходит по зерну. Имеет волокнистое строение (рис. 1.41, а), при больших увеличениях в электронном микроскопе в изломе видны сферические ячейки (рис. 1.41, б).



а б в

Рис.1.40. Строение вязкого (а), хрупкого (б) и усталостного (в) изломов



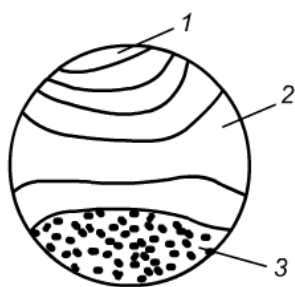
а

б

Рис. 1.41. Микроструктура (а), ямочный микрорельеф (б) вязкого излома

**Излом усталостный** – тип излома, возникающий в результате действия циклических нагрузок. Большая часть поломок деталей вызвана усталостью материала. Усталостный излом состоит из очага разрушения 1 (места образования микротрещин) и двух зон – усталости 2 и долома 3 (рис. 1.42, а). Для стадии усталостного излома характерно наличие волнообразных полос, представляющих собой ряд границ его последовательного распространения. Усталостное разрушение развивается в деталях, работающих при напряжениях меньше предела текучести материала. Усталостный излом имеет элементы хрупкого и вязкого изломов (рис. 1.42, б). К числу

деталей, подвергающихся усталостному разрушению, относятся валы и оси автомобилей, рессоры и др.



а

б

Рис. 1.42. Усталостный излом (а – схема) и вид у шатуна из алюминиевого сплава (б) – темная зона – усталостное разрушение, светлая зона – область хрупкого излома

**Излом хрупкий** (brittle fracture) – тип излома, при котором разрушение происходит по границам зерен, имеет зернистое строение. Поверхность хрупкого излома (рис. 1.42, а) блестящая, кристаллическая, а вязкого – имеет бугристо-сглаженный рельеф. Хрупкий излом не сопряжен с заметной пластической макродеформацией и, как правило, наблюдается при воздействии средних напряжений, не превышающих предел текучести. Траектория разрушения близка к прямолинейной, излом нормален к поверхности и имеет кристаллический характер. Хрупкое разрушение, как правило, является внутрикристаллическим, в большинстве случаев происходит под воздействием нормальных напряжений и распространяется вдоль наименее упакованной кристаллографической плоскости, называемой

плоскостью скола (отрыва). При некоторых условиях эксплуатации (водородное насыщение, коррозия и др.) хрупкое разрушение может быть межкристаллитным (межзерненным). Хрупкое разрушение часто происходит внезапно и распространяется с большой скоростью при малых затратах энергии. Процесс хрупкого разрушения в зависимости от характера нагружения (статическое, циклическое) может включать три этапа: возникновение трещин, медленное (стабильное) их развитие и лавинообразное (нестабильное) распространение разрушения.

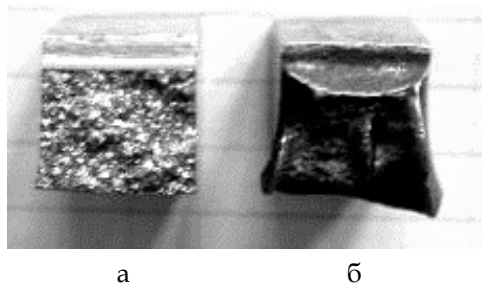


Рис. 1.42. Поверхность хрупкого излома (а) и вязкого излома (б)

**Износ** – удаление части материала с поверхности в результате абразивного, химического, электролитического или других воздействий. Износам подвержены шейки валов, работающие в подшипниках. Появление в масле абразивных частиц обуславливается прорывом из цилиндров газов, несущих в себе сажу и отколовшиеся частицы нагара (более мелкие частицы вдавливаются в мягкий поверхностный слой подшипника и благодаря этому не приводят к заметному повреждению шеек).

**Изотропия** – одинаковость свойств по разным направлениям объема материала, характерная для аморфных тел. Реальные металлы обладают свойством квазиизотропии (ложной изотропии), обусловленным зернистым строением.

**Индентор (наконечник)** – рабочая часть твердомера, внедряемая в поверхность образца и формирующая отпечаток, по размеру которого определяют твердость.

## К

**Карбиды** (от лат. carbo – уголь) – химические соединения металлов с углеродом, обладающие высокой твердостью, жаростойкостью, химической инертностью. Карбид железа  $Fe_3C$  (цементит) входит в состав чугунов и сталей. Карбиды вольфрама  $WC$  и титана  $TiC$  входят в состав твердых сплавов, из которых готовят режущий инструмент, из карбида кремния  $SiC$  (карборунд) готовят шлифовальные круги и другие абразивы. Смешанный карбид железа, кобальта и никеля имеет следующий состав  $(FeNiCo)_3C$ .

**Компонент** – составная часть сплава. Компонентом может быть химический элемент (металл или неметалл) или устойчивое химическое соединение. Внутреннее строение и свойства сплавов определяются главным образом той связью, которая возникает между элементами, входящими в их состав. В этом отношении сплавы можно разделить на две группы: неоднородные и однородные. Неоднородные сплавы представляют собой простую смесь из составляющих сплав компонентов (рис. 1.43, а). Примером



неоднородного сплава может служить свинцовая бронза, в которой легко обнаружить кристаллы меди и свинца. Свойства подобных сплавов зависят от количественного соотношения компонентов. В однородных сплавах нельзя различить составные части. Однородные сплавы бывают двух видов: химические соединения и твердые растворы (рис. 1.43, б).

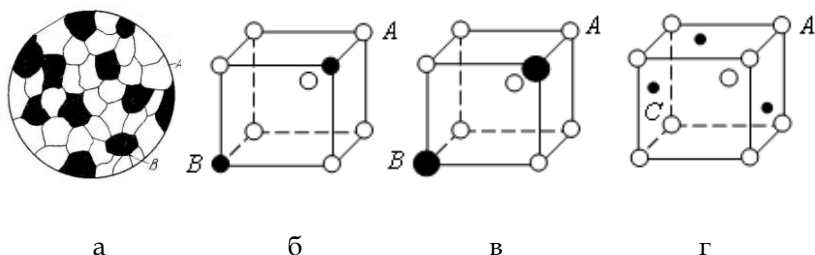


Рис. 1.43. Микроструктура смеси (схема), твердые растворы: неограниченный (б) и ограниченный (в) замещения, внедрения (г) с кристаллической ОЦК-решеткой

**Коррозия** (от лат. *corrosio* – «разъедание») – самопроизвольное разрушение металлов и сплавов в результате химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой. В общем случае это разрушение любого материала, будь то металл или керамика, дерево или полимер. Причиной коррозии служит термодинамическая неустойчивость конструкционных материалов к воздействию веществ, находящихся в контактирующей с ними среде: кислородная коррозия железа в воде:



Гидроксид железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  и является тем, что называют ржавчиной. В повседневной жизни для сталей чаще

используют термин «ржавление». Менее известны случаи коррозии полимеров. Применительно к ним существует понятие «старение», аналогичное термину «коррозия» для металлов. Например, старение резины из-за взаимодействия кислородом воздуха или разрушение некоторых пластиков под воздействием атмосферных осадков, а также биологическая коррозия. Скорость коррозии, как и всякой химической реакции, очень сильно зависит от температуры. Повышение температуры на 100 °С может увеличить скорость коррозии на несколько порядков.

**Красноломкость** – охрупчивание сталей выше 1000 °С при горячей обработке давлением (ковка, штамповка, прокатка) в основном из-за повышенного содержания серы, приводящего к образованию легкоплавкой (988 °С) и хрупкой сернистой эвтектики ( $\text{FeS} + \text{Fe}$ ), располагающейся по границам зерен в виде пленок или цепочек. Красноломкость проявляется преимущественно в сталях с низким содержанием марганца и углерода. Для ослабления вредного влияния и устранения красноломкости в сталь вводят элементы (алюминий, титан, цирконий и др.), образующие тугоплавкие сульфиды. Концентрация меди на границах зёрен может быть в некоторой мере предотвращена легированием (никелем, молибденом, бором).

**Красностойкость** – способность стали сохранять при нагреве до температур красного каления высокую твёрдость и износостойкость, полученные в результате термической обработки. Повышенная красностойкость – характерное свойство инструментальной стали. Красностойкость достигается легированием стали вольфрамом, молибденом,

ванадием, хромом, а также высокотемпературной закалкой. Красностойкость определяют по максимальной температуре, при нагреве до которой сталь сохраняет определённую твёрдость; например, быстрорежущая сталь сохраняет твёрдость до 60 HRC при температуре 620–650 °С. Наиболее высокая красностойкость – у твёрдых сплавов (до 900 °С). см. **Теплостойкость**.

**Кристаллизация** – процесс образования кристаллической структуры.

**Кристаллизация вторичная** – происходит в твердом состоянии с образованием новых кристаллов и сопровождается изменением типа кристаллической решетки. При вторичной кристаллизации вследствие изменения растворимости с изменением температуры выделяются вторичные кристаллы. Вторичная кристаллизация наблюдается и в том случае, если хотя бы один из компонентов претерпевает аллотропические превращения. Вторичная кристаллизация Fe-C-сплавов происходит за счет превращения железа одной аллотропической модификации в другую ( $\gamma$ -железа в  $\alpha$ -железо, рис. 1.44) и за счет изменения растворимости углерода в аустените и феррите, которая уменьшается с понижением температуры. Таким образом, превращения в твердом состоянии наблюдаются во всех тех случаях, при которых хотя бы один из компонентов обладает полиморфизмом (т.е. в диаграммах, где компонентами являются железо, олово, кобальт, марганец, титан, цирконий и некоторые другие элементы).

**Кристаллизация первичная** – происходит при переходе из жидкого состояния в твердое. Кристаллизация

состоит из зарождения центров кристаллизации и роста кристаллов из образовавшихся центров (рис. 1.45). Центрами кристаллизации могут быть группы элементарных кристаллических решеток, неметаллические включения, тугоплавкие примеси. Кристаллизация является самопроизвольным процессом, который идёт с выделением тепла (энергии).

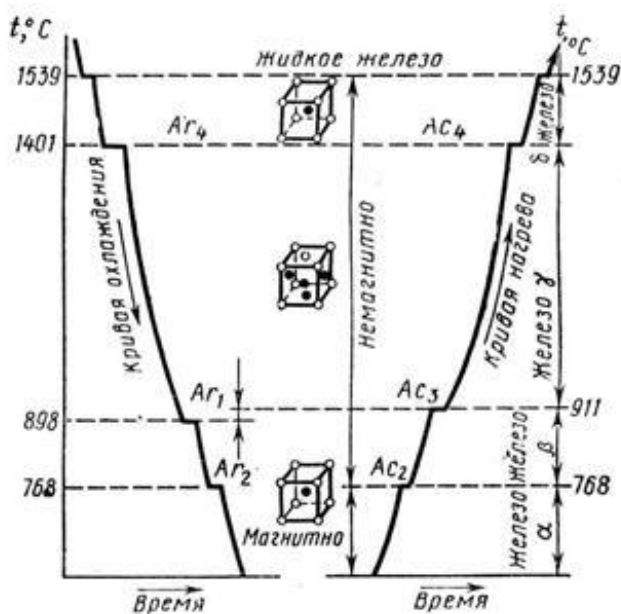


Рис. 1.44. Аллотропические превращения железа

**Кристаллит** (зерно) (crystallite, crystal, grain) – кристалл неправильной формы, грани которого не соответствуют кристаллографическим плоскостям кристаллической решетки.

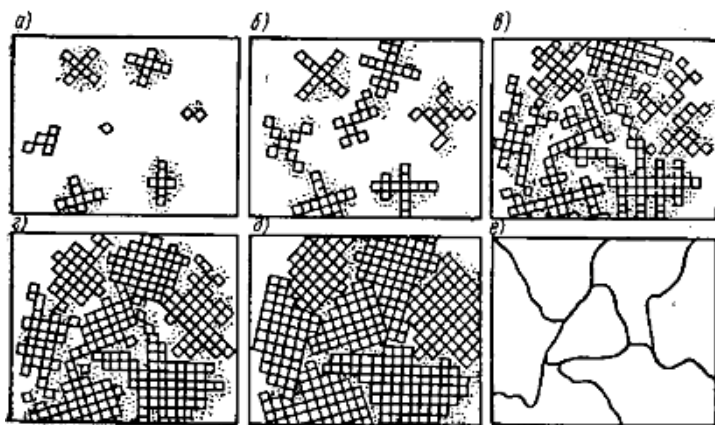


Рис. 1.45. Модель процесса первичной кристаллизации

## Л

**Латуни** – это двойной или многокомпонентный сплав на основе меди, где основным легирующим элементом является цинк (до 45%), иногда с добавлением олова, никеля, свинца, марганца, железа и других элементов. Наиболее часто структура латуней состоит из  $\alpha$ - или  $\alpha+\beta'$ -фаз:  $\alpha$ -фаза – твёрдый раствор цинка в меди с кристаллической решёткой меди ГЦК, а  $\beta'$ -фаза – упорядоченный твёрдый раствор на базе химического соединения  $\text{CuZn}$ . Латуни обладают хорошей текучестью и малой склонностью к ликвации. Латуни легко поддаются пластической деформации – основное их количество идет на изготовление катанных полуфабрикатов – листов, полос, лент, проволоки и разных профилей. Латуни, содержащие до 10% Zn, называют томпаками, а от 10 до 20% – полутомпаками. Эти сплавы, отличающиеся хорошей коррозионной стойкостью и повышенной пластичностью, используют для изготовления

радиаторных и конденсаторных труб, штуцеров гидросистемы автомобилей. В автомобильной промышленности также применяется свинцовистовая латунь. В обозначении марок латуней принята буквенно-цифровая система: первая буква «Л» – означает «латунь», затем – перечень символов, входящих в сплав компонентов, затем – их процентное содержание. Первая цифра указывает на содержание меди, остальные – на содержание других легирующих элементов. Содержание цинка в обозначении марки не указывается – для того чтобы его определить, необходимо от 100% вычесть процентное содержание меди и других химических элементов, входящих в данную латунь. Так томпак Л90 – это латунь, содержащая 90% меди, остальное – цинк; латунь алюминиевая ЛА77-2 содержит 77% меди, 2% алюминия, остальное – цинк; латунь ЛАНКМц75-22,5-0,5-0,5 содержит 75% меди, 2% алюминия, 2,5% никеля, 0,5% кремния, 0,5% марганца, остальное – цинк.

**Леги́рование** (от лат. *ligo* – связываю, соединяю) – введение в металл или сплав химических элементов с целью придания определенных физико-химических или механических свойств (коррозионной стойкости, прочности, упругости, электросопротивления и др.). Материалы, подвергнутые Л., наз. *леги́рованными*. К ним относятся легируемые стали и чугуны, легируемые цветные металлы и сплавы. Для легирования используют металлы, неметаллы (C, S, P, Si, B, N<sub>2</sub> и др.), ферросплавы (см. **Железа сплавы**) и лигатуры – вспомогательные сплавы, содержащие легирующий элемент. Напр., осн. легирующие элементы в сталях и чугунах – Cr, Ni, Mn, Si, Mo, W, V, Ti, Al, Nb, Co,

Cu, в *алюминиевых сплавах* – Si, Cu, Mg, Ni, Cr, Co, Zn, в *магние-вых сплавах* – Zn, Al, Mn, Si, Zr, Li, в *медных сплавах* – Zn, Sn, Pb, Al, Mn, Fe, Ni, Be, Si, P, в *титановых сплавах* – Al, Mo, V, Mn, Cu, Si, Fe, Zn, Nb. Легирование – качественное понятие. В каждом металле или сплаве из-за особенностей производственного процесса или исходного сырья присутствуют неизбежные примеси. Их не считают легирующими, т.к. они не вводились специально.

**Ледебурит (эвтектика)** – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, главным образом белых чугунов, представляющая собой эвтектическую смесь аустенита и цементита (рис. 1.46) в интервале температур 727–1147 °С или феррита и цементита ниже 727 °С. Назван в честь немецкого металлурга Карла Генриха Адольфа Ледебура, который открыл «железо-карбидные зёрна» в чугунах в 1882 г.

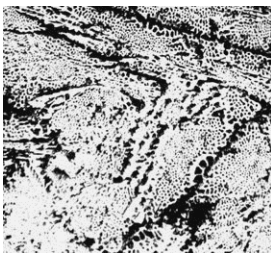


Рис. 1.46. Ледебурит – эвтектическая смесь аустенита и цементита

**Ликвация** (segregation; liquation, (от лат. liquatio разжижение, плавление) – химическая неоднородность сплава, возникающая при кристаллизации в интервале температур между линиями ликвидуса и солидуса из-за различной растворимости отдельных компонентов сплава

в его жидкой и твердой фазах. Ликвация возникает в кристаллах (внутрикристаллическая, дендритная – микроликвация), а также по высоте и зонам слитка (зональная – макроликвация). Дендритная и зональная ликвация тесно взаимосвязаны: чем больше в данном сплаве дендритная ликвация, тем меньше зональная ликвация, и наоборот.

**Ликвация дендритная** (англ. Dendritic segregation) – это химическая неоднородность, проявляющаяся в пределах одного дендрита – кристалла древовидной (ветвистой) формы. Причиной ее является так называемая избирательная кристаллизация, вследствие которой оси дендритов, растущие первыми, содержат меньше примесей, а затвердевающая позже между осями часть расплава обогащается этими примесями, что и приводит к неоднородности химического состава в различных частях каждого дендрита. Вследствие дендритной ликвации сплавов в период их кристаллизации в области равноосных кристаллов, где ликвация имеет наибольшее развитие, образуется точечно-пятнистая неоднородность – строчки карбидов, интерметаллидов и нитридов (рис. 1.47). Обусловлено это тем, что формирование межосных участков в рассматриваемой области происходит в условиях замедленного охлаждения с резко выраженной разделительной диффузией, приводящей к значительному обогащению межосных участков углеродом, азотом, кислородом, бором, серой и некоторыми легирующими элементами (Mo, Cr). В этих участках образуются избыточные фазы: карбиды, карбонитриды, бориды и т.п. За абсолютную величину дендритной ликвации принимают разность состава



осевых и периферийных участков дендритных ветвей. Следствия дендритной ликвации: уменьшение коррозионной стойкости сплава; понижение пластичности сплава; образование строчечной структуры при обработке давлением; понижение температуры солидуса, опасность оплавления границ зерна при термообработке; нестабильность свойств и структуры металла во времени. Устраняется диффузионным отжигом (гомогенизация).

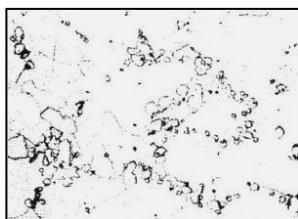


Рис. 1.47. Микроструктура продольного микрошлифа стали ЭИ868 с точечно-пятнистой неоднородностью,  $\times 500$

**Ликвация зональная** – химическая неоднородность в отдельных объемах отливки, т.е. различие химического состава в разных ее частях, возникающая в результате как избирательной кристаллизации, так и процессов перемещения ликвирующих элементов вместе с жидкой фазой из одной части отливки в другую при ее затвердевании. Процесс зональной ликвации обуславливается диффузионными явлениями, которые проявляются в зоне перехода жидкого металла в твердый. Жидкий металл, находящийся в непосредственном контакте с растущими кристаллами, обогащается ликвирующими примесями. Перемещение металла из области затвердевания, в которой сосуществует

твердая и жидкая фазы, в жидкую область слитка определяется, во-первых, механическим захватом жидкости осями растущих дендритов (зона столбчатых кристаллов) и ее вытеснением, во-вторых, диффузией (молекулярной и конвективной), осуществляющей перенос загрязненной жидкости. Оба эти фактора действуют независимо от природы ликвирующих примесей. Более тяжелые примеси могут концентрироваться в нижней, а более легкие – в верхней частях отливки (ликвация по плотности), легкоплавкие компоненты литейных сплавов, затвердевающие в последнюю очередь (при более низких температурах), оттесняются в среднюю часть стенки отливки, что приводит к образованию разновидности зональной ликвации – осевой ликвации. Эта ликвация называется также прямой, в отличие от обратной, при которой в центральной части тела отливки содержатся более тугоплавкие компоненты, а легкоплавкие при кристаллизации вытесняются на ее поверхность. Характерное расположение основных ликвационных зон в слитках спокойной стали приведено на рис. 1.48. В объеме слитка ликвация серы, фосфора и углерода подчиняется следующей закономерности: в верхней части слитка содержание элементов возрастает в направлении к оси; в средней по высоте части слитка ликвация незначительна; в нижней части наблюдается обусловленная всплыванием и перемещением примесей в верхнюю часть слитка обратная ликвация – содержание серы, фосфора и углерода убывает в направлении к оси слитка.

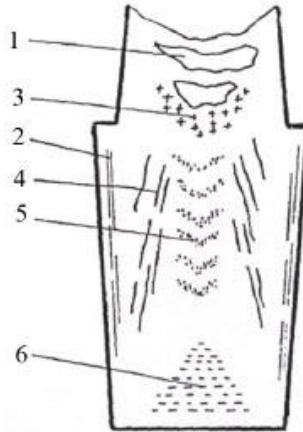


Рис. 1.48. Схематическое расположение основных видов дефектов в крупном слитке спокойной стали: 1 – усадочная раковина; 2 – полосчатость; 3 – подусадочная ликвация (ликвационное пятно); 4 – внецентренная (Λ-образная) ликвация; 5 – осевая (V-образная) ликвация; 6 – конус осаднения

Наряду с отмеченной общей закономерностью распределения ликвирующих примесей в слитке спокойной стали наблюдаются специфические виды ликвации: V-образная ликвация под усадочной раковинной и скопление примесей в виде нитей или полос – Λ-образная ликвация или «зона усов». Образование V-образной ликвации объясняют опусканием в усадочные пустоты осевой части слитка загрязненного примесями металла из прибыли. В процессе кристаллизации последние объемы металла, находящегося в двухфазном состоянии, опускаются вследствие усадки по осевой части слитка. При перемещении увлекается и загрязненная ликватами жидкость из примыкающей двухфазной области, которая заполняет возникающие при усадке разрывы, располагаясь в форме воронки. Повышенная

вязкость металла в конце кристаллизации слитка и наличие мостов препятствуют всплыванию ликватов, и в этой зоне сохраняется повышенное содержание серы, фосфора и углерода. Причина образования  $\Lambda$ -образной ликвации окончательно не выяснена. Одни металлурги считают «усы» следами выделявшихся при кристаллизации пузырьков водорода, которые увлекали за собой примеси; другие видят причину образования «усов» в опускании загрязненного примесями металла в усадочные полости низа слитка по узким каналам между осями дендритов. Наибольшее количество ликвирующих элементов обнаруживается в подприбыльной осевой части слитка, где металл затвердевает в последнюю очередь, а также в районе «усов». В слитках легированной стали массой 2,5–4,5 т степень ликвации под усадочной раковиной составляет, %: серы – 170–300, фосфора 150–260, углерода – 150–200. Обычно эта часть слитка удаляется при прокатке и ковке. Развитие зональной ликвации зависит от ряда факторов. Зональная ликвация развивается тем сильнее, чем больше масса и поперечное сечение слитка и чем больше длительность его затвердевания. В связи с этим высококачественные и легированные стали, используемые для изготовления деталей ответственного назначения разливают в слитки небольшой массы (<6,5 т). Все мероприятия, направленные на борьбу с развитием усадочных дефектов, будут способствовать также и уменьшению V-образной ликвации. В свою очередь, факторы, вызывающие повышение скорости охлаждения и кристаллизации слитка, будут уменьшать развитие  $\Lambda$ -образной ликвации. Зональная ликвация в слитках кипящей стали в связи с интенсивной

циркуляцией металла выражена значительно сильнее, чем в слитках спокойной стали. В центре скопления примесей крупных механически закупоренных слитков степень ликвации серы может достигать 800%, фосфора – 500%, углерода – 300%. В связи с этим при производстве качественных кипящих сталей для удаления скопления вредных примесей головную обрезь приходится увеличивать до 10–13% от массы слитка (вместо 5–9% для рядовой стали). Ликвация приводит к неоднородности механических и других эксплуатационных свойств литых деталей, вызывает их преждевременный износ и разрушение. Устранить образовавшуюся в отливке зональную ликвацию практически невозможно, поэтому стремятся предупредить ее образование, создавая технологичные конструкции отливок, с равномерной толщиной стенок и без массивных узлов, вводя в сплавы добавки, уменьшающие ликвацию, применяя ускоренное охлаждение отливок. Относительная неоднородность состава при зональной ликвации значительно меньше, чем при дендритной.

**Линия ликвидуса** (от лат. liquidus – жидкий) – линия на фазовой диаграмме состояния сплавов, соответствующая началу их равновесной кристаллизации при охлаждении. Выше линии ликвидуса (liquidus line) сплавы находятся в жидком состоянии. В системе переменного состава линия ликвидуса – геометрическое место точек в координатах «температура-состав», отвечающим максимальному насыщению твёрдой фазой расплавленной фазы. На диаграмме неограниченного растворения в жидком и твердом состоянии компонентов А и В (рис. 1.49) присутствуют три области: область выше линии Аа'В – жидкость; область между

линиями  $Aa'B$  и  $Ab'B$  – жидкость и твердый раствор. Ниже линии  $Ab'B$  – область твердого раствора. Линия  $Aa'B$  является линией ликвидуса, а линия  $Ab'B$  – линией солидус.

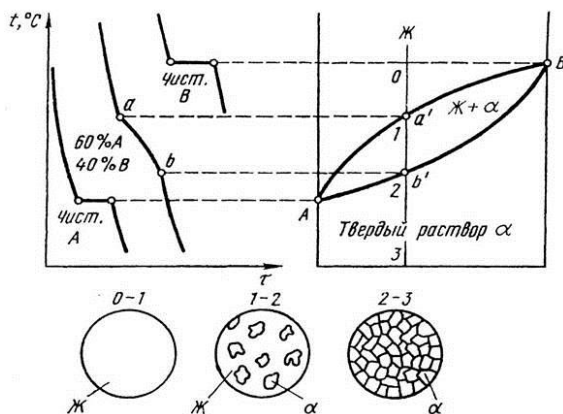


Рис. 1.49. Диаграмма состояния, кривые охлаждения и схемы структур сплавов неограниченного растворения в жидком и твердом состоянии компонентов А и В

**Линия ограниченной растворимости** – линия на диаграмме состояния сплавов, показывающая изменение концентрации одного компонента в кристаллической решетке другого компонента. В сплавах соответственно фазовой диаграммы сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии (рис. 1.50) компоненты А и В ограничено растворяются друг в друге с образованием твердых растворов  $\alpha$  (В в А) и  $\beta$  (А в В), между которыми образуется эвтектика  $эвт(\alpha+\beta)$ . Предельное содержание компонента В в твердом растворе  $\alpha$  ограничено линией ограниченной растворимости  $KF$  и не может быть более  $M\%$  В (в точке F).

Аналогично, предельное содержание А в твердом растворе  $\beta$  ограничено линией ограниченной растворимости GN и не может быть в точке G более (100-N)% А. В данном случае при растворении компонентов друг в друге образуются так называемые ограниченные твердые растворы  $\alpha$  и  $\beta$ .

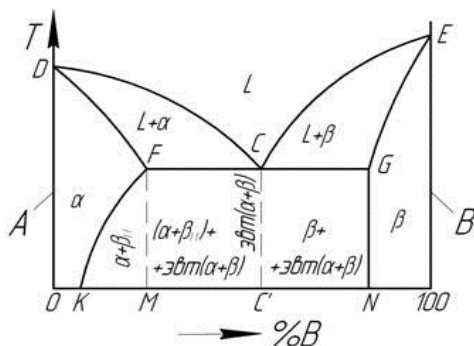


Рис. 1.50. Диаграмма состояний сплавов с ограниченной растворимостью в твердом состоянии

**Линия солидуса** (от лат. solidus – твердый) – линия на диаграмме состояния сплавов, соответствующая концу кристаллизации при охлаждении, на которой исчезают последние капли расплава, или температура, при которой плавится самый легкоплавкий компонент. Ниже линии солидуса сплавы находятся только в твердом состоянии (см. рис. 1.49 – линия Ab'B).

## М

**Макроструктура** – крупное строение металла, видимое невооруженным глазом или при помощи простейшего оптического прибора – лупы при увеличении до 30–40 раз,

называют макроструктурой, которую исследуют на специальных макрошлифах (темплетах). Для приготовления макрошлифа образцы вырезают из крупных заготовок (слитков, поковок и т.д.) или изделий, поверхность которых шлифуют, полируют, а затем подвергают травлению специальными реактивами. Это позволяет изучать большую поверхность и получить общее представление о качестве металла и о наличии в нем каких-либо дефектов поверхности после различных технологических процессов изготовления деталей: литья, обработки давлением, сварки и т.д. Изучение макроструктуры является не окончательным, а предварительным этапом исследования структуры металла. Он позволяет выявить те участки, которые затем необходимо тщательно изучить. Исследование макроструктуры называется макроанализом. В результате макроанализа можно определить: нарушение сплошности металла, наличие трещин и пустот в литых деталях, наличие трещин, возникших в результате термической обработки и т.д.; зоны кристаллизации в литом металле (рис. 1.51); ориентированную структуру в деформированном металле (рис. 1.52); способ изготовления деталей (рис. 1.53); химическую неоднородность (ликвацию, рис. 1.48); вид разрушения (по излому металла, рис. 1.42). Основным документом, регламентирующим контроль дефектов макроструктуры, является ГОСТ 10243–75 «Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры». Известно 114 разновидностей дефектов макроструктуры и излома (перечень терминов дан в ОСТ МЧМ 1438–79 «Стали и сплавы. Макроструктура. Термины и определения»).



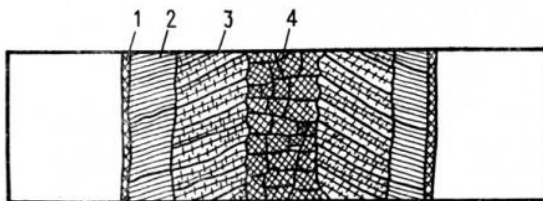


Рис. 1.51. Зоны кристаллизации сварного шва (зарисовка):  
 1 – слоистой; 2 – ячеистой; 3 – столбчатых дендритов;  
 4 – равноосных дендритов



Рис. 1.52. Волокнистое строение макроструктуры поковки вала

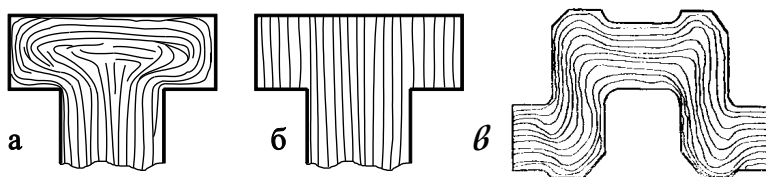


Рис. 1.53. Макроструктура (зарисовка) продольного разреза болта, полученного горячей штамповкой (а) и точением из круглого проката (б) и продольного разреза коленчатого вала (в)

**Макрошлиф** – образец с плоской шлифованной поверхностью, подвергнутый травлению для выявления

макроструктуры. Для травления стали применяются следующие реактивы: 10–12%-ный раствор двойной соли хлорной меди и хлористого аммония; 25%-ный раствор азотной кислоты; раствор, состоящий из 10 % соляной кислоты, 30% серной кислоты и 60% воды и др. Если макрошлиф изготовлен в поперечном сечении детали, то его называют темплетом. Макроанализ находит широкое применение в промышленности, так как дает возможность выявлять раковины, шлаковые включения, трещины и другие дефекты строения сплава, химическую и структурную неоднородность, дефекты сварки – непровары, крупнозернистость основного и наплавленного металла, неоднородность структуры металла и др. Для получения документальных данных макроструктуры фотографируют. Местные скопления серы в металле (даже при содержании ее до 0,04%), которые часто приводят к трещинам, можно определить по специальным серным отпечаткам (метод Баумана по ГОСТ 10 243-75, рис. 1.54). Для этого лист бромосеребряной фотобумаги выдерживают 8 мин в 5%-ном растворе серной кислоты и затем накладывают на макрошлиф. По истечении 3 мин его снимают и по коричневым точкам и штрихам на фотобумаге судят о количестве серы. Отпечаток затем закрепляют в 10%-ном растворе гипосульфита. Сталь склонна к трещинообразованию, если на отпечатке сера расположена в виде вытянутых строчек или больших местных скоплений.

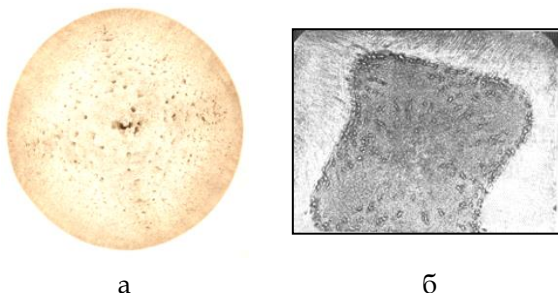


Рис. 1.54. Пример серного отпечатка по Бауману круглого проката из углеродистой стали (а) и ликвационного квадрата (б) в сечении слитка

**Мартенсит** (martensite) – микроструктура игольчатого (пластинчатого, рис. 1.55, а) или речного (пакетного, рис. 1.55, б) вида, представляющая собой пересыщенный твердый раствор внедрения, образующийся в результате кооперативного (сдвигового) смещения атомов в кристаллической решетке (рис. 1.56) на расстояния, не превышающие межатомных; в сталях – это пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в ОЦК- $\alpha$ -железе – все октаэдрические междоузлия по оси «с» заняты атомами углерода и в реальном случае, даже при максимальном содержании углерода в мартенсите ( $\sim 2\%$ ), один атом углерода приходится на четыре элементарные ячейки мартенсита. Мартенсит имеет высокую твердость и прочность, но одновременно и высокую хрупкость. Назван в честь немецкого металловеда Адольфа Мартенса. Физический механизм образования мартенсита принципиально отличается от механизма других процессов, происходящих в стали при нагреве и охлаждении. Мартенситное превращение бездиффузионно (сдвиговое превращение), атомы перемещаются

с большой скоростью по сдвиговому механизму, скорость распространения порядка тысячи метров в секунду. Другие процессы диффузионны, то есть атомы перемещаются с малой скоростью.

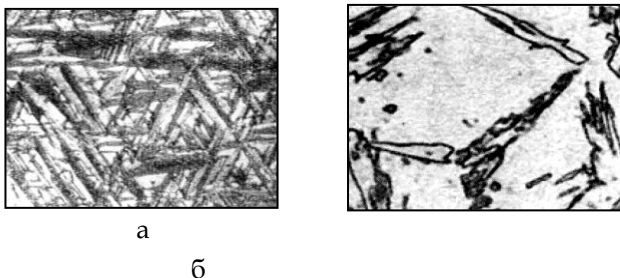


Рис. 1.55. Пластины игольчатого мартенсита в закаленном сплаве Fe - 3,9% Mn (а) и речный (массивный) мартенсит в закаленном сплаве Fe - 1,94% Mo,  $\times 200$

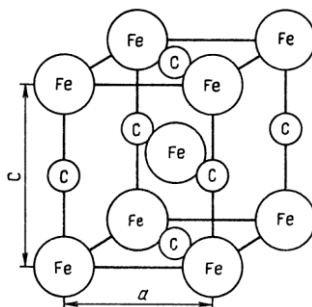
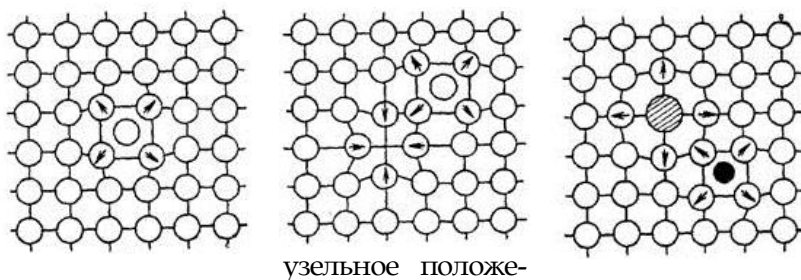


Рис. 1.56. Объемноцентрированная тетрагональная решетка углеродистого мартенсита

**Межузельный атом** – точечный дефект кристаллической решетки, избыточный (собственный или примесный) атом, который занимает промежуточное положение между

узлами решётки рис. 1.57, а). Соседние атомы в узлах кристаллической решётки несколько смещаются по указанным на рис. 1.57, а направлениям, вызывая небольшую деформацию растяжения. Равновесные положения, которые занимают межузельные атомы, зависят от материала и типа решётки. Обычно их бывает несколько в элементарной ячейке. Межузельные атомы обычно образуются в парах с вакансиями (френкелевская пара – рис. 1.57, б). Причиной образования такой пары могут быть тепло-вые флуктуации в кристалле, но особенно большое количество межузельных атомов возникает при облучении кристалла высокоэнергетичными частицами, нейтронами, электронами или ионами. Примесные атомы тоже могут занимать меж-



ние в кристаллической решётке (рис. 1.57, в). Межузельные атомы могут образовывать и комплексы.

а
б
в  
 Рис. 1.57. Межузельный атом (а), Френкелевская пара (б)  
 и примесные атомы замещения (⊗) и внедрения (●)

**Микроструктура** – внутреннее строение металлов и сплавов, изучаемое на шлифах при помощи оптических и

электронных металлографических микроскопов с увеличением от 50 до 2500 раз. При исследовании микрошлифа можно обнаружить форму и расположение зерен в литом металле (рис. 1.58, а, б); волокна (деформированные кристаллиты) в поковках и штамповых заготовках (рис. 1.58, в), дефекты, нарушающие сплошность металла (усадочную рыхлость, газовые пузыри, раковины, трещины и т.д.); химическую неоднородность сплава (ликвации серы и фосфора) вызванную процессом кристаллизации и т.п. (создания азот).



а

б

в

Рис. 1.58. Микроструктура железа (а) и стали с 0,8% С (б, в): а)  $\times 250$ ; б)  $\times 300$ ; в) электронная микрофотография,  $\times 5000$

**Микрошлиф** – образец с плоской полированной поверхностью, подвергнутый травлению для выявления микроструктуры. Микрошлифы изготавливаются и обрабатываются так же, как и макрошлифы, но их поверхность дополнительно полируется на полировальном станке. Травление черных металлов производят следующими реакти-

вами: 5%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте; 4%-ным раствором пикриновой кислоты в этиловом спирте; пикратом натрия и др. Медь травят: 10%-ным раствором персульфата аммония в воде; 8%-ным раствором двухлористой меди в аммиачном растворе и др. Для травления алюминия применяют: водный раствор едкого натра при концентрации от 1 до 20%; раствор из 10 см<sup>3</sup> плавиковой кислоты; 15 см<sup>3</sup> соляной кислоты и 30 см<sup>3</sup> воды. Микроисследования выявляют структуру металла, а следовательно, и его свойства во всех зонах сварного шва. Характерные структуры фотографируются. Наиболее часто обнаруживаются такие дефекты сварки: микропоры, шлаковые включения, непровары, микротрещины, нитриды (соединения железа с азотом в виде продолговатых игл), снижающие пластичность металла, окисные пленки по границам зерен наплавленного металла при его пережоге, карбиды – соединения железа и других элементов с углеродом – в сталях аустенитного класса (выпадение карбидов хрома уменьшает сопротивляемость коррозии нержавеющей стали – рис. 1.59, б и в), укрупненные зерна феррита или наличие видманштеттовой структуры (рис. 1.59, а), которые свидетельствуют о перегреве металла и его низких механических свойствах, отбеливание при сварке чугуна, структуры закалки (троостит и мартенсит) при сварке легированных и углеродистых сталей.

**Модификаторы** – вещества (химических элементы или соединения), образующие дополнительные центры кристаллизации и измельчающие структуру или образующие центры кристаллизации для фазы, которую желатель-

но получить в структуре. Модификаторы, практически не изменяя состав стали, оказывают существенное влияние на ее структуру. Многие из них активно взаимодействуют с компонентами жидкой стали, в результате чего эффект модифицирования в ходе выдержки металла ослабляется. Ввод модификаторов в ряде случаев сопровождается благоприятным воздействием на вредные примеси (раскислением, дегазацией, связыванием серы в устойчивые сульфиды). Все модификаторы, влияющие на структуру затвердевающего металла, делят на две группы: модификаторы первого и второго рода.

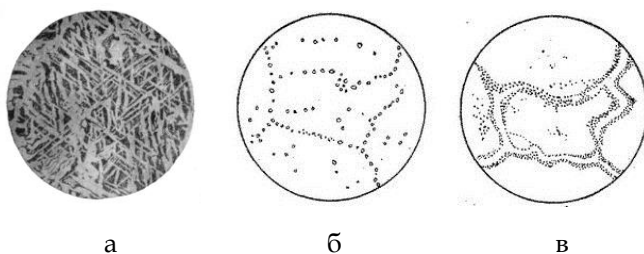


Рис. 1.59. Видманштеттова структура стали,  $\times 50$  (а), выделения карбидов хрома  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  по границам зерен стали X18H9 при нагреве у верхней (б) и нижней (в) границ опасного интервала температуры

**Модификаторы первого рода** – непосредственно образуют в металле центры кристаллизации в виде мелкодисперсной взвеси, являясь или устойчивым тугоплавким соединением с одним из компонентов сплава, или же сам модификатор обладает более высокой температурой плавления, чем основа сплава.



**Модификаторы второго рода** – являются поверхностно активными веществами. При кристаллизации они адсорбируются на поверхности растущих кристаллов и тормозят их рост. Это приводит к увеличению величины переохлаждения жидкой стали перед фронтом кристаллизации и создает благоприятные условия для возникновения новых центров зарождения кристаллов, что в итоге способствует измельчению зерна. Модификаторы второго рода не только измельчают размеры кристаллического зерна, но и изменяют формы роста кристаллов. Они препятствуют развитию игольчатых или пластинчатых кристаллов, придавая им округлые формы. Экспериментально установлено, что в качестве модификаторов второго рода целесообразно использовать щелочные и щелочноземельные металлы.

**Монокристалл** – кристалл, имеющий единственное направление роста кристаллической решетки и состоящий из одного зерна.

## Н

**Наклеп** (нагартовка) – упрочнение металлов и сплавов вследствие изменения их структуры и фазового состава в процессе пластической деформации при температуре ниже температуры рекристаллизации (холодной деформации). Наклеп сопровождается выходом на поверхность образца дефектов кристаллической решётки, увеличением прочности и твёрдости и снижением пластичности, ударной вязкости, сопротивления металлов деформации противоположного знака (эффект Баушингера). Различают два вида на-

клёпа: фазовый и деформационный. Деформационный наклёп является результатом действия внешних деформационных сил. При фазовом наклёпе источником деформаций служат фазовые превращения, в результате которых образуются новые фазы с отличным от исходной(-ых) удельными объёмами. В машиностроении наклёп используется для поверхностного упрочнения деталей. Наклёп приводит к возникновению в поверхностном слое детали благоприятной системы остаточных напряжений, главным образом определяющих высокий упрочняющий эффект поверхностной пластической деформации (ППД), выражающийся в повышении усталостной прочности, а иногда и износостойкости. Для получения упрочненного наклёпом поверхностного слоя заготовку подвергают обработке различными видами ППД, например, обкатка роликами, дробеструйная обработка, поверхностное дорнование и др.

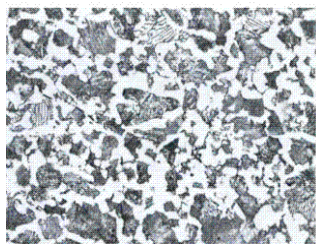
**Нитриды** – химические соединения металлов с азотом. Соединения азота с металлами чаще всего являются тугоплавкими и устойчивыми при высоких температурах веществами, например, эльбор. Нитридные покрытия придают изделиям твёрдость, коррозионную стойкость. Тугоплавкие нитриды применяют в качестве огнеупорных и температуростойких материалов, твёрдые – в производстве твердосплавного и абразивного инструмента, как износостойкие, жаропрочные и жаростойкие материалы.

**Нитроцементация** – процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре 840–860 °С в газовой среде, состо-

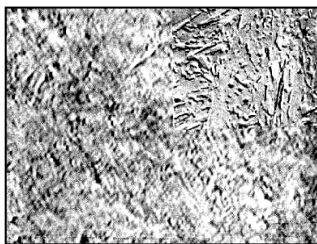
ящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4–10 ч. Основное назначение нитроцементации – повышение твердости, износостойкости и предела выносливости стальных деталей. При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя состоит из мелкокристаллического мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 30–50% остаточного аустенита. Толщина нитроцементованного слоя составляет обычно 200–800 мкм. Она не должна превышать 1000 мкм, т.к. при большей толщине в нем образуются дефекты, снижающие механические свойства стали. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению. Нитроцементация имеет следующие преимущества по сравнению с газовой цементацией. Процесс происходит при более низкой температуре (840–860 °С вместо 910–930 °С), толщина слоя меньше, получаются меньшие деформации и коробление деталей, повышается сопротивление износу и коррозии. Нитроцементацию широко применяют на автомобильных заводах. Так, на ВАЗе 94,5% деталей, проходящих химико-термическую обработку, подвергают нитроцементации.

**Нормализация** (нормализационный отжиг) – вид термической обработки стали с нагревом до аустенитного состояния и охлаждением на воздухе. В результате сталь приобретает мелкозернистую, однородную структуру. Твердость, прочность стали после нормализации выше на 10–15%, чем после отжига. Структура низкоуглеродистой стали после нормализации феррито-перлитная (рис. 1.60, а –

темно-серый перлит и светлый феррит), такая же, как и после отжига, а у средне- и высокоуглеродистой стали – сорбитная (рис. 1.60, б). В некоторых случаях нормализация может заменить для низко-углеродистой стали отжиг, а для высокоуглеродистой – закалку с высоким отпускком. Нормализация применяется для исправления структуры перегретой стали, снятия внутренних механических напряжений, разрушения карбидной сетки, улучшения обрабатываемости конструкционных низколегированных и малоуглеродистых сталей, а также как предварительная операция для увеличения глубины прокаливаемости углеродистых и инструментальных сталей. Часто нормализацию используют для подготовки стали к закалке. Для некоторых изделий нормализация является не предварительной, а окончательной операцией термической обработки. В этом случае после нормализации изделия подвергаются высокому отпуску для снятия внутренних напряжений, образовавшихся при охлаждении изделия на воздухе. Нормализация обеспечивает большую производительность и лучшее качество поверхности при обработке резанием.



а



б

Рис. 1.60. Феррито-перлитная структура низкоуглеродистой стали после нормализации (а) и сорбитная структура высокоуглеродистой стали,  $\times 1000$   
(справа вверху – то же,  $\times 15000$ )

## О

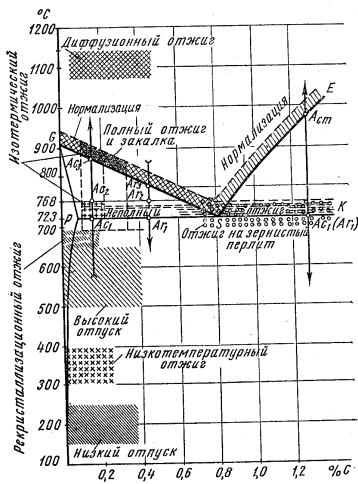
**Отбел** – образование структуры белого чугуна в отливке из серого чугуна; отбеливание чугуна – образование структуры белого чугуна (цементита) в отливках из серого чугуна, обычно в их тонких сечениях или на поверхности отливки, соприкасающейся со стенкой формы. Если отбел не является специальным технологическим приёмом, то он считается дефектом отливки, приводящим к хрупкости изделия и затруднённой механической обработке (см. **Отбелённый чугун**).

**Отбелённый чугун, половинчатый чугун** – серый или высокопрочный чугун со структурой белого чугуна (см. **Чугун белый**) в периферийных частях отливки. Отбелённый чугун применяют в износостойких, прочных и термостойких отливках (лемехов плугов, обода вагонных колёс, носиков коромысел клапанов и других отливок). Структуру белого чугуна получают увеличением скорости охлаждения отливки с помощью установленных в литейную форму металлических холодильников, окрашиванием литейной формы краской с карбидообразующими элементами, например, теллуrom, расплавлением периферийных частей отливки с последующим быстрым охлаждением.

**Отжиг** – вид термообработки металлов и сплавов, в основном сталей и чугунов, получивших в результате предшествующей обработки неустойчивое состояние, заключающийся в нагреве до определённой температуры, выдержке и

последующем, обычно медленном, охлаждении для получения устойчивого структурного состояния сплава (рис. 1.61).

При отжиге осуществляются процессы возврата (отдыха металлов), рекристаллизации, гомогенизации, фазовой перекристаллизации, измельчения зерна. На рис. 1.62 показаны режимы различных видов отжига. Цели отжига – снижение твёрдости для повышения обрабатываемости, улучшение структуры и достижение большей однородности металла, снятие внутренних напряжений. По классификации А.А. Бочвара различают два вида (рода) отжига. Отжиг 1-го рода – без фазовой перекристаллизации – применяется для приведения металла в более равновесное структурное состояние: снимается наклёп, понижается твёрдость, возрастают пластичность и ударная вязкость, снимаются внутренние напряжения (в связи с процессами отдыха и рекристаллизации). Отжиг 2-го рода осуществляется с фазовой перекристаллизацией до температуры выше температуры выжига различной и относительно медлен



еваются до температуры выше температуры выдерживающего сравни

Рис. 1.61. Об.

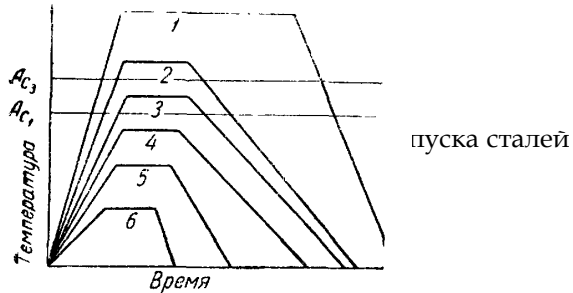


Рис. 1.62. Режимы различных видов отжига:

- 1 - гомогенизация (диффузионный отжиг);
- 2 - полный отжиг;
- 3 - неполный отжиг;
- 4 - низкотемпературный отжиг;
- 5 - рекристаллизующий отжиг (рекристаллизация);
- 6 - отпуск (после закалки)

**Отжиг 1-го рода** - один из видов термической обработки металлов и сплавов - отжиг с фазовыми превращениями в твердом состоянии без перекристаллизации. Нагрев при отжиге 1-го рода, повышая подвижность атомов, частично или полностью устраняет химическую неоднородность, уменьшает внутренние напряжения, т.е. способствует получению более равновесного состояния. Основное значение при проведении такого отжига имеют температура нагрева и время выдержки при этой температуре, т.к. именно эти параметры определяют скорость процессов, устраняющих отклонения от равновесного состояния. Скорость нагрева и охлаждения для отжига 1-го

рода имеет второстепенное значение. Различают следующие разновидности отжига 1-го рода (рис. 1.61): диффузионный отжиг (гомогенизирующий), рекристаллизационный отжиг, отжиг для снятия напряжений, возникающих при ковке, сварке, литье и вызывающих коробление, т.е. изменение формы, размеров и даже разрушение изделий.

**Отжиг 2-го рода** – один из видов термической обработки металлов и сплавов – отжиг с фазовыми превращениями в твердом состоянии – качественными и/или количественными изменениями фазового состава при нагревании и обратными изменениями при охлаждении с целью получения равновесных структур. К отжигу 2-го рода относятся полный, неполный и изотермический отжики (рис. 1.61). Основные параметры такого отжига поковок – температура нагрева, время выдержки при этой температуре и скорость охлаждения. Основное назначение отжига 2-го рода – полное изменение фазового состава. Температуру и время отжига поковок выбирают так, чтобы обеспечить необходимые фазовые изменения, например, полиморфное превращение или растворение избыточной фазы. При изотермическом отжиге в процессе выдержки происходит выравнивание температуры по сечению изделия. Это способствует получению более однородной структуры и однородных свойств. Отжиг 2-го рода применяют чаще всего к стали для общего измельчения структуры, смягчения и улучшения обрабатываемости резанием.

**Отжиг диффузионный (гомогенизация)** – разновидность отжига 1-го рода, заключающаяся в высокотемпературном нагреве для выравнивания химической неод-



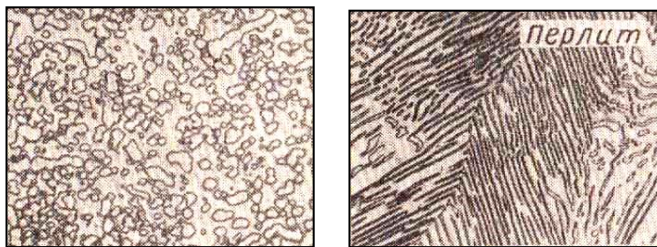
нородности (путем диффузии) зерен твердого раствора, т.е. уменьшения в фасонных стальных отливках и в слитках главным образом из легированной стали дендритной или внутрикристаллитной ликвации, которая повышает склонность стали, обрабатываемой давлением, к хрупкому излому, к анизотропии свойств и возникновению таких дефектов, как шиферность (слоистый излом) и флокены (тонкие внутренние трещины, наблюдаемые в изломе в виде белых овальных пятен). В связи со своим назначением сделать сталь однородной (гомогенной) диффузионный отжиг иначе называется гомогенизацией. Проводят в течение 18–24 ч при температуре 1000–1100 °С, т.к. только в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания в отдельных объемах состава стали. Диффузия наиболее интенсивно протекает в начале выдержки, заметно снижаясь с течением времени. Поэтому во избежание образования большого количества окалины, уменьшения расхода топлива и увеличения производительности печей выдержка должна быть минимальной, обычно 15–20 ч. После выдержки садку охлаждают до 800–820 °С в печи, а далее на воздухе.

**Отжиг изотермический** – состоит в нагреве легированной стали до температуры полного отжига (на 30–50 °С выше верхней критической точки  $A_{C3}$ ), подстуживании до температуры ниже на 150 °С точки  $A_{C1}$  (рис. 1.61) и последующей изотермической выдержки (3–6 ч) в другой печи или ванне с температурой 600–700 °С (в зависимости от марки стали) до полного распада аустенита. Отличительной особенностью изотермического отжига является то,

что при его проведении распад аустенита на ферритно-цементитную смесь происходит при постоянной температуре. Изотермический отжиг по сравнению с обычным отжигом имеет два преимущества. Прежде всего он может дать выигрыш во времени, если суммарное время ускоренного охлаждения, изотермической выдержки и последующего ускоренного охлаждения меньше времени медленного охлаждения изделия вместе с печью. Изотермический отжиг приводит к снижению твердости, повышению пластичности и улучшению обрабатываемости резанием, применяется для мелких деталей и имеет меньшую продолжительность процесса, чем полный отжиг. Особенно большой выигрыш времени можно получить при изотермическом отжиге легированных сталей с устойчивым переохлажденным аустенитом. Другое преимущество изотермического отжига – получение более однородной структуры, так как при изотермической выдержке температура по сечению изделия выравнивается, и превращение во всем объеме стали происходит при одинаковой степени переохлаждения. Разновидностью изотермического отжига является патентирование, при котором изотермическую выдержку дают при температуре, обеспечивающей получение структуры тонкопластинчатого сорбита. Патентированная проволока со структурой сорбита обладает чрезвычайно высоким запасом пластичности и упрочняется до очень высоких значений временного сопротивления.

**Отжиг неполный** – нагрев производится до температур несколько выше точки  $A_{c1}$  (рис. 1.61). Применяют для доэвтектоидных сталей с целью улучшения обрабатываемости резанием, в заэвтектоидных сталях нагрев несколько

выше точки  $A_{C1}$  (обычно на 10–30 °С) вызывает практически полную перекристаллизацию и позволяет получить зернистую структуру перлита (рис. 1.63, а) вместо пластинчатой (рис. 1.63, б). Такой отжиг еще называют сфероидизацией.



а

б

Рис. 1.63. Зернистая (а) и пластинчатая (б) структура перлита стали с содержанием углерода 1,1 %С, х 450

**Отжиг полный** (Full annealing) – заключается в нагреве сталей на 30–50 °С выше температуры точки  $A_{C3}$  с переводом их структуры полностью в аустенитное состояние (рис. 1.61), выдержки и медленном охлаждении в печи со скоростью: для углеродистых сталей 100–150 °С/час, легированных – 30–40 °С/час. Структура стали после полного отжига получается феррито-перлитная (рис. 1.64, а). Предназначен для снятия внутренних напряжений, уменьшения твердости и получения структуры, близкой к равновесной. Полный отжиг осуществляется главным образом после горячей обработки и литья углеродистых и легированных сталей. Основные цели полного отжига следующие: устранение пороков структуры, возникших при предыдущей обработке металла (литье, горячей деформации, сварке и термообработке), смягчение стали перед

обработкой резанием и уменьшение напряжений. При литье могут кристаллизоваться крупные зерна аустенита, из которых при охлаждении образуются грубые зерна феррита и перлита, причем часто феррит располагается в виде вытянутых кристаллов с определенной ориентировкой – возникает видманштеттова структура (рис. 1.64, б), характеризующаяся пониженной ударной вязкостью. Полный отжиг позволяет устранить данный порок структуры (рис. 1.64, в). Все алюминиевые сплавы, как термически упрочняемые, так и термически не упрочняемые, после полного отжига получают состояние, которое является самым мягким, самым пластичным и наиболее благоприятным для пластической деформации.

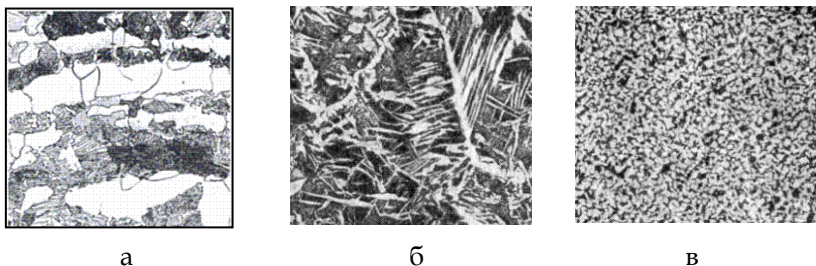


Рис. 1.64. Феррито-перлитная структура стали 40 после полного отжига (а), видманштеттова структура литой доэвктикоидной стали (б) и её микроструктура ( $\times 100$ ) после полного отжига (в)

**Отжиг рекристаллизационный** – нагрев холоднодеформированного сплава до температур выше температуры рекристаллизации для снятия наклепа, внутренних напряжений, восстановления пластичности металла, получения равновесного состояния сплава. Рекристаллизационный отжиг сталей, цветных металлов и сплавов при-

меняют после холодной прокатки листов, лент и фольги, холодного волочения труб, прутков и проволоки, холодной штамповки и других видов холодной, а также теплой обработки давлением (при теплой обработке давлением металл значительно наклепывается, хотя и слабее, чем при холодной). В результате рекристаллизации в деформированном металле образуются новые зерна. В отдельных случаях рекристаллизационный отжиг следует за горячей обработкой давлением. Например, горячекатаные рулоны из некоторых алюминиевых сплавов перед холодной прокаткой отжигают для снятия остатков наклепа, так как в конце горячей прокатки, когда лист был захлажден до температур 280–330 °С, медленная рекристаллизация не успела полностью пройти и снять наклеп. В производстве полуфабрикатов и изделий из цветных металлов и сплавов рекристаллизационный отжиг как самостоятельная операция термообработки распространена гораздо шире, чем в технологии производства стали. Объясняется это тем, что по сравнению со сталями холодной обработке давлением подвергают несравненно большую долю цветных металлов и сплавов. Рекристаллизационный отжиг подразделяют на полный, неполный и текстурирующий. Полный рекристаллизационный отжиг, обычно называемый просто рекристаллизационным – одна из наиболее широко применяемых операций термообработки. В таблице 1.1 примерные температуры полного рекристаллизационного отжига разных материалов. Время выдержки обычно составляет 10–60 мин. При выборе времени выдержки иногда приходится учитывать побочные процессы. Так, основным процессом при отжиге хо-

лоднодеформированных сталей ниже точки  $A_{c1}$  является рекристаллизация феррита. Но, кроме нее, может идти сфероидизация цементита. Если требуется перевести цементит в зернистую форму, время выдержки доходит до нескольких часов (зернистая форма цементита наиболее благоприятна для последующего холодного деформирования).

**Отпуск** – термическая обработка с нагревом закаленной стали до температуры ниже температур фазовых превращений с целью повышения пластичности и вязкости, уменьшения остаточных напряжений и получения специальной структуры и свойств. Термин «Отпуск» применяют главным образом к сталям. Процессы распада, зафиксированного закалкой неравновесного состояния других сплавов чаще называют старением (см. **Старение металлов**). Основное назначение отпуска стали – достижение у неё необходимых свойств, в особенности оптимального сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости. Отпуск разделяют на низкий, средний и высокий в зависимости от температуры нагрева (рис. 1.61).

Таблица 1.1

Примерные температуры полного рекристаллизационного отжига разных материалов

Материал	Температура, °С
Углеродистая сталь	650–710
Медь	500–700
Латуни и бронзы	600–700
Медноникелевые сплавы	700–850
Никель	700–800
Никелевые сплавы	800–1150
Титан	670–690
Алюминий	300–500

Алюминиевые сплавы	350–430
Магниевые сплавы	300–400

**Отпуск высокий** – отпуск с нагревом до температур 550–680 °С для полного снятия внутренних напряжений и получения наивысшей ударной вязкости стали (рис. 1.61). Нагрев до указанной температуры способствует распаду мартенсита и образованию структур троостита или сорбита отпуска: полигонизированного либо рекристаллизованного феррита с глобулярным либо пластинчатым цементитом (рис. 1.65, а). Наличие таких структур желательно для деталей, изготовляемых из конструкционной стали, так как это обеспечивает получение высоких прочностных и пластических свойств. Высокий отпуск (500–650 °С) придает деталям высокую вязкость при сохранении достаточной твердости (НВ = 300). Для деталей, от которых в работе требуются прочность и пластичность (например, шестерни, шатуны двигателей внутреннего сгорания, валы коробок передач и т.д.), отпуск дается до температур 500–600 °С с целью получения структуры сорбита. В практике термической обработки операция закалки с высоким отпуском получила название «термическое улучшение». Для деталей, которые в работе испытывают знакопеременные нагрузки (например, пружины), отпуск дается до температур 350–450 °С с целью получения структуры троостита (рис. 1.65, б). В этом случае сталь будет менее пластичная, чем сталь со структурой сорбита, но более прочная и твердая и будет лучше сопротивляться переменным нагрузкам. Перлит, сорбит и троостит – структуры с одинаковой природой (феррит +

цементит), отличающиеся степенью дисперсности феррита и цементита (таблица 1.2).

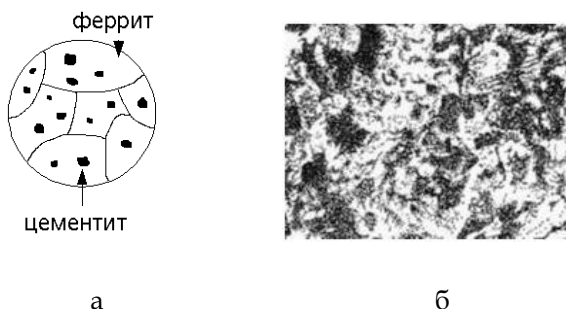


Рис. 1.65. Структура сорбита отпуска (а) и троостита отпуска (б) (дисперсная смесь феррита и цементита)

**Отпуск низкий** – отпуск мартенсита на низких температурах (180–250 °С) для снятия внутренних напряжений и повышения вязкости стали без снижения ее твердости (рис. 1.61). Применяется после закалки для инструментальных, подшипниковых сталей, малоуглеродистых сталей после цементации для изготовления деталей и инструментов, работающих на износ, от которых требуется высокая твердость. Низкий отпуск применяют для режущего и измерительного инструмента, изготовленного из углеродистых и малолегированных сталей, шарикоподшипниковых колец, шариков и роликов, цементованных и планированных деталей – зубчатых колес автомобилей, металлорежущих станков и т.д. Цель низкого отпуска – уменьшение остаточных закалочных напряжений и хрупкости деталей. Выдержка при температуре низкого отпуска обычно 1–3 часа. Получаемая структура – мартенсит отпуска.



**Отпуск средний** – отпуск с нагревом до температур 350–450 °С для получения наилучших сочетаний упругих свойств стали. Получаемая структура: мартенсит превращается в мелкую феррито-цементитную смесь – троостит. Среднеуглеродистая сталь приобретает твердость около 35–47 HRC, упругость и повышенную сопротивляемость действию переменных и ударных нагрузок. Среднему отпуску подвергаются главным образом детали, испытывающие ударные нагрузки, например, зубила, молотки, пружины, рессоры и т.д. Для такого отпуска применяются отпускные электрические печи и селитровые ванны.

Таблица 1.2

Степень дисперсности структур одинаковой природы:  
феррит + цементит

Ф-Ц смесь	Структура	Межпластинчатое расстояние $\Delta_0$ , мкм	Твердость, НВ
Перлит		0,6–1,0	180–250
Сорбит		0,25–0,3	250–350
Троостит		0,1–0,15	350–450

## II

**Параметр (кристаллической решетки).** Кристаллическая решетка – это мысленно проведенные в пространстве прямые линии, соединяющие ближайшие атомы и проходящие через их центры, относительно которых они совершают колебательные движения. В итоге образуются фигуры правильной геометрической формы – кристаллическая решетка (рис. 1.66). Расстояния ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) между соседними атомами – параметры кристаллической решетки, находятся в пределах  $2\text{--}6 \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$ ). Каждый атом принадлежит 8 кристаллическим решеткам.

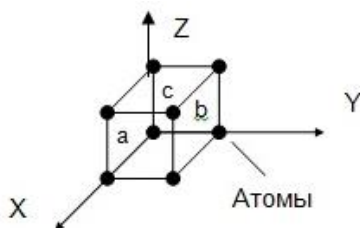


Рис. 1.66. Схема кристаллической решетки

**Перлит** – структурная составляющая в углеродистых и легированных сталях и чугунах, возникающая при эвтектидном распаде высокотемпературной фазы аустенита. Перлит состоит из двух фаз – феррита ( $\Phi$ ) и цементита ( $\Pi$ ). Феррит – железо с очень малым количеством углерода (до  $0,03\%$ ), а цементит – химическое соединение  $\text{Fe}_3\text{C}$ , содержащее по массе  $6,67\% \text{ C}$ . Среднее содержание углерода в перлите –  $0,8\% \text{ C}$ , а сталь с целиком перлитной структурой, содержащая  $0,8\%$  углерода, называется эвтектидной. При содержании углерода менее  $0,8\%$  сталь состоит из перлита и

феррита, если углерода более 0,8% – из перлита. Перлитное превращение всегда начинается на границах зерен аустенита (рис. 1.67). При образовании перлита из аустенита ведущей фазой является цементит. Зарождение центров кристаллизации цементита облегчено на границе аустенитных зерен. Образовавшаяся пластинка цементита растет, удлиняется и обедняет соседние области углеродом. Рядом с ней образуются пластинки феррита. Эти пластинки растут как по толщине, так и по длине. Рост образовавшихся колоний перлита продолжается до столкновения с кристаллами перлита, растущими из других центров. Свойства и строение продуктов превращения аустенита зависят от температуры, при которой происходит процесс его распада. Твердость ферритно-цементитной смеси прямопропорциональна площади поверхности раздела между ферритом и цементитом. В зависимости от формы различают пластинчатый (рис. 1.68, а) и зернистый (рис. 1.68, б) перлит.



Рис. 1.67. Механизм превращения аустенита в перлит

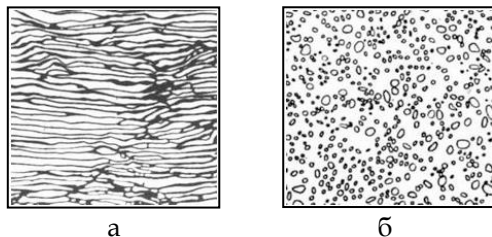


Рис. 1.68. Структура пластинчатого (а) и зернистого (б) перлита

**Перлит зернистый** – состоит из зерен феррита и цементита.

**Перлит пластинчатый** – состоит из пластинок феррита и цементита.

**Пермаллои** – обладающие высокой магнитной проницаемостью прецизионные сплавы с магнитно-мягкими свойствами, состоящие из железа и никеля (40–82% Ni). По составу выделяют низконикелевые (40–50% Ni) и высоконикелевые (72–82% Ni) пермаллои. Обе группы пермаллоев для улучшения электромагнитных свойств легируются различными элементами, например молибденом, хромом, медью, кобальтом и некоторыми др. элементами. Термическая обработка высоконикелевых пермаллоев сложнее, чем низконикелевых.

**Пластичность** (от греч. *plastikós* – податливый, пластичный) – свойство твёрдых тел необратимо изменять (деформироваться под действием внешних нагрузок) свои размеры и форму (т.е. пластически деформироваться, получать большие остаточные деформации) под действием механических нагрузок, не разрушаясь, и сохранять измененную форму после прекращения действия деформирующих усилий. Пластичность определяет возможность обработки материалов давлением (ковки, прокатки и др.). Пластичность кристаллических тел (или материалов) связана с действием различных микроскопических механизмов пластической деформации, таких как зарождение, движение и исчезновение дислокаций. Относительная роль каждого из этих механизмов определяется внешними условиями: температурой, нагрузкой, скоростью деформирования.

Дефекты кристаллической структуры (вакансии, междоузельные и примесные атомы), которые могут препятствовать или способствовать движению дислокаций, оказывают существенное влияние на пластичность. Для поликристаллических твердых тел важный вклад в пластичность вносят также границы зерен. Межзеренные границы препятствуют распространению дислокаций и, как правило, упрочняют кристаллические тела при низких температурах. Наоборот, при высоких температурах наличие границ, являющихся источниками или стоками дефектов, повышает пластичность. Показателем пластичности металла служат относительное удлинение  $\delta$  и относительное сужение  $\varphi$ . Чем больше значения  $\delta$  и  $\varphi$ , тем больше пластичность, и наоборот. Эти показатели пластичности металла определяются по результатам одноосного растяжения цилиндрических образцов (ГОСТ 1497-84). При растяжении образцов с площадью поперечного сечения  $F_0$  и рабочей (расчетной) длиной  $l_0$  строят диаграмму растяжения в координатах: нагрузка  $P$  – удлинение  $\Delta l$  образца (рис. 1.69). Диаграмма растяжения характеризует поведение металла при деформировании от момента начала нагружения до разрушения образца. Относительное остаточное удлинение ( $\delta$ , %) определяется по формуле:

$$\delta = 100 \cdot (l_k - l_0) / l_0,$$

где  $l_k$  – рабочая длина образца после испытания, мм;  $l_0$  – рабочая длина до испытания, мм.

Относительное остаточное сужение ( $\varphi$ , %) определяется из выражения:

$$\varphi = 100 \cdot (F_0 - F_k) / F_0.$$

где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>;  
 $F_k$  – площадь сечения образца вместе разрушения, мм<sup>2</sup>.

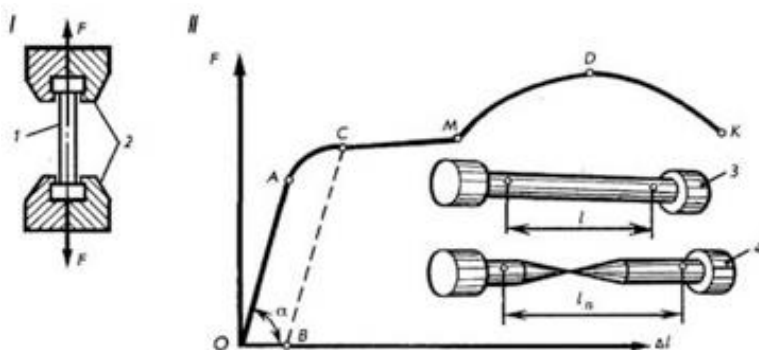


Рис. 1.69. Диаграмма растяжения одноосного растяжения цилиндрических образцов

К числу весьма пластичных материалов относятся отожженная медь, алюминий, латунь, золото, малоуглеродистая сталь и др. Менее пластичными являются дюраль и бронза. К числу слабопластичных материалов относятся многие легированные стали. Отсутствие или малое значение пластичности называют хрупкостью.

**Плоскость скольжения** (Slip plane) – кристаллографическая плоскость с наиболее плотной упаковкой атомов, где сопротивление сдвигу наименьшее, вдоль которой происходит скольжение в кристалле. Для каждой кристаллической решетки может существовать несколько плоскостей скольжения (рис. 1.70). Скольжение происходит так, что атомные слои не отделяются друг от друга, т.е. атомы в плоскости скольжения перемещаются на целое число трансляций и атомная структура сохраняется. Примером

такого скольжения является реализация одного из двух основных типов пластической деформации, а именно скольжением (рис. 1.71, а), в отличие от второго типа пластической деформаций – двойникования, протекающего в плоскости двойникования (рис. 1.71, б).

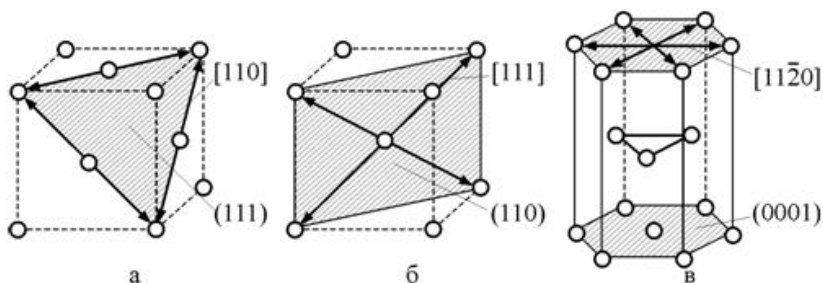


Рис. 1.70. Основные плоскости и направления скольжения в решетках: а) ГЦК; б) ОЦК; в) ГПУ



Рис. 1.71. Пластическая деформация скольжением (а) и двойникованием (б)

**Порог хладноломкости** (cold-shortness threshold) – условный температурный интервал перехода от вязкого разрушения металла к хрупкому; характеризуется, как правило, двумя температурами:  $T_{в/sub>}$ , выше которой излом полностью вязкий, и  $T_{н}$ , ниже которой излом полностью

хрупкий. Железо, сталь и металлы, и сплавы, в основном с ОЦК решеткой, могут разрушаться хрупко или вязко в зависимости от температурного порога хладноломкости. Зная порог хладноломкости и рабочую температуру эксплуатации материала, можно оценить его температурный запас вязкости, под которым понимают интервал температур между порогом хладноломкости и рабочей температурой. Чем больше температурный запас вязкости, тем меньше опасность хрупкого разрушения. При небольшом запасе вязкости в результате случайного снижения температуры, роста зерна, загрязнения металла вредными примесями и т.д. порог хладноломкости может повыситься, это приведет к хрупкому разрушению.

**Правило Гиббса (правило фаз)** – соотношение, связывающее число веществ (компонентов), фаз и степеней свободы в гетерогенной системе. Любая гетерогенная система состоит из отдельных гомогенных, физически или химически различных, механически отделимых друг от друга частей, называемых фазами. Фаза – это совокупность всех гомогенных частей гетерогенной системы, отделенная от других частей системы четкими поверхностями раздела (межфазными границами). Химический состав и свойства остаются постоянными внутри объема, занимаемого фазой. При переходе через межфазную границу состав и свойства меняются скачком. Математическая форма выражения общих закономерностей существования устойчивых фаз системы, отвечающих условиям равновесия, устанавливает зависимость между числом степеней свободы



(< 3), числом компонентов (К), числом внешних факторов (П) и числом фаз (Ф) в виде:

$$C = K + П - Ф.$$

Число компонентов К – наименьшее число независимо изменяющихся веществ, с помощью которых можно описать состав каждой фазы в системе в отдельности. Число степеней свободы С – наименьшее число независимых переменных системы (давление, температура и концентрации веществ в различных фазах), которые необходимо задать, чтобы полностью описать состояние системы. Общий закон сосуществования фаз действительно есть. По имени своего первооткрывателя он называется правилом Гиббса.

**Правило Курнакова** – устанавливает связь между свойствами двойных сплавов (механическими, физическими и технологическими) и типом их диаграмм состояния. Свойства сплавов зависят от взаимодействия компонентов, т.е. структуры. Диаграмма состояния характеризует взаимодействие компонентов и показывает, какая структура получается в зависимости от состава сплава. Следовательно, существует связь между свойствами и типом диаграммы состояния (рис. 1.72).

При образовании механических смесей (рис. 1.72, а) свойства сплава изменяются по линейному закону (аддитивно), а – непрерывного ряда твердых растворов свойства (твердость, электропроводность и др.) изменяются по криволинейной зависимости (рис. 1.72, б). Твердость компонентов А и В ниже, чем твердость сплавов. В сплавах с ограниченной растворимостью (рис. 1.72, в) – диаграммы с эвтектическим или перитектическим превращениями –

свойства при концентрациях, отвечающих однофазовому твердому раствору, изменяются по криволинейной зависимости, а в двухфазовой области - по прямой. Крайние точки на прямой являются свойствами предельно насыщенных твердых растворов. При образовании химического соединения (рис. 1.72, г) на кривой «концентрация-свойства» будет иметься максимум (или минимум) с перегибом в точке, соответствующей образованию химического соединения  $A_mB_n$ . Зная характер взаимодействия между двумя металлами и тип диаграммы «концентрация-свойства», можно легче и быстрее определить состав сплава, обеспечивающий наилучшие свойства.

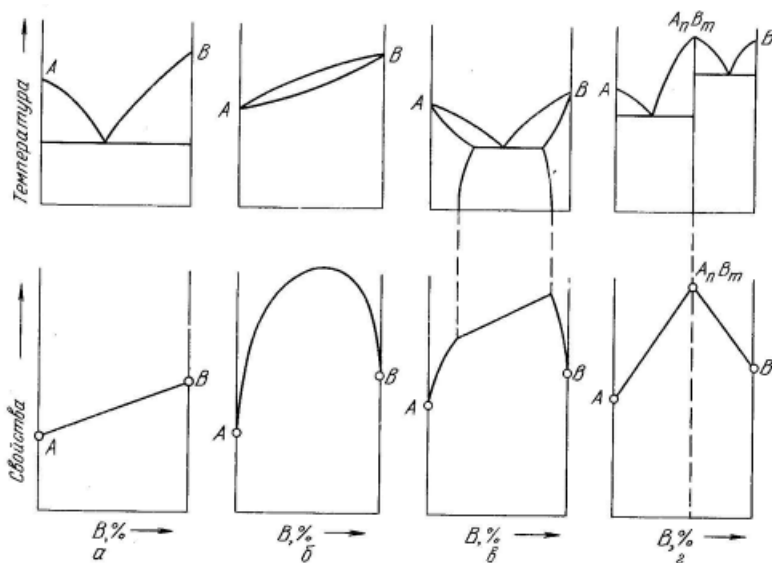


Рис. 1.72. Свойства сплавов и их диаграммы состояния

**Предел выносливости** (также предел усталости) – максимальное напряжение при симметричном или несимметричном цикле нагружения, не вызывающее разрушение образца. Предел выносливости материала определяют с помощью испытаний серий одинаковых образцов (не менее 10 шт.): на изгиб, кручение, растяжение–сжатие или в условиях комбинированного нагружения (последние два режима для имитации работы материала при асимметричных циклах нагружения или в условиях сложного нагружения). Испытания на усталость очень трудоёмки, связаны с получением и обработкой значительного массива данных, полученных экспериментальным путём и для которых характерен большой разброс значений. Поэтому были предприняты попытки связать эмпирическими формулами предел выносливости с известными прочностными характеристиками материала. Более всего для этой цели подходит такая характеристика материала, как предел прочности. Установлено, что, как правило, для сталей предел выносливости  $\sigma_{-1}$  при изгибе составляет половину от предела прочности:

$$\sigma_{-1} \approx (0,4-0,5) \cdot \sigma_{В.Р.},$$

для высокопрочных сталей можно принять:

$$\sigma_{-1} \approx 400 + 1/6\sigma_{В.Р.},$$

для цветных металлов можно принять:

$$\sigma_{-1} \approx (0,25-0,5) \cdot \sigma_{В.Р.},$$

где  $\sigma_{В.Р.}$  – механическое напряжение, выше которого происходит разрушение материала. Согласно ГОСТу 1497-84 более корректным термином является «Временное сопротивление разрушению», то есть напряжение, соответствующее

наибольшему усилию, предшествующему разрыву образца при (статических) механических испытаниях. Термин происходит от того представления, что материал может бесконечно долго выдержать любую статическую нагрузку, если она создаёт напряжения меньшие по величине, чем временное сопротивление. При нагрузке, соответствующей временному сопротивлению (или даже превышающей её – в реальных и квазистатических испытаниях), разрушение материала (разделение образца на несколько частей) произойдёт через какой-то конечный промежуток времени, возможно, что и практически сразу. В случае динамических испытаний время нагружения образцов часто не превышает нескольких секунд от начала нагружения до момента разрушения, в таком случае соответствующая характеристика называется также условно-мгновенным пределом прочности, или хрупко-кратковременным пределом прочности.

**Предел ползучести** (creep limit) – напряжение, которое за конкретный промежуток времени при данной температуре вызывает заданное удлинение, например 1%. Ползучесть материалов (последствие) – медленная, происходящая с течением времени деформация твёрдого тела под воздействием постоянной нагрузки или механического напряжения. Ползучести в той или иной мере подвержены все твёрдые тела – как кристаллические, так и аморфные. Ползучесть описывается кривой ползучести (рис. 1.73), которая представляет собой зависимость деформации от времени при постоянных температуре и приложенной нагрузке (или напряжении). Её условно делят

на три участка или стадии:  $AB$  – неустановившейся (или затухающей) ползучести (стадия I),  $BC$  – установившейся ползучести – деформации, идущей с постоянной скоростью (стадия II),  $CD$  – ускоренной ползучести (стадия III),  $E_0$  – деформация в момент приложения нагрузки (стадия IV), точка  $D$  – момент разрушения.

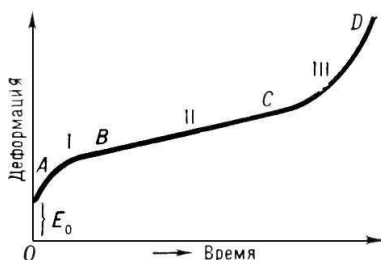


Рис. 1.73. Кривая ползучести

Структурный же механизм ползучести, то есть элементарные процессы, приводящие к ползучести, зависит как от вида материала, так и от условий, в которых происходит ползучесть. Физический механизм ползучести, особенно при высоких температурах, имеет преимущественно диффузионную природу и тем отличается от механизма деформирования при пластичности, которая связана с быстрым скольжением вдоль атомных плоскостей зёрен поликристалла. Всё многообразие элементарных процессов необратимой пластической деформации, приводящих к ползучести, можно условно разделить на процессы, осуществляемые движением дислокаций (дефектов в кристалле), и процессы, обусловленные диффузией. Последние имеют место у аморфных тел при всех температурах

их существования, а также у кристаллических тел, в частности у металлов и сплавов, при достаточно высоких температурах. Высокое сопротивление *ползучести* является одним из факторов, определяющих жаропрочность.

**Предел прочности** – напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке (т. В на рис. 1.74, а), предшествующей разрушению образца, или предел прочности еще называют временным сопротивлением при растяжении  $\sigma_B$ . Это характеристика статической прочности:

$$\sigma_B = P_{\max} / F_0,$$

где  $P_{\max}$  – наибольшая нагрузка (напряжение), предшествующая разрушению образца, МПа (кгс);  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup> (мм<sup>2</sup>). У пластичных металлов, начиная с напряжения  $\sigma_B$ , деформация сосредоточивается (локализуется) в одном участке образца, где появляется сужение, так называемая шейка. В результате в шейке образуется множество вакансий и дислокаций, возникают зародышевые несплошности. Сливаясь, они образуют трещину, которая распространяется в поперечном растяжению направлении, и образец разрушается (точка С). Кривая растяжения образца без площадки текучести показана на рис. 1.74, б.

**Предел текучести условный** – напряжение, соответствующее остаточному удлинению образца 0,2% от начальной  $\sigma_{0,02}$ , МПа).

**Примесный атом** (impurity atom) – атом кристалла, химическая природа которого отлична от химической природы основных атомов, образующих кристалл. Примесные атомы относятся к точечным дефектам и приводят к нарушению строгой периодичности идеального кристалла.

Примесные атомы располагаются либо в узлах кристаллической решётки, замещая основные атомы (примесь замещения – substitutional impurity, рис. 1.75, б), либо в междоузлиях (примесь внедрения – interstitial impurity, рис. 1.75, в).

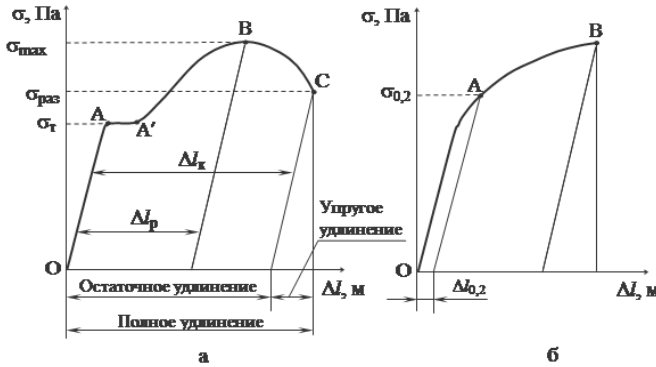


Рис. 1.74. Диаграмма растяжения пластичных металлов: а) с площадкой текучести; б) без площадки текучести

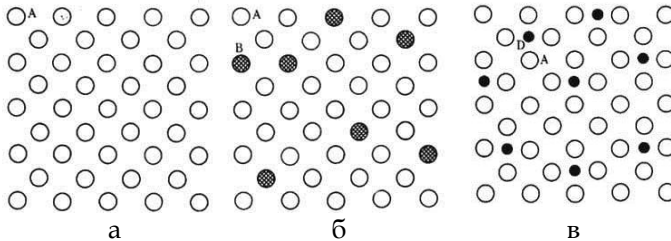


Рис. 1.75. Схемы расположения атомов в твёрдых растворах: а) чистый элемент А сплава; б) твёрдый раствор замещения элемента-примеси В в элементе А сплава; в) твёрдый раствор внедрения элемента-примеси D в элементе А сплава;

○ – А; ⊗ – В; ● – D.

**Прочность** – свойство материалов сопротивляться деформации или разрушению (разделению на части), а также необратимому изменению формы (пластической деформации) под действием статических или динамических нагрузок. Физическая природа прочности твёрдых тел обусловлена в конечном счёте силами взаимодействия между атомами и ионами, составляющими тело (рис. 1.76). Эти силы зависят главным образом от взаимного расположения атомов. Одной из основных количественных характеристик прочности является предел прочности (временное сопротивление) при растяжении, равный частному от деления наибольшей нагрузки, которую выдерживает растягиваемый образец, на первоначальную площадь его поперечного сечения. Другими характеристиками могут служить предел прочности при сжатии, предел прочности при сдвиге, истинное сопротивление при разрыве и т.д. В зависимости от свойств материала и типа нагрузок прочности материала может также характеризоваться пределом текучести, пределом ползучести, пределом выносливости, а также ударной вязкостью.

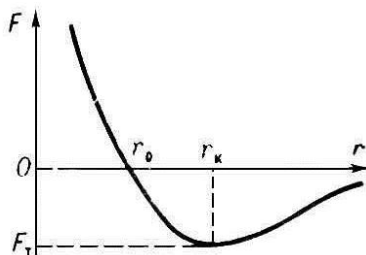


Рис. 1.76. Сила взаимодействия двух атомов в зависимости от расстояния



## Р

**Разгаростойкость** (resistance to thermal erosion) – сопротивление материала термической усталости, т.е. способность выдерживать многократные нагревы и охлаждения под нагрузкой без образования поверхностных трещин. Это свойство обеспечивается снижением содержания углерода в стали, которое сопровождается повышением пластичности, вязкости, а также теплопроводности, уменьшающей разогрев поверхностного слоя и термические напряжения в нем.

**Разрушение** – заключительная стадия деформирования материалов, процесс разделения твердого тела на части под действием нагрузки. Может сопровождаться термическими, радиационными, коррозионными и другими воздействиями. В рамках кинетического подхода, предложенного Я.Б. Фридманом, разрушение рассматривается как процесс, проходящий с течением времени последовательно подготовительную, критическую и заключительную стадии. Механическое разрушение является предельным случаем неупругой деформации, когда тело под действием напряжений разделяется на части. Материалы, в которых перед разрушением происходит значительная пластическая деформация, называются пластичными. Материалы, в которых перед разрушением она отсутствует (или, строго говоря, является пренебрежимо малой), считаются хрупкими. При однократном воздействии монотонно нарастающего усилия возможны два основных типа разрушения – хрупкое и вязкое (рис. 1.77). В обоих

случаях тело разделяется на части до того, как в месте расчленения площадь его поперечного сечения уменьшится до нуля. Хрупкое и вязкое разрушение имеют разные виды разрушенной поверхности. Возможно обнаружить дефекты на этой поверхности. Дефекты в зонах растягивающих напряжений обычно – главный источник усталостных трещин.

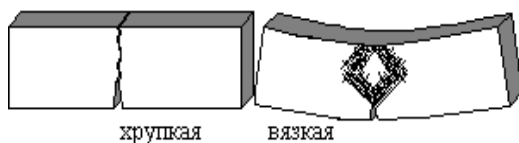


Рис. 1.77. Основные типы разрушения – хрупкое и вязкое

**Разупрочнение** – процесс понижения под действием внешних или внутренних факторов прочности и повышения пластичности материалов, предварительно упрочнённых в результате наклёпа, термической обработки (для сталей – закалка с низкотемпературным отпуском, а для сплавов с ограниченной растворимостью, зависящей от температуры, – дисперсионное твердение) или облучения частицами с высокой энергией (нейтронами,  $\gamma$ -лучами, электронами). Упрочнённое состояние (см. **Упрочнение**) связано с наличием структурных несовершенств различного рода и масштаба и является метастабильным. Поэтому при нагреве или в случае относительно легкоплавких металлов и сплавов, при длительном вылёживании при комнатной температуре происходит разупрочнение, которое является средством огрубления микро- и субмикроструктуры упрочнённого материала (видоизменения дислокационной структуры). Разупрочнение при нагреве после

наклёпа происходит уже при отдыхе, когда имеет место частичная аннигиляция точечных дефектов и дислокаций, а также их перераспределение, и полностью завершается после рекристаллизации, приводящей к образованию новых зёрен, плотность дислокаций в которых значительно ниже, чем в деформированных. Степень разупрочнения зависит от температуры и времени отжига (рис. 1.78).

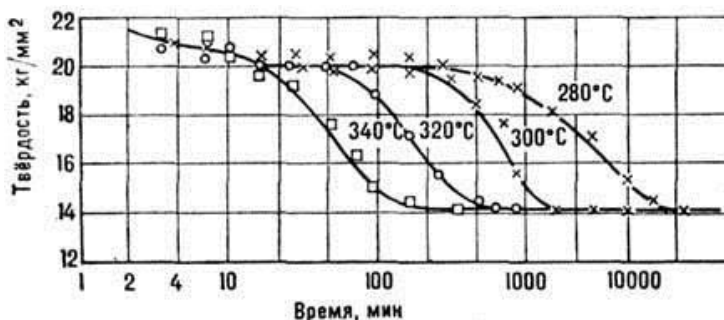


Рис. 1.78. Изменение твёрдости алюминия, деформированного растяжением до 20%, со временем при различных температурах

Легирующие элементы повышают температуру разупрочнения. Например, предел текучести железа при нагреве после деформации прокаткой до 80% начинает снижаться уже при 200 °С, а введение в него 0,8% ниобия повышает температуру начала разупрочнения до 600 °С. При достаточно высоком нагреве разупрочнение может быть обусловлено обратным растворением выделившихся частиц в твёрдом растворе. Удельная роль каждого из перечисленных процессов в разупрочнении зависит от состава сплава и режима термической обработки. Разупрочнение при нагреве облучённых материалов обусловлено перераспределением

точечных дефектов, их частичной аннигиляцией, изменением взаимодействия с дислокациями, а также с перераспределением дислокаций, закреплённых точечными дефектами и образовавшихся в результате скоплений точечных дефектов. Р. может иметь место также непосредственно в процессе пластической деформации в тех случаях, когда происходят поперечное скольжение и переползание дислокаций.

**Растворы твердые** – фазы переменного состава, в которых сохраняется кристаллическая решетка одного компонента, а атомы другого компонента располагаются в его решетке, образуя твердые растворы внедрения или замещения.

**Растворы твердые внедрения** – атомы одного компонента внедряются в кристаллическую решетку другого компонента.

**Растворы твердые замещения** – атомы одного компонента замещают в кристаллической решетке атомы другого компонента.

**Растворы твердые с неограниченной растворимостью** (unlimited solid solutions) – кристаллические решетки компонентов однотипы и близки по параметрам, и атомы одного компонента могут неограниченно размещаться в кристаллической решетке другого. Неограниченная растворимость наблюдается преимущественно у элементов, отвечающих сформулированным Юм-Розери условиям: компоненты должны быть изоморфны (т.е. иметь одну и ту же кристаллическую решетку; размеры атомов компонентов не должны отличаться более чем на 15%; взаимодействующие элементы должны иметь близкие электрохимические свойства (т.е. близко располагаться в Периодической системе).

И.И. Корнилов показал, что неограниченно растворяться в Fe могут только те элементы, атомные размеры которых отличаются от атомных размеров Fe на  $\leq 8\%$ . Другие металлы (например, Cu) образуют непрерывные ряды твердых растворов при различии атомных радиусов до 10–11%, а легкоплавкие элементы, с малым пределом упругости (например, Se, Te), неограниченно взаимно растворяются при разнице атомных радиусов до 17%.

**Растворы твердые с ограниченной растворимостью** (imited solid solutions) – кристаллические решетки компонентов значительно различаются по параметрам, и атомы одного компонента ограничено внедряются в кристаллическую решетку другого. Образование твердых растворов замещения металлами с одинаковыми кристаллическими решетками, но сильно различающимися атомными радиусами, вызывает значительные искажения кристаллической решетки, что приводит к накоплению в ней упругой энергии. Искращения, достигнув определенной величины, делают кристаллическую решетку неустойчивой и наступает предел растворимости. Растворимость тем меньше, чем больше различие в размерах атомов и свойствах компонентов, образующих твердый раствор.

**Рекристаллизация металла** – процесс зарождения и роста новых зерен в объеме деформированного металла, которые чаще всего приобретают равноосную форму (рис. 1.79).

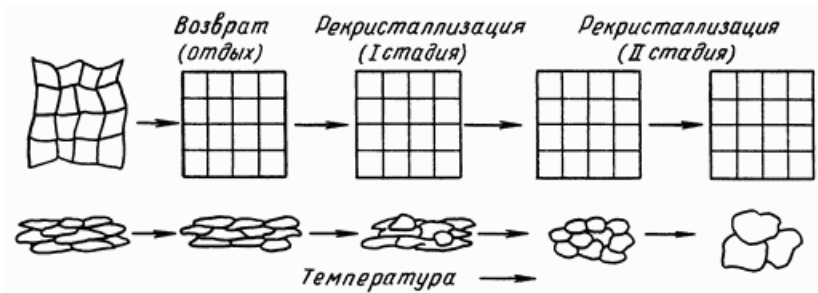


Рис. 1.79. Процесс рекристаллизации деформированного металла

Зарождение новых зерен при рекристаллизации происходит в участках с наибольшей плотностью дислокаций, обычно на границах деформированных зерен. Чем больше степень пластической деформации деформированного металла, тем больше возникает центров рекристаллизации. С течением времени образовавшиеся центры новых зерен увеличиваются в размерах вследствие перехода атомов от деформированного окружения к более совершенной решетке. Эта стадия рекристаллизации называется первичной рекристаллизацией или рекристаллизацией обработки. Первичная рекристаллизация заканчивается при полном поглощении новыми зернами старых деформированных зерен. По завершении первичной рекристаллизации происходит рост образовавшихся зерен; эта стадия рекристаллизации называется собирательной рекристаллизацией. Собирательная рекристаллизация не связана с предварительной пластической деформацией металла. Этот процесс самопроизвольно развивается при достаточно высоких температурах в связи с тем, что укрупнение

зерен приводит к уменьшению свободной энергии металла из-за уменьшения поверхностной энергии (чем крупнее кристаллы, тем меньше суммарная протяженность границ). Рост зерен происходит путем перехода атомов от одного зерна к соседнему через границу раздела, одни зерна при этом постепенно уменьшаются в размерах и затем исчезают, а другие становятся более крупными, поглощая соседние зерна. С повышением температуры рост зерен ускоряется. Чем выше температура нагрева, тем более крупными окажутся рекристаллизованные зерна.

**Релаксация** (Stress relaxation) – в механике деформируемого твердого тела явление самопроизвольного уменьшения, снятия напряжений с течением времени при постоянных нагрузке и температуре. Релаксация напряжения может наблюдаться при вылеживании детали после термической обработки, при низкотемпературном отпуске, при переменном нагружении в условиях заданной амплитуды деформации и т.д. Исследования, проведенные в последние годы, показали, что релаксация напряжений может происходить в различных металлах и сплавах при нормальной, высоких, а в ряде случаев и при отрицательных температурах. Установлена возможность разрушения деталей, работающих в условиях релаксации напряжений. Можно считать установленным, что релаксация напряжений (подобно ползучести) является результатом как сдвиговодислокационных, так и диффузионных процессов. Процессы первого типа связаны с кооперативным передвижением группы атомов (например, по плоскостям сдвигов и т.д.). Процессы второго типа – с индивидуальным

перемещением отдельных атомов как у границ зерен основной структуры, так и по всему объему поликристалла. Преобладающая роль того или иного явления, контролирующего процесс релаксации, зависит от рабочей температуры и от уровня действующих напряжений. Целесообразно различать макрорелаксацию напряжений (в материале, деталях), реализуемую путем макроползучести в условиях, затрудняющих изменение линейных размеров детали, и микрорелаксацию напряжений, вызванную процессами микроползучести как между элементами микроструктуры (релаксация второго рода), так и внутри их (релаксация третьего рода). Макрорелаксация напряжений в детали может быть обусловлена процессами микрорелаксации в элементах структуры. Сопротивление материала релаксации напряжений можно повысить посредством: термической обработки, обеспечивающей оптимальную для релаксационной стойкости структуру; стабилизации, увеличивающей сопротивление релаксации (и ползучести) на первой стадии процесса; термомеханической обработки; повторными нагружениями в обеспечении получения материалов с высокой релаксационной стойкостью – конструкционных и жаропрочных материалов, работающих в условиях релаксации напряжений при различных температурах.

**Решетка кристаллическая** – воображаемая пространственная сетка с ионами (атомами) в узлах, изображающая закономерное расположение атомов в кристалле. Используют для описания атомно-кристаллической структуры. Для металлов наиболее характерны кристаллические решетки трех типов (рис. 1.80):



- кубическая гранецентрированная - ГЦК. Атомы расположены в вершинах куба и в центре каждой грани. Эту упаковку имеют металлы: гамма-железо, альфа-никель, медь, алюминий, свинец и др.;

- кубическая объемноцентрированная - ОЦК. Атомы расположены в вершинах и центре куба. Эта решетка характерна для альфа-железа, альфа-хрома, молибдена, вольфрама, ванадия и других металлов;

- гексагональная плотноупакованная - ГПУ. Атомы расположены в углах и центре шестигранных оснований призмы, и три атома расположены в средней плоскости призмы. Эту решетку имеют магний, цинк, кадмий, альфа-цирконий и другие металлы.

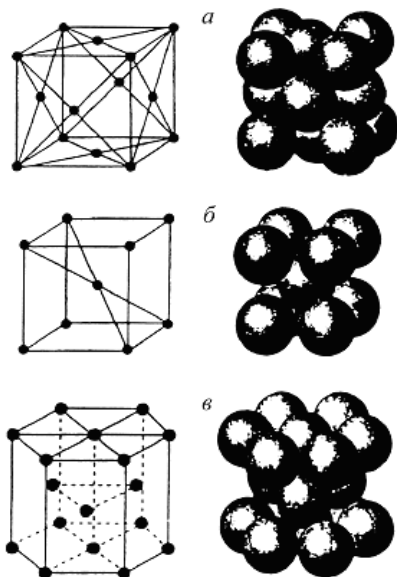


Рис. 1.80. Типы элементарных ячеек кристаллических решеток металлов и схемы упаковки в них атомов: а - ГЦК, б - ОЦК, в - ГПУ

Строение кристаллической решетки описывается элементарной ячейкой, представляющей собой наименьший объем кристалла, многократное повторение которого по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  дает представление о строении всего кристалла. Важной характеристикой кристаллической решетки является ее плотность, т.е. объем, занятый атомами. Атомы при этом рассматриваются как жесткие шары. Плотность характеризуется координационным числом – числом атомов, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от одного, так называемого базисного, атома. Координационное число ОЦК-решетки равно 8 (обозначается  $K_8$ ), а коэффициент заполнения, т.е. отношение объема, занятого атомами, к объему ячейки, составляет 68%. Для ГЦК- и ГПУ-решеток координационное число 12 (принятое обозначение  $K_{12}$  и  $G_{12}$ ). Эти решетки являются наиболее компактными. Коэффициент заполнения в них составляет 74%.

## С

**Самоотпуск (self-tempering)** – процесс отпуска, происходящий за счет тепла, оставшегося в изделии после закалки. В этом случае охлаждение изделия в закалочной среде прерывают, чтобы в сердцевине изделия сохранилось еще некоторое количество теплоты, т.е. нагретые изделия помещают в охлаждающую среду и выдерживают до неполного охлаждения. После извлечения изделия из закалочной среды под действием теплообмена температура в более сильно охлаждающихся поверхностных слоях

повышается и сравнивается с температурой сердцевины. Тем самым происходит отпуск поверхности стали (самоотпуск). Закалка с само-отпуском широко распространена в инструментальном производстве. Применяется для изделий, которые должны сочетать высокую твердость на поверхности и высокую вязкость в сердцевине (инструменты ударного действия: молотки, зубила).

**Сверхпластичность** (англ. superplasticity) – способность металла в определенных условиях получать при малом сопротивлении (1-10 МПа) значительную (до 1000% и более) без разрушения или трещинообразования пластическую деформацию, на порядок превышающую максимально возможную для этого металла или сплава в обычном состоянии. Необходимое условие проявления сверхпластичности – наличие ультрамелкого зерна (размером до 15 мкм) и деформирование при температурах выше  $0,5 T_{пл}$  с низкими скоростями. Кроме достаточно мелкого зерна, от материала для достижения состояния сверхпластичности требуется высокая однородность распределения по объему термопластичных компонентов, которые связывают между собой границы зерен в процессе пластического течения, позволяя материалу сохранять свою кристаллическую структуру. Для металлов до сих пор нет однозначно принятого мнения о механизме возникновения состояния сверхпластичности. Считается, что он лежит в области явлений атомарной диффузии и проскальзывания зерен относительно друг друга. Механизм деформации в состоянии сверхпластичности представляет собой результат сложного взаимодействия различных процессов движения

точечных, линейных и объемных дефектов кристаллической решетки и границ зерен. Недавно обнаруженное состояние сверхпластичности у крупнозернистого алюминид железа объясняется процессом динамической рекристаллизации зёрен. Образцы в состоянии сверхпластичности при растяжении, как правило, не образуют «шейки». Эффект сверхпластичности используется при формовке деталей сложной конфигурации с большой точностью из труднодеформируемых металлов и сплавов на основе никеля, магния, алюминия, железа. Может быть использован также для соединения металлических материалов в твердом состоянии. Сверхпластическая деформация относится к одному из весьма перспективных методов обработки металлов давлением. Во многих случаях этот метод значительно экономичнее обычных методов деформации. Кроме того, он создает качественно новые возможности для существенного улучшения свойств и деформируемости материалов за счет более однородной микроструктуры.

**Силицирование** – процесс поверхностной или объёмной диффузионной металлизации при химико-термической обработке, состоящей в высоко-температурном (950–1100 °С) насыщении поверхности стали кремнием. Силицирование придаёт стали высокую коррозионную стойкость в морской воде, высокую кислотоупорность в азотной, серной и соляной кислотах и несколько увеличивает стойкость против износа. Силицирование может производиться в газообразных и жидких средах как электролизным, так и безэлектролизным методом. Силицированный слой отличается повышенной пористостью, а толщина его 300–1000 мкм.

Несмотря на низкую твёрдость 200–300 HV, силицированный слой обладает высокой износостойкостью после пропитки маслом при температурах 170–200 °С. Применяется преимущественно как средство защиты тугоплавких металлов (W, Mo, Ta, Ti и др.) от окисления, а также – для деталей, используемых в химической и нефтяной промышленности.

**Силумины** (от латинского *silicium* – кремний и *aluminium* – алюминий) – общее название группы литейных сплавов на основе Al, содержащих 10–13 % Si, а также некоторые примеси (Fe, Mn, Ca, Ti, Cu, Zn), обладающие наилучшими литейными свойствами и высокой коррозионной стойкостью. В двойных сплавах Al-Si эвтектика состоит из твердого раствора и кристаллов практически чистого кремния (рис. 1.81). Высокая жидкотекучесть, малая усадка, отсутствие или низкая склонность к образованию горячих трещин и хорошая герметичность силуминов объясняются наличием большого количества эвтектики в структуре этих сплавов. В двойных сплавах Al-Si эвтектика состоит из твердого раствора и кристаллов практически чистого кремния (рис. 1.82, а), в легированных (АК 9ч и др.) помимо двойной имеются тройные и более сложные эвтектики. Механические свойства зависят от химического состава, технологии изготовления (модифицирования, способа литья и т.д.), а также термической обработки. В двойных силуминах с увеличением содержания кремния до эвтектического состава снижается пластичность и повышается прочность. Силумины обычно модифицируют натрием, который в виде хлористых и фтористых солей

вводят в жидкий сплав в количестве 2–3% от массы сплава. Помимо модифицирующего действия натрия сдвигает эвтектическую точку в системе Al-Si в сторону больших содержаний кремния. Благодаря этому эвтектический по составу сплав (АК12) становится доэвтектическим. В его структуре помимо мелкокристаллической эвтектики появляются первичные кристаллы мягкой пластичной фазы – твердого раствора (рис. 1.82, б). Все это приводит к увеличению пластичности и прочности. Модифицируют как двойные, так и легированные силумины, содержащие более 5–6% Si. Для легирования силуминов часто используют Mg, Cu, Mn, Ti; реже – Ni, Zr, Cr и др. Растворяясь в алюминии, они повышают прочность и твердость силуминов. Кроме того, медь улучшает обрабатываемость резанием, титан оказывает модифицирующее действие. Медь и магний, обладая переменной растворимостью в алюминии, способствуют упрочнению силуминов при термической обработке, как правило, состоящей из закалки и искусственного старения. Температура закалки различных силуминов находится в пределах 515–535 °С, температура старения – в интервале 150–180 °С. Легированные силумины применяют для средних и крупных литых деталей ответственного назначения: корпусов компрессора, картеров, головок, цилиндров. Высокопрочный сплав АК8М, разработанный в МВТУ им. Н.Э. Баумана, применяют для литья под давлением нагруженных деталей, например, блоков цилиндров, головок блоков и других деталей автомобильных двигателей. Силумины поставляются в чушках с цветной маркировкой, масса чушек 15 и 1000 кг (ГОСТ 1521-76).

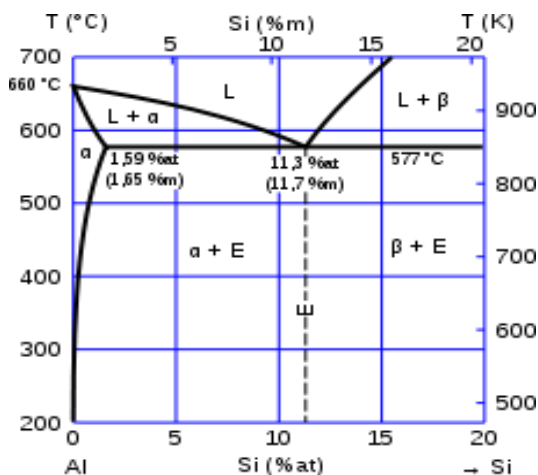


Рис. 1.81. Фазовая диаграмма системы Al-Si



а

б

Рис. 1.82. Микроструктура сплава АК12 до модифицирования (а) и после модифицирования (б),  $\times 340$

**Скорость заковки критическая** (critical quenching rate) – минимальная скорость охлаждения стали из высокотемпературного состояния, необходимая для подавления диффузионного распада аустенита при температуре его минимальной устойчивости с образованием феррито-цементитной смеси и обеспечения возможности его превращения в мартенсит, т.е. минимальная скорость, при которой

аустенит еще не распадается на феррито-карбидную смесь. В первом приближении критическая скорость закалки определяется наклоном касательной к С-кривой начала распада аустенита (рис. 1.83, а). При таком определении получается величина, примерно в 1,5 раза больше истинной критической скорости. Величина критической скорости закалки уменьшается с увеличением содержания легирующих элементов (кроме Сo). Наиболее сильно критическая скорость закалки снижается при одновременном введении нескольких легирующих элементов. Мелкозернистая сталь, содержащая 0,4% С, 1,5% Мn и 1,0% Cr, имеет критическую скорость закалки около 40°С/с. У многих высоколегированных сталей критическая скорость закалки имеет значения 5–20 °К/с. Нерастворимые частицы в аустените (например, карбидов) уменьшают устойчивость аустенита и повышают критическую скорость закалки. За исключением кобальта, все легирующие элементы, растворенные в аустените, затрудняют его распад, уменьшают критическую скорость закалки и улучшают прокаливаемость. Замедления распада аустенита под влиянием легирующих элементов отражает рис. 1.83, б. Применение легированной стали позволяет заменить закалку в воде более мягкой закалкой в эмульсии, масле или даже на воздухе.

**Смесь механическая** – структура (строение) сплава из раздельно кристаллизующихся с большим различием атомных радиусов компонентов, которые не способны к взаимному растворению в твердом состоянии и не вступают в химическую реакцию с образованием соединений. Сплав состоит из разнородных кристаллов компонентов А и Б, которые не входят в общую решетку, а каждый из компонентов



образует свою, присущую ему кристаллическую решетку. Смесь может состоять из кристаллов различной формы и размеров. Кристаллы механической смеси значительно отличаются один от другого некоторыми свойствами. Механические смеси могут состоять из чистых компонентов, твердых растворов и химических соединений. При образовании механические смеси кристаллические решетки фаз не изменяются. Кристаллиты смеси связываются между собой только общими границами.

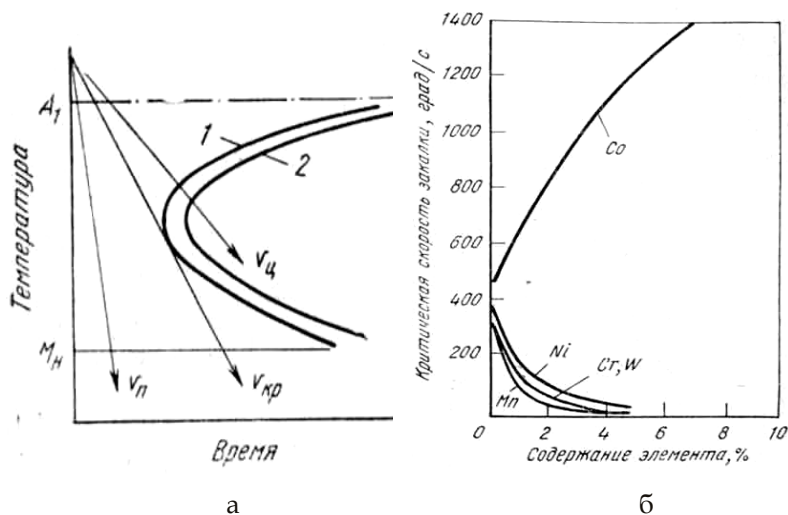


Рис. 1.83. Определение критической скорости заковки  $v_{кр}$  по С-диаграмме (а) и влияние легирующих элементов на критическую скорость заковки содержащей 0,9–1% С стали:  $v_{ц}$ ,  $v_{п}$  – скорости охлаждения центра и поверхности изделия; 1, 2 – начало и окончание распада аустенита

Сплавы, кристаллизующиеся в виде механических смесей, обладают высокими литейными свойствами. Механические свойства таких сплавов имеют среднее значение свойств

компонентов, входящих в сплав, и изменяются прямо пропорционально количеству составляющих компонентов. Сплавы, структура которых представляет собой механическую смесь, как правило, плохо поддаются обработке металлов давлением, потому что состоят из кристаллов, которые сильно отличаются один от другого пластическими свойствами. Механические смеси могут образовываться при кристаллизации из жидкого сплава и при перекристаллизации в твердом состоянии. Практическое применение сплавов, имеющих структуру механической смеси, определяется их свойствами. Как правило, большинство литейных сплавов при кристаллизации образуют механические смеси, например: сплав алюминия с 33% меди; сплав железа с 4,3% углерода; сплав алюминия с 11–13% кремния; сплав свинца с 13 % сурьмы и др.

**Сорбит** (sorbite) – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, представляющая собой смесь феррита и цементита средней степени дисперсности (см. табл. 1.2).

**Сорбит закалки** (sorbite di tempra) имеет пластинчатое строение (рис. 1.84, а).

**Сорбит отпуска** (secondary sorbite) – имеет зернистое строение (рис. 1.84, б).

**Сормайт** – название литых твёрдых высокоуглеродистых и высоколегированных (хромом, никелем, кремнием и марганцем) сплавов (См. **Твёрдые сплавы**) на основе железа для наплавки на изнашивающиеся поверхности деталей и инструментов. Термин образован от «Сормово» (первый сплав такого типа разработан в 30-х гг. XX в. металлургами Сормовского завода) и окончания «-айт» (англ. ite, по аналогии с окончанием названия одного

из подобных американских сплавов). Сормайт, характеризующийся наибольшей твёрдостью (Сормайт 50 HRC), содержит 25–31% Cr, 2,5–3,5% С, 2,8–4,2% Si, 3–5% Ni, до 1,5% Mn, до 0,08% S, до 0,08% P; по химическому составу и структуре этот сплав близок к высоколегированным белым чугунам. Выпускается Сормайт и с более низким содержанием Cr (13–18%), С (1,5–2,2%) и Si (1,5–2,2%). Сормайт используется в качестве наплавочных материалов для повышения износостойкости поверхностей деталей машин и инструментов, работающих в условиях абразивного износа, в т.ч. при повышенных температурах без смазки. Именно электроды сормайт являются тем продуктом, которого так не хватало сварщикам. Сормайт значительно дешевле твёрдых сплавов на кобальтовой и никелевой основе, но несколько уступают им по эксплуатационным свойствам, главным образом при повышенных температурах. Изготавливается в виде прутков и порошков.

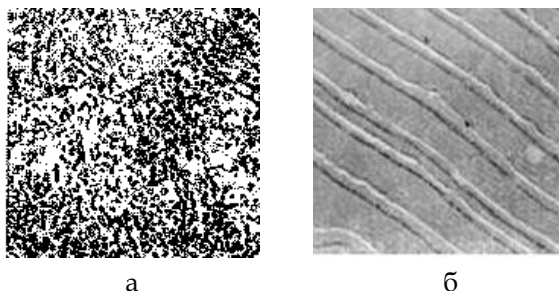


Рис. 1.84. Микроструктура сорбит закалки (а) и отпуска (б)

**Сплавы** – макроскопически однородный металлический материал, состоящий из смеси двух или большего

числа химических элементов с преобладанием металлических компонентов. Сплавы состоят из основы (одного или нескольких металлов), малых добавок специально вводимых в сплав легирующих и модифицирующих элементов, а также из неудаленных примесей (природных, технологических и случайных). Сплавы являются одним из основных конструкционных материалов. Среди них наибольшее значение имеют сплавы на основе железа и алюминия. По характеру металлической основы различают черные сплавы (основа - Fe), цветные сплавы (основа - цветные металлы), сплавы редких металлов, сплавы радиоактивных металлов. По числу компонентов сплавы делят на двойные, тройные и т.д.; по структуре - на гомогенные (однородные) и гетерогенные (смеси), состоящие из нескольких фаз (последние могут быть стабильными и метастабильными); по характерным свойствам - на туго- и легкоплавкие, высокопрочные, жаропрочные, твердые, антифрикционные, коррозионностойкие, сплавы со специальными свойствами и др. По технологии производства выделяют литейные (для изготовления деталей методом литья) и деформируемые (подвергаемые ковке, штамповке, прокатке, прессованию и другим видам обработки давлением). По способу изготовления сплавов различают литые и порошковые сплавы. Литые сплавы получают кристаллизацией расплава смешанных компонентов. Порошковые - прессованием смеси порошков с последующим спеканием при высокой температуре. Компонентами порошкового сплава могут быть не только порошки простых веществ, но и порошки химических соединений.

Например, основными компонентами твёрдых сплавов являются карбиды вольфрама или титана. По способу получения заготовки (изделия) различают литейные (например, чугуны, силумины), деформируемые (например, стали) и порошковые сплавы. В твердом агрегатном состоянии сплав может быть гомогенным (однородным, однофазным – состоит из кристаллитов одного типа) и гетерогенным (неоднородным, многофазным). Твёрдый раствор является основой сплава (матричная фаза). Фазовый состав гетерогенного сплава зависит от его химического состава. В сплаве могут присутствовать: твердые растворы внедрения и замещения, химические соединения (в т.ч. карбиды, нитриды, интерметаллиды) и кристаллиты простых веществ. Свойства металлов и сплавов полностью определяются их структурой (кристаллической структурой фаз и микроструктурой). Макроскопические свойства сплавов определяются микроструктурой и всегда отличаются от свойств их фаз, которые зависят только от кристаллической структуры. Макроскопическая однородность многофазных (гетерогенных) сплавов достигается за счёт равномерного распределения фаз в металлической матрице. Сплавы проявляют металлические свойства, например: электропроводность и теплопроводность, отражательную способность (металлический блеск) и пластичность. Важнейшей характеристикой сплавов является свариваемость. В технике применяется более 5 тыс. сплавов.

**Сплав металлический** – вещество, обладающее свойствами металла и получаемое в результате взаимодействия 2-х или нескольких элементов. Основу сплава

составляет металл, а составной частью может быть любой химический элемент.

**Сплавы порошковые** – материалы, получаемые методом прессования и спекания порошков металлов и неметаллов без расплавления или с частичным расплавлением наиболее легкоплавкой составляющей.

**Среды закалочные** – различные среды для охлаждения стальных деталей при закалке. Обычно применяют различные закалочные среды: воду, водные растворы солей, расплавленные соли, минеральные масла и т.д. Закалочные среды резко отличаются друг от друга по своим физическим свойствам, т.е. они с разной интенсивностью отнимают тепло от нагретых под закалку деталей (табл. 1.3). Наилучшая закалочная среда та, которая быстро охлаждает сталь в интервале температур 650–500 °С (область наименьшей устойчивости аустенита) и медленно – ниже 300–200 °С (область мартенситного превращения). Единой, универсальной закалочной среды нет, поэтому на практике пользуются различными средами. Из таблицы 1.3 видно, что в 10-процентном водном растворе едкого натра или поваренной соли скорость охлаждения стали в области трооститных превращений (600–600 °С) в два раза больше скорости охлаждения в пресной воде. В области мартенситных превращений (300–200 °С) соленая и пресная вода охлаждают сталь почти одинаково. Это преимущество водных растворов солей используется в практике термической обработки. Однако термисты чаще всего применяют 5–10-процентный раствор поваренной соли,

т.к. он не разъедает сталь и не действует на руки рабочих, как обезжиривающий едкий натр (каустик).

**Стали** (от нем. Stahl) – сплавы железа с углеродом, содержащие от 0,02% до 2,14% углерода (при большем количестве углерода образуется чугун). Углерод придаёт сплавам железа прочность. Сталь – важнейший продукт чёрной металлургии, являющийся материальной основой практически всех отраслей промышленности. К важнейшему конструкционному материалу современной техники – стали, предъявляется широкий спектр разнообразных требований, что обуславливает большое число марок стали, отличающихся по химическому составу, структуре, свойствам.

Таблица 1.3

Скорость охлаждения стали в зависимости от закалочных сред

Закалочная среда	Скорость охлаждения, °C/сек в интервале температур, °C	
	600–500	300–200
Иода при 20°C (спокойная)	600	270
Вода при 20°C (циркулирующая)	350	700
Вода при 40°C	100	270
Вода дистиллированная при 20°C	250	200
Вода при 80°C	30	200
10-процентный раствор поваренной соли в воде	1100	300
10-процентный раствор едкого натра в воде	1200	300
10-процентный раствор соды в воде (Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	800	270
Минеральное масло при 20°C	120	25

**Стали быстрорежущие** – высоколегированные стали, содержащие вольфрам, молибден, ванадий, хром, обладающие высокой теплостойкостью и твердостью, предназначенные, главным образом, для изготовления металлорежущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания. В настоящее время быстрорежущие стали являются основным материалом для изготовления режущего инструмента, несмотря на то, что инструмент из твердого сплава или керамики обеспечивает более высокую производительность обработки. Широкое использование быстрорежущих сталей для изготовления сложнопрофильных инструментов определяется сочетанием высоких значений твердости (до HRC 68) и теплостойкости (600–650 °С) при высоком уровне хрупкой прочности и вязкости, значительно превышающих соответствующие значения для твердых сплавов. Кроме того, быстрорежущие стали обладают достаточно высокой технологичностью, так как хорошо обрабатываются давлением и резанием в отожженном состоянии. Современные быстрорежущие стали можно разделить на три группы: нормальной, повышенной и высокой теплостойкости (табл. 1.4). В связи со все более возрастающей дефицитностью вольфрама и молибдена – основных легирующих элементов, используемых при производстве быстрорежущей стали, все большее применение находят экономнолегированные марки. Среди сталей этого типа наибольшее применение получила сталь 11P3AM3Ф2. Наиболее эффективные возможности повышения качества быстрорежущей стали, ее эксплуатационных свойств, и создания новых режущих



материалов появились при использовании порошковой металлургии. Порошковая быстрорежущая сталь характеризуется однородной мелкозернистой структурой, равномерным распределением карбидной фазы, пониженной деформируемостью в процессе термической обработки, хорошей шлифуемостью, более высокими технологическими и механическими свойствами, чем сталь аналогичных марок, полученных по традиционной технологии.

**Стали жаропрочные** – легированные стали, способные работать под нагрузкой при температурах выше 450 °С в течение определенного времени. Критерием жаропрочности является предел ползучести. Главной характеристикой, определяющей работоспособность жаропрочной стали, является жаропрочность. Жаропрочные свойства в первую очередь определяются температурой плавления основного компонента сплава, затем его легированием и режимами предшествующей термообработки, определяющими структурное состояние сплава. Основой жаропрочных сталей являются твёрдые растворы или пересыщенные растворы, способные к дополнительному упрочнению вследствие дисперсионного твердения. Для кратковременной службы применяются сплавы с высокодисперсным распределением второй фазы, а для длительной службы – структурно-стабильные сплавы, не склонные к дисперсионному твердению. Самым распространённым легирующим элементом в жаропрочных сталях является хром (Cr), который благоприятно влияет на жаростойкость и жаропрочность. Большую часть жаропрочных сталей, работающих при повышенных температурах, составляют аустенитные

стали на хромоникелевой и хромомарганцевой основах с различным дополнительным легированием.

Таблица 1.4

Химический состав быстрорежущих сталей

Марка стали	Массовая доля, %						
	C	Cr	W	V	Co	Mo	N
Стали нормальной теплостойкости							
P18	0,73–0,83	3,8–4,4	17–18,5	1,0–1,4	<0,50	<1,00	
P6M5	0,82–0,90	3,8–4,4	5,5–6,5	1,7–2,1	<0,50	4,8–5,3	
Стали повышенной теплостойкости							
P6M5Ф3	0,95–1,05	3,8–4,3	5,7–6,7	2,3–2,7	<0,50	4,8–5,3	
P12Ф3	0,95–1,05	3,8–4,3	12–13,0	2,5–3,0	<0,50	<0,50	
P18K5Ф2	0,85–0,95	3,8–4,4	17–18,5	1,8–2,2	4,7–5,2	<1,00	
P9K5	0,90–1,00	3,8–4,4	9–10	2,3–2,7	5,0–6,0	<1,00	
P6M5K5	0,92–0,94	3,8–4,3	5,7–6,7	1,7–2,1	4,7–5,2	4,8–5,3	
P9M4K8	1,00–1,10	3,0–3,6	8,5–9,5	2,3–2,7	7,5–8,5	3,8–4,3	
P2AM9K5	1,00–1,10	3,8–4,4	1,5–2,0	1,7–2,1	4,7–5,2	8,0–9,0	*)
Стали высокой теплостойкости							
V11M7K23	0,10	–	11,0	0,50	23,0	7,0	
V14M7K25	0,10	–	14,0	0,50	25,0	7,0	

\* Примечание. Массовая доля азота 0,05–0,10 %

**Стали жаростойкие (окалиностойкие)** – стали, обладающие стойкостью к химическому (коррозионному) разрушению поверхности (образованию окалины) время работы в газовых средах при повышенных температурах (свыше 550 °С) в ненагруженном или слабонагруженном состоянии. Жаростойкость (окалиностойкость) стали характеризуется сопротивлением окислению при высоких температурах. Для повышения окалиностойкости сталь легируют элементами, которые изменяют состав и строение

окалины. В результате введения в сталь необходимого количества хрома (Cr) или кремния (Si), обладающих большим родством с кислородом (O), чем железо (Fe), в процессе окисления на поверхности образуются плотные оксиды на основе хрома или кремния. Образовывающаяся тонкая плёнка из этих оксидов затрудняет процесс дальнейшего окисления. Чтобы обеспечить окалиностойкость до температуры 1100 °С в стали должно быть не менее 28% хрома (например сталь 15X28). Наилучшие результаты получаются при одновременном легировании стали хромом и кремнием. Для изготовления клапанов впуска и выпуска автомобильных и тракторных дизельных двигателей, крепежных деталей двигателей применяются жаростойкие стали 40X10C2M (ЭИ 107), 40X9C2 (ЭСХ 8) и др.

**Стали инструментальные** – стали с содержанием углерода от 0,7% и выше, предназначенные для изготовления режущего и штампового инструмента. Их делят на углеродистые (У7-У12) и легированные. Инструментальная углеродистая сталь делится на качественную и высококачественную. Содержание серы и фосфора в качественной инструментальной стали – 0,03% и 0,035%, в высококачественной – 0,02% и 0,0% соответственно. Выпускается по ГОСТ 1435-99 следующих марок: У7; У8; У8Г; У9; У10; У11; У12; У7А; У8А; У8ГА; У9А; У10А; У11А; У12А. Стандарт распространяется на углеродистую инструментальную горячекатаную, кованую, калиброванную сталь, серебрянку. Достоинство углеродистых инструментальных сталей состоит в основном в их малой стоимости и достаточно высокой твёрдости по сравнению с другими инструментальными материалами. К недостаткам следует

отнести малую износостойкость и низкую теплостойкость. В инструментальных легированных сталях массовое содержание легирующих элементов недостаточно, чтобы связать весь углерод в карбиды, поэтому теплостойкость сталей этой группы лишь на 50–100 °С превышает теплостойкость инструментальных углеродистых сталей. Основные физико-механические свойства инструментальных углеродистых (ГОСТ 1435-74) и легированных сталей (ГОСТ 5950-73) приведены в таблицах 1.5 и 1.6 соответственно. Эти материалы имеют ограниченные области применения: углеродистые идут, в основном, для изготовления слесарных инструментов, а легированные – для резьбообразующих, деревообрабатывающих и длинномерных инструментов (ХВГ) – протяжек, разверток и т.д.

Таблица 1.5

Химический состав углеродистых инструментальных сталей

Марка стали	C, %	Mn, %	Si, %	Марка стали	C, %	Mn, %	Si, %
У7	0,65–0,74	0,20–0,40		У7А	0,65–0,74	0,15–0,30	
У8	0,75–0,84	0,20–0,40		У8А	0,75–0,84	0,15–0,30	
У9	0,85–0,94	0,15–0,35	*	У9А	0,85–0,94	0,15–0,30	*
У10	0,95–1,04	0,15–0,35		У10А	0,95–1,04	0,15–0,30	
У11	1,05–1,14	0,15–0,35		У11А	1,05–1,14	0,15–0,30	
У12	1,15–1,24	0,15–0,35		У12А	1,15–1,24	0,15–0,30	
У13	1,25–1,35	0,15–0,35		У13А	1,25–1,35	0,15–0,30	
Содержание серы не более 0,03% фосфора – 0,035%, хрома – 0,2% никеля – 0,25%, меди – 0,25%				Содержание серы не более 0,02%, фосфора – 0,03%, хрома – 0,15% меди – 0,2%			

\* Примечание. Массовая доля Si 0,15–0,35%

**Стали кипящие** – стали, раскисленные в процессе кристаллизации (в слитке) марганцем и почти не содержащие кремния (менее 0,05%). Во время разлива в процессе кристаллизации слитка эта сталь «кипит» в изложнице. «Кипение» металла в изложнице вызывается обильным выделением газов за счет реакции между углеродом и закисью железа или марганца с образованием при этом окиси углерода. Газы, выделяющиеся при затвердевании слитка кипящей стали, содержат 80–90% CO, 1–2% CO<sub>2</sub> и незначительное количество водорода, азота и метана.

Таблица 1.6

Химический состав малолегированных  
инструментальных сталей

Марка стали	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	W, %	V, %
X	0,95–1,10	<0,4	< 0,35	1,30–1,60	-	-
XГ	1,30–1,50	0,45–0,7	<0,35	1,30–1,60	-	-
9XC	0,85–0,95	0,30–0,6	1,2–1,6	0,95–1,25	-	-
B1	1,05–1,25	0,20–0,4	<0,35	0,10–0,30	0,80–1,20	0,15–0,3
XB5	1,25–1,50	< 0,3	< 0,3	0,40–0,70	4,50–5,50	0,15–0,3
XBГ	0,09–1,05	0,80–1,1	0,15–0,35	0,09–1,20	1,02–1,60	-
XBCГ	0,95–1,05	0,60–0,9	0,65–1,0	0,06–1,10	0,50–0,80	0,05–0,15
X6BF	1,05–1,15	0,15–0,4	0,15–0,35	5,50–6,50	1,1–1,5	0,50–0,80

**Стали коррозионностойкие (нержавеющие)** – устойчивые против химической и электрохимической коррозии стали, содержащие от 13% хрома и других легирующих элементов. Причина коррозионной стойкости нержавеющей стали объясняется, главным образом, тем, что на поверхности хромсодержащей детали, контактирующей

с агрессивной средой, образуется тонкая плёнка нерастворимых окислов, при этом большое значение имеет состояние поверхности материала, отсутствие внутренних напряжений и кристаллических дефектов. Классифицируют нержавеющие стали по ГОСТ 5632-72. По химическому составу нержавеющие стали делятся на:

- хромистые, которые, в свою очередь, по структуре делятся на:

- мартенситные;
- полуферритные (мартенисто-ферритные);
- ферритные;

- хромоникелевые:

- аустенитные;
- аустенитно-ферритные;
- аустенитно-мартенситные;
- аустенитно-карбидные;

- хромомарганцевоникелевые (классификация совпадает с хромоникелевыми нержавеющими сталями).

Основной элемент, который и делает обычную сталь нержавеющей, это Cr. При добавлении в сталь хром образует с железом твердый раствор, увеличивая при этом коррозионную стойкость стали. При этом содержание хрома не должно быть меньше, чем 11,7%. Области применения - карбюраторные иглы, пружины (30X13, 40X13), втулки, оси, стержни, шариковые и роликовые подшипники (95X18), электроды искровых зажигательных свечей, теплообменники (15X25T, 12X18H10T), коллекторы выхлопных систем (08X18H10) и др.

**Стали легированные** – стали, содержащие кроме обычных примесей элементы, специально вводимые в определённых количествах для обеспечения требуемых физических или механических свойств. Эти элементы называются легирующими – Ni, Cr, Si, V, W, Mo, Ti и др. Растворяясь в аустените или феррите, легирующие элементы упрочняют эти фазы, делают их более устойчивыми против распада при нагреве и охлаждении, изменяя температуры фазовых превращений и структуру сталей, повышают прочность, коррозионную стойкость стали, снижают опасность хрупкого разрушения. По содержанию легирующих элементов различают *низко-* (< 5%), *средне-* (5–10%) и *высоколегированные* (>10% легирующих элементов). Легированные стали в зависимости от структуры, получаемой после нагрева до 900 °С и охлаждения на воздухе (т.е. после нормализации), подразделяются на пять классов: 1) перлитный; 2) мартенситный; 3) аустенитный; 4) ферритный; 5) карбидный. Разная структура получается в зависимости от содержания легирующих элементов и углерода при заданной скорости охлаждения. Микроструктура сталей различных классов в нормализованном состоянии показана на рис. 1.85.

Легированные стали, предназначенные для изготовления деталей машин и приборов, разделяют в зависимости от применяемой к ним термообработки на цементуемые (содержат не более 0,25% С) и улучшаемые (0,25–0,5% С). Детали из цементуемых сталей подвергают цементации, закалке и низкому отпуску. В результате получается твёрдая, износостойкая поверхность (HRC 56–62), со структурой

высокоуглеродистого мартенсита и более мягкая, вязкая сердцевина (HRC 15–45) со структурой малоуглеродистого мартенсита. Детали из улучшаемых сталей подвергают закалке в масле и высокому отпуску. Такая термообработка называется улучшением. Стали, легированные кремнием, марганцем и некоторыми другими элементами и содержащие 0,5–0,65% С, используются для изготовления пружин и рессор. Кроме деталей машин из легированных сталей перлитного класса с высоким содержанием углерода (>0,8%) изготавливают режущий и мерительный инструмент.

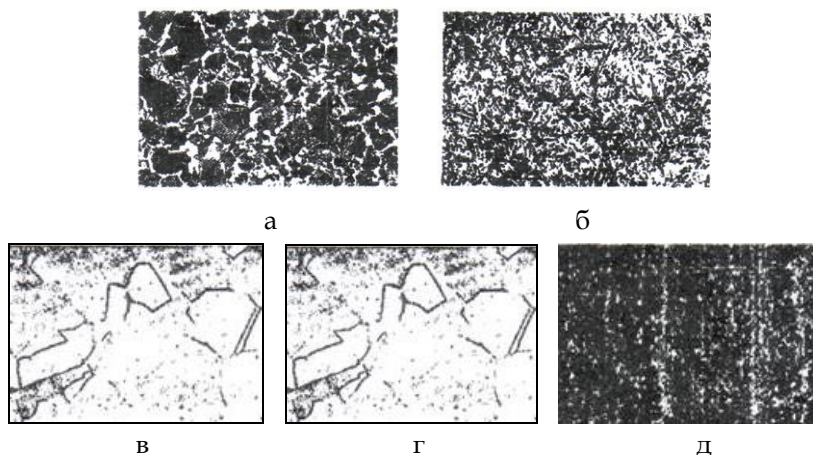


Рис. 1.85. Микроструктура сталей различных классов в нормализованном состоянии,  $\times 100$ : а) перлит и феррит; б) мартенсит игольчатый; в) аустенит; г) феррит; д) бесструктурный мартенсит и карбиды

**Стали ПНП** (TRIP steel, TRIPassisted steel) пластичность, наведенная превращением) – один из видов высокопрочных сталей (high-strength steel). В ПНП-сталях высокие механические свойства достигаются превращением



аустенита в мартенсит в процессе деформации (отсюда название ПНП – пластичность, наведенная превращением). Существует две разновидности таких сталей. Первая разновидность – стали с полностью аустенитной первоначальной структурой (TRIP steel). Для них характерно высокое содержание никеля и других аустенито-стабилизирующих добавок, что делает их довольно дорогими. Примерами таких сталей являются стали 30X9H8M4Г2С2 и 25Н25М4Г1. Характерным для этой группы является высокое значение вязкости разрушения и предела выносливости. Широкому применению таких ПНП-сталей препятствует их высокая легированность, необходимость использования мощного оборудования для деформации при сравнительно низких температурах, трудность сварки. Эти стали используют для изготовления высоконагруженных деталей, проволоки, тросов, крепежных деталей. Вторая разновидность – многофазные стали, в состав которых входит обогащенный углеродом аустенит, который при деформации или приложении механического напряжения трансформируется в мартенсит. Такие стали называют TRIP-assisted steel. Они содержат значительно меньшее количество легирующих добавок: 0,2% углерода, 1,5% марганца и 1-2% кремния, что делает их значительно более дешевыми. Несмотря на присутствие высокоуглеродистого мартенсита (очень хрупкого в нормальном состоянии), стали типа TRIP-assisted имеют не только высокую прочность, но и могут подвергаться деформации при получении изделий сложной формы. Данное свойство открывает широкие перспективы применения, например, в автомобильной

промышленности, поэтому стали данного типа интенсивно исследуются во всем мире.

**Стали полуспокойные** – стали, раскисленные в ходе плавки марганцем и в конце плавки алюминием. Полуспокойные стали по степени раскисления занимают промежуточное положение между спокойными и кипящими, сохраняет преимущества спокойной и кипящей сталей и не имеет их недостатков. Полуспокойная сталь (рис. 1.86, в, е) 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 слитка полуспокойной стали меньше, чем кипящей, и близка к ликвации спокойной стали, но слитки полуспокойной стали не имеют усадочных раковин.

**Стали спокойные** (killed steel) – стали, более полно раскисленные по сравнению с *кипящей сталью* и *полуспокойной сталью*, что достигается вводом в печь или в ковш (иногда в изложницы) увеличенного количества сильных раскислителей – ферросилиция, алюминия и др., чтобы снизить содержание кислорода до такого уровня, что не возникает никакой реакции между углеродом и кислородом. Стали спокойные затвердевают спокойно, без газыделения, без кипения и выделения искр, в верхней части слитка образуется усадочная раковина 1, а в средней – усадочная осевая рыхлость (рис. 1.86, а, г). Слиток спокойной стали имеет следующее строение (рис. 1.86, а): тонкую наружную корку А из мелких равноосных кристаллов; зону В крупных столбчатых кристаллов (дендритов); зону В

крупных неориентированных кристаллов; конус осаждения 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. По качеству спокойная сталь выше кипящей и полуспокойной.

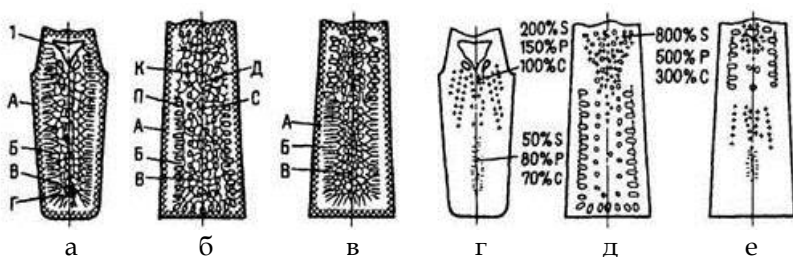


Рис. 1.86. Схема строения стальных слитков

**Стали теплоустойчивые** – стали, способные противостоять циклическому температурному воздействию без разрушения.

**Старение** – медленное самопроизвольное необратимое изменение свойств материалов во времени без заметного изменения микроструктуры. Эти процессы происходят главным образом в низкоуглеродистых сталях. При старении за счет скопления атомов углерода (азота) на дислокациях (атмосферы Котрелла) или выделения избыточных фаз (карбидов, нитридов) повышается прочность, порог хладноломкости и снижается сопротивление хрупкому разрушению. Старение происходит под действием теплового

движения молекул и атомов, светового и иного излучения, механических воздействий, гравитационных и магнитных полей и других факторов. В результате материал переходит в более равновесное состояние. В экономике считается вредным процессом, так как свойства материала с течением времени отклоняются от спроектированных, обычно в худшую сторону. Изменение механических, физических и химических свойств металлов и сплавов, обусловленное термодинамической неравновесностью исходного состояния и постепенным приближением структуры к равновесному состоянию в условиях достаточной диффузной подвижности атомов. Имеется большое число сплавов, для которых старение проводится как специальная операция термической обработки и обеспечивает получение комплекса важных механических или физических свойств. Старение или «дисперсионное твердение» – основной способ упрочняющей термической обработки сплавов на основе Al, Mg, Cu, Ni. Кроме высокой прочности, стареющие сплавы могут приобретать и др. ценные свойства, например высокую коэрцитивную силу. Понятию «естественное старение» противопоставляется «искусственное старение», которое в случае алюминиевых сплавов (исторически первых материалов, упрочняемых старением) проводилось при повышенных температурах (выше 100 °С); в современной литературе вместо этих терминов чаще используются термины «низкотемпературное старение» и «высокотемпературное старение». В связи с различиями процесса распада в разных температурных интервалах для некоторых сплавов оптимальный комплекс свойств достигается после

сложного старения в определенной последовательности при низкой и при более высокой температурах. В процессе старения выделяют три основных вида – старение естественное, искусственное и после пластической деформации (деформационное).

**Старение деформационное** (Strain aging) – происходит после пластического деформирования сплавов при температурах ниже температуры рекристаллизации и приводит к их охрупчиванию. При деформационном старении основное упрочнение вероятно связано с образованием атмосфер Коттрелла из атомов углерода или азота вокруг скопления дислокаций, что затрудняет их движение. При нагреве деформированной стали возможно образование частиц карбидов и нитридов. В сталях возможно термдеформационное старение. Старение отрицательно сказывается на эксплуатационных и технологических свойствах многих сталей. Развитие деформационного старения резко ухудшает штампуемость листовой стали, поэтому многие углеродистые стали подвергают обязательным испытаниям на склонность их к деформационному старению. Склонность стали к старению снижается при модифицировании ее алюминием, титаном или ванадием.

**Старение дисперсионное** – процесс старения, когда происходят только процессы выделения избыточных фаз (карбидов, нитридов) без сложных подготовительных процессов. Такое явление еще называют дисперсионным твердением.

**Старение естественное** – процесс старения, который происходит при нормальных условиях и влечет за собой повышение твердости и прочности сплавов.

**Старение искусственное (термическое)** (Precipitation heat treatment) – протекает при повышенных температурах и приводит к повышению твердости и прочности сплавов.

**Степень деформации критическая** (critical degree of deformation) – превышение которой при пластической деформации приводит к образованию трещин, шелушению поверхностного слоя или разрушению материала. Критической также называют такую минимальную степень деформации, выше которой при нагреве становится возможной первичная рекристаллизация.

**Структура** (лат. structura строение, расположение) – строение металла, определяемое формой, размерами и характером взаимного расположения фаз. Макроструктуру металла (рис. 1.87) можно наблюдать невооруженным глазом или при небольших увеличениях, чтобы установить присутствие и распределение по объёму изделия раковин, пор, неметаллических включений и т.п. дефектов металлов, а также расположение и форму крупных зёрен. С помощью светового и электронного микроскопов изучают микроструктуру (рис. 1.88, а), характеризующую размерами, формой и взаимным расположением кристаллитов (зёрен) разных фаз, а также их относительным количеством. Ещё более тонкие детали строения металла (субструктуру – рис. 1.88, а), определяемые расположением дислокаций и их скоплений, а также субграниц внутри зёрен наблюдают с помощью электронной и рентгеновской дифракционной микроскопии. Иногда под структурой понимают строение кристаллической решётки металла или фаз сплава.



Рис. 1.87. Макроструктура поковки (а) и зуба шестерни после ТВЧ-закалки (б): темные участки у зуба шестерни закаленный слой

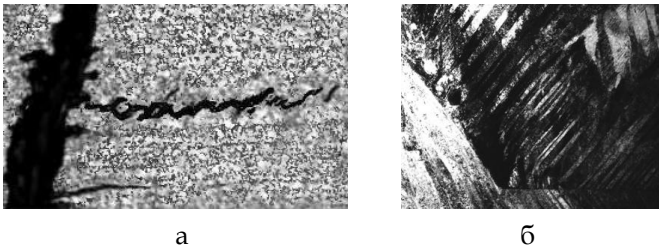


Рис. 1.88. Микроструктура сварного шва (поперечный шлиф) стали 16Г2АФ в зоне трещинообразования (а) и субмикроструктура стали после холодной деформации

**Структура неравновесная** – образуется в результате ускоренного охлаждения и характеризуется большим запасом свободной энергии. Неравновесные структуры образуются при термической обработке (закалке) и их можно получить только в том случае, когда в сплавах имеются превращения в твердом состоянии: переменная растворимость, полиморфные превращения твердых растворов, распад высокотемпературного твердого раствора по эвтектоидной реакции и др. Для получения неравновесной структуры

сплав нагревают выше температуры фазового превращения в твердом состоянии, после чего быстро охлаждают, чтобы предотвратить равновесное превращение при охлаждении. В отличие от чистых металлов, все сплавы после кристаллизации характеризуются неравновесной структурой, т.е. их химический состав является переменным как в пределах одного зерна, так и в пределах всего объема отливки, слитка.

**Структура равновесная** – устойчивая структура, обладающая наименьшим запасом свободной энергии, образуется в результате медленного охлаждения и характеризуется большим запасом свободной энергии. Равновесные структуры образуются при термической обработке – отжиге, направленном на получение в металлах равновесной структуры. Любой отжиг включает в себя нагрев до определенной температуры, выдержку при этой температуре и последующее медленное охлаждение.

**Структура строчечная** – возникает при холодной обработке металлов давлением, характеризуется направленным расположением кристаллов вдоль течения металла (рис. 1.89).

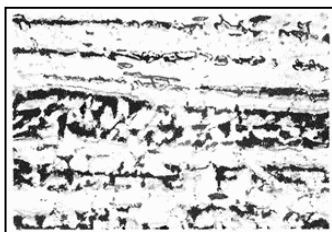


Рис. 1.89. Строчечная структура конструкционной углеродистой стали (сернистые включения – центры кристаллизации доэвтектоидного феррита),  $\times 250$



**Сфероидизация** (spheroidizing, sphero-idize annealing) – образование фаз сферической формы в процессе первичной или вторичной кристаллизации металла, модифицирования или термической обработки. Представляет собой переход кристаллов избыточной фазы в глобулярную (сферическую) форму, происходящий при относительно высоких температурах в связи с уменьшением межфазной поверхностной энергии. Особенно важное значение имеет сфероидизация пластинок *цементита*, входящего в состав *перлита* (рис. 1.90): при этом пластинчатый перлит превращается в зернистый, в результате чего значительно уменьшаются твёрдость и прочность, но повышается пластичность металла. Сфероидизация осуществляется длительной выдержкой при температурах вблизи нижней критической точки или циклическим нагревом – охлаждением вблизи этих температур (см. **Отжиг**); процесс может быть ускорен предварительной деформацией или закалкой. Сфероидизирующий отжиг на зернистый перлит, особенно высокоуглеродистых шарикоподшипниковых и инструментальных сталей, служит для улучшения их обрабатываемости на металлорежущих станках, а также для подготовки структуры к закалке.

В автомобильной промышленности и машиностроении широкое применение получил чугуны с шаровидным графитом или высокопрочный чугун (рис. 1.91): коленчатые и распределительные валы, тормозные барабаны, картеры коробок передач, картеры задних мостов, ступицы колес и т.д. Отличительной особенностью высокопрочного чугуна являются его высокие механические свойства, обусловленные наличием в структуре шаровидного графита,

который в меньшей степени, чем пластинчатый графит в сером чугуна, ослабляет рабочее сечение металлической основы и, что еще важнее, не оказывает на нее сильного надрезающего действия, благодаря чему вокруг включений графита в меньшей степени создаются концентраторы напряжений. Чугун с шаровидным графитом обладает не только высокой прочностью, но и пластичностью. Получение шаровидного графита в чугуна достигается модифицированием расплава присадками, содержащими Mg, Ca, Ce и другие редкоземельные металлы (РЗМ).

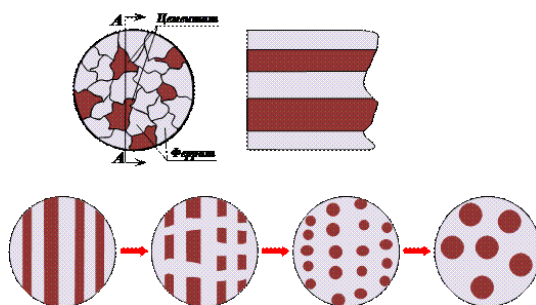


Рис. 1.90. Схема образования сферической структуры цементита в перлитных сталях

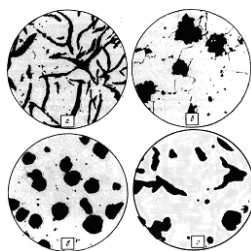


Рис. 1.91. Различные формы графита в чугуна,  $\times 200$ :  
 а) пластинчатый графит; б) хлопьевидный графит;  
 в) шаровидный графит; г) вермикулярный графит

## Т

**Твердение дисперсионное** (dispersion hardening) – образование мелкодисперсных упрочняющих фаз в результате распада перенасыщенного твердого раствора, полученного закалкой. Одним из путей радикального влияния на качество сплавов является изменение их макро- и микроструктуры, включая морфологию выделений фазовых составляющих. Такое изменение приводит, с одной стороны, к повышению свойств сплавов, а с другой – открывает возможность деформировать «недеформируемые» сплавы, совмещать термическую обработку с деформацией при строго определенных температурах, связанных с фазовыми изменениями в структуре сплавов. В последнее время в результате использования ниобия, ванадия или титана удалось совместить дисперсионное твердение с измельчением зерна. Эффективность влияния ниобия, ванадия или титана зависит от их растворимости в аустените – она определяет, какое количество может раствориться и, следовательно, выделяется затем в виде дисперсной фазы.

**Твердость** – свойство материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при внедрении в него другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела – индентора. О твердости судят либо по глубине проникновения индентора (метод Роквелла), либо по величине отпечатка от вдавливания (методы Бринелля, Виккерса, микротвердости). Во всех случаях происходит пластическая деформация материала. Чем больше сопротивление материала пластической деформации,

тем выше твердость. Наибольшее распространение получили методы Бринелля, Роквелла, Виккерса и микротвердости. Схемы испытаний представлены на рис. 1.92. При поверке приборов для измерения твердости по методам Бринелля, Виккерса, Роквелла применяются меры твердости образцовые второго разряда по ГОСТ 9031.

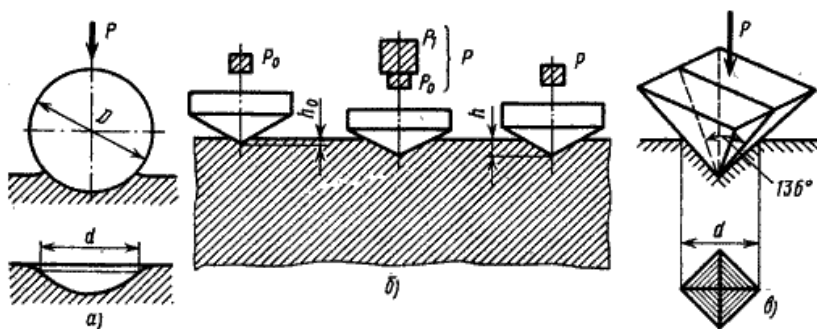


Рис. 1.92. Схемы определения твердости:  
а) по Бринеллю; б) – по Роквеллу; в) по Виккерсу

**Твердость по Бринеллю (НВ)** – отношение нагрузки  $P$ , действующей на индентор (шарик), к сферической поверхности отпечатка  $F$ :

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Метод измерения твердости по Бринеллю (предложен шведским инженером Ю.А. Бринеллем в 1900 году) первый широко используемый стандартизированный метод измерения твердости материалов в материаловедении. Испытание проводят на твердомере Бринелля (рис. 1.93, а).

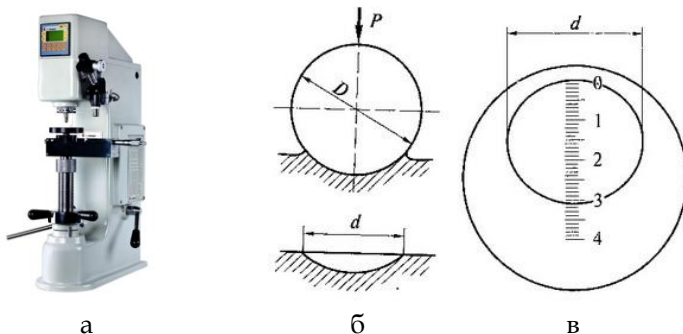


Рис. 1.93. Твердомер Бринелля (а), схема определения твердости по Бринеллю (б) и измерения отпечатка лупой Бринелля

В качестве индентора используется стальной закаленный шарик диаметром  $D$  2,5; 5; 10 мм (рис. 1.93, б). Величину нагрузки и диаметр шарика выбирают в зависимости от исследуемого материала, который разделен на 5 основных групп: 1 – сталь, никелевые и титановые сплавы; 2 – чугун; 3 – медь и сплавы меди; 4 – легкие металлы и их сплавы; 5 – свинец, олово. Кроме этого, эти группы могут разделяться на подгруппы в зависимости от твердости образцов. При выборе условий испытаний следят за тем, чтобы толщина образца, как минимум, в 8 раз превышала глубину вдавливания индентора. И еще важно контролировать диаметр отпечатка, который должен находиться в пределах от  $0,24D$  до  $0,6D$ . Продолжительность выдержки  $\tau$ : для стали и чугуна – 10 с, для латуни и бронзы – 30 с. Полученный отпечаток измеряется в двух направлениях при помощи лупы Бринелля (рис. 1.93, в). Стандартными условиями являются  $D = 10$  мм;  $P = 3000$  кгс;  $\tau = 10$  с.

**Твердость по Виккерсу (HV)** – отношение нагрузки, действующей на индентор (четырёхгранная алмазная пирамида), к площади полученного отпечатка. Сущность метода заключается во вдавливании в испытуемый материал правильной четырёхгранной алмазной пирамиды с углом  $136^\circ$  между противоположными гранями (рис. 1.92, в). Регламентируется ISO 6507 и ГОСТ 2999-75. Метод Виккерса позволяет определять твёрдость азотированных и цементированных поверхностей, а также тонких листовых материалов. Твёрдость по Виккерсу во всех случаях обозначается буквами HV без указания размерности – МПа (кгс/мм<sup>2</sup>). Основными параметрами при измерении твёрдости по Виккерсу являются нагрузка  $P$  до 980,7 Н (100 кгс) и время выдержки 10–15 с. Наблюдается хорошее совпадение значений твёрдости по Виккерсу и Бринеллю в пределах от 100 до 450 HV.

**Твердость по Роквеллу (HRB, HRC, HRA)** – оценивают по глубине внедрения индентора (алмазный конус или стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм) и выражают в условных единицах. Испытание на твердость по Роквеллу вдавливанием в испытываемый образец конуса с углом  $120^\circ$  представлено на рис. 1.92, б. Конус вдавливают в испытательный образец под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок – предварительной  $P_0$  и основной  $P_1$ . Общая нагрузка  $P$  будет равна сумме предварительной  $P_0$  и основной  $P_1$  нагрузок.  $h_0$  – глубина внедрения наконечника в испытательный материал под действием предварительной нагрузки  $P_0$ . Глубина внедрения наконечника в испытательный материал под действием основной нагрузки  $P_1$ . Расстояние между центрами двух

соседних отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка (но не менее 2 мм), расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее 2,5 диаметра отпечатка (но не менее 1 мм). При измерении твёрдости на выпуклых цилиндрических и сферических поверхностях по шкалам А, В, С, D, F, G в результаты измерений твёрдости должны быть введены поправки, величины которых приведены в приложении 3 ГОСТ 9013. Поправки прибавляются к полученным значениям твёрдости. Существует корреляция между значениями твёрдости, измеренной разными методами (рис. 1.94). Перевод единиц твёрдости HRB в твёрдость по методу Бринелля для алюминиевых сплавов). Имеются нормативные документы, где приведено сравнение значений твёрдости, измеренной разными методами (например, ASTM E-140) и таблицы перевода единиц твёрдости по методам Бринелля, Виккерса, Роквелла.

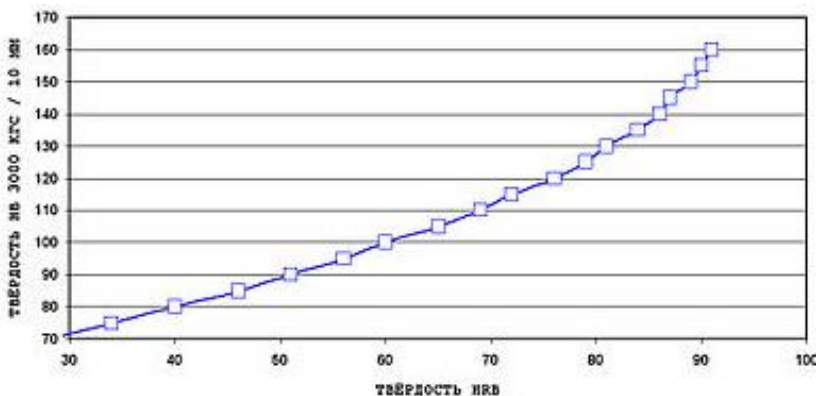


Рис. 1.94. Перевод единиц твердости по Роквеллу в единицы твердости по Бринеллю для алюминиевых сплавов

**Текстура деформации** (deformation texture) – закономерная ориентация кристаллитов относительно внешних деформационных сил при обработке металлов давлением (рис. 1.95).

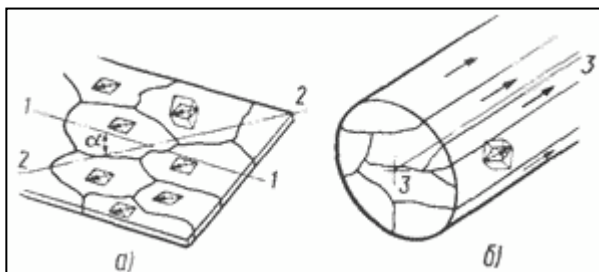


Рис. 1.95. Текстуры прокатки (а) и волочения (б):  
1 – 1 – направление прокатки; 2 – 2 – ось текстуры;  
3 – 3 – направление волочения

Возникновение текстуры является одним из важнейших следствий кристаллографической направленности скольжения в каждом зерне по определенным плоскостям и направлениям пространственной решетки, т.к. эти направления закономерно поворачиваются по отношению к осям деформации изделия. Характер текстуры деформации зависит от вида и условий обработки давлением (в основном от схемы главных деформаций) и от природы металла (типа кристаллической решетки и энергии дефектов упаковки), наличия примесей. При волочении или экструзии возникают так называемые аксиальные текстуры, когда определенное кристаллографическое направление оказывается параллельным оси проволоки или прутка для большинства зерен (рис. 1.95, б). При прокатке получается



более сложная текстура. В этом случае параллельно плоскости прокатки лежит кристаллографическая плоскость и кристаллографическое направление, которое образует с направлением прокатки определенный угол  $\alpha$  (рис. 1.95, а). Кристаллографическую текстуру не следует отождествлять с волокнистой структурой, волокнистость иногда может и не сопровождаться текстурой. Образование текстуры способствует появлению анизотропии механических и физических свойств. Различают однокомпонентные, когда существует только одна группа кристаллитов в поликристалле, имеющая одну преимущественную ориентацию, и многокомпонентные текстуры, когда существует несколько групп кристаллитов, характеризующихся отличающимися ориентировками.

**Текстура рекристаллизации** – текстура рекристаллизации качественно тождественна текстуре деформации при отжиге ниже некоторой температуры. Различие может состоять в усилении одних и ослаблении других компонентов текстуры. Весьма подробно текстура первичной рекристаллизации изучена в металлах и твердых растворах с ГЦК решеткой. Как правило, чем совершеннее текстура деформации, тем более четкой получается соответствующая ей текстура рекристаллизации. Характер текстуры рекристаллизации определяется условиями проведения отжига, видом предшествующей обработки давлением (прокатка, волочение и т.д.), а также количеством и природой примесей. При объяснении текстур рекристаллизации в настоящее время исходят из гипотез ориентированного зарождения и ориентированного роста рекристаллизованных зерен. Предполагается, что все зародыши

рекристаллизации уже имеются в деформированной матрице в виде субзерен. Так, в меди, холоднокатаной с большими обжатиями, удалось выявить, что текстура деформации содержит не только известную главную ориентировку  $\{111\} \langle 111 \rangle$ , но и следы ориентировки  $\{100\} \langle 100 \rangle$ , которые можно рассматривать как зародыши кубической текстуры рекристаллизованного металла. Это объясняет, почему степень деформации, температура деформирования и другие условия обработки давлением влияют на текстуру рекристаллизации. При образовании текстуры рекристаллизации отожженный поликристаллический металл характеризуется анизотропией свойств.

**Текстура роста** (growth texture) – к текстурам роста, прежде всего, относится текстура литья. В процессе кристаллизации слитков вследствие направленного отвода тепла происходит ориентированный рост столбчатых кристаллов.

**Температура кристаллизации** – температура, при которой практически начинается кристаллизация, называется фактической температурой кристаллизации ( $T_{фк}$ ). Движущая сила кристаллизации любого типа – разный характер изменения свободной энергии металла в жидком и твердом состояниях в зависимости от температуры (рис. 1.96).

Температура, при которой равновероятно как твердое, так и жидкое состояние, – равновесная или теоретическая температура кристаллизации ( $T_{пл}$ ). Затвердевание металла при этой температуре еще не происходит. Для кристаллизации необходимо образование зародышей и их рост в результате присоединения частиц контактирующей с ними жидкости. Это происходит в том случае, если термодинамический

потенциал вещества в твердом состоянии будет меньше термодинамического потенциала вещества в жидком состоянии, т.е. при переохлаждении жидкого металла до температур ниже равновесной. Степенью переохлаждения  $\Delta T$  называют разность между теоретической и фактической температурами кристаллизации.

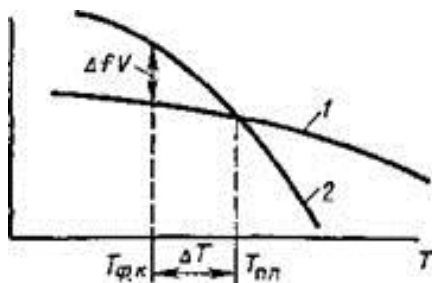


Рис. 1.96. Зависимость свободной энергии твердого (1) и жидкого (2) металла от температуры

**Температура кристаллизации равновесная** – температура, при которой термодинамические потенциалы вещества в твердом и жидком состояниях равны, а свободные энергии исходной и образующихся фаз одинаковые: температура  $T_{пл}$  на рис. 1.96.

**Температура кристаллизации фактическая** – температура, соответствующая определенной степени переохлаждения (скорости охлаждения): температура  $T_{фк}$  на рис. 1.96.

**Теплоемкость** – количество тепла, получаемое телом единичной массы для повышения его температуры на один градус и отдаваемое при понижении его температуры на один градус; точнее – отношение количества теплоты,

поглощаемой телом при бесконечно малом изменении его температуры, к этому изменению.

**Теплопроводность** – свойство материала проводить (пропускать) определенное количество теплоты в единицу времени. Показателем теплопроводности является коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , зависит от природы материала, его строения, пористости и влажности.

**Теплостойкость** – способность материала сохранять исходные свойства при высоких температурах и выдерживать без изменения структуры и разрушения периодические колебания температуры. Теплостойкость измеряется числом теплосмен, т.е. числом резких изменений воздействующей на материал температуры, которая, как правило, бывает ниже температуры применения.

**Термоциклирование** – технологический процесс термической обработки, основанный на использовании циклических тепловых воздействий и получивших название термоциклической обработки (ТЦО), заключающейся в многократном повторе циклов нагрева и охлаждения металлов и сплавов с целью изменения (улучшения) его структуры и повышения их механических свойств. В отличие от других видов термической обработки структурные и фазовые превращения при ТЦО совершаются многократно при изменяющейся температуре нагрева и охлаждения. Необходимость многократного повторения обработки при заданных температурах, как правило, обусловлена стремлением накопить изменения, которые коренным образом улучшают качество изделий и придают им свойства, недостижимые при одноразовой термической обработке (рис. 1.97).

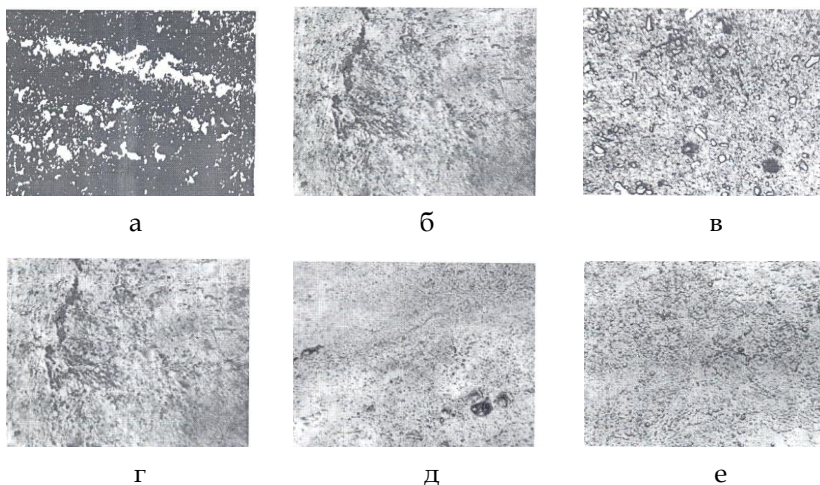


Рис. 1.97. Структура сталей У8, 5ХНМВ, 45Х2МНВФКЮ после традиционной термической обработки (а - в соответственно) и после окончательной термоциклической обработки (г - е),  $\times 650$  [1]

Чаще всего, возникающие изменения от цикла к циклу связывают с изменениями, вызванными пластической деформацией. При ТЦО наклеп осуществляется в процессе термической обработки, но на этой основе разработаны и другие методы упрочнения сталей и сплавов, такие как механико-термическая обработка (МТО) и др. Эффективность влияния ТЦО на структуру и свойства стали во многом определяется режимом ее осуществления, т.е. температурами в цикле, количеством циклов, а также скоростью нагрева и охлаждения. Практическое применение - разработка и внедрение новых более эффективных технологий упрочнения инструментальных сталей, повышающих качество готового инструмента и, в конечном итоге - его

эксплуатационную стойкость, обеспечивающую значительное снижение энергозатрат, направлены на решение и теоретическое обоснование научной проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение.

**Техника** – совокупность средств человеческой деятельности, созданных и (или) создаваемых для осуществления процессов производства и обслуживания производственных потребностей общества.

**Томпак** – простая латунь, содержащая до 10% цинка.

**Точки критические** – характерные точки на термических кривых, соответствующие определенным фазовым превращениям, протекающим с выделением (при охлаждении) или поглощением (при нагреве) теплоты. В табл. 1.6 приводятся обозначения критических точек чистого железа и сплавов железо-углерод. Впервые критические точки железа были определены в 1868 г. Д.К. Черновым по цвету каления, изменению объема, пластичности и другим свойствам. В 1888 г. французский ученый Флорис Осмонд предложил каждую критическую точку обозначить индексом А (от французской «arret» – что означает остановку на термической кривой. Для различия критических точек при нагревании и охлаждении к обозначению критической точки А добавляется индекс «с» (от французского слова *choftage* – нагревание) или индекс «г» (от французского *refroidissement* – охлаждение).

**Трещина горячая** (hot crack) – дефект отливки в виде разрыва или надрыва тела отливки усадочного происхождения, возникающий в интервале кристаллизации сплава. Горячая трещина располагается по границам кристаллов,

имеет неровную окисленную поверхность, на которой иногда видны дендриты. Горячая трещина относится к группе дефектов «Несплошности в теле отливки».

Таблица 1.6

Критические точки чистого железа и сплавов Fe-Fe<sub>3</sub>C

Температура превращения, °С	Обозначение критических точек		Примечание
	при нагреве	при охлаждении	
1539	-	-	Плавление, кристаллизация
910	A <sub>c3</sub>	A <sub>r3</sub>	γ Fe ↔ αFe
770	A <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	Магнитное превращение железа
727	A <sub>c1</sub>	A <sub>r1</sub>	Эвтектоидное превращение цементита
210	A <sub>0</sub>		Магнитное превращение цементита

**Трещина холодная** (cold cracking) – разрыв или надрыв тела отливки (рис. 1.98) после затвердевания в результате неравномерного охлаждения и возникающих внутренних напряжений или механического воздействия (холодной прокатки).

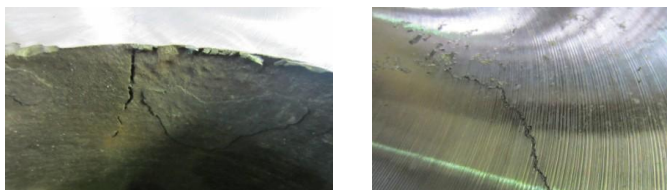


Рис. 1.98. Холодные трещины блока цилиндров

**Трещиностойкость** (cracking resistance) – свойство материала сопротивляться развитию трещин при механических и других воздействиях. Критерий трещиностойкости материала – критический коэффициент интенсивности напряжений в условиях плоской деформации в вершине образца.

**Трипстали** – высоколегированные стали аустенитного класса, имеющие высокую прочность и пластичность, в которых после деформационного упрочнения точка мартенситного превращения  $M_k$  находится при отрицательной температуре, а точка  $M_n$  (начало образования мартенсита деформации) – при температурах выше комнатной. При растяжении аустенит в местах пластической деформации превращается в мартенсит и сталь упрочняется, а деформации сосредотачиваются в соседних объемах аустенита. В результате данных процессов повышается пластичность сплава (относительное удлинение  $\delta = 100\text{--}150\%$ ).

**Троостит** – ферритно-цементитная смесь с характерной темной структурой и твердостью более 40HRC. англ., troostite, по имени французского химика Луи-Жозефа Труста) – структурная составляющая железоуглеродистых сплавов (чугуна, стали). Троостит является высокодисперсным перлитом, который, в свою очередь, представляет собой эвтектоидную смесь феррита и собой цементита. Троостит образуется в результате распада аустенита при температурах ниже 600 °С. Превращение аустенита в троостит происходит диффузионным путём, тип образовавшегося троостита зависит от температуры превращения.

**Троостит закалки** – образуется в результате закалки и имеет пластинчатое строение с расстоянием между пластинами цементита порядка 0,1–0,15 мкм. Троостит закалки,



образующийся при распаде аустенита в температурном интервале 400–500 °С, содержит пластинчатый цементит, в отличие от троостита отпуска, который образуется при отпуске при температурах 350–400 °С и содержит зернистый цементит. Межпластиночное расстояние в троостите закалки не превышает 0,1 мкм. Твёрдость троостита выше, чем перлита или сорбита. В оптическом микроскопе троостит наблюдается в качестве тёмных участков на фоне светлых полей мартенсита, при этом дифференцировать отдельные составляющие феррито-цементитной смеси почти невозможно ввиду её мелкодисперсности. Однако под электронным микроскопом легко наблюдается пластинчатое строение троостита с веерообразным расположением пластинок.

**Троостит отпуска** (temper troostite) – образуется в результате закалки и последующего среднего отпуска. В нем цементит находится в виде мелких пластинок, что обеспечивает высокую упругость. Мартенсит и остаточный аустенит, составляющие типичную структуру закаленной стали, являются **неравновесными фазами**. При нагреве они переходят в более устойчивое состояние, распадаясь на феррито-цементитную смесь. Поскольку этот распад носит диффузионный характер, особенности его протекания будут определяться температурой нагрева. Полученная в результате отпуска при 300–450 °С структура представляет высокодисперсную феррито-цементитную смесь, по свойствам соответствующую трооститу. Эту структуру называют трооститом отпуска.

## У

**Углерод** – неметаллический элемент периодической системы. В обычных условиях существует в виде графита или его метастабильной модификации – алмаза. Растворим в железе в жидком и твердом состояниях, может быть в связанном состоянии – в виде химического соединения  $Fe_3C$ , а в высокоуглеродистых сплавах – в виде графита.

**Удлинение относительное** ( $\delta$ , %) – пластическая деформация, предшествующая разрушению. Определяют как отношение изменения длины образца до и после разрушения к его начальной длине. Это характеристика пластичности материала (См. **Пластичность**)

**Улучшение** (quenching and tempering) – комплексная дифференциальная термообработка, состоящая из закалки и последующего высокого отпуска для получения однородной дисперсной структуры сорбита, обеспечивающей хорошее сочетание прочности, пластичности, ударной вязкости и критической температуры перехода из вязкого в хрупкое состояние. Основные марки улучшаемых конструкционных сталей приведены в табл. 1.7.

**Упрочнение (поверхностное)** – изменение с целью повышения твердости и износостойкости физических свойств поверхности металла. Среди методов поверхностного упрочнения наибольшее распространение получили поверхностная закалка, обработка лазером и электроискровое легирование.

Таблица 1.7

## Основные марки улучшаемых конструкционных сталей

I углеродистые стали ГОСТ 1050-74	II малолегированные стали ГОСТ 4543-71	III среднелегированные стали ГОСТ 4543-71
30, 35	30Г, 50Г, 60Г, 65Г	38ХН3А, 38Х2МЮА
40, 45	30Х, 40Х, 30ХМ, 40ХМ	40ХН2МА
50, 55	50Г2, 50ХФА	38ХН3МФА
60, 65	30ХГСА, 40ХМФА	45ХН2МФА

При поверхностной закалке закаливается только верхний слой на некоторую заданную глубину, а сердцевина изделия остается незакаленной. Основное назначение поверхностной закалки: повышение твердости, износостойкости и предела выносливости обрабатываемого изделия. Сердцевина изделия остается вязкой и воспринимает ударные нагрузки. Поверхностную закалку осуществляют несколькими методами: нагревом токами высокой частоты (ТВЧ) и нагревом газовым пламенем (рис. 1.99 и 1.100). Скорость нагрева ТВЧ значительно выше скорости нагрева в печи и фазовые превращения в стали происходят при более высоких температурах, температуры нагрева под закалку повышаются. Так при нагреве ТВЧ со скоростью 400 °С/с температура закалки стали 40 с 840–860 °С повышается до 930–980 °С. После нагрева ТВЧ стали до температуры закалки изделие охлаждают водой и получается высокодисперсная структура кристаллов мартенсита, обеспечивающая более высокую твердость и прочность стали, чем при печном нагреве.

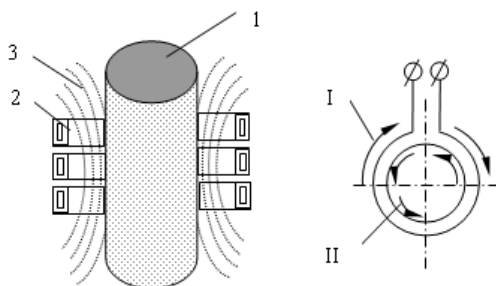


Рис. 1.99. Схема нагрева токами высокой частоты:  
 1 – деталь; 2 – индуктор; 3 – магнитное поле; I – направление  
 тока в индукторе; II – направление тока в детали

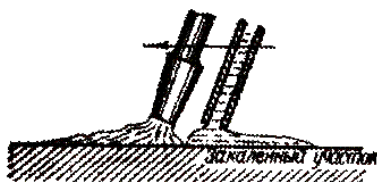


Рис. 1.100. Схема закалки с помощью газовой горелки

Используют также следующие способы закалки индукционного нагрева: одновременный нагрев и охлаждение всей поверхности; этот метод применяют для изделий, имеющих небольшую поверхность (пальцы, валики, осевые инструменты); последовательный нагрев и охлаждение отдельных участков: используют при закалке шеек коленчатых валов (последовательный нагрев и закалка одной шейки за другой), зубчатых колес с модулем более 6 (закалка «зуб за зубом»), кулачков распределительных валов и т.д.; непрерывно последовательный нагрев и охлаждение изделия с перемещением его относительно неподвижных индуктора

и охлаждающего устройства (спрейера) или наоборот. Метод применяют для закалки длинных валов, осей и т.д. По сравнению с первым методом не требуется большой установочной мощности генератора. При закалке с нагревом пламенем газокислородной горелки, имеющей температуру 2000–3000 °С, получается очень быстрый нагрев некоторого участка поверхности до температуры закалки, после которого использование спрейера обеспечивает интенсивное охлаждение поверхности обрабатываемого изделия с формированием слоя закалки на требуемую толщину.

**Упрочнение деформационное** – возникает в результате холодной пластической деформации – наклепа (нагартовки). Упрочнение металла при пластической деформации (наклеп) объясняется увеличением числа дефектов кристаллического строения (дислокаций, вакансий, межузельных атомов). Повышение плотности дефектов кристаллического строения затрудняет движение отдельных новых дислокаций, а следовательно, повышает сопротивление деформации и уменьшает пластичность. Наибольшее значение имеет увеличение плотности дислокаций, так как возникающее при этом между ними взаимодействие тормозит дальнейшее их перемещение. Металлы с ГЦК-решеткой упрочняются сильнее, чем металлы с ОЦК-решеткой. В результате холодной деформации уменьшаются плотность, сопротивление коррозии и повышается электросопротивление. Холодная деформация ферромагнитных металлов (например, железа) повышает коэрцитивную силу и уменьшает магнитную проницаемость.

**Упрочнение карбидное (дисперсионное)** – возникает в результате образования мелкодисперсных частиц химического соединения легирующего элемента (титан, хром, вольфрам и др.) и углерода. Частицы избыточных фаз могут еще более существенно, чем растворенные атомы, влиять на пластическую деформацию во всем интервале гомологических температур. Обычно в сплавах они находятся в окружении матрицы – твердого раствора на базе основного металла и являются эффективными барьерами для скользящих в матрице дислокаций. Дисперсные смеси образуются двояким образом: закалкой и старением; методами порошковой металлургии. Соответственно, упрочнение, достигаемое за счет выделения дисперсных включений в процессе термообработки называется дисперсионным, а за счет введения дисперсных частиц в исходную шихту, последующего формования и спекания – дисперсным. Несмотря на это, механизмы торможения дислокаций при пластической деформации для данных вариантов упрочнения общие. Отдельные особенности состоят в различии межфазных границ «частица-матрица». В дисперсионноупрочненных материалах эта граница может быть когерентной, полукogerентной и некогерентной (рис. 1.101 а, б и в соответственно). В дисперсноупрочненных материалах межфазная граница всегда некогерентна. Отличия этих типов межфазных границ: когерентная граница наблюдается между фазами, имеющими одинаковые типы решеток с близкими параметрами, сопряжение полное; полукogerентная граница возникает в случае частичного сопряжения решеток, для полного сопряжения

необходимо ввести дислокации; некогерентная граница возникает между фазами с различным типом решетки, параметром. Для сопряжения требуется переходная решетка и зернограницные дислокации. Оптимальные (с точки зрения торможения дислокаций) условия: расстояния между частицами  $<0,1$  мкм, размер частиц  $<0,01$  мкм.

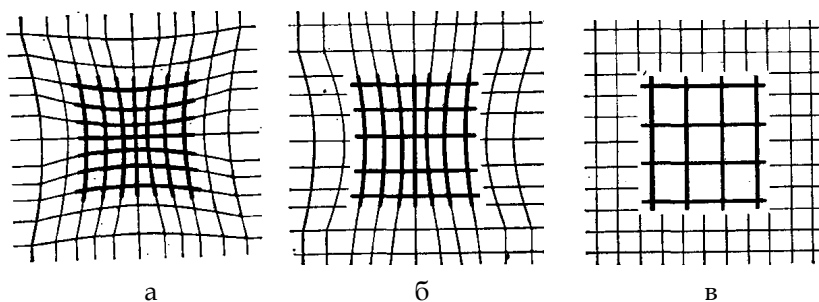


Рис. 1.101. Схемы границ в дисперсионноупрочненных материалах: а – когерентной, б – полукogerентной, в – некогерентной

Допустимое объемное содержание упрочняющей фазы определяется технологическими возможностями получения равномерного распределения ее частиц выбранной дисперсности. Способ введения частиц фазы-упрочнителя в матрицу зависит от выбора типа структуры дисперсионупрочненного материала, которая может быть дисперсной (рис. 1.102, а) или агрегатной (рис. 1.102, б); в реальных материалах эти структуры сосуществуют, хотя стремятся к более предпочтительной дисперсной структуре.

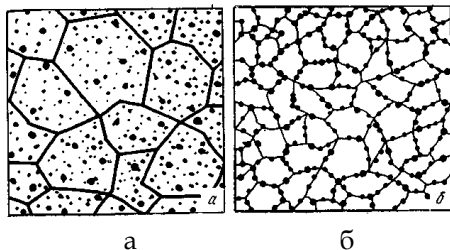


Рис. 1.102. Типы структур в дисперсноупрочненных материалах:  
а – дисперсная; б – агрегатная

**Упрочнение твердорастворное** – возникает в результате искажения кристаллической структуры металла при образовании твердого раствора. Твердорастворное упрочнение реализуется в сплавах вследствие способности металлов образовывать между собой, а также с неметаллами либо отдельные фазы, либо смеси фаз. Различают твердые растворы замещения, твердые растворы внедрения, интерметаллические фазы. Твердые растворы замещения возникают при занятии некоторых узлов решетки матрицы атомами другого элемента, т.е. замещением атома матрицы (рис. 1.103, а). Область растворимости какого-либо металла в данной матрице может быть оценена эмпирическим правилом Юм-Розери: широкая область растворимости возможна в тех случаях, когда: различие атомных радиусов менее 10–15%; элементы обладают почти одинаковыми электрохимическими свойствами; решетки изотипны. При полном выполнении правила Юм-Розери получается непрерывный ряд твердых растворов, а при частичном – растворимость в твердом состоянии ограниченная.



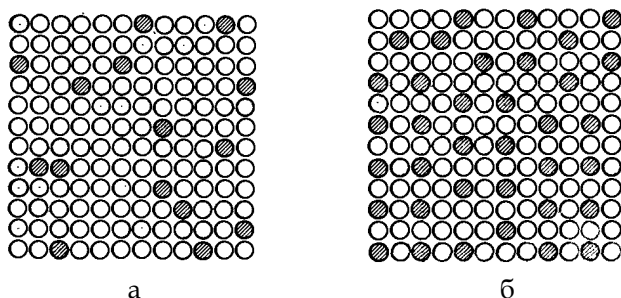


Рис. 1.103. Твердые растворы замещения:  
 а – при занятии некоторых узлов решетки матрицы атомами другого элемента, б – атом окружен атомами другого вида

При образовании твердых растворов замещения могут возникать следующие варианты расположения атомов:

1. Ближний порядок (рис. 1.103, б). Атом окружен атомами другого вида. Энергия связи между разнородными атомами больше, чем между однородными.

2. Дальний порядок или сверхструктура (рис. 1.104, а). Возникает при стехиометрическом соотношении разнородных атомов, которые образуют вполне определенную решетку. Сверхструктуры устойчивы только ниже определенной температуры.

3. Образование зон (рис. 1.104, б). Предпочтительное расположение однородных атомов растворяемого элемента в качестве ближайших соседей.

4. Твердые растворы внедрения образуются при внедрении преимущественно атомов металлоидов в междоузлия кристаллической решетки матрицы.

5. Фазы внедрения – сверхструктуры в системах растворов внедрения (рис. 1.105) имеют полуметаллический блеск, высокую твердость и износоустойчивость. В технике



внешних сил, если силы эти не превосходят тех пределов, за которыми восстановление формы тела совершается не вполне, так что остаются некоторые деформации, не исчезающие после прекращения действия сил. Обусловлена взаимодействием и тепловым движением частиц тела.

**Усталость** – процесс постепенного накопления напряжений в материале при действии циклических нагрузок, приводящий к образованию микротрещин и разрушению. Свойство металлов сопротивляться усталости носит название «выносливость». Характерной особенностью разрушений металла от усталости является пониженный уровень необходимых для этого напряжений по сравнению с их уровнем, приводящим к разрушению при однократном приложении нагрузки. Процесс разрушения связан с накоплением дефектов в кристаллической решётке, приводящим сначала к местному разрушению – возникновению микротрещин. Первоначально процесс развивается медленно, а затем, когда живое сечение образца ослабнет настолько, что напряжения превысят предел текучести, происходит внезапное разрушение. Металл может разрушаться также под действием многократных повторных температурных напряжений. Это явление получило название термической усталости. При быстром нагреве наружные слои детали оказываются в сжатом состоянии, а внутренние – в растянутом. При охлаждении знак напряжений меняется. В конечном счёте деталь разрушается.

## Ф

**Фаза** (от греч. phasis – появление) – однородная по химическому составу, структуре и свойствам часть системы, отделенная от других частей системы поверхностью раздела, при переходе через которую резко (скачком) изменяются состав, строение и свойства сплава. Основной характеристикой твердой фазы является индивидуальная, присущая только этой фазе кристаллическая структура. Для описания кристаллической структуры используют математическую модель – пространственную решетку, в узлах которой располагаются атомы или ионы данного вещества. Пространственную решетку можно воспроизвести с помощью элементарной ячейки – наименьшего повторяющегося объёма. Изменение фазового состава вещества возможно при изменении следующих термодинамических параметров: химический состав, давление, температура или всех трех вместе.

**Феррит** (лат. ferrum – железо) – фазовая составляющая сплавов железа, представляющая собой твёрдый раствор углерода и легирующих элементов в  $\alpha$ -железе ( $\alpha$ -феррит). Имеет объёмноцентрированную кубическую кристаллическую решётку ОЦК-решетку). Является фазовой составляющей других структур, например, перлита, состоящего из феррита и цементита. При температурах выше 1401 °С в железоуглеродистых сплавах образуется твёрдый раствор углерода в  $\delta$ -железе ( $\delta$ -феррит), который можно рассматривать как высокотемпературный феррит. При температуре 727 °С в феррите растворяется 0,02% С,

при 0 °С – 0,002% С. Механические свойства: 80 НВ,  $\sigma_b = 250$  МПа,  $\delta = 40\%$ . Ферромагнетик.

**Ферромагнетики** – материалы, имеющие малую коэрцитивную силу, высокую магнитную проницаемость, высокую индукцию насыщения (способность легко намагничиваться) и обладающие спонтанной намагниченностью, т.е. они намагничены даже при отсутствии внешнего магнитного поля. К ферромагнетикам, кроме основного их представителя – железа (от него и идет название «ферромагнетизм»), – относятся кобальт, никель, гадолиний, их сплавы и соединения. Процесс намагничивания ферромагнетиков сопровождается изменением его линейных размеров и объема. Это явление получило название магнитострикции. Величина и знак эффекта зависят от напряженности намагничивающего поля, от природы ферромагнетика и ориентации кристаллографических осей по отношению к полю.

**Флокены** (нем. Flocken, букв. хлопья) – очень тонкие трещины (в сотые доли миллиметра и меньше) овальной или линзообразной формы, представляющие собой в изломе пятна (хлопья). Поперечник флокена от 0,5 до 30–50 мкм. Служат концентраторами напряжений, а при сварке вызывают образование холодных трещин. На протравленных шлифах флокены выявляются в виде тонких волосовин (рис. 1.106, а), а в изломе закалённых образцов представляют собой овальные кристаллические, с крупнозернистой текстурой, пятна серебристо-белого цвета (рис. 1.106, б), отличающиеся от основной серой массы излома.

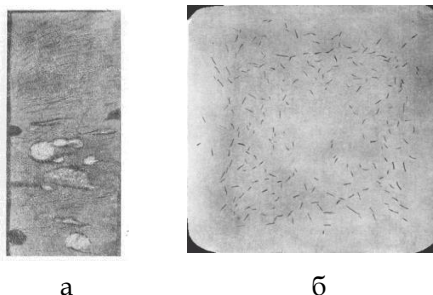


Рис. 1.106. Флокены в изломе стали (а) на поперечном макрошлифе проката с квадратным поперечным сечением (б)

Наибольшую склонность к поражению флокены имеют легированные и углеродистые стали мартенситного и перлитного классов (конструкционные, подшипниковые, броневые, рельсовые и т.д.); в сталях аустенитного и карбидного классов (нержавеющие, быстрорежущие) эти дефекты не встречаются. Флокены всегда находятся в сердцевинных зонах стальных изделий. Чем больше размер поковки или заготовки, полученной горячей обработкой, тем больше вероятность образования в ней флокенов. В прутках диаметром до 50 мм флокены не встречаются. Основная причина образования флокенов – присутствие в стали повышенного количества водорода, а наиболее вероятный механизм – адсорбция водорода на поверхностях микронесплошностей с понижением поверхностной энергии, что облегчает разрушение. Образование зон с повышенной адсорбцией водорода, где зарождаются флокены, стимулируют внутренние растягивающие напряжения, возникающие в стали при структурных превращениях, пластической деформации, неравномерном охлаждении.

Снижение сопротивления металла разрушению в местах концентрации напряжений у скоплений дефектов кристаллической решётки, неметаллических включений, ликвационных неоднородностей также способствует возникновению флокенов. Способы борьбы с флокенами: термическая обработка изделий по специальным противофлокеным режимам, а также вакуумирование жидкой стали, при котором содержание водорода снижается до безопасного уровня. Водород попадает в сталь в процессе плавки из влаги, вносимой в печь шихтой, флюсами и пр. Поэтому при выплавке стали необходимо принимать меры, препятствующие попаданию водорода в плавильную печь (прокаливание шихты, отсутствие подсоса воздуха и т.д.).

## Х

**Химико-термическая обработка** – нагрев и выдержка металлических (а в ряде случаев и неметаллических) материалов при высоких температурах в химически активных средах (твердых, жидких, газообразных). При химико-термической обработке изменяется не только структура, но и химический состав поверхностных слоев металла. Сущность химико-термической обработки стали состоит в искусственном изменении химического состава ее поверхностных слоев. Цель такой обработки – получение высокой поверхностной твердости и износостойкости стальных деталей. Химический состав поверхностных слоев стали изменяется благодаря проникновению в них различных элементов. Изменение химического состава вызывает

изменение структуры и свойств поверхностного слоя. Химико-термическая обработка осуществляется помещением стали в среду, в которой происходит насыщение ее поверхностного слоя. Химико-термическая обработка стали складывается из трех этапов: диссоциации, адсорбции и диффузии. Различают следующие виды химико-термической обработки: цементация и нитроцементация, цианирование, азотирование, алитирование, хромирование.

**Хладноломкость** (frost fracture) – свойство металлов, характеризующееся уменьшением пластичности и повышением хрупкости при низких температурах. Хладноломкость связана с происходящим при этом из-за затруднённости движения дислокаций значительным повышением предела текучести; начиная с некоторой температуры (т.н. критическая температура хрупкости, или порог хладноломкости) хрупкое разрушение наступает раньше, чем состояние пластической текучести. Хладноломкость присуща низколегированным сталям, танталу, вольфраму, хрому, молибдену и некоторым др. металлам с объёмноцентрированной кубической решёткой и сплавам на их основе. Хладноломкость вызывается в железе посторонними примесями, главным образом, примесью фосфора, сурьмы, мышьяка и вольфрама, а отчасти также серы, меди, цинка и хрома. Наличие примесей внедрения в металлах, что в сочетании со сжатием кристаллической решётки при понижении температуры приводит к увеличению внутренних напряжений. Из этих примесей преобладающее влияние оказывает фосфор. Влияние его проявляется тем сильнее, чем богаче металл углеродом. Температура перехода



от вязкого разрушения к хрупкому зависит от режима термической обработки, величины зерна, скорости нагружения, величины концентрации напряжений. Чаще всего хладноломкость оценивают путём испытаний на ударный изгиб призматических образцов с надрезом, определяя при этом работу деформации и разрушения – значения ударной вязкости. Склонность к хладноломкости можно также оценить по температуре резкого снижения пластичности или по доле волокнистого излома на поверхности разрушения. Хладноломкость имеет особое значение при эксплуатации водородных двигателей. Снижение хладноломкости достигается очисткой металлов от вредных примесей, термообработкой, легированием.

**Хрупкость отпускная** – снижение ударной вязкости при отпуске некоторых легированных сталей. Сталь в состоянии отпускной хрупкости характеризуется низкой ударной вязкостью. На других механических свойствах при комнатной температуре состояние отпускной хрупкости практически не сказывается. На рис. 1.107 схематично показано влияние температуры отпуска на ударную вязкость легированной стали, в сильной степени склонной к отпускной хрупкости. У многих легированных сталях наблюдаются два температурных интервала отпускной хрупкости. При отпуске в интервале 250–400 °С возникает необратимая, а в интервале 450–650 °С – обратимая отпускная хрупкость. Ударная вязкость закаленной стали после отпуска в интервале 250–400 °С меньше, чем после отпуска при температурах ниже 250 °С. Если хрупкую сталь, отпущенную при 250–400 °С, нагреть выше 400 °С и перевести

в вязкое состояние, то повторный отпуск в интервале 250–400 °С не возвращает сталь в хрупкое состояние. Скорость охлаждения с температур отпуска в интервале 250–400 °С не влияет на ударную вязкость.

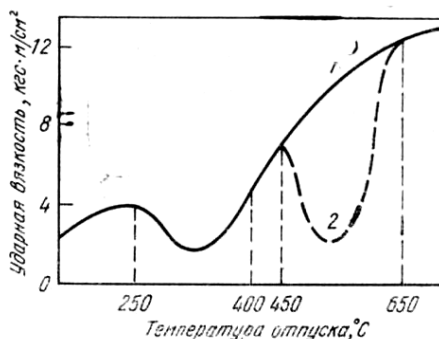


Рис. 1.107. Влияние температуры отпуска на ударную вязкость стали с высокой склонностью к отпускной хрупкости (схема):

1 – быстрое охлаждение в воде, масле;

2 – медленное охлаждение на воздухе или с печью.

Ударная вязкость – в высшей степени структурно чувствительное свойство, особенно чувствительное к состоянию границ зерен. Сталь в состоянии необратимой отпускной хрупкости имеет блестящий межкристаллитный излом по границам бывших аустенитных зерен. Эта хрупкость свойственна в той или иной мере всем сталям, в том числе и углеродистым. Поэтому средний отпуск стали, как правило, не используют, хотя он и обеспечивает высокий предел текучести. Причиной необратимой отпускной хрупкости считают карбидообразование при распаде мартенсита, в частности выделение карбида в виде пленки по границам зерен. Эта пленка при более высоких

температурах отпуска исчезает, а при повторном нагреве до 250–400 °С не восстанавливается. Кремний в малолегированных сталях, задерживая распад мартенсита, устраняет необратимую отпускную хрупкость. Практические меры борьбы с обратимой отпускной хрупкостью – быстрое охлаждение с температуры отпуска (в воде или масле) и легирование стали молибденом или вольфрамом.

**Хрупкость отпускная I рода** (необратимая) – снижение ударной вязкости после отпуска в интервале 250–400 °С.

**Хрупкость отпускная II рода** (обратимая) – снижение ударной вязкости после отпуска в интервале 500–600 °С и замедленного охлаждения.

## Ц

**Цементация** (науглероживание) – химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода при нагреве в соответствующей среде, называемой карбюризатором. Цементация является промежуточной операцией, цель которой – обогащение поверхностного слоя углеродом (рис. 1.108).

Требуемое упрочнение поверхностного слоя изделия достигается закалкой после цементации. Закалка должна не только упрочнить поверхностный слой, но и исправить структуру перегрева, возникающую из-за многочасовой выдержки стали при температуре цементации. После цементации в твердом карбюризаторе ответственные изделия подвергают двойной закалке, так как содержание углерода в сердцевине и на поверхности изделия разное, а оптимальная температура нагрева под закалку зависит от содержания углерода в стали.

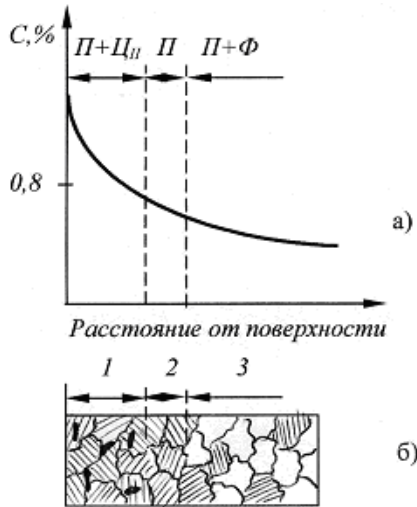


Рис. 1.108. Изменение концентрации углерода по глубине цементированного слоя (а) и схема микроструктуры незакаленного науглероженного слоя (б):  
1 – заэвтектоидная; 2 – эвтектоидная; 3 – доэвтектоидная зоны

**Цементит** – химическое соединение железа и углерода – карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), содержащее 6,67% С и имеющее высокую твердость (800 НВ), но хрупкое. Цементит – метастабильная фаза; образование стабильной фазы – графита во многих случаях затруднено. Цементит имеет орторомбическую кристаллическую решётку (рис. 1.109), очень тверд и хрупок, слабо магнитен до 210 °С. В зависимости от условий кристаллизации и последующей обработки цементит может иметь различную форму – равноосных зёрен, сетки по границам зёрен, пластин, а также видманштеттову структуру. Цементит в разных количествах, в зависимости от концентрации, присутствует в железоуглеродистых сплавах уже при малых содержаниях

углерода. Формируется в процессе кристаллизации из расплава чугуна. В сталях выделяется при охлаждении аустенита или при нагреве мартенсита. Цементит является фазовой и структурной составляющей железоуглеродистых сплавов, составной частью ледебурита, перлита, сорбита и троостита. Цементит – представитель так называемых фаз внедрения, соединений переходных металлов с легкими металлоидами. В фазах внедрения велика доля как ковалентной, так и металлической связи. Первичный цементит кристаллизуется из жидкого сплава, вторичный цементит – из аустенита, третичный цементит – из феррита.

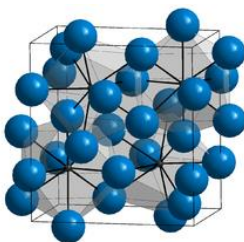


Рис. 1.109. Структура цементита

**Центр кристаллизации** (nucleus of center) – дискретная точка жидкой фазы, которая при определенных условиях вырастает в кристалл. Различают самопроизвольные и искусственные центры кристаллизации. При соответствующем понижении температуры в жидком металле начинают образовываться кристаллики – центры кристаллизации или зародыши. Для начала их роста необходимо уменьшение свободной энергии металла, в противном случае зародыш растворяется. В переохлажденной (перегретой) либо пересыщенной фазе происходит зарождение

новой фазы – образуются центры кристаллизации, которые превращаются в кристаллы и растут, как правило, изменяя форму, содержание примесей и дефектность. Центры кристаллизации возникают гомогенно в объеме начальной фазы и гетерогенно на поверхностях посторонних твердых частиц (первичное зародышеобразование), а также вблизи поверхности ранее сформировавшихся кристаллов новой фазы (вторичное зародышеобразование). При росте кристаллов сначала кристаллизующееся вещество адсорбируется на поверхности сформировавшегося кристаллика, а затем встраивается в его кристаллическую решетку: при сильном переохлаждении равновероятно на любом участке поверхности (нормальный рост), при слабом – слоями тангенциально на ступенях, образованных винтовыми дислокациями или двумерными зародышами (послойный рост). Если переохлаждение ниже некоторого значения, называемого пределом морфологической устойчивости, нормально растущий кристалл повторяет форму (обычно округлую) теплового, либо концентрационного поля вокруг него, а послойно растущий кристалл имеет форму многогранника. При превышении указанного предела растут древовидные кристаллы (дендриты). Количественно рост кристаллов характеризуют линейной скоростью, равной скорости перемещения их поверхности в нормальном к ней направлении.

**Цианирование** – химико-термическая обработка, заключающаяся в одновременном диффузионном насыщении поверхностного слоя атомами углерода и азота в цианистых солях. Различают высоко- (750–950 °С) и низкотемпературное (520–700 °С). Высокотемпературное цианирование

сопровождается преимущественным насыщением стали углеродом до 0,6–1,2%, (жидкостная цементация). Содержание азота в цианированном слое от 0,2% до 0,6%, толщина слоя 0,15–2 мм. После цианирования изделия подвергаются закалке и низкому отпуску. Окончательная структура цианированного слоя состоит из тонкого слоя карбонитридов  $Fe_2(C, N)$ , а затем азотистый мартенсит. По сравнению с цементацией высокотемпературное цианирование происходит с большей скоростью, приводит к меньшей деформации деталей, обеспечивает большую твердость и сопротивление износу. Низкотемпературное цианирование сопровождается преимущественным насыщением стали азотом. Проводится для инструментов из быстрорежущих, высокохромистых сталей, является окончательной обработкой. Основным недостатком цианирования является ядовитость цианистых солей.

## Ч

**Число степеней свободы** – число независимых переменных факторов, которые можно изменять, не нарушая равновесия системы.

**Чугун белый** – чугун, у которого весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Эти чугуны, фазовые превращения в которых происходят согласно диаграммы Fe-Fe<sub>3</sub>C, подразделяют на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические (рис. 1.110). При цеховой температуре структура белого доэвтектического чугуна состоит из ледебурита, перлита и вторичного цементита

(рис. 1.110, а). Ледебуритная составляющая на металлографическом шлифе имеет вид светлых цементитных полей с равномерно расположенными на них относительно мелкими темными перлитными участками. Перлит занимает также крупные темные области. Вторичный цементит часто виден в виде светлых выделений по границам перлитных областей, а частично сливается с цементитом ледебурита. Эвтектический белый чугун имеет в своей структуре один ледебурит (рис. 1.110, б), а заэвтектический белый чугун – ледебурит и цементит первичный).

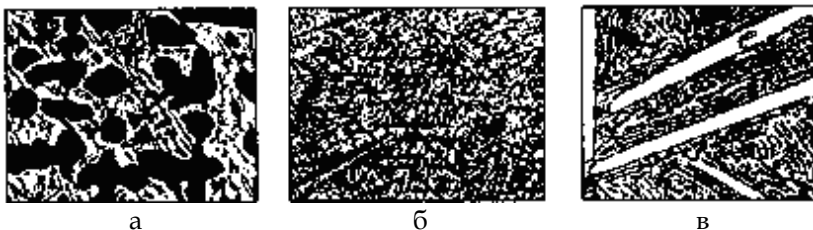


Рис. 1.110. Микроструктуры белых чугунов:  
 а – доэвтектический белый чугун  
 (перлит + ледебурит + цементит вторичный);  
 б – эвтектический белый чугун (ледебурит);  
 в – заэвтектический белый чугун  
 (ледебурит + цементит первичный)

Из-за большого количества цементита белые чугуны тверды, хрупки и для изготовления деталей машин используются редко. Ограниченное применение имеют отбеленные чугуны (отливки из серого чугуна с поверхностным слоем белого чугуна). Из них изготавливают прокатные валки, тормозные колодки, вагонные колеса и др. детали, работающие в условиях износа. Белый чугун используется



также как переделный для получения с помощью граффицирующего отжига ковкого чугуна.

**Чугун высокопрочный** – чугун, в котором графит имеет шаровидную форму. Их получают модифицированием магнием, церием, иттрием, которые вводят в жидкий чугун в количестве 0,02–0,08%. По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть ферритным (допускается до 20% перлита) или перлитным (допускается до 20% феррита). Шаровидный графит является более слабым концентратором напряжений, чем пластинчатый графит, поэтому меньше снижает механические свойства чугуна (рис. 1.111). Высокопрочный чугун обладает более высокой прочностью и некоторой пластичностью. Маркируют высокопрочные чугуны по ГОСТ 7293-85 буквами ВЧ и двузначным числом, показывающим минимальное значение предела прочности на растяжение в десятках мегапаскалей. Например, высокопрочный чугун ВЧ 40 имеет временное сопротивление при растяжении 400 МПа, относительное удлинение – не менее 10%, твердость HB = 1400–2200 МПа, структура перлитоферритная. Обычный состав высокопрочного чугуна: 2,7–3,8% С; 1,6–2,7% Si; 0,2–0,7% Mn;  $\leq 0,02\%$  S и  $\leq 0,1\%$  P. Из высокопрочных чугунов изготавливают прокатные валки, кузнечно-прессовое оборудование, корпуса паровых турбин, коленчатые валы и другие ответственные детали, работающие при высоких циклических нагрузках и в условиях изнашивания.



Рис. 1.111. Микроструктура высокопрочного чугуна на ферритоперлитной основе

**Чугун ковкий** – чугун, в котором графит имеет хлопьевидную форму. Их получают путем специального графитизирующего отжига (томления) отливок из белых доэвтектических чугунов. Отливки загружают в специальные ящики, засыпают песком или стальными стружками для защиты от окисления и производят нагрев и охлаждение по схеме (рис. 1.112, а). При температуре 950–1000 °С происходит графитизация эвтектического и избыточного цементита (превращение метастабильного цементита в стабильный графит и аустенит). При второй выдержке при температуре 720–740 °С графитизируется цементит образовавшегося перлита (иногда вместо выдержки проводят медленное охлаждение от 770 °С до 700 °С в течение 30 часов, при этом происходит кристаллизация по стабильной диаграмме с выделением углерода в свободном состоянии). В результате продолжительного отжига весь углерод выделяется в свободном состоянии. Обычный состав ковкого чугуна 2,4–2,8% С; 0,8–1,4% Si; ≤ 1% Mn; ≤ 0,1% S; ≤ 0,2% P. Структура – ферритная или ферритно-перлитная (рис. 1.112, б, в). Отсутствие литейных напряжений,

снятых во время отжига, благоприятная форма и изолированность графитных включений обуславливают высокие механические свойства ковких чугунов. Маркируют ковкие чугуны по ГОСТ 1215-79 буквами КЧ и двумя числами, первое из которых – минимальный предел прочности на растяжение в десятках мегапаскалей, а второе – относительное удлинение  $\delta$  в %. Например, чугун КЧ 45-6 имеет временное сопротивление при растяжении 450 МПа,  $\delta = 6\%$ , НВ = 2400 МПа и структуру – феррит + перлит. Из ковкого чугуна изготавливают детали высокой прочности, работающие в тяжелых условиях износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки, в т.ч. клапаны, муфты, картеры редукторов, коленчатые валы и др.

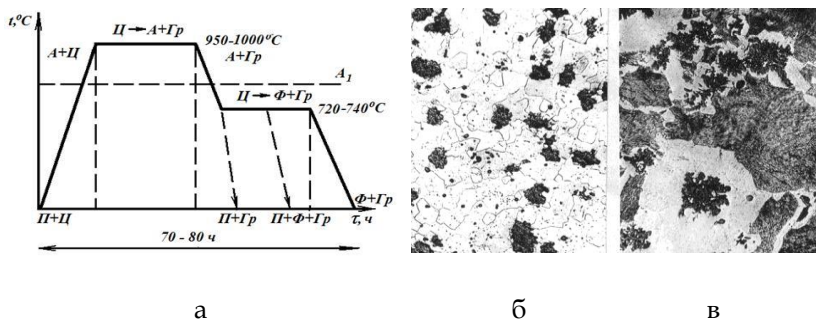


Рис. 1.112. Схема отжига белого чугуна на ковкий (а) и микроструктура ковкого чугуна (б, в): б – ферритная основа, в – ферритно-перлитная основа

**Чугун серый** – серыми называют чугуны, у которых весь углерод или часть его присутствует в свободном состоянии в форме графита. Термины: белый и серый чугуны связаны с видом излома, определяемым наличием либо

светлых кристаллов цементита, либо темных кристаллов графита. Графит имеет практически нулевую прочность и пластичность. Он обеспечивает пониженную твердость, хорошую обрабатываемость резанием, высокие антифрикционные свойства вследствие низкого коэффициента трения, а также способствует гашению вибрации и резонансных колебаний. Кроме того, графит способствует при охлаждении отливки некоторому увеличению ее объема, чем обеспечивается хорошее заполнение формы. Вместе с тем включения графита снижают прочность и пластичность, так как нарушают сплошность металлической основы сплава. В зависимости от формы графита различают обыкновенный серый чугун (графит пластинчатой формы), высокопрочный чугун (графит сферической формы) и ковкий чугун (графит хлопьевидной формы). Обыкновенный серый чугун – это сплав сложного состава. Химический состав серого чугуна колеблется в пределах: 3,2–3,8% С, 1–5% Si, 0,5–0,9% Mn, 0,2–0,4% P, до 0,12% S. Факторами, способствующими выделению углерода в свободном состоянии (графитизации), являются низкая скорость охлаждения и наличие в химическом составе чугуна графитизирующих элементов Si, Ni, Cu (препятствуют графитизации Mn, S, Cr, W). Практически, изменяя в чугуне содержание кремния при постоянном количестве марганца, получают различную степень графитизации. На рис. 1.113 показана микроструктура обыкновенного серого чугуна на феррито-перлитной основе. На свойства серого чугуна оказывают большое влияние вид графитовых включений, их размеры, характер металлической основы. От формы и количества

графита зависит прочность и пластичность чугуна (от 0,5% относительного удлинения при пластинчатой форме графита до 20% – при шаровидной форме). Вытянутые пластинки графита фактически являются трещинами в металлической основе и сильными концентраторами напряжений, на их концах при приложении нагрузки напряжения быстро достигают разрушающих величин.



Рис. 1.113. Микроструктура серого чугуна на феррито-перлитной основе

Твердость и износостойкость чугунов растет с увеличением перлита в металлической основе серого чугуна (различают чугуны с ферритной, феррито-перлитной и перлитной основой). Обыкновенный серый чугун является одним из важнейших литейных машиностроительных материалов и характеризуется высокими литейными и удовлетворительными механическими свойствами, хорошей обрабатываемостью резанием, высокой износостойкостью, нечувствительностью к поверхностным дефектам. Согласно ГОСТ 1412-85 установлены марки отливок из серого чугуна. Серый чугун маркируется буквами СЧ и двузначным числом, показывающим минимальное значение предела

прочности на растяжение. Например, у чугуна марки СЧ25 временное сопротивление при растяжении  $\sigma_b = 250$  МПа; твердость НВ = 1800–2500 МПа и структура металлической основы – феррит + перлит. Ферритные и феррито-перлитные серые чугуны СЧ10, СЧ15, СЧ18 используют для слабо- и средненагруженных деталей: крышки, фланцы, маховики, корпуса редукторов и др. Перлитные серые чугуны СЧ21, СЧ25 применяют для деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках: блоки цилиндров, картеры двигателей, поршни цилиндров, станины станков и пр. Перлитные модифицированные серые чугуны СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45 обладают наиболее высокими механическими свойствами. Их применяют при высоких нагрузках: зубчатые колеса, гильзы двигателей, шпиндели, распределительные валы и пр. Структура модифицированных чугунов – перлитная основа с небольшим количеством изолированных пластинок графита.

## Э

**Эвтектика** [eutectic] – смесь двух или более твердых фаз, одновременно кристаллизующихся из расплава, характеризующегося постоянной температурой кристаллизации и составом. В зависимости от количества фаз различаются двухфазные, трёхфазные, четырёхфазные, многофазные эвтектики (См. Диаграмма состояния). По характеру микроструктуры различают следующие виды эвтектики (рис. 1.114): пластинчатая, зернистая, скелетная, игольчатая и другие формы эвтектики: стержневая, сферолитная.

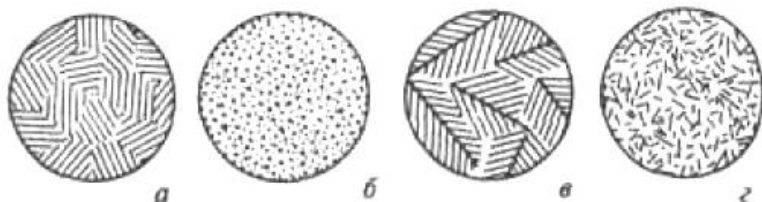


Рис. 1.114. Виды эвтектики: а – пластинчатая, б – зернистая, в – скелетная, г – игольчатая

Если эвтектика состоит из регулярно расположенных фаз, ее называют **нормальной**. Эвтектика, для которой характерно нерегулярное расположение фаз, называется **аномальной**. Эвтектическая кристаллизация происходит в форме эвтектических колоний, вырастающих из одного центра. Эвтектика – это не механическая смесь фаз. В пределах одной колонии каждая из фаз, составляющих эвтектику, в пространстве является непрерывной. Количество фаз в двухфазных эвтектиках определяется правилом рычага, а в трёхфазных – правилом центра тяжести треугольника и может изменяться в довольно широких пределах. Так, например, в эвтектике  $\alpha(\text{Al}) + \text{SiAl}_2$  системы Al-Si содержание фаз примерно одинаково, а в системе Cu-Vi эвтектика представлена почти чистым Vi (99,85% Vi и 0,15% Si). Если эвтектической кристаллизации предшествует выделение первичных кристаллов и жидкости эвтектического состава остается мало, то в структуре такого сплава не наблюдается типичного эвтектического строения. Одна из фаз эвтектики кристаллизуется на поверхности первичных кристаллов той же фазы, сливаясь с ними,

а другая фаза, которая должна входить в эвтектическую колонию, выделяется в виде прослоек между первичными кристаллами. В результате эвтектика структурно вырождается в одну фазу и поэтому называется вырождаемой. Сплавы эвтектического типа широко применяются в качестве литейных сплавов, припоев и др.

**Эльбор** – синтетический материал на основе кубического нитрида бора, обладающий высокой твердостью, теплостойкостью, высоким модулем упругости, низким коэффициентом линейного расширения, химической устойчивостью к кислотам, щелочам, инертностью к железу.

**Энергия системы свободная** – составляющая внутренней энергии, которая в изотермических условиях может быть превращена в работу. Внутренняя энергия складывается из энергии движения молекул, атомов, электронов, внутриядерной энергии, энергии упругих искажений кристаллической решетки и других видов энергии. Движущие силы процессов фазовых превращений обусловлены стремлением системы к состоянию с наименьшим запасом свободной энергии.

## Я

**Ячейка элементарная** – наименьший объем кристалла, дающий представление об атомно-кристаллической структуре металла. Элементарная ячейка кристалла, часть кристаллической решетки (см. **Кристаллическая решетка**), параллельные переносы которой в трех измерениях (трансляции) позволяют построить всю кристаллическую



решетку. Выбор элементарной ячейки кристалла производится различными способами. За ребра элементарной ячейки, т.е. за элементарные трансляции, принимают те направления в пространственной решетке, в которых период трансляции наименьший и которые наилучшим образом отражают симметрию решетки. Если по соображениям симметрии это возможно, то предпочтение отдается трансляциям взаимно перпендикулярным и (или) таким, чтобы периоды элементарных трансляций были равны друг другу.

## Глава 2

### ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Основой производства наиболее распространенных конструкционных материалов – железоуглеродистых сплавов, а именно – сталей, является металлургический цикл, представляющий собой комплекс различных производств: доменного и сталеплавильного, литейного и обработки давлением. Спецификой металлургического комплекса являются несопоставимый с другими отраслями масштаб производства и сложность технологического цикла. Для производства многих видов продукции необходимо 15–18 переделов, начиная с добычи руды и других видов сырья.

Основа современной металлургии – двухступенчатая схема, включающая доменную выплавку чугуна и передела его в сталь. До 80% выплавленного чугуна идет на переработку в сталь, и такой чугун называют передельным; 15–20% – литейный чугун, который идет для производства фасонных отливок. При выплавке чугуна используют железные руды, топливо и флюсы. Область науки и техники, охватывающая процессы получения металлов

из руд или других материалов, а также процессы, связанные с изменением химического состава, структуры и свойств металлических сплавов – это металлургия (от др. греч. *μεταλλουργέω* – добываю руду, обрабатываю металлы). В первоначальном, узком значении металлургия – искусство извлечения металлов из руд.

К металлургии относятся процессы добычи и обработки руд с целью их подготовки к извлечению металлов, процессы извлечения металлов из руд и других материалов, очистка металлов от нежелательных примесей и другие процессы – литья, обработки металлов давлением.

Исторически сложилось так, что металлургическое производство подразделяют на *черную металлургию* (металлургию железа и его сплавов) и *цветную металлургию* (металлургию всех остальных металлов).

*Черная металлургия* – основа развития большинства отраслей народного хозяйства. Несмотря на бурный рост продукции химической промышленности и цветной металлургии, черные металлы и сплавы на их основе остаются главным конструкционным материалом в машиностроении.

Полный производственный цикл в черной металлургии включает в себя следующие основные этапы:

- добыча руды, ее обогащение и переработка в агломерат или окатыши (рудоуправления и горно-обогажительные комбинаты – ГОКи);
- добыча коксующихся углей и их переработка в кокс;
- производство ферросплавов (как элемента для легирования или раскисления металла);
- производство передельного чугуна;

- выплавка стали;
- производство поковок и проката – листов, полос, труб и другой продукции.

В черной металлургии в зависимости от *используемого сырья* выделяют:

- доменное производство (сырьем служит обогащенная до агломерата или окатышей железная руда и кокс) передельного чугуна, из которого затем выплавляют сталь;

- бескоксую технологию (технология прямого восстановления), когда в установке металлизации идет прямое восстановление обогащенной железной руды газом (direct reduction iron – DRI) до металлизированного продукта, годного для производства электростали;

- технологию, использующую лом. В настоящее время в черной металлургии мира примерно 2/5 железосодержащего сырья составляет стальной лом.

В первых двух случаях сырьем для выплавки стали служит железная руда. В последние десятилетия в мире преобладает тенденция увеличения доли стали, выплавляемой с использованием технологии прямого восстановления – процесса получения железа и стали непосредственно из рудных материалов, минуя стадию выплавки чугуна в доменных печах.

## А

**Агломерация** (англ. agglomeration или aggregation) – в металлургии, термический процесс окускования мелких материалов (руды, рудных концентратов, содержащих металлы

отходов и др.), являющихся составными частями металлургической шихты, путем их спекания с целью придания формы и свойств (химического состава, структуры), необходимых для плавки. После добычи большие куски руды измельчаются до такой степени, когда каждая частица является либо ценным концентратом, либо отходом.

Пространственная группировка и адгезия дисперсных частиц, в результате которой образуются более крупные по размерам «вторичные» частицы, составляет сущность процесса агломерации. Агломерация происходит путем связывания первичных частиц за счет слабых (приводящих к образованию агрегатов) или более сильных (приводящих к образованию агломератов) взаимодействий; при этом первичные частицы в значительной степени сохраняют свою форму и размер. Это отличает агломерацию от перекристаллизации, когда рост больших частиц осуществляется за счет поглощения более мелких. Для обозначения процессов пространственной группировки также может использоваться термин «агрегация».

Агломерация включает: подготовку шихты (дозировка отдельных компонентов, смешивание, увлажнение и окомкование), спекание подготовленной шихты на агломерационных машинах, обработку горячего спека (дробление, рассев с удалением кусков до 5–10 мм, охлаждение до 100 °С, сортировка). Более 95% агломерата используется в чёрной металлургии; в цветной металлургии агломерат применяется в алюминиевом, никелевом и свинцовом производствах.

Агломерация занимает важное место в общей схеме *технологической схемы* переработки железной руды перед плавкой (рис. 2.1).

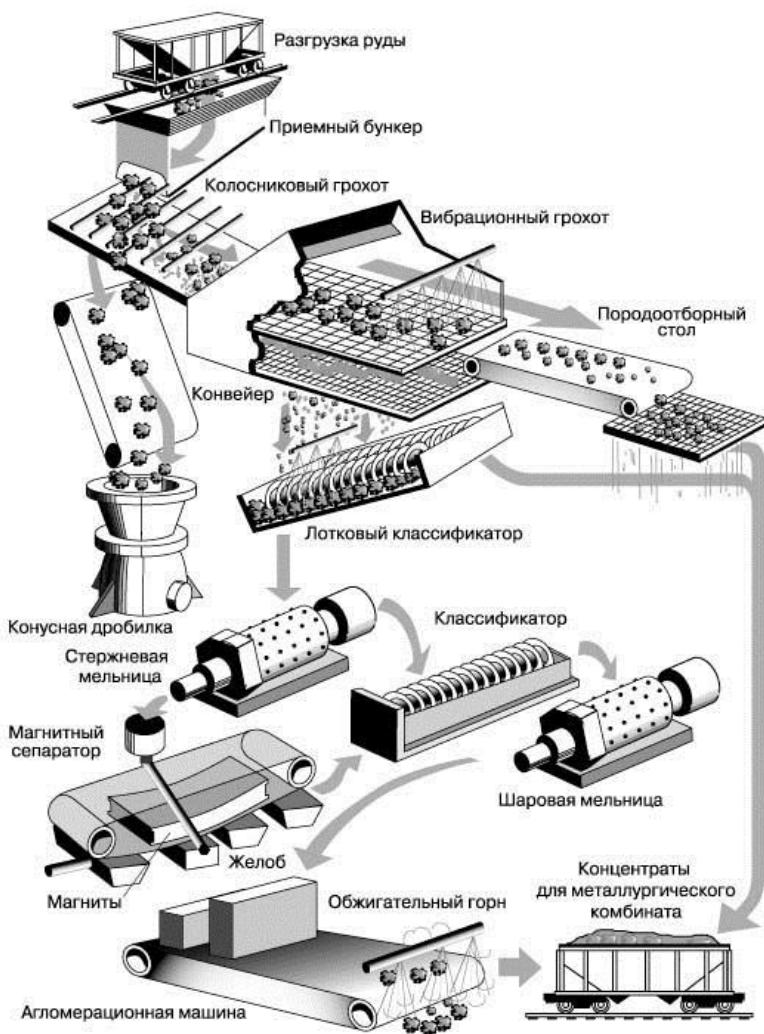


Рис. 2.1. Технологическая схема переработка железной руды перед плавкой

## Б

**Безкоксовая технология** (direct reduction iron – DRI) – технология внедоменного прямого восстановления, когда в установке металлзации идет прямое восстановление обогащенной железной руды газом до металлизированного продукта, годного для производства электростали. Под процессами прямого получения железа понимают такие химические, электрохимические или химико-термические процессы, которые дают возможность непосредственно из руды, минуя доменную печь, получать металлическое железо в виде губки, порошка или жидкого металла. Процессы внедоменного получения металла разделены на три больших класса: твердофазные, жидкофазные и твердожидкофазные. Основным способом процесса твердофазного восстановления оксида железа, пригодным для выплавки стали в электродуговой печи и наиболее промышленно-освоенным в мире и нашей стране, является технология металлзации «Мидрекс» (рис. 2.2).

С середины 80-х гг. XX в. стал применяться в эксплуатации в промышленных масштабах твердо-жидкофазный процесс «Корекс» (Германия) восстановления оксида железа, при котором восстановление железа из руды происходит в твердо-жидкофазного фазе: 90% твердофазного восстановления и не более 10% жидкофазного восстановления (рис. 2.3). При этом реализуется плавно-восстановительный процесс получения чугуна из руды и угля с низкими затратами и минимальными выбросами в окружающую среду (рис. 2.3).

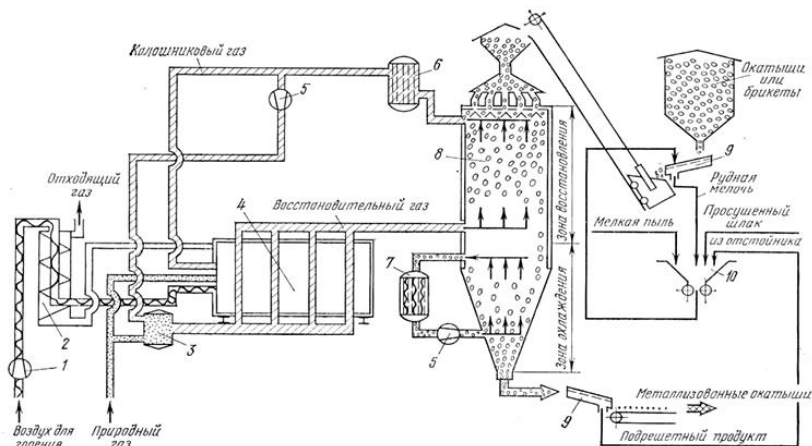


Рис. 2.2. Технологическая схема процесса «Мидрекс»:  
 1 – воздуходувка; 2 – теплообменник; 3 – смеситель газов;  
 4 – конвертер; 5 – компрессор; 6, 7 – скруббер  
 для колошникового газа; 8 – шахтная печь;  
 9 – вибрационный грохот; 10 – брикетировочный пресс

В отличие от твердофазных и комбинированных твердо-жидкофазных процессов восстановления железа западных разработок в конце 70-х годов XX века в Московском институте стали и сплавов (МИСиС) было начато создание полностью жидкофазного процесса, в котором восстановление с использованием энергетических углей неподготовленных железорудных материалов целиком осуществляется одноступенчатым способом в одном агрегате прямоугольного сечения (рис. 2.4), работающем с небольшим разрежением в рабочем пространстве, исключая выбросы газов в атмосферу.



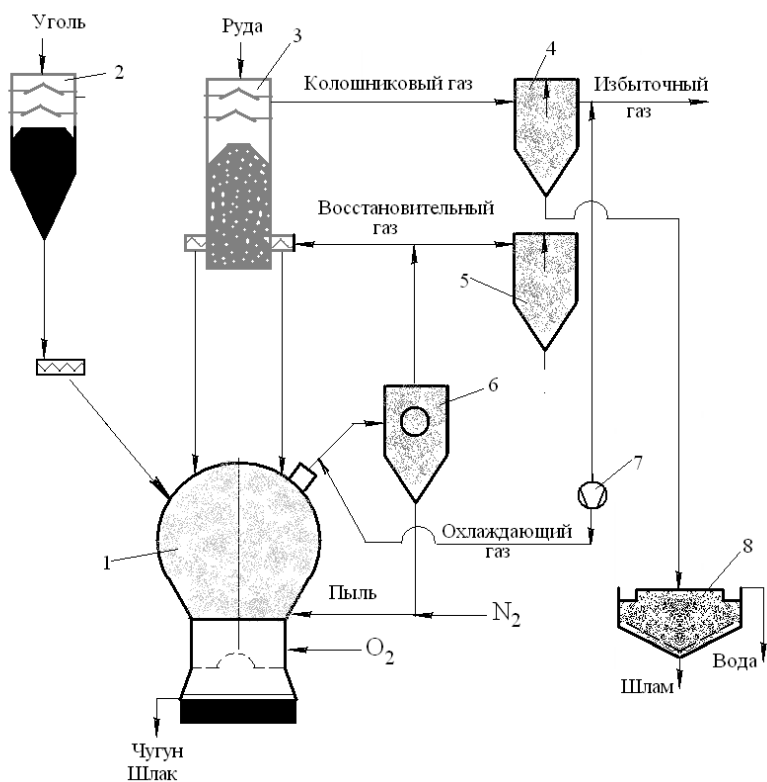


Рис. 2.3. Технологическая схема процесса «Корекс»:  
 1 – реактор-газификатор; 2 – угольный бункер; 3 – шахтная печь;  
 4 – скруббер колошникового газа; 5 – водяной холодильник;  
 6 – циклон; 7 – нагнетатель; 8 – сгуститель

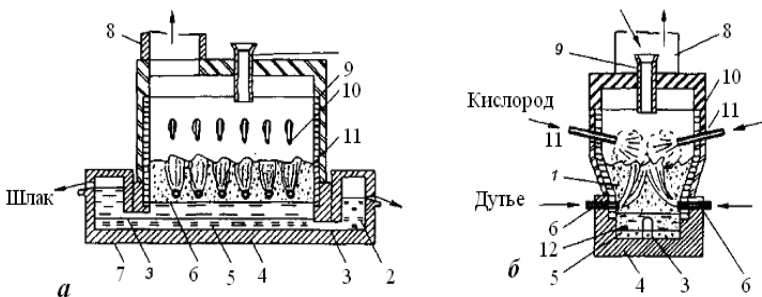


Рис. 2.4. Схема плавильного агрегата процесса «Ромелт»:  
 а) продольный разрез; б) поперечный разрез;  
 1 – барботируемый слой шлака; 2 – металлический сифон;  
 3 – шлаковый сифон (отстойник); 4 – горн с подиной;  
 5 – перегород; 6 – загрузочная воронка; 7 – дымоотводящий патрубков; 8 – фурмы нижнего ряда (барботажные); 9 – фурмы верхнего ряда (для дожигания); 10 – слой спокойного шлака; 11 – слой металла; 12 – водоохлаждаемые кессоны

Исходным железорудным сырьем в процессе «Ромелт» являются неподготовленные железорудные материалы, в том числе пылеобразные, с широким диапазоном содержания железа.

**Брикетирование** – процесс переработки материала в куски геометрически правильной и однообразной в каждом случае формы, практически одинаковой массы – брикеты (франц. *briquette*). При брикетировании создаются дополнительные сырьевые ресурсы из мелких материалов (преимущественно ископаемых топлив и руд), использование которых малоэффективно или затруднительно, а также утилизируются отходы (пыль, шлаки, металлическая стружка и т.п.). Целесообразность брикетирования

в каждом случае обосновывается экономически. Брикетирование применяется в качестве составной части новых методов коксования для получения металлургического кокса из газовых и слабоспекающихся углей. Тощие угли, антрацит, старые бурые угли, полукоксы брикетируются со связующими (каменно-угольный пек в твёрдом или жидкорасплавленном виде, нефтяной битум и др.). Брикетирование имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами окучивания, поэтому при дальнейшем развитии вполне может заменить агломерационное производство. Брикетные фабрики по сравнению с агломерационными являются более компактными и высокопроизводительными, практически не нуждаются в энергетических ресурсах и не загрязняют окружающую среду. Брикеты в отличие от агломерата: имеют правильную одинаковую форму и более высокий удельный вес; в меньшем объеме содержат больше металла; обладают более высокой прочностью и лучшей транспортабельностью; экономически более выгодны (их себестоимость на 20–28% ниже). Брикетирование – один из универсальных способов подготовки железосодержащих отходов.

**Брикеты** – прессованные конгломераты – куски нужного размера и формы различных отходов производств: шламы газоочисток, пыль аспирационных установок, коксовая мелочь, отсева флюсующих компонентов (известняка, доломита), прокатная окалина, стальная и чугунная стружка, а также первородные мелкофракционные и тонкодисперсные железные руды. Брикеты используются в качестве шихты для доменного и сталеплавильного производства.

В доменном переделе они позволяют уменьшать расход железорудного сырья и кокса. В сталеплавильном – дают возможность организовать рециклинг цинксодержащих отходов, с последующим накоплением цинка и продажей его предприятиям цветной металлургии. Применение брикетов и гранул позволяет уменьшать расход железорудного сырья и доменного кокса до 7% при выплавке 1 т чугуна. Кроме того, брикетирование позволяет уменьшить газопылевые выбросы, образующиеся при традиционных методах подготовки железорудного сырья к плавке. И это при том, что себестоимость брикетов, используемых в сталеплавильном производстве, на 20–30% ниже по сравнению с агломератом или окатышами с обжигом. Если же использовать брикетировочное оборудование, непосредственно в зоне переработки отходов, то рентабельность производства брикетов повышается на 200%.

## В

**Возгонка** (англ. Sublimation) – переход вещества из конденсированного состояния в газообразное, сопровождаемый изменением свободной энергии, значительную долю которой составляет теплота возгонки или сублимации. Возгонка элементов, обладающих высокими значениями давления насыщенного пара, происходит во многих агрегатах черной и цветной металлургии. При производстве чугуна в доменной печи происходит возгонка Pb и Zn; оксидов Si и S; Si при конвертировании штейнов и переплаве медьсодержащих отходов. При обжиге свинцовых

концентратов осуществляется возгонка оксидов и сульфидов Pb, Cd, Sb и Sn. Процессы рафинирования Zn, получения Hg и Mg, сопровождаются В. При нагреве в вакуумной индукционной печи происходит возгонка летучих компонентов шихты, таких как Cd, Te, Pb, Se, Zn, Mg, Al, Ca, Sb, Mn, Cr. Аналогичные процессы происходят в вакуумной дуговой печи при нагреве электродов, прессованных из порошка и стружки.

## Г

**Гранулирование, грануляция** (англ. Granulation) – процесс получения гранул диспергированием расплава или укрупнением отдельных твердых частиц; различают мокрую, полусухую и сухую грануляцию. Грануляция является наиболее распространенным способом переработки металлургических шлаков. Сущность грануляции заключается в резком охлаждении шлаковых расплавов водой, паром или воздухом и образовании в результате этого стекловидных зерен размером до 10 мм. В большинстве стран гранулируют в основном доменные шлаки. Основная масса гранулированных доменных шлаков поступает в производство шлакопортландцемента. Их применяют также для получения местных бесклинкерных вяжущих, шлакощелочных бетонов, минеральной ваты, шлакоситалловых изделий, в качестве заполнителя в цементных и асфальтовых бетонах.

**Грануляция мокрая** – заключается в резком охлаждении расплавленного шлака обычно в железобетонных резервуарах объемом до 800 м<sup>3</sup>, наполненных водой, и диспергировании его образующимся паром, а также газами,

выделяющимися из расплава. Установки мокрой грануляции несложны, имеют высокую производительность, а выполнение технологического процесса требует небольших затрат труда. Однако шлаки мокрой грануляции имеют высокую влажность (10–30%), что приводит к смерзанию их в зимнее время, повышению стоимости транспортирования, вызывает необходимость значительных затрат тепла на их сушку. Более эффективна полусухая грануляция.

**Грануляция полусухая** – основана на комбинированном охлаждении шлаков: водой, а затем воздухом. Полусухая грануляция прогрессивна, поскольку расход воды меньше (до 2 м<sup>3</sup>/т гранулята), влажность продукта ниже (7–10%). А производительность больше. В настоящее время наибольшее практическое применение имеют гидрожелобной способ (рис. 2.5)

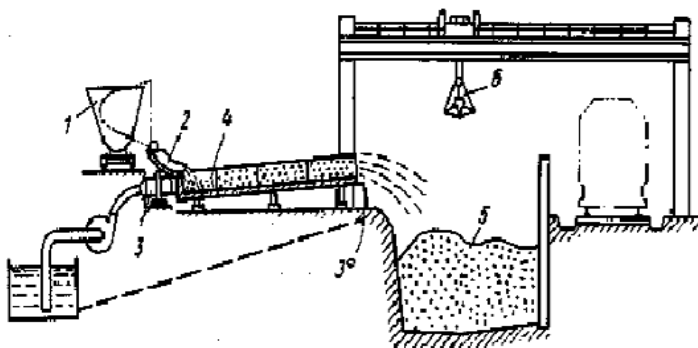


Рис. 2.5. Технологическая схема грануляции шлака на гидрожелобных установках: 1 – шлаковозный ковш; 2 – шлакоприемная ванна; 3 – гидронасадка; 4 – желоб; 5 – гранулированный шлак

Общими недостатками мокрых и полусухих способов грануляции являются несовершенство систем оборотного водоснабжения, загрязнение окружающей среды, получение гранулированного шлака повышенной влажности, потери физического тепла шлака. При мокром и полусухом способе грануляции физическое тепло шлака в основном расходуется на испарение воды и безвозвратно теряется.

**Грануляция сухая (припечная)** – дробление расплава на гранулы и их транспортировка осуществляется потоком дутья воздуха или азота. В полете капельки расплава охлаждаются. Для более интенсивного охлаждения подается незначительное количество воды.

## Д

**Дегидратация** – процесс обезвоживания материалов, преимущественно продуктов обогащения руды в бункерах. Обезвоживание основано на процессе дренирования воды через слой обезвоживаемого материала и перфорированный шибер разгрузочного отверстия. В бункерах обезвоживают обычно среднезернистые продукты (80–10 мм), из которых предварительно удалена основная часть воды на ситах, грохотах или элеваторах.

**Добывающая металлургия** – заключается в извлечении ценных металлов из руды и переплавке извлечённого сырья в чистый металл. Для того, чтобы превратить оксид или сульфид металла в чистый металл, руда должна быть отделена физическим, химическим или электролитическим

способом, к которым относятся следующие технологические процессы: обогащение, агломерация, получение концентратов и др.

**Доменное производство** – технологический процесс выплавки чугуна с использованием железной руды, топлива и флюсов (рис. 2.6). Железные руды содержат железо в различных соединениях: в виде оксидов  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 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). В качестве топлива в производстве чугуна главным образом используют кокс, который при сгорании не только поддерживает температуру, но и создает условия для восстановления железа из руды. Также применяют природный газ, мазут, пылевидное топливо (угольная пыль). В доменном производстве используют флюсы – материалы, которые загружают в плавильную печь для образования легкоплавких соединений с пустой породой, золой, концентратом. Выбор флюсов определяется составом пустой породой руды. Если пустая порода представляет из себя песчано-глинистую, то в качестве флюса используют  $\text{CaCO}_3$  или даломит. В случае известковой пустой породы в качестве флюса применяют кварцит и другие песчаные составы, главным образом, на основе  $\text{SiO}_2$ . Флюсы применяют для наведения шлака на поверхности расплавленного металла и удаления серы.



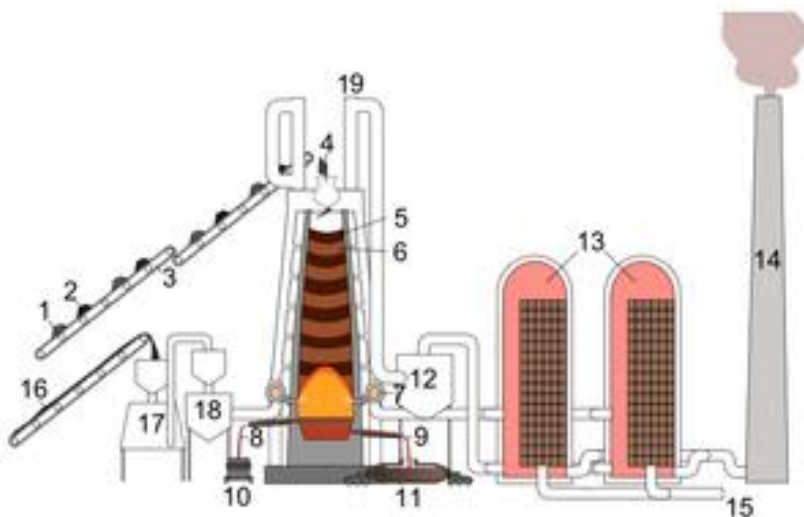
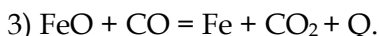
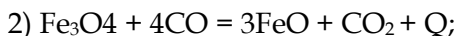
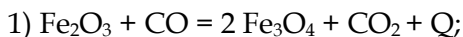


Рис. 2.6. Схема доменного производства:

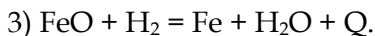
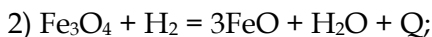
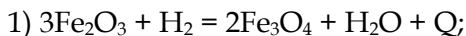
1 – железная руда + известняк; 2 – кокс; 3 – лента конвейера; 4 – колошник с аппаратом, предотвращающим уход доменного газа в атмосферу; 5 – слой кокса; 6 – слои известняка, оксида железа, руды; 7 – горячий воздух (с температурой ~ 1200 °С); 8 – шлак; 9 – жидкий передельный чугун; 10 – шлаковый ковш; 11 – чугуновоз; 12 – циклон для очистки доменного газа от пыли перед сжиганием его в регенераторах 13; 13 – регенераторы (кауперы); 14 – дымовая труба; 15 – подача воздуха в регенераторы (кауперы); 16 – порошок угля; 17 – коксовая печь; 18 – резервуар для кокса; 19 – газо-отвод для горячего колошникового газа

При доменной плавке происходит избирательное восстановление железа из руды, а также восстановление фосфора, марганца и кремния, науглероживание железа и частичное насыщение его серой, т.е. образуется чугун – сплав железа с углеродом, кремнием, марганцем, серой и фосфором. Удаляется влага, из топлива выделяются летучие вещества, происходит основной процесс – восстановление

окислов железа, который осуществляется в несколько стадий – от высших окислов к низшим и далее к чистому металлу:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ . Косвенное восстановление происходит в несколько стадий по реакциям:

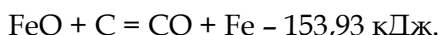
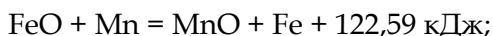
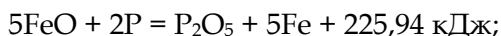
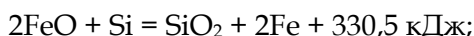


В процесс косвенного восстановления определенный вклад вносит водород ( $\text{H}_2$ ) по аналогичным реакциям:



Прямое восстановление происходит в зоне распара печи при температуре 950–1000 °С по реакции  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2 - \text{Q}$ . В прямом восстановлении участвует только низший оксид  $\text{FeO}$ , который единственно присутствует в шихте при этих температурах. Наряду с реакциями восстановления происходит его науглероживание при температурах более 500 °С за счет его взаимодействия с оксидом углерода, коксом и сажистым углеродом по реакции:  $3\text{Fe} + 2\text{CO} = \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2 + \text{Q}$ . Передел чугуна в сталь производят в конверторах, мартеновских и электрических печах. При этом происходит избирательное окисление примесей чугуна, которые переходят в шлак и газы. Железо окисляется в первую очередь при взаимодействии чугуна с кислородом в сталеплавильных печах:  $\text{Fe} + 1/2\text{O}_2 = \text{FeO} + 263,68 \text{ кДж}$ . Одновременно с железом окисляются Si, P, Mn, C и др. Образующийся оксид железа при высоких

температурах отдаёт свой кислород более активным примесям в чугуне, окисляя их:



**Доменный процесс** – все физико-химические процессы в доменной печи (рис. 2.7) определяются существующими на разных уровнях температурными режимами.

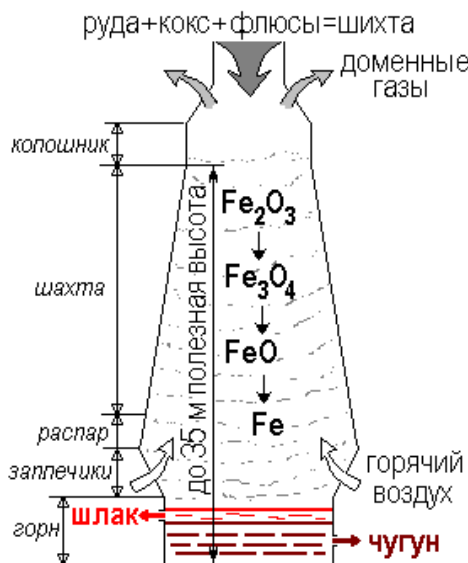
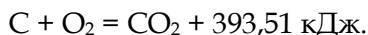


Рис. 2.7. Схема доменной печи

При загрузке через конус сырые материалы попадают в область низких температур 200–300 °С и по мере опускания температура шихты растет, достигая порядка 1900–2100 °С в нижней части распара, а потом постепенно

снижается до температуры 1450 °С в горне. Вблизи фурм углерод кокса взаимодействует с кислородом и сгорает с образованием двуокси углерода CO<sub>2</sub>:



При высоких температурах и в присутствии твердого углерода кокса двуокись углерода CO<sub>2</sub> неустойчива и частично переходит в окись углерода CO:



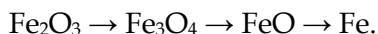
Одновременно, на некотором расстоянии от фурм, идет реакция неполного горения углерода кокса:



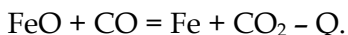
В результате горения кокса в доменной печи выделяется теплота и образуется газовый поток, содержащий CO и CO<sub>2</sub>, и другие газы. При этом в печи немного выше уровня фурм температура становится более 2000 °С. Горячие газы поднимаются вверх, отдают свою теплоту шихтовым материалам и нагревают их, охлаждаясь при этом до 300–400 °С у колошника. В зоне печи, где температура газов достигает 450–700 °С, часть окиси углерода разлагается с образованием сажистого углерода, оседающего на шихтовых материалах: 2CO = CO<sub>2</sub> + C. Остальная часть газа (CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> – колошниковый газ) отводится из печи по трубам и после очистки используется как топливо для воздухонагревателей.

Шихтовые материалы (агломерат, кокс) опускаются вниз навстречу потоку газов и нагреваются. В результате в них: удаляется влага, из топлива выделяются летучие вещества, происходит основной процесс – восстановление

окислов железа осуществляется в несколько стадий – от высших окислов к низшим и далее к чистому металлу:



В восстановлении железа участвуют газы (CO, H<sub>2</sub>) и твердый углерод кокса. Восстановление железа твердым углеродом называют прямым, а газами – **косвенным** (см. **Доменное производство**). Реакции прямого восстановления эндотермические, т.е. сопровождаются поглощением тепла и протекают в нижней части печи. Реакции косвенного восстановления экзотермические, т.е. сопровождаются выделением тепла и происходят, главным образом, в верхних горизонтах печи. Реакции косвенного восстановления начинаются при температурах 400–500 °С (первая реакция, см. **Доменное производство**) и заканчиваются при 900–950 °С (третья реакция, см. **Доменное производство**). Косвенное восстановление имеет большое значение, т.к. за счет него восстанавливается 60–80% всего железа, а остальная часть восстанавливается твердым углеродом кокса (прямое восстановление). Прямое восстановление происходит в зоне распара печи при температуре 950–1000 °С по реакции:



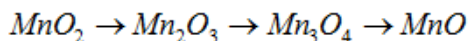
В прямом восстановлении участвует только низший оксид FeO, который единственно присутствует в шихте при этих температурах.

Восстановление железа заканчивается при 1300–1400 °С в распаре печи. При этих температурах (T<sub>пл.</sub>=1539 °С) восстановленное железо находится в твердом состоянии в виде пористой губчатой массы (кричное железо). Наряду с реакциями восстановления происходит его науглероживание

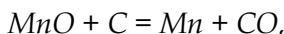
при температурах более 500 °С за счет его взаимодействия с оксидом углерода, коксом и сажистым углеродом по реакции:



Продуктом науглероживания является карбид железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , который хорошо растворяется в твердом железе и постепенно образует сплав железа с углеродом. При концентрации углерода в сплаве  $\sim 4,3$  мас. % температура плавления уменьшается до 1147 °С. В результате в нижней части печи на уровне распара и заплечиков начинается плавление. Жидкий расплав – чугуна стекает вниз, омывает куски раскаленного кокса и дополнительно интенсивно науглероживается. В нем также растворяются марганец, кремний, фосфор (из руды), а также сера (из кокса), восстановленные из шихты одновременно с восстановлением и науглероживанием железа. Высшие и средние окислы марганца восстанавливаются до низшего ступенчато окисью углерода по схеме:



Наиболее трудно восстановимый низший окисел марганца (закись) восстанавливается твердым углеродом по реакции:



которая сопровождается поглощением тепла и протекает при температурах выше 1100–1200 °С. Это определяет режим работы печи при вылавке чугуна марганцовистых марок. Печь должна работать при повышенном расходе кокса и возможно более высоком нагреве дутья (до 1200 °С и выше; в перспективе даже до 1400 °С). Кремнезем восстанавливается только твердым углеродом.

Конечный состав чугуна устанавливается в горне. При этом большое значение имеют состав, свойства и количество шлага. Восстановление других элементов. В доменную печь с шихтовыми материалами попадают Mn, Si, S, P, As и др. элементы в виде различных химических соединений. Эти элементы частично или полностью восстанавливаются и входят в состав чугуна, улучшая или ухудшая его свойства. Эти примеси считают постоянными и подразделяют их на вредные (S, P, Pb, As) и полезные (Mn, Si). Mn и Si частично восстанавливаются и переходят в состав чугуна. Другая часть в виде MnO и SiO<sub>2</sub> входит в состав шлага. P полностью восстанавливается и входит в состав чугуна. S образует летучие соединения (SO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>S) и в значительной части удаляется с газом при нагреве шихты. Определенная ее часть взаимодействует с известью CaO и переходит в шлак. Большая часть (до 50%) серы взаимодействует с железом и входит в состав чугуна. Сера – наиболее вредная примесь в чугуне и стали, поэтому разрабатывают различные способы ее удаления из металла как доменные, так и внедоменные. В состав чугуна могут попасть и другие примеси, если они содержатся в руде (никель, хром, ванадий). Чугун – основной продукт доменной плавки. В доменных печах получают чугун различного химического состава в зависимости от его назначения. Передельные чугуны (ГОСТ 805-69) М1, М2, М3; Б1, Б2; фосфористые чугуны МФ1, МФ2, МФ3; высококачественные ПВК1, ПВК2, ПВК3. Передельный чугун выплавляют для передела его в сталь в конвертерах или мартеновских печах. Литейные чугуны (ГОСТ 4832-58) ЛК0, ЛК1,

..., ЛК5. Литейный чугун используют на машиностроительных заводах при производстве фасонных отливок.

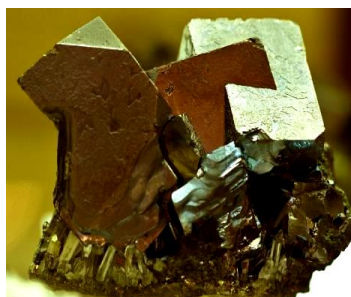
## Ж

**Железные руды** – горные породы, переработка которых экономически выгодна на данной стадии развития техники. Железные руды не являются мономинеральными образованиями, они состоят из устойчивых сочетаний минералов и относятся поэтому к группе горных пород. Слагающие железную руду минералы делятся на две группы. К первой группе относят так называемые *рудные минералы*, содержащие главную массу всего железа руды. Остальные минералогические составляющие, совсем не содержащие железа или содержащие его в незначительном количестве, называются пустой породой. Железные руды классифицируют по виду рудного минерала и по характеру пустой породы. Различают магнетитовые, мартитовые, гематитовые, сидеритовые, шамозитовые, тюрингитовые руды, бурые железняки. Основу многих крупных железорудных месторождений составляют магнетитовые руды (магнитные железняки  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Различают богатые (св. 50% железа), рядовые (25–50%) и бедные (до 25%) железные руды. По химическому составу железные руды представляют собой окиси, гидраты окисей и углекислые соли закиси железа, встречаются в природе в виде разнообразных рудных минералов, из которых главнейшие: магнитный железняк или магнетит, железный блеск и плотная его разновидность красный железняк, бурый железняк, к которому относятся



болотные и озерные руды, наконец, шпатоватый железняк в его разновидность сферосидерит.

**Железный блеск или гематит, красный железняк** (рис. 2.9) – представляет безводную окись железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , соответствуя 70% железа и 30% кислорода). Различные видоизменения красного железняка составляют важнейшие железные руды, из которых получается огромное количество железа. В природе встречается в видоизменениях, называемых обыкновенно железным блеском и красным железняком.



а



б

Рис. 2.8. Железный блеск (а) и красный железняк (б)

**Железняк бурый** (англ. limonite, brown (iron) ore, bog iron ore) – осадочная горная порода, природное скопление гидроксидов железа. Синоним: лимонит (с др.-греч. λειμών – луг; по нахождению в сырых местах). Общая химическая формула:  $n\text{Fe}_2\text{O}_3 + n\text{H}_2\text{O}$  (начиная от наиболее бедного гидратной водой гидрогематита и кончая лимонитом, рис. 2.8), что соответствует 59–89% металлического железа.



а



б

Рис. 2.9. Бурый железняк (а), лимонит (б)

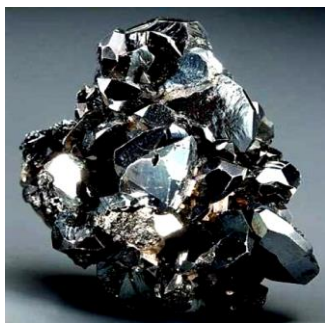
Бурый железняк содержит примеси – глину, кремнезем и т.п., часто вредные примеси, как, например, фосфор, марганец, серу. Удельный вес колеблется между 3,4 и 4,4, твердость – между 4,5 и 5,5. Очень часто бурый железняк образуется за счет окисления шпатового железняка, сферосидерита, серного колчедана, в сообществе с которыми он часто залегает; во многих случаях он является псевдоморфизирующим и окаменяющим веществом. Наиболее распространены лимонит и гетит.

К бурым железнякам по химическому составу приближаются болотные и озерные руды, представляющие отчасти химический, отчасти механический осадок водной окиси и кремнекислой закиси железа, песка и глины в виде горошин, лепешек или ноздреватых пористых масс в болотах, озерах и других стоячих водах. Обыкновенно содержат 35–45% железа. Бурые железняки, по удобству добытия и своей легкоплавкости, с самых давних времен

служили предметом разработки, но получаемое из них железо обыкновенно невысокого качества.

**Железняк магнитный, магнетит** – один из лучших и наиболее разрабатываемых железных руд (рис. 2.10, а), встречается пластами, жилами и гнездами в гнейсах и кристаллических сланцах архейской группы, а также образует иногда целые горы в области развития массивных изверженных горных пород.

**Железняк шпатоватый** – по составу углекислая закись железа (49% металлического железа), встречается в виде пластов и залежей в гнейсах, кристаллических сланцах, реже в более новых осадочных образованиях, где часто сопровождается медным колчеданом и свинцовым блеском. Синонимы – железный шпат, сидерит. Разновидность шпатового железняка – сферосидерит (рис. 2.10, б).



а



б

Рис. 2.10. Магнитный железняк  $\text{FeO-Fe}_3\text{O}_4$  (а) и сферосидерит (б) [2]

По минералогическому составу руды этого типа представляют плотный сферосидерит, реже тонкокристаллический шпатоватый железняк, с глиной и углистым веществом.

### З

**Закись железа** (ferrous oxide, оксид железа (II), FeO) – получают восстановлением из окиси железа (через закись-окись) или окислением металлического железа. Технический синоним – вюстит (англ. wüstite) – минерал, монооксид железа, характеризуемый небольшой дефектностью ГЦК решётки, которая описывается формулой  $Fe_{1-x}O$ . Представляет собой нестехиометрическое соединение с недостатком атомов железа. Назван в честь немецкого проф. Ф. Вюста, исследовавшего состав и свойства этой фазы.

### Л

**Литейное производство** – отрасль машиностроения, занимающаяся изготовлением фасонных деталей и заготовок путём заливки расплавленного металла в форму, полость которой имеет конфигурацию требуемой детали. В процессе литья, при охлаждении металл в форме затвердевает и получается отливка – готовая деталь или заготовка, которая при необходимости (повышение точности размеров и снижения шероховатости поверхности) подвергается последующей механической обработке. В связи с этим перед литейным производством стоит задача получения отливок, размеры и форма которых максимально приближена к размерам и форме готовой детали. В машинах и промышленном оборудовании от 50 до 95% всех деталей изготавливают способом литья в землю.

Для изготовления отливок в разовых песчаных формах необходима специальная литейная оснастка, от конструкции

и качества которой в значительной мере зависит качество и трудоемкость производства литья. Литейная оснастка по своей роли в процессе изготовления отливок подразделяется на формообразующую (основную) и универсальную (вспомогательную). Формообразующая оснастка представляет собой модельный комплект, в который входят: модели, стержневые ящики, элементы литниковой системы, модельные плиты, шаблоны для изготовления форм и стержней.

Литейное производство выгодно отличается от других заготовительных производств (поковки, штамповки, сварки) тем, что методом литья возможно изготавливать заготовки, максимально приближенные по геометрии к самым сложным деталям машин. При современных литейных технологиях коэффициент использования металла достигает 95–97% в цветном литье и более 80% – в чугунолитейном производстве. Без сомнения, литейное производство и в будущем сохранит лидирующее положение среди заготовительных производств. Чаще всего продукция литейного производства используется в автомобилестроении.

Литьем получают разнообразные конструкции отливок массой от нескольких граммов до 300 т, длиной от нескольких сантиметров до 20 м, со стенками толщиной 0,5–500 мм (рис. 2.11 – блоки цилиндров, поршни, коленчатые валы, корпуса и крышки редукторов, зубчатые колеса и т.д.).

В таблице 2.1 приведены характеристика и примеры применения отливок из серого чугуна в автомобилестроении.



Рис. 2.11. Виды отливок в автомобилестроении:  
 а – поршень с шатуном; б – форма (справа)  
 и отливка (слева) блока цилиндров

Для изготовления отливок применяют множество способов литья: в песчаные формы, в оболочковые формы, по выплавляемым моделям, в кокиль, под давлением, центробежное литье и др. Область применения того или иного способа литья определяется объемом производства, требованиями к геометрической точности и шероховатости поверхности отливок, экономической целесообразностью и другими факторами.

**Литейный чугун** – чугун, продукт доменной плавки, составляющий 8–17% всего производства чугуна, марок ЛК-00, ЛК-0, ЛК-1 и до ЛК-5, применяют для получения отливок. Его получают при горячем ходе печи из шихты с достаточным содержанием кремнезема. В зависимости от марки литейный чугун обычно содержит 1,25–4,25% Si и до 1,3% Mn. Литейные чугуны должны быть легкоплавкими, чтобы при сравнительно низких температурах могли точнее выполнять форму, давать плотные и безпузырчатые отливки, обеспечивать малое изменение объема при застывании изделия.

Таблица 2.1

Характеристика и примеры применения отливок  
из серого чугуна

Марка	Характеристика	Примеры применения
СЧ 10	Неответственное литье, главное требование – легкость обработки	Плиты, грузы, корыта, крышки, кожухи и т.п.
СЧ 15	Малоответственное литье с толщиной стенки $S = 8-15$ мм; невысокие требования к износостойкости	Детали сложной конструкции при недопустимости большого коробления; маховики, шкивы; поршневые кольца, арматура, сосуды, работающие под давлением; тонкостенные отливки
СЧ 20	Ответственное литье с $S = 10-30$ мм; детали, требующие значительной прочности и работающие до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$	Корпуса, блоки цилиндров, зубчатые колеса, станины с направляющими большинства металлорежущих станков, диски сцепления, тормозные барабаны
СЧ 25	Ответственное сложное литье с $S = 20-60$ мм; детали, работающие до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$	Корпуса насосов и гидроприводов, поршни и гильзы дизелей и бесклапанных двигателей, цилиндры и головки дизелей, рамы, штампы для холодной вытяжки и другие детали, работающие под высоким давлением
СЧ 30	Ответственное высоконагруженное литье с $S = 20-100$ мм; детали, работающие до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$	Цилиндры и крышки паровых машин, малые коленчатые валы, клапаны и кулачки распределительных механизмов, зубчатые колеса, цепные звездочки, тормозные барабаны, муфты, диски сцепления, клапаны, поршневые кольца и другие нагруженные детали
СЧ 35	Ответственное тяжело-нагруженное литье с $S > 20$ мм	Крупные толстостенные втулки, коленчатые валы, цепные звездочки, зубчатые и червячные колеса, тормозные барабаны, муфты, диски сцепления, клапаны и другие детали

Сообразно назначению литейный чугун должен также давать отливки, обладающие требуемой твердостью, прочностью и упругостью. Находящиеся в чугунах примеси углерода, марганца, кремния, фосфора, серы и т.п. сильно влияют на свойства отливок. Самое большое влияние оказывает углерод, находящийся в чугуне в виде графита, карбида или углерода закала. Каждая из этих трех форм вызывает различные свойства, изменяя структуру, цвет излома и другие качества литейного чугуна. В зависимости от содержания вышеупомянутых элементов и от влияния их на свойства литейных чугунов они разделяются по виду излома на *серые* и *белые*. В литейном деле употребляют главным образом только серый чугун, белые же идут в передел или иногда служат прибавкой к сильно кремнистым чугунам.

**Литьё в песчаные формы** (землю) – метод литья металлов и сплавов, при котором расплавленный металл заливается в форму, сделанную из плотно утрамбованного песка. Для связи песчинок между собой песок смешивают с глиной, водой и другими связующими материалами. Литьё в песчаные формы – дешёвый, самый грубый, но самый массовый (до 75–80% по массе получаемых в мире отливок) вид литья.

Вначале изготавливается литейная модель (ранее – деревянная, в настоящее время часто используются пластиковые модели, полученные методами быстрого прототипирования), копирующая будущую деталь. Модель отличается от отливки:

- увеличенными параметрами размерности на величину, равную усадке применяемого сплава;



- наличием определенных формовочных требований и уклонов, которые облегчают процесс извлечения модельной части из формы;

- наличием определенной разъемной плоскости и знаковых (стержневых) частей для установки объекта (стержня), благодаря которому внутри образуется полость.

Для изготовления литейной формы служит формовочная смесь, представляющая собой многокомпонентную систему, состав которой определяется типом и массой отливки и природой металла. Основными компонентами формовочной смеси являются кварцевый песок, так как он более пластичен и имеет хорошие огнеупорные показатели, и формовочная глина. Глина является связующим и при оптимальном содержании воды (4-5%) придает формовочной смеси необходимую прочность и пластичность. Песок увеличивает пористость и, следовательно, газопроницаемость формовочной смеси. Кроме того, в формовочную смесь вводят противопригарные добавки (каменно-угольную пыль, графит), защитные присадочные материалы (борную кислоту, серный цвет) и другие ингредиенты.

На песчаные формы налагается гораздо меньше всяческих ограничений, нежели на любые другие. Они пригодны для получения отливок любых размеров, любой конфигурации, из любого сплава; они наименее требовательны к конструкции изделия.

Отверстия в детали образуются с помощью размещённых в форме литейных песчаных стержней, копирующих форму будущего отверстия. Для изготовления стержней используют стержневые смеси, состоящие из кварцевого песка

и самотвердеющих неорганических (жидкое стекло с добавкой 10% раствора NaOH) или органических связующих.

Для формирования формы отливки будущей детали используют опоки – металлические короба без дна и крышки (3) и (5) (рис. 2.12).

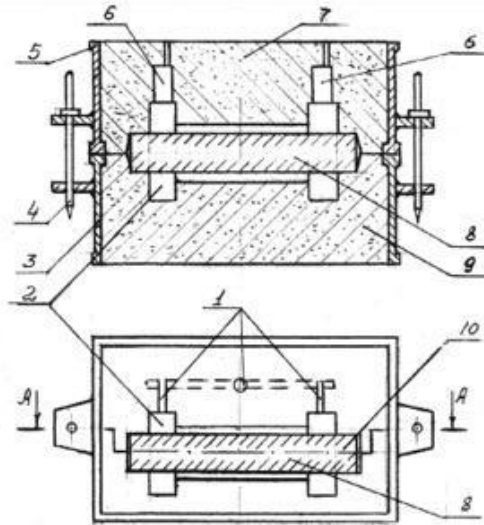


Рис. 2.12. Литейная разовая песчано-глинистая форма:  
 1 – литниковая система; 2 – полость формы; 3 – нижняя опока;  
 4 – штырь; 5 – верхняя опока; 6 – прибыль; 7 – верхняя  
 полуформа; 8 – стержень; 9 – нижняя полуформа;  
 10 – знаковая часть стержня

Плоскость соприкосновения двух опок – поверхность разъёма. В опоку засыпают формовочную смесь и утрамбовывают её. На поверхности разъёма делают отпечаток промодели (промодель соответствует форме отливки), формируя нижнюю полуформу (9). Также выполняют вторую – верхнюю полуформу (7). В первой полуформе с использованием

соответствующих модельных заготовок продельвается литниковая система (1), включающая воронку, каналы-питатели.

Соединяют две полуформы по поверхности разъёма. В целом это и образует единый «литниковый сосуд», система которого распределена так, чтобы металл или сплав, поступающий из разливочного ковша в полость базовой литейной формы, равномерно распределялся и на вспомогательные полости. При усадке остывающего металла дополнительным накопительным резервуаром являются «прибыли» (6), обеспечивающие питание «рабочей» отливки в процессе его термического охлаждения и кристаллизации. Образовавшиеся полости «литникового сосуда» заливаются расплавом металла через специальные отверстия – литники. Заливка литейных форм – процесс заполнения полости литейной формы расплавленным металлом из ковша. Ковш с расплавленным металлом от плавильных печей к месту разливки перевозят мостовым краном или по монорельсовому пути.

Важное значение при заливке форм имеет выбор температуры заливки расплавленного металла. При повышенной температуре заливки возрастает жидкотекучесть металла, улучшается питание отливок, но горячий металл более газонасыщен, сильнее окисляется, вызывает пригар на поверхности отливки. В то время как низкая температура заливки увеличивает опасность незаполнения полости формы, захвата воздуха, ухудшается питание отливки. Температуру заливки сплавов целесообразно назначать на 100–150 °С выше температуры ликвидуса.

Автоматизация заливки литейных форм обеспечивает высокую точность дозировки металла, облегчает труд заливщика, повышает производительность труда.

Охлаждение отливок в литейных формах после заливки продолжается до температуры выбивки. Небольшие тонкостенные отливки охлаждаются в форме несколько минут, а толстостенные (массой 50–60 т) – в течение нескольких суток и даже недель. Для сокращения продолжительности охлаждения отливок, особенно массивных, используют различные методы принудительного охлаждения: формы обдувают воздухом; в формы при формовке укладывают змеевики или трубы, по которым пропускают воздух или воду и др. При этом качество отливок не ухудшается.

После остывания форму разбивают и извлекают отливку с использованием процесса выбивки отливок – удаления затвердевших и охлажденных до определенной температуры отливок из литейной формы, при этом литейная форма разрушается. Выбивку отливок осуществляют на различных выбивных установках. После выбивки отливки сразу же отделяют от неё литниковую систему (обычно это обрубка), удаляют облой и прибыли. Литники от чугунных отливок отбивают молотками из форм перед удалением стержней. Литники от стальных отливок отрезают газовой или плазменной резкой. Ленточные и дисковые пилы используют для обрубки отливок из алюминиевых, магниевых, медных сплавов. После обрубки отливки зачищают, удаляя мелкие заливы, остатки прибылей, выпоров и литников. Зачистку выполняют маятниковыми и стационарными шлифовальными кругами,

пневматическими зубилами, газоплазменной обработкой и другими способами.

Очистка отливок – процесс удаления пригара, остатков формовочной и стержневой смеси с наружных и внутренних поверхностей отливок. Ее осуществляют в галтовочных барабанах периодического или непрерывного действия, в гидropескоструйных и дробеметных камерах, химической или электрохимической обработкой и другими способами.

Контроль отливок перед термообработкой (для снятия остаточных напряжений, для лучшей обрабатываемости отливки и пр.), прежде всего, осуществляют визуально для выявления брака или отливок, подлежащих исправлению. Правильность конфигурации и размеров проверяют разметкой, плотность металла отливки – гидроиспытаниями под давлением воды до 200 МПа. Внутренние дефекты выявляют в специализированных лабораториях.

Литье в песчаные формы – наиболее простой и распространенный способ получения литых заготовок. Недостатки такого литья – большие припуски на механическую обработку, низкая производительность и плохие санитарно-гигиенические условия труда.

Новым направлением технологии литья в песчаные формы является применение вакуумируемых форм из сухого песка без связующего или песок в смеси со смолой, применение литейных форм с вертикальной линией разъёма *в стопочной форме* для производства отливок вентилируемого тормозного диска в частности (рис. 2.13) и т.д.

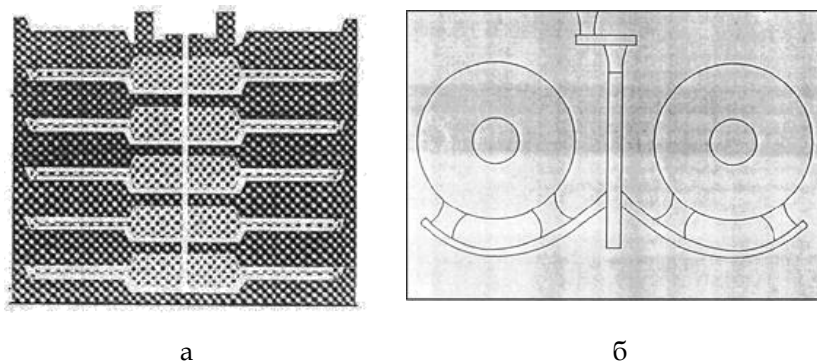


Рис. 2.13. Стопочная формовка (а) и типичное технологическое решение (б) при изготовлении отливок вентилируемого тормозного диска в песчано-глинистой форме

**Литьё в разборные формы** (кокиль) – заключается в применении многократно используемой литейной формы, которая формирует конфигурацию и свойства отливки. Литьё металлов в кокиль – более качественный способ, чем литьё в песчаные формы. При этом способе литья либо совсем исключается применение, либо расходуется малое количество песчаных смесей лишь на изготовление разовых стержней. Изготавливается кокиль – разборная форма (чаще всего металлическая), в которую производится литьё (рис. 2.14).

После застывания и охлаждения кокиль раскрывается и из него извлекается изделие. Затем кокиль можно повторно использовать для отливки такой же детали. В отличие от других способов литья в металлические формы (литьё под давлением, центробежное литьё и др.), при литье в кокиль заполнение формы жидким сплавом и его затвердевание происходят внешнего воздействия на жидкий металл, а лишь под действием силы тяжести.

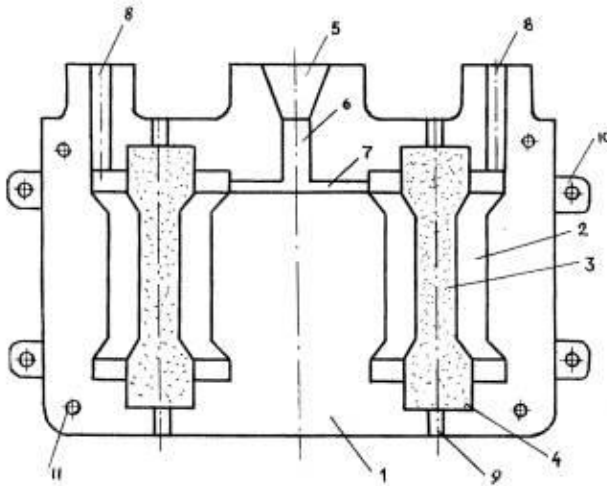


Рис. 2.14. Эскиз сечения собранной металлической формы – кокиля:  
 1 – корпус кокиля; 2 – литейная форма; 3 – стержень; 4 – знак стержня; 5 – литниковая чаша; 6 – стояк; 7 – питатель; 8 – выпор;  
 9 – вентиляционный канал; 10 – прилив;  
 11 – центрирующий штифт

Последовательность изготовления отливки в кокиле состоит из небольшого числа основных операций и процессов: очистка кокиля от старой облицовки, прогрев его до 200–300 °С, покрытие рабочей полости новым слоем облицовки, простановка стержней, закрывание частей кокиля, заливка металла, охлаждение и удаление полученной отливки (рис. 2.15). Этот вид литья применяется в условиях крупносерийного и массового производств. Отливки получают из чугуна, стали и цветных сплавов с толщиной стенок 3–100 мм и массой от десятков граммов до сотен килограммов. Особенно эффективно применение кокильного литья при изготовлении отливок из алюминиевых

и магниевых сплавов. Эти сплавы имеют относительно невысокую температуру плавления, поэтому один кокиль можно использовать до 10000 раз (с простановкой металлических стержней). До 45% всех отливок из этих сплавов получают в кокилях.

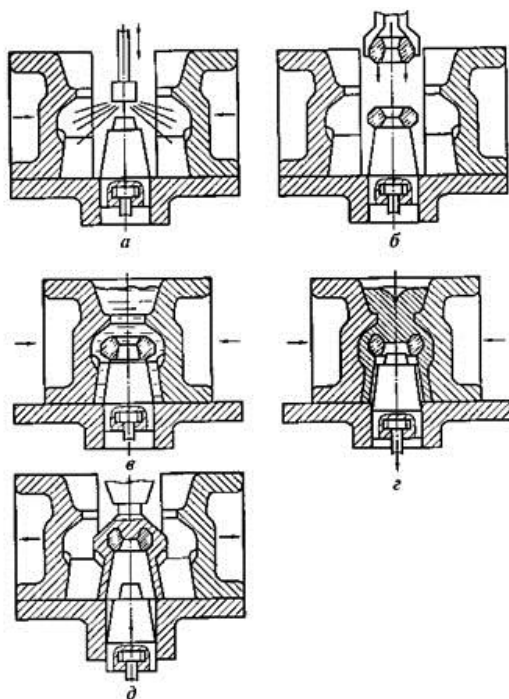


Рис. 2.15. Основные операции и процессы изготовления отливки в кокиле: а – очистка полуформ; б – установка стержней; в – заливка расплава; г – частичное удаление металлического стержня; д – извлечение отливки; стрелки – направление движения деталей кокиля

Из алюминиевых сплавов в автомобилестроении методом литья в кокиль изготавливают корпуса для насосов,



фильтров, выключателей, детали бытовых приборов, автомобильные колеса, детали моторной группы. Алюминиевые поршни и рычаги отливают с металлическим стержнем (рис. 2.16). Корпус кокиля состоит из трех частей (1, 2 и 3). Литниковая система (4) расположена в плоскости разъема. Внутреннюю полость отливки образует металлический стержень, для обеспечения возможности его выемки из отливки его делают разъемным (из нескольких частей).

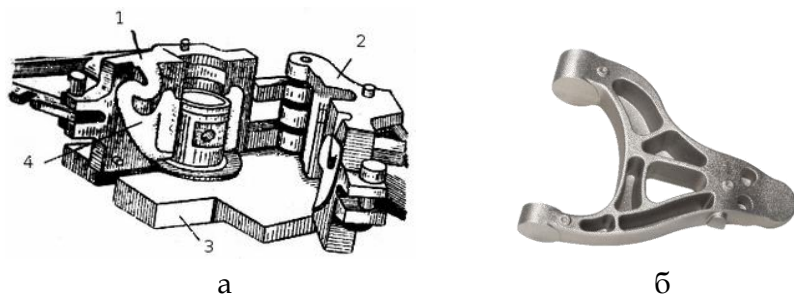


Рис. 2.16. Разъёмный кокиль для изготовления алюминиевого поршня (а) и отливка рычага (б)

В соответствии с ГОСТами точность отливок достигает 12–15-го квалитетов, а шероховатость поверхности  $Ra = 25\text{--}2,5$  мкм. Отливки характеризуются стабильностью по механическим свойствам и плотности.

Возрастающая популярность процесса литья в кокиль обусловлена его несомненными достоинствами и рядом четко выраженных преимуществ перед традиционными способами изготовления отливок. Главные из них относятся к эффективности процесса литья и к качеству отливок. Повышение эффективности литейного производства связано с такими достоинствами литья в кокиль,

как многократность использования литейных форм, рост производительности труда и снижение себестоимости отливок, улучшение качества отливок благодаря повышению точности и ускоренному охлаждению металла. Само собой разумеется, что снижение брака отливок, повышение их точности, снижение припусков на обработку и т.п. обеспечивает повышение эффективности процесса литья. Литье в кокиль относится к трудо- и материалосберегающим, малооперационным и малоотходным технологическим процессам. Оно улучшает условия труда в литейном производстве и уменьшает воздействие на окружающую среду.

К недостаткам кокильного литья следует отнести высокую стоимость кокиля, трудность получения тонкостенных отливок в связи с быстрым отводом теплоты от расплава металлическим кокилем, сравнительно небольшое число заливок при изготовлении в нем стальных и чугунных отливок.

Материалами для кокилей служат чугуны серые СЧ20, СЧ25 и высокопрочный ВЧ42-12; низкоуглеродистые стали 10 и 20; легированные стали 15ХМЛ и др.; алюминиевые сплавы АЛ9 и АЛ11; медь. Наибольшее распространение получили чугунные кокили.

По конструкции кокили бывают простыми и сложными. В зависимости от расположения плоскости разъема кокили делятся на неразъемные; с вертикальной, горизонтальной и сложной (комбинированной) плоскостями разъема. Разновидности кокилей показаны на рис. 2.17.

Сочетание в кокиле металлических и песчаных (или керамических) элементов позволяет в ряде случаев успешно применить литье в кокиль для получения деталей

сложной конструкции. При этом лучше всего удается избежать препятствия усадке отливок и повысить стойкость форм.

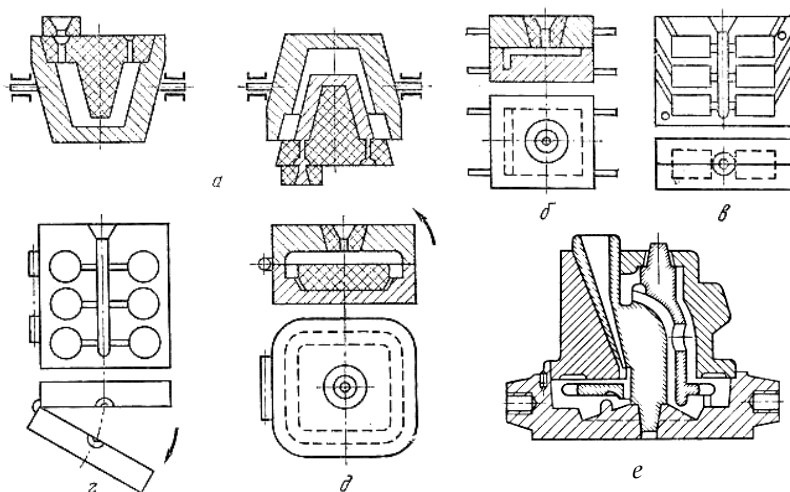


Рис. 2.17. Разновидности кокилей:

а – неразъёмный (вытряхной); б – с горизонтальной плоскостью разъёма; в – с вертикальной плоскостью разъёма; г – створчатый с вертикальной плоскостью разъёма; д – створчатый с горизонтальной плоскостью разъёма; е – со сложным разъемом

Кокили отличаются от обычных песчаных форм большой жесткостью и высокой прочностью, достаточно высокой точностью и стабильностью размеров элементов, а также точностью и надежностью сопряжения последних. Для управления качеством отливок при литье в кокиль приходится учитывать меньшее число факторов, чем при литье в песчаную форму.

В кокилях получают детали различных габаритных размеров, массы. Весьма разнообразны конструктивные

особенности отливок, получаемых в кокилях: от простых (типа втулок) до сложных (типа картеров двигателей, блоков цилиндров) (рис. 2.18) и др.

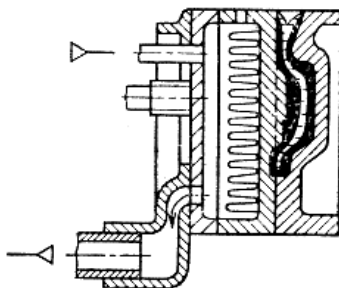


Рис. 2.18. Песчаные стержни олока цилиндров двигателей

В кокилях производят детали различного, в том числе весьма ответственного назначения. В немалой степени это обусловлено применением кокилей с воздушным (естественным и принудительным), с жидкостным (водяным, масляным) и с комбинированным (водовоздушным и т.д.) охлаждением. Воздушное охлаждение используют для мало- и теплонагруженных кокилей: ребра на стенках кокиля увеличивают поверхность соприкосновения охладителя – воздуха – с кокилем и соответственно теплоотвод. Водяное охлаждение используют обычно для высокотеплонагруженных кокилей, а также для повышения скорости охлаждения отливки или ее отдельных частей.

Кокиль, как и любая литейная форма, – ответственный и точный инструмент. Технические требования к кокилям оговорены ГОСТом. Конструктивное исполнение основных элементов кокилей – полуформ, плит, стержней, вставок – зависит от конфигурации отливки (рис. 2.19). Стержни в кокилях могут быть песчаными и металлическими.

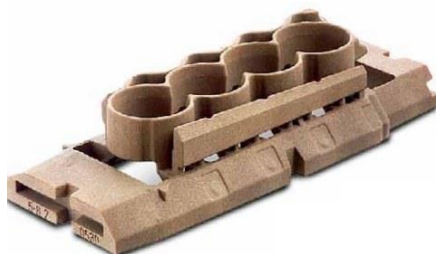


Рис. 2.19. Песчаные стержни блока цилиндров двигателей

Песчаные стержни для кокильных отливок должны обладать пониженной газотворностью и повышенной поверхностной прочностью. Первое требование обусловлено трудностями удаления газов из кокиля; второе – взаимодействием знаковых частей стержней с кокилем, из-за чего отдельные песчинки могут попасть в полость кокиля и образовать засоры в отливке. Стержневые смеси и технологические процессы изготовления песчаных стержней могут быть различными – по горячим ящикам (сплошные и оболочковые стержни), из холоднотвердеющих смесей и т.д. В любом случае использование песчаных стержней в кокилях вызывает необходимость организации дополнительной технологической линии для изготовления стержней в кокильном цехе. Однако в конечном счете использование кокилей в комбинации с песчаными стержнями в большинстве случаев оправдывает себя экономически.

Металлические стержни применяют, когда это позволяют конструкция отливки и технологические свойства сплава. Использование металлических стержней дает возможность повысить скорость затвердевания отливки, сократить продолжительность цикла ее изготовления, в отдельных

случаях повысить механические свойства и плотность (герметичность). Однако при использовании металлических стержней возрастают напряжения в отливках, увеличивается опасность появления в них трещин из-за затруднения усадки. Металлические стержни, выполняющие наружные поверхности отливки, называют вкладышами (рис. 2.20, а). Вкладыши затрудняют механизацию и автоматизацию процесса, так как их устанавливают и удаляют вручную. Металлические стержни, выполняющие отверстия и полости простых очертаний (рис. 2.20, б) до момента полного извлечения отливки «подрывают» для уменьшения усилия извлечения стержня. Полости более сложных очертаний выполняются разъемными (рис. 2.20, в) или поворотными (2.20, г) металлическими стержнями.

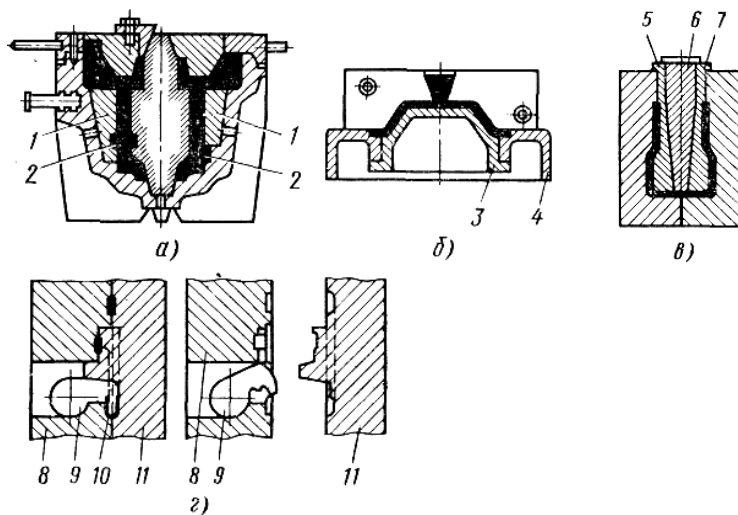


Рис. 2.20 – Металлические стержни:

- 1 – вкладыш; 2 – выступы на отливке; 3 – стержень; 4 – плита;
- 5 – 7 – части стержня; 8, 11 – полуформы;
- 9 – поворотный стержень; 10 – отливка

Для надежного извлечения стержней из отливки они должны иметь уклоны 1–5°, хорошие направляющие во избежание перекосов, а также надежную фиксацию в форме.

Во многих случаях металлические стержни делают водоохлаждаемыми изнутри. Водяное охлаждение стержня обычно включают после образования в отливке прочной корочки. При охлаждении размеры стержня сокращаются так, что между ним и отливкой образуется зазор, который уменьшает усилие извлечения стержня из отливки.

Для отливок сложной конфигурации используют кокили, имеющие не только системы охлаждения отдельных их частей, но и системы нагрева. Это дает возможность обеспечить направленное затвердевание за счёт положения отливки в форме, когда топкие части отливки располагают внизу, а массивные вверху с установкой на них прибыли и питающих выпоров, и питание отливок с использованием литниковых систем с подводом расплава сверху, снизу, сбоку, комбинированные и ярусные. Литниковая система должна обеспечивать спокойное, плавное поступление расплава в полость формы, надежное улавливание окисных плен, шлаковых включений и предотвратить их образование в каналах литниковой системы и полости кокиля, способствовать направленному затвердеванию и питанию массивных узлов отливки.

Способ литья в кокили имеет следующие недостатки:

1. Высокая стоимость кокиля, сложность и трудоемкость его изготовления. Стоимость кокиля возрастает при необходимости усложнять конструкцию формы – делать

дополнительные разъемы, использовать вставки, разъемные металлические или песчаные стержни.

2. Ограниченная стойкость кокиля, измеряемая числом годных отливок, которые можно получить в данном кокиле. От стойкости кокиля зависит экономическая эффективность процесса, особенно при литье чугуна и стали. Поэтому проблема повышения стойкости кокиля относится к важнейшим при решении технологических задач кокильного литья этих сплавов.

3. Высокая интенсивность охлаждения расплава в кокиле в сравнении с песчаной формой. Данный фактор ограничивает возможность получения тонкостенных протяженных отливок, а в чугунных отливках дополнительно приводит к отбелу поверхностного слоя, ухудшающему обработку резанием; вызывает необходимость термической обработки отливок.

4. Неподатливость кокиля, которая приводит к появлению в отливках напряжений, а иногда и трещин.

5. Использование в кокиле большого числа песчаных стержней. Этот фактор снижает точность получаемых отливок и повышает в этих местах шероховатость их поверхности.

Преимущества и недостатки кокильного способа определяют в итоге рациональную область его использования. Вследствие высокой стоимости кокилей экономически целесообразно применять этот способ литья только в серийном или массовом производстве.

**Литьё по выплавляемым моделям (ЛВМ)** – ещё один способ литья. Этот метод чаще всего применяется



при изготовлении деталей высокой точности, например, в авиационном и точном машиностроении.

Сущность процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям заключается в следующем. В соответствии с чертежом детали изготавливают пресс-форму (рис. 2.21), в которую шприцем запрессовывают в сметанообразном состоянии модельный состав (смесь парафина со стеарином).

После охлаждения и затвердевания модельного состава в пресс-форме из неё извлекают парафино-стеариновую модель будущей отливки. Несколько таких моделей припаивают к парафино-стеариновому стояку и покрывают суспензией. Затем обсыпают песком и сушат. Эти операции повторяются 3 После охлаждения и затвердевания модельного состава в пресс-форме из неё извлекают парафино-стеариновую модель будущей отливки. Несколько таких моделей припаивают к парафино-стеариновому стояку и покрывают суспензией. Затем обсыпают песком и сушат. Эти операции повторяются 3–8 раз. Модели отливок со стояком помещают в горячую воду, где модельный состав выплавляется из сформировавшейся вокруг них многослойной оболочки. Далее оболочки сушат, прокаливают при температуре 900–1000 °С и после этого направляют на заливку (рис. 2.21, ж). Перед заливкой блоки предварительно нагревают и далее устанавливают в печь, а разогретый металл заливают в оболочку. Залитый блок охлаждают на воздухе или в термостате и после его полного охлаждения отправляют на выбивку, где получается отливка.

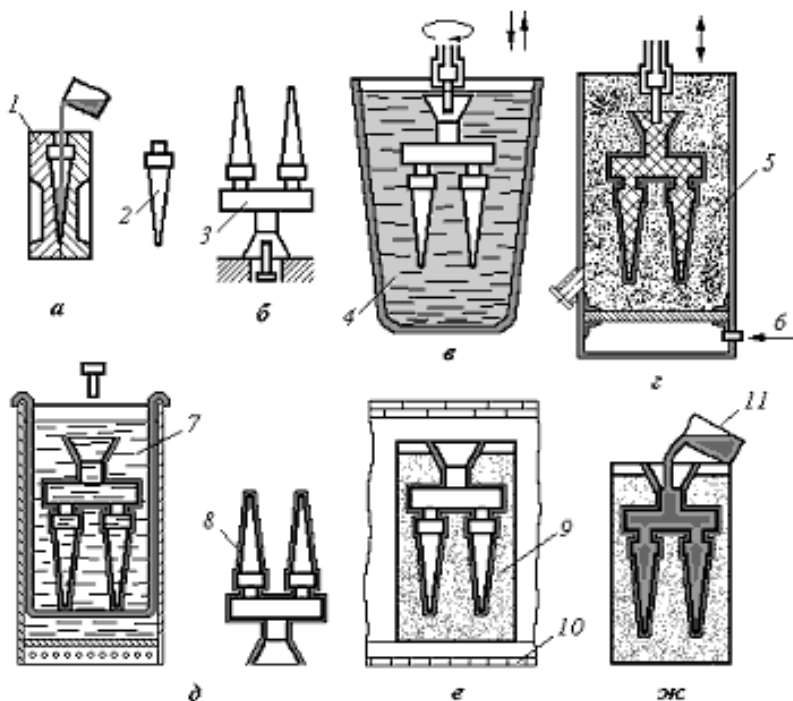


Рис. 2.21. Литье по выплавляемым моделям:

- а – изготовление моделей; б – монтаж модельных блоков;  
 в, г – формирование на модельных блоках керамической  
 оболочки; д – выплавливание моделей из керамических форм;  
 е – формовка оболочки; ж – заливка. 1 – пресс-форма;  
 2 – модель; 3 – модельно-литниковый блок; 4 – суспензия;  
 5 – псевдоожиженный слой зернистого огнеупорного материала;  
 6 – подача сжатого воздуха; 7 – расплав модельной массы  
 (или горячая вода); 8 – керамическая оболочковая форма;  
 9 – опорный наполнитель (кварцевый песок);  
 10 – печь; 11 – ковш

Выплавляемые модели для литья изготавливают из смеси или сплавов легкоплавких материалов, чаще всего

органического происхождения. В качестве исходных материалов используют парафин, стеарин, церезин, буро-угольный воск, торфяной битум, канифоль, полистирол, полиэтилен, этил-целлюлозу, жирные кислоты, озокерит и др. Модельные составы должны обладать определенными свойствами: 1) температурой плавления 60–100 °С, температурой начала размягчения выше температуры рабочего помещения на 35–45 °С; 2) минимальной и стабильной линейной усадкой, минимальным объемным и линейным расширением; 3) хорошей жидкотекучестью; 4) достаточной прочностью и твердостью для предохранения от повреждения поверхности моделей; 5) минимальной зольностью и неприлипаемостью к поверхности пресс-форм, инструменту и рукам рабочего; 6) химической инертностью по отношению к материалам пресс-форм и огнеупорных покрытий; 7) не выделять вредных паров при нагревании и сгорании; 8) возможностью многократного использования; 9) хорошей смачиваемостью облицовочным составом; 10) дешевизной исходных материалов.

Основным способом изготовления выплавляемых моделей для литья является запрессовка пастообразного состава в рабочую полость пресс-форм, что обеспечивает лучшую точность и чистоту поверхностей моделей. Эту операцию выполняют на установке, на которой приготовление пасты из жидкого расплава и запрессовка модельной массы в пресс-формы производятся автоматически. После затвердевания модельного состава пресс-форма автоматически раскрывается, модель выталкивается в ванну с холодной водой, откуда по водяному конвейеру направляется на участок

сборки моделей. Готовые модели осматривают. Модели хранят либо в холодной проточной воде, либо в термостагах. Одновременно с изготовлением модели отливки изготавливают модели элементов литниковой системы: стояка и воронки.

К пресс-формам предъявляются следующие основные требования:

1. Размеры и чистота поверхности полости пресс-формы должны обеспечивать получение отливок с заданной точностью и чистотой поверхности. При этом точность размеров и чистота поверхности рабочей полости пресс-формы должны быть на 1–2 класса выше требуемой точности и чистоты поверхности отливки.

2. Пресс-формы должны иметь минимальное количество разъемов, причем должно быть обеспечено удобное, быстрое и надежное извлечение моделей. Извлечение модели из пресс-формы без повреждений и искажений достигается правильным выбором разъема, выполнением уклонов и применением выталкивающих устройств. Величину уклонов принимают не менее  $0,5^\circ$ . Выталкиватели делают местными или сплошными. Местные выталкиватели могут оставлять следы на моделях, поэтому их надо ставить на обрабатываемых или на неотвеченных поверхностях, сплошные выталкиватели не оставляют следов на поверхности модели. Для удаления воздуха из полости пресс-формы при заполнении ее модельным составом на разъемах делают тонкие риски (0,1 мм), а в глухих углублениях, где образуются воздушные мешки, следует предусматривать тонкие вентиляционные отверстия.

4. Размеры каналов для подвода модельного состава должны обеспечивать получение модели без пузырей, усадочных и других дефектов. Место подвода не должно портить поверхность модели и должно компенсировать объемную усадку. Если питатели отливки нельзя использовать как литники модели, следует подводить модельную массу в наиболее толстое сечение модели и к обрабатываемой поверхности данной отливки.

5. Пресс-форма должна быть удобной в работе. Для удобства сборки и разборки на пресс-форме предусматриваются ручки, приливы или углубления для пальцев рук, а также зажимные приспособления для быстрого и надежного запираения пресс-формы.

6. Детали и узлы пресс-формы должны быть прочными, жесткими и износоустойчивыми. Стальные пресс-формы выдерживают до 100 тыс. съёмов моделей и более. К стальным пресс-формам по износоустойчивости приближаются литые из цинково-алюминиево-медных сплавов. Пресс-формы из других легкоплавких сплавов допускают около 1 тыс. съёмов. Для увеличения срока службы пресс-формы часто армируют.

7. Конструкция пресс-формы должна быть технологичной в изготовлении. Сложные детали пресс-формы, изготавливаемые механической обработкой, целесообразно расчленять на более простые элементы. Изготовление гипсовых и литых металлических пресс-форм одинаково и осуществляется по мастер-модели в металлических обоймах. Часто применяются и комбинированные пресс-формы. Часть их деталей изготавливается механической обработкой, а наиболее

сложные детали – отливкой по мастер-модели методом гальванопластики и другими способами.

По способу подвода металла к отливке все литниково-питающие системы делятся на четыре типа. Правильно построенная литниковая система должна обеспечить:

- 1) хорошее заполнение формы;
- 2) получение отливок без усадочных раковин, рыхлот и пористости, без инородных включений и коробления;
- 3) высокие механические свойства металла отливок.

Вес литниковой системы и ее габариты должны быть возможно меньшими. Модель литниковой системы представляет собой несущую конструкцию и должна быть прочной. Обычно металл подводится к толстым частям отливок. Питание всех массивных узлов отливки осуществляется только от стояка или коллектора через питатели, или одни узлы отливок питаются от специально установленных прибылей. Такое построение литниковой системы обеспечивает надежное питание и направленное затвердевание отливок. Размеры элементов литниковой системы определяются факторами, характеризующими скорость охлаждения отливок. Критерием скорости охлаждения отливки является ее приведенная толщина, т.е. отношение площади сечения тела отливки к его периметру. Приведенная толщина характеризует скорость охлаждения отливки только при малой интенсивности теплообмена. Размеры стояков и питателей определяются в зависимости от толщины массива отливки, веса отливки и длины питателя. Последовательность подготовительных и основных производственных операций при различных вариантах современного промышленного процесса литья по выплавляемым моделям представлена на рис. 2.22.

Воскообразные модельные составы обычно запрессовывают в полость пресс-формы (1) в жидком или пастообразном состоянии (рис. 2.22, а). Модели отливок обычно собирают в блок, соединяя их с моделью литниковой системы, сделанной также из модельного сплава. В условиях массового производства обычно применяют высокопроизводительный метод механического соединения звеньев в блок (рис. 2.22, б) нанизыванием на металлический стояк-каркас и скреплением их пружинным устройством в верхней части стояка. На стояк с рукояткой (3) и опорным фланцем (4) сначала надевают модель литниковой воронки (5), затем нанизывают звенья (2) моделей (4) и скрепляют прижимным устройством (6) с гайкой (7), после чего на нее напаивают колпачок (8) из модельного сплава.

Для получения оболочки формы (рис. 2.22, в-г) на модельные блоки путем их погружения в бак (9) последовательно наносят несколько слоев суспензии (10), содержащей раствор специального связующего (например, этил-силиката) и порошок огнеупорной основы (пылевидный кварц, корунд, алюмосиликат и пр.). Каждый слой суспензии присыпают упрочняющими его огнеупорными материалами (12) (например, кварцевым песком, шамотом или корундом), которые располагаются в специальном устройстве (11) во взвешенном состоянии. Обычно для получения оболочки необходимой прочности наносят от 3–4 до 7–8 слоев суспензии, а при изготовлении крупных отливок наносят до 18–20 слоев, получая таким образом оболочку толщиной около 20–22 мм. Сушка слоев оболочки состоит из двух процессов: собственно сушки (испарения органических

растворителей или воды, введенных в состав связующего) и отверждения пленки связующего вещества в результате огеливания или полимеризации.

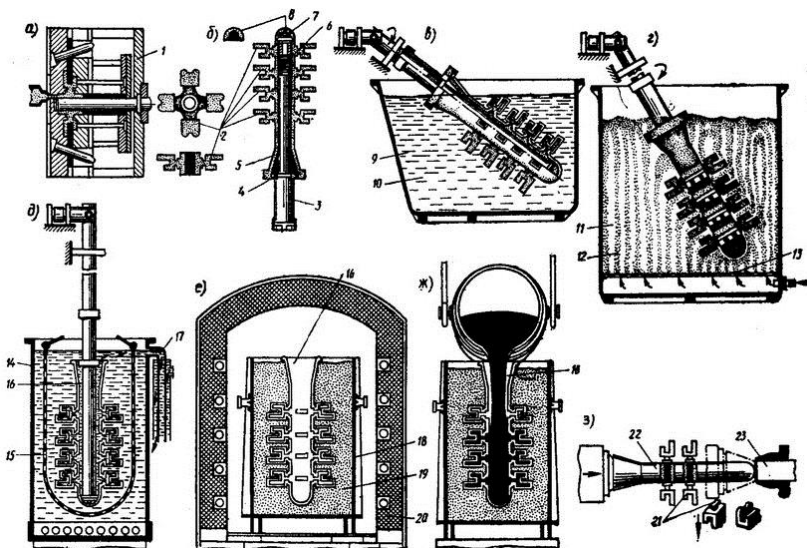


Рис. 2.22. Схема процесса литья по выплавляемым моделям

Удаление моделей после формирования оболочки производят различными способами с учетом свойств модельного сплава. Так, легкоплавкие воскообразные составы на основе парафина удаляют из оболочки в горячей воде, горячим воздухом или паром, в перегретом расплаве модельного состава и т.п. На рис. 2.22, д показано в качестве примера удаление моделей в горячей воде (14 – бак с горячей водой; 15 – сетка для приема оболочки формы 16; 17 – сливной патрубков для очистки модельного сплава). После удаления модельного сплава оболочки сушат (рис. 2.22, е)



и затем для удаления остатков его органических компонентов прокаливают при температуре 850–1000 °С. Заливку форм производят непосредственно после прокаливания их в горячем состоянии при температуре 600–900 °С, что обеспечивает хорошее заполнение форм. Заливка может производиться как в заформованные в опорный наполнитель (19) оболочки (рис. 2.22, ж), так и в незаформованные. После заливки форм и охлаждения отливок оболочка обычно растрескивается на поверхности литого блока из-за меньшего сжатия при охлаждении по сравнению с усадкой металла. Отливки (21) отделяются от литниковой системы (22) механически, например, специальным инструментом – трубчатой фильерой (23) (рис. 2.22, з).

Наиболее совершенным методом литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) считается процесс, в результате которого сохраняется оригинал и получают пустотелые изделия, оригинал служит моделью (рис. 2.23). Технологически этот способ состоит из двух частей: вначале изготавливают по оригиналу пустотелую модель, а затем по этой модели литейную форму.

К преимуществам метода ЛВМ следует отнести возможность изготовления деталей из сплавов, не поддающихся механической обработке. Метод позволяет получать высокоточные отливки с шероховатостью поверхности 2,5–1,25 мкм. Он даёт возможность получать узлы и детали машин, которые при других способах литья пришлось бы собирать из нескольких отдельных деталей.

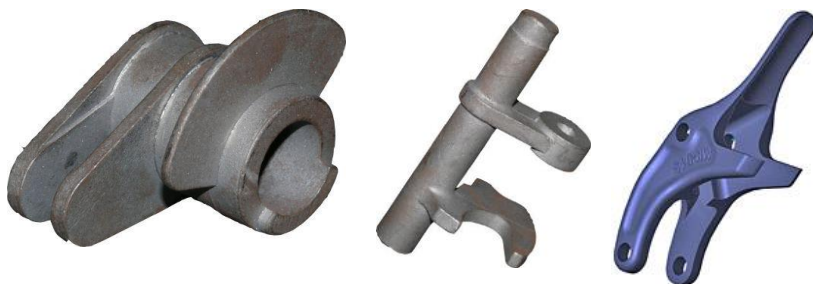


Рис. 2.23. Вид изделий, отлитых по выплавляемым моделям

К отрицательным сторонам метода относится большой расход металла и высокая стоимость, поэтому данный метод применяют исключительно для получения ответственных деталей.

**Литьё по газифицируемым моделям (ЛГМ)** – одна из самых перспективных и развивающихся в настоящее время технологий литья. Эту технологию можно отнести к способу литья по выплавляемым моделям, но в отличие от него модель удаляется (газифицируется) не до заливки, а в процессе заливки формы металлом, который, вытесняя (замещая) «испаряющуюся модель» из формы, занимает освободившееся пространство полости формы. По технологии ЛГМ англоязычное название Lost Foam Casting Process, модели изготавливают из пенополистирола (реже из других пенопластов) и помещают в формы из сухого песка без связующего. В этом способе литья получить модель отливки означает уже наполовину получить саму отливку из металла.

Для серии отливок модели производят из порошка полистирола в легких алюминиевых пресс-формах при их нагреве до 130 °С. Модель и полученная по ней отливка

имеют высокую точность и конкурентный товарный вид, чему способствует окраска модели быстросохнущей краской с порошком-огнеупором.

Свободно можно видеть отливку в модели, промерять ее стенки, чего при обычной формовке для сложных с несколькими стержнями отливок просто не сделать. Отсутствует смещение стержней и форм при сборке (так как отсутствуют сами стержни). По сути, разъемная литейная форма как бы «исчезла» в ее традиционном понимании, ее заменила литейная форма в виде засыпки модели сухим песком в ящике (контейнере). При заливке этой формы металл испаряет модель и собой ее замещает.

Основными преимуществами отливок, изготовленных по технологии ЛГМ, являются следующие:

- высокая точность получаемых отливок даже при сложной конфигурации (7-12 класс по ГОСТ 26645-85);

- качество и плотность металла в отливке обеспечивается за счет частичного вакуумирования в процессе литья;

- высокое качество поверхности отливок позволяет в некоторых случаях совсем отказаться от механической обработки, которая была бы необходима при другом способе изготовления;

- минимальный припуск на механическую обработку, если она необходима;

- полная идентичность отливок в серии.

Развитие литейного производства большей частью сопровождается созданием самостоятельных некрupных цехов с гибкими технологиями получения отливок высокой точности и сложности, когда метод ЛГМ оказался

наиболее подходящим вместо литья в песчано-глинистые формы, по выплавляемым моделям, в металлические формы или других способов. Сегодня – это наиболее экологичный и экономичный метод литья. Например, 1 м<sup>3</sup> пенополистирола модели весит 25 кг, если он замещается 7 т жидкого чугуна, то при этом на 1 т литья расходуется  $25/7 = 3,6$  кг полимера. Экологическая безопасность технологического процесса обеспечивается исключением из применения токсичных связующих, большого объема формовочных и стержневых песчаных смесей (обычно 2 т смеси со связующим идет в отвал на 1 т литья), транспортировки их и выбивки отливок.

Области применения литья по газифицированным моделям – это отливки различной серийности, от единичного производства до промышленных серий. Цеха и участки с этой гибкой технологией стремительно множатся по всему миру – от Америки до Китая. Большинство крупнейших автопроизводителей Европы и Америки ежегодно используют в производимых автомобилях несколько сотен тысяч тонн точных отливок, полученных способом ЛГМ. General Motors, Ford Motors, BMW, Fiat, VW, Renault и ряд других фирм полностью перешли в 1980-1990 гг. на изготовление отливок блоков цилиндров, головок блока, впускных и выпускных коллекторов, коленчатых валов для наиболее массовых типов двигателей (4-3 цилиндровых, рис. 2.24) методом ЛГМ. Сегодня в мире по пенополистироловым моделям производят ~1,4% от всего количества литья (~1 млн т/год), прогнозы на ближайшее будущее дают этой технологии 10–20% мирового литья.



Рис. 2.24. Пенополистироловые модели (белого цвета) и отливки (темного цвета) деталей двигателя автомобиля

Материалы отливок – это практически все марки чугунов от СЧ15 до ВЧ-50, износостойкие ИЧХ. Стали – от простых углеродистых Ст. 20–45 до высоколегированных, теплоустойчивых и жаропрочных. Бронзы – практически все литейные марки бронз. Основной развес отливок от 100 г до 300 кг.

**Литьё с использованием оболочковых форм** – базируется на получении разовых полуформ и стержней в виде оболочек толщиной 6–10 мм. Их изготавливают путем отверждения на металлической оснастке слоя смеси, в которой связующее вещество при нагреве вначале расплавляется, а затем затвердевает (необратимо), придавая оболочке высокую прочность.

Технология литья в оболочковые формы включает ряд следующих операций: приготовление специальной песчано-смоляной смеси; формирование на модельной оснастке тонкостенных оболочковых форм и стержней; сборка форм и их подготовка к заливке. Для приготовления оболочковых форм выпускают специальное связующее –

смесь фенолформальдегидной смолы с катализатором отверждения смолы, вводимым в количестве 7–8%.

Для предварительного формирования оболочки наиболее часто используют поворотный бункер (1), в который засыпают песчано-смоляную смесь (2) (рис. 2.25, а). На верхнюю часть бункера, снабженную кольцевым каналом (3) для подачи охлаждающей воды, устанавливают моделями вниз и закрепляют нагретую до 200–240 °С металлическую модельную плиту (4). На ней закреплены с помощью четырех направляющих колонок (5) плита (6) толкателей (7). Толкатели, равномерно распределенные по всей плите, выходят на рабочую поверхность, как модели, так и модельной плиты. Их фиксируют специальными хвостовиками в гнездах плиты (6) и закрепляют в ней прижимной плитой (8). Модельная плита с выталкивающим устройством помещена в корпус (9). Для фиксации плиты толкателей в исходном положении на направляющих колоннах (5) установлены пружины (10).

Для предварительного формирования оболочки бункер (1), снабженный цапфами (11) и поворотным механизмом, поворачивают на 180°, и формовочный материал падает на горячую модельную плиту (рис. 2.25, б), уплотняясь под действием гравитационных сил. В прилегающем к плите слое смеси смола плавится (при температуре 95–115 °С), смачивая зерна песка, а затем начинает полимеризоваться, загустевая и отверждаясь по мере прогрева до более высокой температуры. За 30–40 секунд выдержки смола успевает оплавиться в слое толщиной около 10 мм. Слой остается на модельной плите после поворота бункера

в исходное положение (рис. 2.25, в) и сброса на дно бункера не прореагировавшей и сохранившей свои начальные свойства и пригодной для последующего использования части смеси.

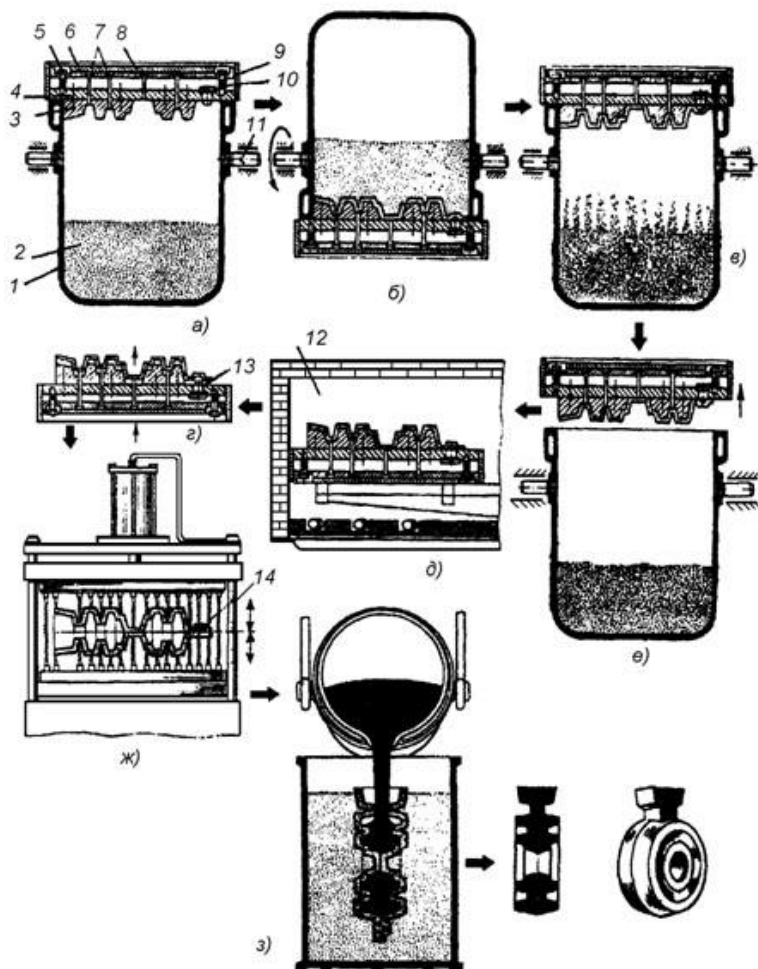


Рис. 2.25. Схема технологического процесса литья в оболочковые формы

Модельную плиту со сформированной оболочковой полуформой снимают с бункера (рис. 2.25, г) и подают в печь 12 (рис. 2.25, д), где при температуре 300–400 °С за 90–120 секунд заканчивается полимеризация, и смола приобретает высокую технологическую прочность. Затем готовую оболочковую полуформу снимают с модельной плиты (рис. 2.25, е) и соединяют с другой полуформой (например, склеиванием) на специальном пневмопрессе (рис. 2.25, ж). Для исключения прорыва расплава формы с вертикальным разъемом обычно заформовывают (рис. 2.25, з) в опорный наполнитель (песок, дробь и т.п.). Формы небольшой высоты с горизонтальным разъемом в большинстве случаев не заформовывают и заливают на поддонах с песчаной постелью.

В оболочковые формы получают отливки практически из любых промышленных сплавов массой до 200–300 кг – радиаторы парового и водяного отопления, детали автомобилей и ряда машин.

Преимущества литья в оболочковые формы по сравнению с литьем в песчано-глинистые разовые формы заключаются в следующем:

- уменьшение параметров шероховатости поверхности и существенное улучшение внешнего товарного вида отливок;
- возможность получения отливок с тонким и сложным рельефом, а также толстостенных отливок с литыми каналами малых сечений;
- уменьшение трудоемкости ряда операций технологического процесса (приготовление смеси, изготовление формы, очистка отливок и пр.);



- сокращение в 8–10 раз и более объема переработки и транспортирования формовочных материалов; простота автоматизации получения форм;

- уменьшение металлоемкости формовочного оборудования.

Кроме того, для литья в оболочковые формы характерна меньшая жесткость оболочки, что следует рассматривать как достоинство метода в сравнении с методами литья в кокиль.

Основные недостатки метода литья в оболочковые формы:

- относительно высокая стоимость смоляного связующего;

- сложность модельной и стержневой оснастки;

- повышенное выделение вредных химических веществ в ходе термического разложения смоляного связующего;

- недостаточная прочность оболочек при получении тяжелых отливок;

- невозможность получать крупногабаритные отливки и изделия особо сложной формы;

- склонность к появлению некоторых специфических видов дефектов, сопровождающих низкую газопроницаемость литейной формы.

## О

**Оксиды железа** – соединения железа с кислородом. Известно три наиболее распространённых оксида железа: FeO – оксид железа(II) – устаревшее название – закись железа,

(минерал вюстит);  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – оксид железа (III) (минерал гематит);  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – оксид железа (II,III), сложный оксид, одновременно содержащий ионы железа (II) и железа (III) (минерал магнетит);  $\text{Fe}_4\text{O}_5$  – оксид железа (II, III).

## II

**Передельный чугун** (steelmaking iron) – чушковый чугун, продукт доменной плавки, первичный сплав железа, выплавленный в доменной печи и идущий (в жидком или твёрдом виде) в переработку (передел) на сталь главным образом в кислородных конвертерах или мартеновских печах. От других видов металла, получаемого в доменных печах (литейных и зеркального чугунов, ферросилиция и ферромарганца), передельный чугун отличается низким содержанием Si и Mn (не более 1,75% каждого). Передельный чугун, предназначенный для кислородно-конвертерного передела, имеет более узкие пределы колебаний химического состава по Si, Mn и S. Выплавляется также высококачественный передельный чугун, который характеризуется низким содержанием P (0,020–0,060 %) и S (0,015–0,025 %). Передельный чугун – основная продукция доменного производства (См. Доменное производство). В зависимости от назначения изготавливают передельный чугун марок: П1 и П2 – для сталеплавильного производства; ПЛ1 и ПЛ2 – для литейного производства; ПФ1, ПФ2 и ПФ3 – фосфористый чугун; ПВК1, ПВК2 – высококачественный чугун.

## Р

**Разливка стали** – процесс наполнения жидким металлом форм, в которых металл кристаллизуется, образуя слитки или отливки. Полученную в сталеплавильном агрегате сталь перед её разливкой выпускают в сталеразливочный ковш (рис. 2.26), в котором осуществляют операции доводки – раскисления, десульфурации, модифицирования и др.

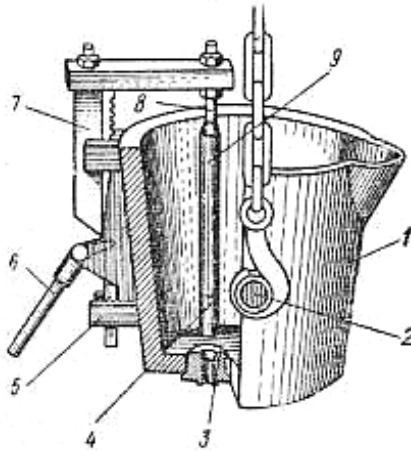


Рис. 2.26. Сталеразливочный ковш

Сталеразливочный ковш выполняет несколько функций: 1) служит ёмкостью для транспортировки металла от сталеплавильного агрегата или от сталеваза до места разливки; 2) является устройством, при помощи которого сталь распределяется по изложницам или кристаллизаторам установки непрерывной разливки; 3) является агрегатом, в котором осуществляют ряд металлургических процессов

(раскисление, легирование, обработку вакуумом, продувку инертным газом, обработку жидкими синтетическими шлаками или твердыми шлаковыми смесями и т.п.); 4) служит емкостью, в которой металл выдерживают при заданной температуре в процессе разливки плавки.

Снаружи ковш имеет металлический кожух (1) с цапфами (2), внутри он футерован огнеупорным шамотным кирпичом. Сталь из печей по желобу поступает в ковш сверху. В ковш попадает и некоторое количество шлака, предохраняющего сталь от быстрого остывания и окисления. Емкость ковшеи колеблется в пределах 0,5–375 т и более. Сталь в ковше выдерживается 5–15 мин с целью более полного удаления газов, частиц шлака и снижения температуры металла. Затем, открыв огнеупорную пробку в днище (4) с помощью рычажного стопорного устройства, состоящего из стержня (8) с огнеупорным слоем (9), рычага (6), штока (7) и упора (5), выпускают сталь из ковша через отверстие в его днище (стаканчик 3). Преимущество такого способа выпуска стали – уменьшение возможности попадания в нее шлака, недостаток – большой напор металла и опасность «замерзания» его в стопорном отверстии.

Применяют два основных способа разливки стали: разливку в изложницы и непрерывную разливку.

**Разливка стали в изложницы** – способ наполнения жидким металлом форм (изложниц), в которых металл кристаллизуется, образуя слитки. Конфигурация изложниц, характеризующаяся формой поперечного и продольного сечений, определяется сортаментом стали и дальнейшим переделом слитка. Поперечное сечение изложниц

может быть квадратным, прямоугольным, круглым, многогранным (рис. 2.27).

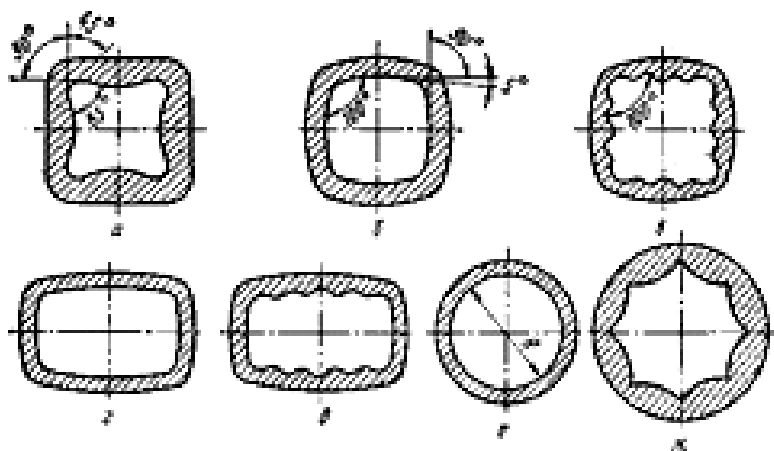


Рис. 2.27. Формы поперечного сечения изложниц

Слитки квадратного сечения идут на сортовой прокат прямоугольного сечения при отношении их ширины  $b$  к толщине  $h$  менее 1,5 – для получения как листа, так и сортового проката, плоские слитки при отношении  $b/h$  в пределах от 1,5 до 3,0 – для прокатки на лист. Слитки круглого сечения используют для изготовления труб, бандажей, колес. В многогранные изложницы отливают слитки для кузнечных поковок.

По форме продольного сечения изложницы бывают двух типов: с уширением сверху для разливки спокойной стали (рис. 2.28, а) и с уширением книзу для разливки кипящей и полуспокойной стали (рис. 2.28, б). Для разливки кипящей и полуспокойной стали иногда применяют изложницы бутылочной формы (рис. 2.28, в), верхнее отверстие

которых после наполнения изложницы сталью закрывают пробкой или крышкой. Быстрое застывание металла в сужающейся части бутылочной изложницы обеспечивает снижение химической неоднородности стали по сравнению с разливкой в обычные сквозные изложницы. Изложницы, расширяющиеся кверху – чаще всего с дном. В дне изложниц находится отверстие. При разливке сифоном в него вставляют шамотный стаканчик, через который сталь поступает в изложницу, а при разливке сверху – стальной вкладыш (пробку), предохраняющий дно изложницы от размывания струей металла.

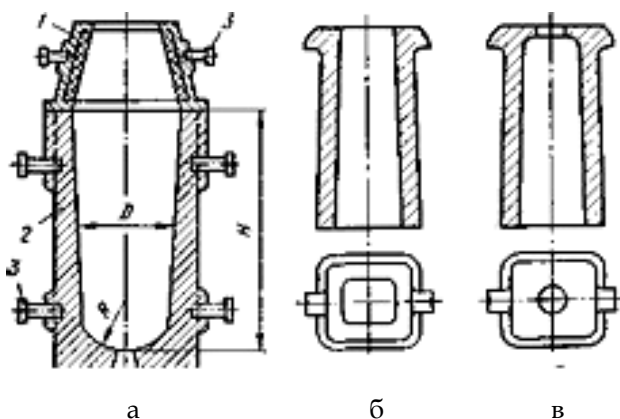


Рис. 2.28. Формы продольного сечения изложниц

Внутреннюю поверхность изложниц иногда делают волнистой. При этом увеличивается поверхность соприкосновения слитка с изложницей, быстрее нарастает толщина затвердевшей корочки в начальный момент кристаллизации и снижается пораженность слитков снаружи продольными трещинами.

Разливку в изложницы подразделяют на разливку сверху (рис. 2.29) и сифоном (греч. siphon – трубка, насос) снизу (рис. 2.30).

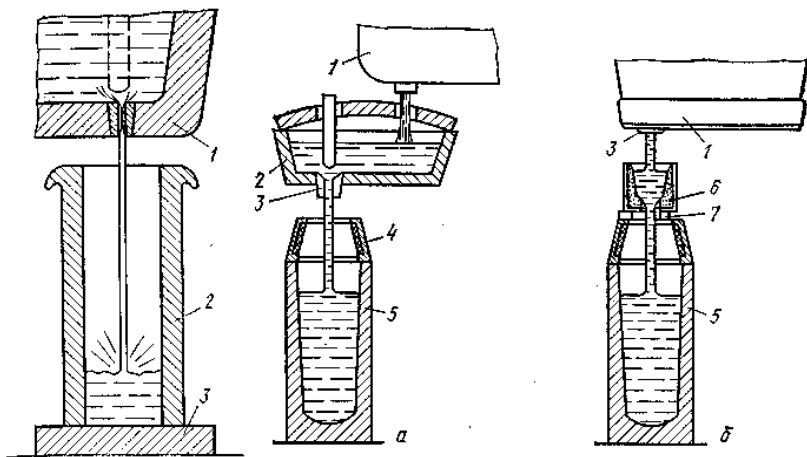


Рис. 2.29. Схема разливки стали сверху, через промежуточный ковш (а) и промежуточную воронку (б)

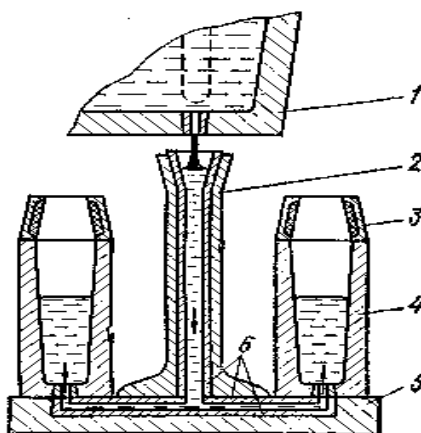


Рис. 2.30. Схема разливки стали сифоном:  
 1 – разливочный ковш; 2 – центральный литник; 3 – надставка;  
 4 – изложница; 5 – чугунный поддон; 6 – огнеупорная масса

При разливке сверху после заполнения каждой изложницы стопор или шиберный затвор ковша закрывают, ковш транспортируют к следующей изложнице, вновь открывают стопор (шиберный затвор) и после заполнения сталью новой изложницы цикл повторяют. Иногда при разливке сверху применяют двухстопорные ковши; это позволяет одновременно заполнять две изложницы и сократить длительность разливки. С целью уменьшения напора струи и разбрызгивания металла на стенки изложниц разливку сверху иногда ведут через промежуточные ковши (рис. 2.29, а) или через промежуточные воронки (рис. 2.29, б).

Разливку сверху обычно используют для изготовления слитков большой массы. При такой разливке поверхность слитков вследствие попадания брызг жидкого металла на стенки изложницы может быть загрязнена *корольками* (каплями затвердевшего металла) и пленками оксидов.

При разливке *сифоном* сталь из ковша (1) поступает в центральной литник (2) (рис. 2.15), протекает по каналам и снизу поступает в изложницы (4), установленные на чугунном поддоне (5). В этом случае сталь поступает в изложницы (4) снизу, что обеспечивает плавное, без разбрызгивания, их заполнение. Поверхность слитка получается чистой, сокращается время разливки.

При сифонной разливке, основанной на принципе сообщающихся сосудов, сталью одновременно заполняют несколько (от двух до шестидесяти) изложниц. Металл из ковша поступает в изложницу, лишь пройдя систему каналов, футерованных огнеупорным кирпичом. После наполнения всех установленных на поддоне изложниц стопор



(шиберный затвор) закрывают, и ковш транспортируют к следующему поддону и т.п.

Оба способа разливки обладают рядом преимуществ и недостатков.

Сифонная разливка имеет следующие *преимущества* перед разливкой сверху:

1) одновременная отливка нескольких слитков сокращает длительность разливки плавки и позволяет разливать в мелкие слитки плавки большой массы;

2) удобно применять защиту зеркала металла в изложнице шлаковыми смесями или жидким шлаком;

3) поверхность слитка получается чистой, так как металл в изложницах поднимается спокойно без разбрызгивания;

4) повышается стойкость футеровки ковша и улучшаются условия работы стопора и шиберного затвора вследствие меньшей длительности разливки и уменьшения числа открываний и закрываний стопора или затвора;

5) во время разливки можно следить за поведением поднимающегося металла в изложнице и в соответствии с этим регулировать скорость разливки.

*Недостатки сифонной разливки:*

1) сложность и повышенная стоимость разливки, обусловленные расходом сифонного кирпича, установкой дополнительного оборудования и значительными затратами труда на сборку поддонов и центровых;

2) дополнительные потери металла в виде литников (0,7–2,5% от массы разливаемой стали) и возможность потерь при прорывах металла через сифонные кирпичи;

3) необходимость нагрева металла в печи до более высокой температуры, чем при разливке сверху, так как он дополнительно охлаждается в каналах сифонного кирпича;

4) опасность загрязнения стали неметаллическими включениями в результате размывания сифонного кирпича.

*Преимущества разливки сверху:*

1) более простая подготовка оборудования к разливке и меньшая стоимость разливки;

2) меньше опасность загрязнения стали неметаллическими включениями;

3) отсутствие расхода металла на литники;

4) температура металла перед разливкой может быть ниже, чем при сифонной разливке.

Вместе с тем разливке сверху присущи следующие недостатки:

1) образование плен на поверхности нижней части слитков, что является следствием разбрызгивания металла при ударе струи о дно изложницы. Застывшие на стенках изложницы и окисленные с поверхности брызги металла не растворяются в поднимающейся жидкой стали, образуя дефект поверхности – плены, которые не свариваются с металлом при прокатке, благодаря чему поверхность прокатанных заготовок приходится подвергать зачистке;

2) большая длительность разливки, из-за чего снижается стойкость футеровки ковша и в связи с большим числом открываний и закрываний ухудшаются условия работы стопора или шибберного затвора.

Оба способа разливки широко применяют. Как правило, сифонным способом отливают слитки небольшой

массы. Вопрос о том, какой из них является лучшим, до сих пор не решен. Благодаря простоте и отсутствию потерь металла с литниками часто предпочитают разливку сверху. Несмотря на необходимость дополнительной зачистки поверхности проката, разливка сверху для рядовых марок является более экономичной, чем разливка сифоном. В то же время высококачественные в легированные стали, когда стремятся снизить потери дорогостоящего металла на зачистку и получить чистую поверхность слитка, разливают главным образом сифоном. Сифонной разливкой, как правило, получают также слитки массой < 2,5 т. Потери металла при разливке сифоном и сверху в виде скрапа и недоливов составляют 0,6–1,9%; при разливке сифоном дополнительно теряется 0,7–2,5% разливаемой стали в виде литников.

**Разливка стали непрерывная** – способ непрерывного наполнения жидким металлом кристаллизатора с образованием струйноохлаждаемой непрерывнолитой заготовки. Непрерывная разливка стали является наиболее прогрессивным способом. Агрегаты для разливки стали этим методом называют машинами непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) или установками непрерывной разливки стали (УНРС). Металл из ковша (7) (рис. 2.31) заливается непрерывной струей в промежуточное устройство (8), а из него поступает в охлаждаемые водой кристаллизаторы (6), в которые предварительно закладываются стальные заготовки (называемые затравками), образующие дно. При соприкосновении жидкого металла с этими заготовками (затравками) и стенками кристаллизаторов начинается быстрое его затвердевание.

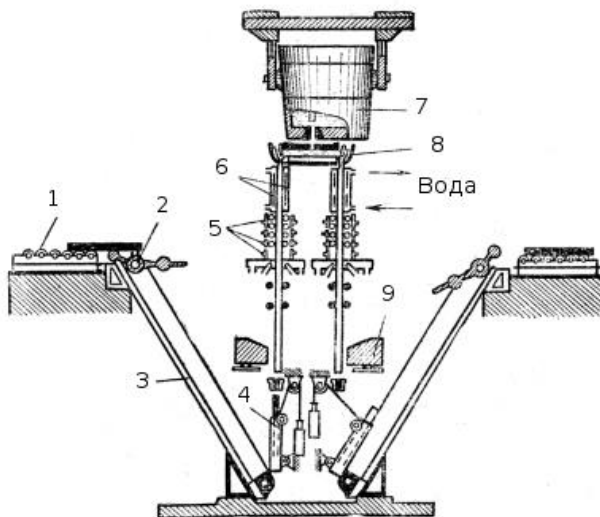


Рис. 2.31. Принципиальная схема и установка для непрерывной разливки стали с двумя машинами:

- 1 – приемный стол; 2 – передаточная тележка; 3 – наклонный конвейер; 4 – кантователь; 5 – вторичное охлаждение и сглаживающие ролики; 6 – кристаллизатор; 7 – разливочный ковш; 8 – разливочное устройство; 9 – тележка газорезки

После частичного затвердевания металла затравка начинает опускаться вниз и слиток непрерывно вытягивается из кристаллизатора роликами, действующими от специального механизма, к тележкам газорезок (9). При этом кристаллизатор непрерывно пополняется жидким металлом сверху из промежуточного устройства (8). Вторичное охлаждение кристаллизующегося слитка происходит при его проходе через зону (5). Затвердевшая заготовка разрезается газорезаками (9) на заготовки мерной длины, которые кантователями (4) укладываются на наклонный конвейер (3),

с которого передаточной тележкой (2) доставляется на приемный стол (1) для дальнейшей обработки – передачи в прокатный или кузнечно-прессовый цех. Применение способа непрерывной разливки стали позволяет сократить отходы металла с 15–20% при обычной разливке до 3–5%.

На установках непрерывной разливки стали (УНРС) отливают заготовки квадратного сечения (размерами от 50х50 до 300х300 мм), плоские слябы (толщиной от 50 до 300 мм и шириной от 300 до 2000 мм), круглые заготовки (диаметром от 100 до 550 мм), из которых получают трубы, сортовой и листовой прокат, поковки. В среднем в мире > 75% всей производимой стали разливается на УНРС, причем в таких странах, как Япония, Франция, Италия, Испания, США, Великобритания, Южная Корея, непрерывным способом производится более 90% стали. В то же время в Китае этот показатель < 50%, в России – чуть более 40%, в Украине – 13,5%, в Польше ~13%.

Существенным недостатком вертикальных УНРС является их большая высота – до 45 метров. Поэтому в последние годы все более широко применяют установки радиального типа (рис. 2.32). Общая высота таких установок, как правило, не превышает 12 метров. Конструктивной особенностью УНРС радиального типа является наличие кристаллизатора определенного радиуса, что обеспечивает получение радиальной технологической линии. После затвердевания заготовки осуществляется ее разгиб в горизонтальной плоскости. Следовательно, выдача готовой заготовки на холодильник осуществляется в горизонтальной плоскости.

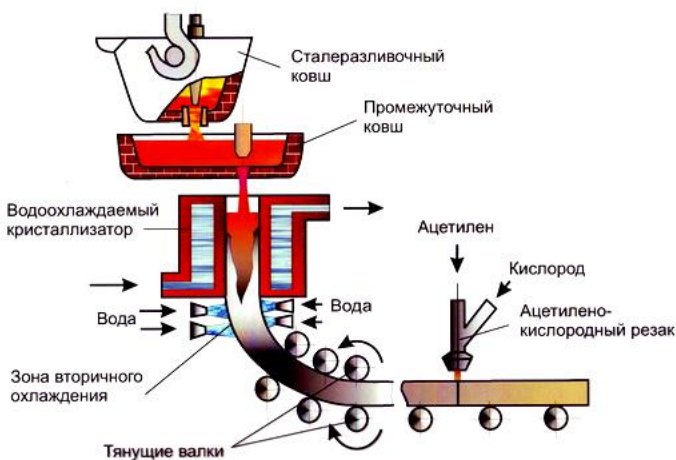


Рис. 2.32. УНРС радиального типа

Преимущества УНРС радиального типа перед вертикальными следующие: меньшая высота машины, высокая скорость разливки, что увеличивает производительность, горизонтальная выдача заготовки на холодильник и пр. Недостатки таких УНРС относятся, главным образом, к качеству заготовки, которое несколько ниже, чем у вертикальнолитой, что объясняется всплыванием неметаллических включений в кристаллизатор к стенке большего радиуса и возможным появлением внутренних трещин, возникающих при разгибе заготовки. Последнее устраняется путем применения системы многоточечного разгиба. В настоящее время радиальные УНРС используются преимущественно для получения сортовой и блюмовой заготовки.

На рубеже тысячелетий в сталелитейной практике появились первые промышленные УНРС для прямого

получения листа, в которых удается исключить из технологической схемы цикл горячей прокатки заготовки. В агрегатах прямой отливки тонкого листа кристаллизатор состоит из двух валков, расположенных непосредственно под промковшом и вращающихся в противоположных направлениях (рис. 2.33).

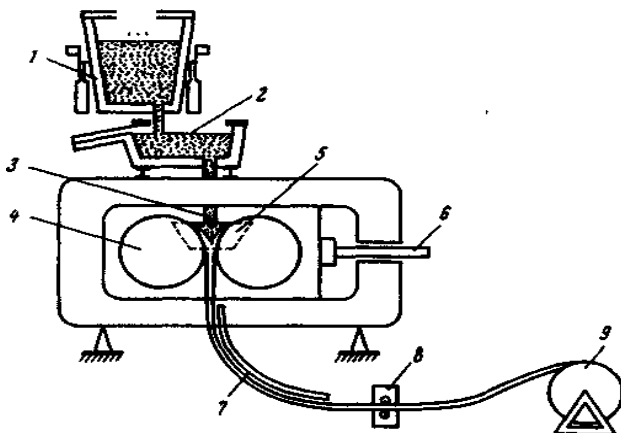


Рис. 2.33. Схема двухвалковой УНРС прямого получения листа: 1 - ковш; 2 - разливочный узел; 3 - погружной стакан; 4 - валки; 5 - уплотнение; 6 - регулятор нагрузки; 7 - направляющий желоб; 8 - приемные валки; 9 - сматыватель

Жидкая сталь при разливке поступает в пространство между валками (4) и при контакте с поверхностью валков кристаллизуется, образуя корочки, которые двигаются вместе с поверхностью и выходят из валков в форме листа, толщина которого определяется расстоянием между валками, а ширина – боковыми стенками кристаллизатора. Для отвода выделяющегося тепла валки, изготовленные, как правило, из сплава меди с хромом, охлаждаются

водой. В качестве покрытия валков используют различные материалы на основе никеля, хрома или керамики.

Технологическая схема получения тонкого листа с применением двухвалковых УНРС имеет огромный потенциал в части экономии энергетических ресурсов (в 8–10 раз), снижения потерь с окалиной (в 40–50 раз), повышения производительности работы персонала (5–10 раз), снижения выбросов парникового газа (в 10–20 раз) при существенном снижении затрат на капитальное строительство, что обеспечивает экономическую мотивацию в части его дальнейшего развития и совершенствования.

В металлургической практике известны также УНРС, технологическая линия которых расположена горизонтально или наклонена под углом 15–20° к горизонтали. Горизонтальные УНРС представляются весьма перспективными в части снижения затрат на строительство машины. Они компактны и их удобно размещать в действующих цехах. При этом нет необходимости увеличивать высоту здания или формировать глубокий колодец. Обслуживание такой машины, ремонт и замена основных узлов весьма удобны и просты.

Достаточно очевидным представляется и тот факт, что качество заготовки при этом будет значительно ниже, вследствие того, что неметаллические включения и пузырьки газа будут всплывать к верхней грани. Такая физическая неоднородность существенно снижает кондиции продукции из заготовки. Кроме того, до настоящего времени на практике не решены полностью вопросы успешного совмещения работы металлоприемника и кристаллизатора



(для условий разливки стали). Поэтому в черной металлургии такие УНРС практически не используются. Широкое распространение горизонтальные УНРС получили при разливке цветных металлов и сплавов.

**Раскисление стали** – обусловлено необходимостью снижения активности кислорода. Окислительные условия ведения плавки в сталеплавильных агрегатах, наличие окислительных шлаков, а также взаимодействие металла с атмосферой при выпуске и разливке является предпосылкой к тому, что кислород, растворенный в стали, к моменту ее выпуска из агрегата имеет повышенную активность, а, следовательно, возникает необходимость раскисления стали в сталеразливочном ковше. Технологическую операцию снижения активности кислорода до необходимых пределов называют *раскислением*, а сталь, прошедшую такую обработку, *раскисленной*. Если раскисленная сталь при затвердевании в изложницах ведет себя спокойно, т.е. из нее почти не выделяются газы, то такую сталь называют *спокойной*. Если раскисление не проводить, то в стали при ее постепенном охлаждении в изложнице будет протекать реакция между растворенным кислородом и углеродом металла:



Образующиеся при этом пузыри монооксида углерода  $\text{CO}_\Gamma$ , выделяясь из кристаллизующегося слитка, приводят к тому, что металл в изложнице интенсивно перемешивается, поверхность его бурлит. Такую сталь называют *кипящей*. Иногда при раскислении из стали удаляют не весь кислород. Оставшийся растворенный кислород вызывает кратковременное кипение металла. Такую сталь

называют *полуспокойной*. Достигнутый при раскислении уровень активности (концентрации) кислорода называют *степенью раскисленности*, от которой зависит структура стального слитка (рис. 2.34). Спокойную сталь получают при полном раскислении в печи и ковше (рис. 2.34, а, г). Она затвердевает без выделения газов и образует плотный слиток, в верхней части которого расположена усадочная раковина (2), а в средней части – усадочная осевая рыхлость (1). Концентрация кислорода в спокойной стали составляет 0,003% (рис. 2.35, 1).

Для устранения усадочных дефектов слитки спокойной стали отливают с прибыльной частью, которая образуется прибыльной надставкой со стенками, футерованными огнеупорной массой малой теплопроводности. Вследствие этого сталь долгое время остается в жидком состоянии и питает усадку слитка, а усадочная раковина образуется в его прибыльной части. Структура слитка спокойной стали, выявленная травлением его продольного осевого разреза (рис. 2.34, а), имеет следующее строение: тонкую наружную корку А из мелких равноосных кристаллов; зону Б крупных столбчатых кристаллов (дендритов); зону В крупных неориентированных кристаллитов; конус осаждения Г – мелкокристаллическую зону у донной части слитка.

## С

**Скрап** (англ. scrap) – вторичный металл, металлическое сырьё в виде лома и отходов, весь оборотный лом, образующийся на металлургическом предприятии: зашлакованные

отходы черных металлов, образующиеся при выпуске, транспортировке и разливке чугуна и стали, литники системы сифонной разливки в слитки, скрапины, получающиеся при сливе остатков жидкого металла и шлака из разливочных ковшей и т.п. Скрап после разделки или в начальном виде используют в качестве металлошихты для переплавки в металлургических печах.

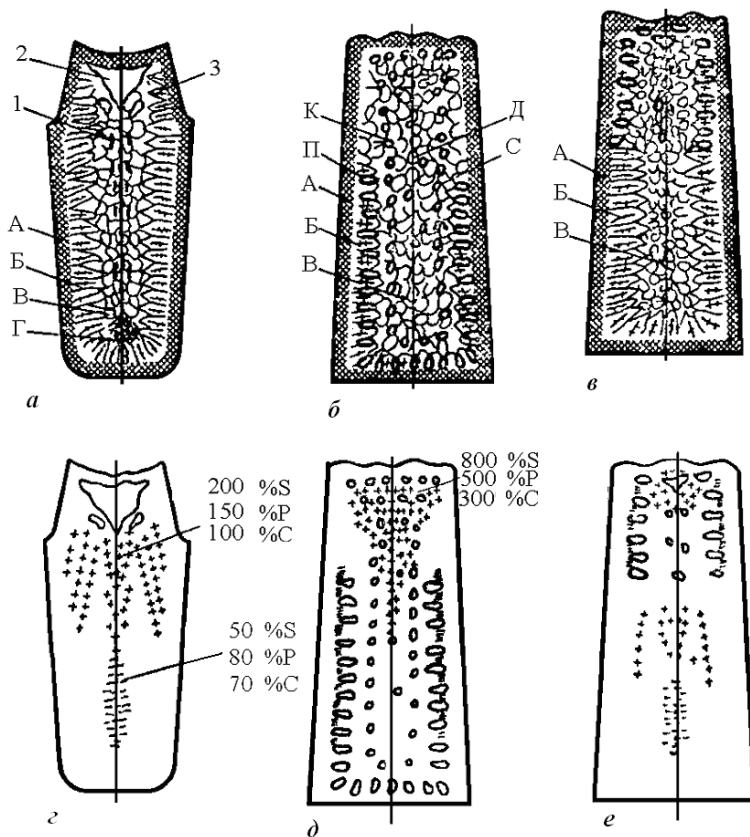


Рис. 2.34. Схематическая структура слитков

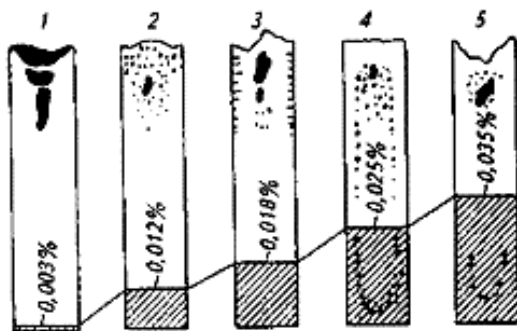


Рис. 2.35. Концентрация кислорода в стали слитков:  
 1 – спокойного; 2 – полуспокойного; 3 – закупоренного  
 и 4, 5 – кипящего

**Сталеплавильное производство** – второй этап двух-стадиальной схемы извлечения железа из руд путем передела чугуна и металлоотходов в сталь. Основными исходными материалами для производства стали являются передельный чугун и стальной лом (скрап). Содержание углерода и примесей в стали значительно ниже, чем в чугуне (табл. 2.2), поэтому сущность любого металлургического передела чугуна в сталь – снижение содержания углерода и примесей путем их избирательного окисления и перевода в шлак и газы в процессе плавки.

Таблица 2.2

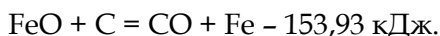
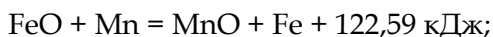
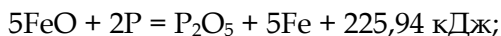
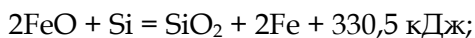
Состав передельного чугуна и низкоуглеродистой стали

Материал	C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %
Чугун передельный	4,0–4,4	0,76–1,26	до 1,75	0,15–0,30	0,03–0,07
Сталь низкоуглеродистая	0,14–0,22	0,12–0,30	до 0,65	0,05	0,0055

Примеси отличаются по своим физико-химическим свойствам, поэтому для удаления каждой из них в плавильном агрегате создают определенные условия, используя основные законы физической химии. Железо окисляется в первую очередь при взаимодействии чугуна с кислородом в сталеплавильных печах:

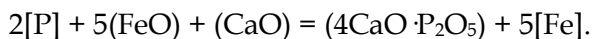


Одновременно с железом окисляются Si, P, Mn, C и др. Образующийся оксид железа при высоких температурах отдаёт свой кислород более активным примесям в чугуне, окисляя их:



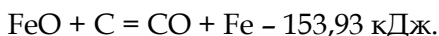
Процессы выплавки стали осуществляют в три этапа.

*Первый этап* – расплавление шихты и нагрев ванны жидкого металла. Температура металла сравнительно невысокая, интенсивно происходит окисление железа, образование оксида железа и окисление примесей: кремния, марганца и фосфора. Наиболее важная задача этапа – удаление фосфора. Для этого желательно проведение плавки в основной печи, где шлак содержит CaO. Фосфорный ангидрид образует с оксидом железа нестойкое соединение  $(\text{FeO})_3 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ . Оксид кальция – более сильное основание, чем оксид железа, поэтому при невысоких температурах связывает  $\text{P}_2\text{O}_5$  и переводит его в шлак:



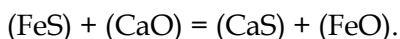
Для удаления фосфора необходимы невысокие температура ванны металла и шлака, достаточное содержание в шлаке FeO. Для повышения содержания FeO в шлаке и ускорения окисления примесей в печь добавляют железную руду и окалину, наводя железистый шлак. По мере удаления фосфора из металла в шлак, содержание фосфора в шлаке увеличивается. Поэтому необходимо убрать этот шлак с зеркала металла и заменить его новым со свежими добавками CaO.

*Второй этап* – кипение металлической ванны – начинается по мере прогрева до более высоких температур. При повышении температуры более интенсивно протекает реакция окисления углерода, происходящая с поглощением теплоты:



Для окисления углерода в металл вводят незначительное количество руды, окалины или вдувают кислород. При реакции оксида железа с углеродом, пузырьки оксида углерода 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 газы, проникающие в пузырьки CO. Все это способствует повышению качества металла. Следовательно, этот этап – основной в процессе выплавки стали. Также создаются условия для удаления серы. Сера в стали находится в виде сульфида (FeS), который растворяется также в основном шлаке. Чем выше температура, тем большее количество

сульфида железа (FeS) растворяется в шлаке и взаимодействует с оксидом кальция CaO:



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

*Третий этап* – раскисление стали заключается в восстановлении оксида железа, растворённого 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: 1) осаждающее раскисление осуществляется введением в жидкую сталь растворимых раскислителей (ферромарганца, ферросилиция, алюминия), содержащих элементы, которые обладают большим сродством к кислороду, чем железо. В результате раскисления восстанавливается железо и образуются оксиды: MnO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др., которые имеют меньшую плотность, чем сталь, и удаляются в шлак; 2) диффузионное раскисление осуществляется раскислением шлака. Ферромарганец, ферросилиций и алюминий в измельчённом виде загружают на поверхность шлака. Раскислители, восстанавливая оксид железа, уменьшают его содержание в шлаке. Следовательно, оксид железа, растворённый в стали, переходит в шлак. Образующиеся при этом процессе оксиды остаются в шлаке, а восстановленное железо переходит в сталь, при этом в стали снижается содержание неметаллических включений и повышается ее качество.

Легирование стали осуществляется введением ферросплавов или чистых металлов в необходимом количестве в расплав. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду меньше, чем у железа (Ni, Co, Mo, Cu), при плавке и разливке не окисляются, поэтому их вводят в любое время плавки. Легирующие элементы, у которых сродство к кислороду больше, чем у железа (Si, Mn, Al, Cr, V, Ti и др.), вводят в металл после раскисления или одновременно с ним в конце плавки, а иногда в ковш.

**Сталеплавильное производство в конверторе** – выплавка стали из жидкого чугуна в конвертере с основной футеровкой и продувкой кислородом через водоохлаждаемую фурму – кислородно-конвертерный процесс. Шихтовыми материалами кислородно-конвертерного процесса являются жидкий передельный чугун, стальной лом (не более 30%); известь для наведения шлака; железная руда; боксит  $Al_2O_3$  и плавиковый шпат  $CaF_2$ , применяемые для разжижения шлака. Кислородно-конвертерный процесс получил в настоящее время наибольшее распространение.

Кислородный конвертер верхнего дутья представляет собой груше-видный сосуд – стальную реторту (с открытой верхней горловиной), футерованную огнеупорным кирпичом (рис. 2.36).

Конвертер имеет цилиндрическую часть, легко заменяемое днище и конусообразную горловину. Рабочее пространство – цилиндрическая часть конвертера крепится в литом, стальном кольце с двумя цапфами. В процессе работы конвертер может проворачиваться на цапфах вокруг горизонтальной оси на  $360^\circ$  при помощи приводных



механизмов (специривода) для завалки скрапа, заливки чугуна, слива стали и шлака. В районе горловины имеется летка для слива шлака и выпуска стали.

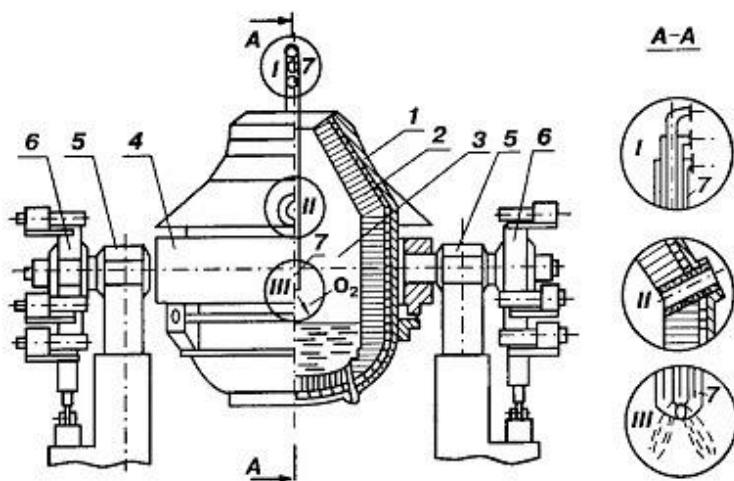


Рис. 2.36. Устройство кислородного конвертера верхнего дутья:  
 1 – корпус; 2 – футеровка; 3 – рабочее пространство конвертера;  
 4 – опорное кольцо с цапфами и системой крепления в нем корпуса; 5 – опорные узлы и станины; 6 – механизм поворота;  
 7 – кислородная фурма с системой крепления и перемещения

Кислородно-конвертерный процесс осуществляется в конвертере с основной смолодоломитовой (доломит, смешанный со смолой) футеровкой и с глухим дном (рис. 2.37). Перед плавкой конвертер наклоняют, через горловину с помощью завалочных машин загружают скрап (рис. 2.37, а) и заливают чугун (рис. 2.37, б) при температуре 1250–1400 °С.

Подачу и заливку жидкого чугуна в конвертер производят двумя способами, определяющимися типом применяемых миксеров – стационарных или передвижных.

Металлолом заполняют магнитограферными кранами в совки, которые взвешивают и устанавливают на скраповоз, подающий их на рабочую площадку или в загрузочный пролет. металлолом из совков заваливают в конвертер загрузочной машиной.

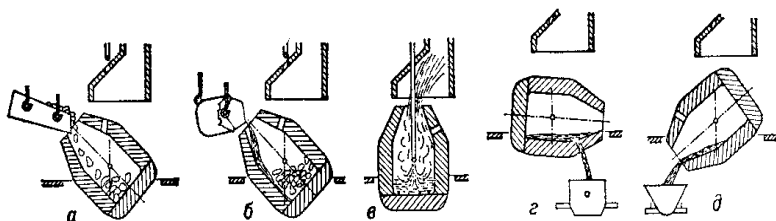


Рис. 2.37. Схема получения стали в кислородном конвертере:  
 а – загрузка металлолома; б – заливка чугуна; в – продувка;  
 г – выпуск стали; д – слив шлака

После заливки жидкого чугуна и завалки металлолома конвертер поворачивают в вертикальное рабочее положение. Внутрь его через горловину вводят водоохлаждаемую фурму и через нее подают технический чистый кислород под давлением 0,9–1,4 МПа. Одновременно с началом продувки в конвертер загружают известь (с целью образования основного шлака, связывающего фосфор), боксит, железную руду. Струи кислорода проникают в металл, вызывают в конвертере его циркуляцию и перемешивание со шлаком. Благодаря интенсивному окислению примесей чугуна при взаимодействии с кислородом в зоне под фурмой развивается температура до 2500 °С.

Под воздействием дутья примеси чугуна (кремний, марганец, углерод и др.) окисляются, выделяя значительное

количество тепла, в результате чего одновременно снижается содержание примесей в металле и повышается температура, поддерживая его в жидком состоянии. Течение кислородно-конвертерного процесса (последовательность реакций окисления примесей чугуна) обуславливается его температурным режимом и регулируется изменением количества дутья или введением в конвертер «охладителей» (скрапа, железной руды, известняка). Когда содержание углерода достигает требуемого значения (количество углерода определяется по времени от начала продувки и по количеству израсходованного кислорода), продувку прекращают и фурму извлекают из конвертера. После этого конвертер поворачивают и выпускают в сталеразливочный ковш, затем из конвертера сливают шлак. Плавка в конвертерах заканчивается через 25–50 мин. Кислородно-конвертерный процесс получения стали характеризуется очень высокой интенсивностью (400–500 т/ч стали), благодаря высокой производительности и малой металлоемкости он стал основным способом производства стали.

Применение при конвертировании кислородного дутья вместо воздушного позволило получать сталь с низким содержанием азота (0,002–0,006%). Высокая температура кислородно-конвертерного процесса способствует интенсивному окислению углерода, поэтому содержание кислорода, растворенного в металле, снижается до 0,005–0,01%. Расход кислорода на 1 т чугуна при кислородно-конвертерном процессе составляет  $\approx 53 \text{ м}^3$ . При одном и том же качестве стали кислородно-конвертерный процесс по сравнению с мартеновским даёт экономию по капиталовложениям на 20–25 %, снижение себестоимости стали на 2–4%

и увеличение производительности труда на 25–30%. Рост производства конвертерной стали сопровождается ростом ёмкости конвертеров. С технологической точки зрения увеличение ёмкости конвертера не создает каких-либо дополнительных трудностей ведения плавки. Поэтому даже в крупных конвертерах выплавляют не только рядовую низкоуглеродистую сталь, но и среднеуглеродистую, высокоуглеродистую, низколегированную и легированную стали.

Недостатком кислородно-конвертерного способа получения стали является большое пылеобразование, обусловленное обильным окислением и испарением железа. В настоящее время разработаны меры, обеспечивающие контроль и регулирование хода плавки. В кислородных конвертерах выплавляют конструкционные стали с различным содержанием углерода, кипящие и спокойные. Можно выплавлять низколегированные (до 2–3% легирующих элементов) стали, при этом легирующие элементы вводят в ковш. Сортамент стали, получаемой этим способом, непрерывно расширяется, по качеству кислородно-конвертерная легированная сталь не уступает мартеновской стали и электростали соответствующих марок.

**Сталеплавильное производство в мартеновской печи** – чугуны перерабатывают в сталь на подду пламенной отражательной печи. В обычной печи невозможно достичь температур, необходимых для получения стали. П. Мартен в 1864 г. во Франции предложил подавать в печь топливо и воздух, предварительно подогретые до 1100 °С, используя для подогрева тепло отходящих газов (принцип регенерации тепла отходящих печных газов). Это позволяет поднимать температуру в печи до 1800 °С.

Мартеновская печь – это емкость прямоугольной формы, подина, стенки и свод которой футерованы огнеупором (рис. 2.38).

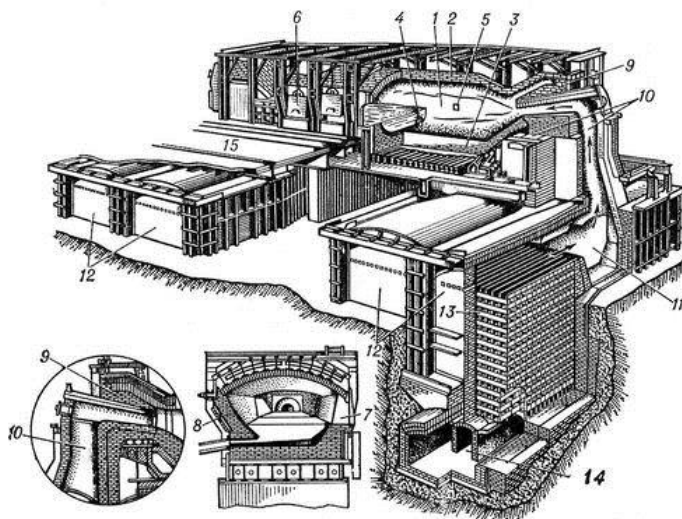


Рис. 2.38. Устройство мартеновской печи:

- 1 – рабочее пространство; 2 – свод; 3 – подина; 4 – сталевыпускное отверстие; 5 – отверстие для спуска шлака; 6 – завалочные окна;
- 7 – передняя стенка; 8 – задняя стенка; 9 – головки;
- 10 – вертикальные каналы; 11 – шлаковик; 12 – регенераторы;
- 13 – насадка регенераторов; 14 – борова; 15 – рабочая площадка

С торцевых сторон мартеновской печи имеются головки, в которых расположены фурмы для подачи воздуха и топлива (мазут, газ), а также каналы для отвода печных газов. Печь с каждой стороны снабжена двумя регенераторами (полости, заполненные пористой огнеупорной насадкой).

Современные мартеновские печи отапливают обычно смесью доменного и коксовального (иногда природного газа или мазута) газов и оборудуют четырьмя регенераторами с насадками. Продукты горения из рабочего пространства печи направляются в одну пару регенерата и нагревают их садку, затем впускаются в дымовую трубу. В это время газовое топливо и воздух подают в печь через вторую пару регенераторов, насадка которых была нагрета раньше. Через некоторое время с помощью автоматически переключающихся клапанов меняется направление входа печных газов и подачи топлива.

Мартеновские печи имеют разную вместимость (10–500 т). Их рабочее пространство ограничено снизу подиной, сверху – сводом, а с боков – передней и задней стенками. Загружают в печь твердые материалы через завалочные окна. Мартеновские печи бывают двух типов – стационарные и качающиеся. Большинство мартеновских печей стационарные. Качающиеся мартеновские печи обычно применяются для переработки фосфористых чугунов, т.к. при этом требуется несколько раз «скачивать» богатый фосфором шлак, что легче осуществлять на качающихся печах.

Мартеновские печи могут отапливаться жидким (мазутом) или газообразным (природный, смешанный, генераторный газы) топливом. Смешанный газ (коксовый и доменный) и генераторный газ, обладающие недостаточной теплотой сгорания, перед поступлением в рабочее пространство подогреваются в регенераторах примерно до 1150 °С. Природный газ и мазут используются без подогрева. Кислород, служащий для интенсификации горения

топлива, вводится через фурмы, помещенные в головках печи, а подаваемый для продувки ванны – через фурмы, опускаемые в отверстия в своде. Некоторое количество топлива может поступать вместе с кислородом в рабочее пространство печи с помощью топливо-кислородных горелок, также опускаемых через свод. Печи, отапливаемые низкокалорийными видами газообразного топлива, имеют две пары шлаковиков и две пары регенераторов (для подогрева газа и подогрева воздуха), располагаемых попарно соответственно под каждой головкой печи; отапливаемые мазутом или природным газом имеют под каждой головкой по одному шлаковику и одному регенератору – только для подогрева воздуха. Несмотря на наличие регенераторов, отходящие газы перед дымовой трубой имеют температуру 400–800 °С. Для утилизации этого тепла за мартеновской печью устанавливают котлы-утилизаторы. Печи оборудованы контрольно-измерительной аппаратурой, позволяющей не только контролировать их работу, но и автоматически поддерживать заданный тепловой режим в различные периоды плавки.

Газ подают в печь по центральному каналу, воздух – по двум боковым. Сходясь в рабочем пространстве печи, эти каналы образуют так называемую головку печи, формирующую газовое пламя. Образовавшийся факел направлен на шихту. Факел имеет температуру 1750–1800 °С и нагревают рабочее пространство печи и шихту, в результате чего происходит окисление примесей шихты при плавке. Для окисления примесей чугуна необходим кислород и, хотя атмосфера в мартеновской печи окислительная, кислорода

печных газов недостаточно для ведения процесса окисления. Поэтому необходимым условием мартеновской плавки является присутствие в исходных продуктах железного лома (скрапа), кислород оксидов которого и является окислителем примесей чугуна, если его не хватает, то в шихту добавляют железную руду.

Отходящие газы, имеющие температуру 1500–1600 °С, проходят очистные устройства и направляются в регенератор, где нагревают футеровку (насадку) до 1250–1280°С. Когда футеровка достаточно нагрета, направление потоков через печь меняется на обратное. Поступающие воздух и газ воспринимают тепло от кирпичей насадки, а отходящие газы нагревают вторую камеру. Таким образом, достигается экономия топлива и повышается рабочая температура.

Использование кислорода для интенсификации работы мартеновских печей приводит к постепенному уменьшению роли регенераторов. В связи с этим в 60-х годах XX века на ряде металлургических заводов были пущены в эксплуатацию так называемые двухванные печи (рис. 2.39), вообще не имеющие регенераторов.

Выпуск стали и шлака из мартеновской печи после завершения плавки проводят через летку в задней продольной стенке печи. На время плавки летку заделывают магнезитовым порошком и огнеупорной глиной.

Мартеновская печь – крупное сооружение, и процесс выплавки стали занимает в среднем 12–14 часов. На загрузку печи рудой, металлоломом и чугуном уходит около 5 часов, на расплавление – 4 часа и на рафинирование и корректировку окончательного состава стали еще 3–4 часа.



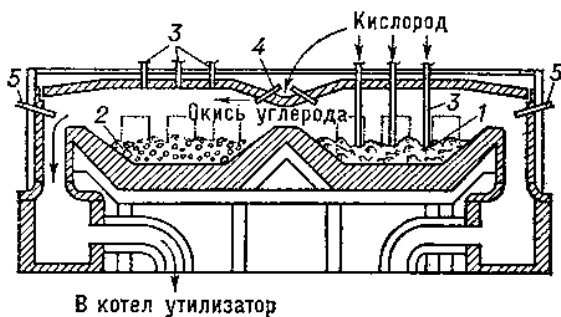


Рис. 2.39. Двухвальная сталеплавильная печь:

- 1 – жидкий металл; 2 – твёрдая шихта; 3 – продувочная фурма;  
4 – дожигающая фурма; 5 – резервная топливная горелка

Несмотря на резкое сокращение доли мартеновского металла в общем объеме производства стали, роль мартеновского процесса в черной металлургии многих стран еще достаточно высока. Использование кислорода, природного газа, огнеупоров высокого качества позволяет значительно интенсифицировать мартеновский процесс. Вместе с тем строительство новых мартеновских печей повсеместно прекращено.

Мартеновским способом в основном выплавляют высококачественную углеродистую и низколегированную сталь. Мартеновский способ получил широкое применение благодаря возможности использования различного сырья и разнообразного топлива. Различают следующие разновидности мартеновского производства в зависимости от используемого сырья: *скрап-процесс* и *скрап-рудный процесс*.

При *скрап-процессе* шихта состоит из 60–70% стального лома и 30–40% твердого чушкового чугуна, эта разновидность процесса применяется на заводах, не имеющих

доменного производства. При *скрап-рудном* процессе применяют шихту, состоящую из 20–50% скрапа и 50–80% жидкого чугуна, хранящегося после выпуска из доменных печей в миксерах. Название этого процесса объясняется тем, что для ускорения окисления примесей чугуна в печь загружают красный железняк в количестве 15–30% от массы металлической части шихты. Скрап-рудным процессом выплавляется основная масса мартеновской стали, которая идет на изготовление проката.

В современном сталеплавильном производстве для кладки стен и пода печей применяются как кислые, так и основные огнеупоры, этим отличается устройство *основных* и *кислых мартеновских печей*.

В *основных мартеновских печах* выплавляют углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества, низко- и среднелегированные. *Кислым мартеновским способом* выплавляют более качественные стали. Стали, выплавляемые в кислых мартеновских печах, содержат меньше водорода и кислорода, неметаллических включений, чем выплавленные в основной печи.

Мартеновский способ получения стали – трудоемкий, длительный процесс (одна плавка занимает 12–14 часов), поэтому в настоящее время вытесняется более прогрессивными конвертерным способом.

**Сталеплавильное производство в электрических печах** – сталь из чугуна получают в электродуговой или индукционной печи. Большими преимуществами электроплавки являются: возможность быстрого достижения высокой температуры, точная регулировка температуры,

создание в печи любой атмосферы. В настоящее время все высококачественные стали получают электропечным способом.

Емкость дуговых печей от 3 до 300 т, индукционных – от 5 кг до 25 т. При плавке в электропечах, благодаря достижению высоких температур (до 2000 °С), возможны выплавка высоколегированных сталей специального назначения, вакуумная плавка или плавка в контролируемой атмосфере. Время плавки в дуговых электропечах зависит от емкости печей и может составлять от 1 до 3 часов.

В кислородном конвертере и мартеновской печи окислительные условия сохраняются в течение всей плавки, а в дуговой печи легко создать окислительную, восстановительную и нейтральную атмосферы. Угар легирующих и раскислителей в электропечи на 25–30% меньше, чем в других плавильных агрегатах. Электропечь незаменима для переработки металлизированного сырья, доля которого с каждым годом увеличивается.

Дуговая электропечь преимущественно представляет собой емкость круглого сечения – стальной кожух, футерованный изнутри огнеупорным кирпичом (рис. 2.40, а). Рабочее пространство печи сверху ограничено сводом 1, снизу – подом. Свод печи съемный, через него пропущены три графитовых электрода 6.

Современные электропечи работают на трехфазном переменном токе и потому имеют три электрода. Электродуга, возникающая между электродами и ванной расплава, является источником тепла для плавки. Такие печи (прямого действия с вертикальным расположением электродов) в настоящее время применяются только для выплавки стали,

выпускаются емкостью 12, 25, 50, 100, 200 т. Применяют угольные и графитовые электроды диаметром 200–500 мм. В передней стенке печи находится завалочное окно (2), которое служит для завалки шихты и наблюдения за ходом плавки. Для выпуска металла в задней стенке имеется отверстие (5) с желобом (4). В некоторых печах жидкий металл выпускается через желоб (4), вставляемый в завалочное окно (2). Для наклона печи служит механизм (3).

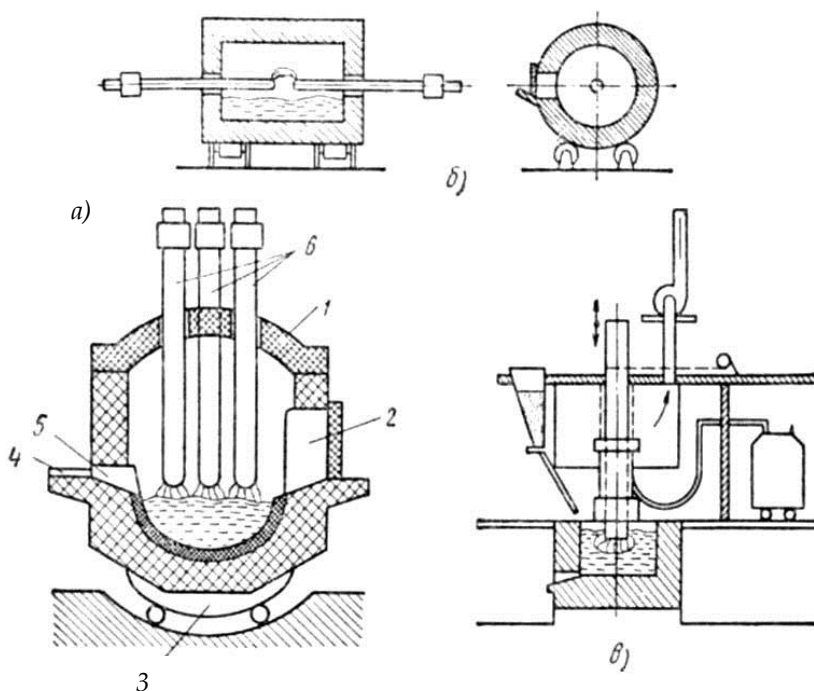


Рис. 2.40. Схема дуговых электропечей с разными способами нагрева:  
 а - прямого действия; б - печи косвенного действия;  
 в-с закрытой дугой

Кладку электросталеплавильных печей делают либо основной – при выплавке главным образом высококачественных и легированных сталей для производства слитков, либо кислой – при выплавке углеродистых и низколегированных сталей для фасонного литья.

В зависимости от емкости и конструкции печи загружаются различно: через завалочное окно вручную, лотками и завалочной машиной или сверху бадьей или корзиной после подъема и отвода в сторону свода или выкатывания печи. После загрузки печи к электродам подводят ток. Благодаря высокой температуре горения дуги (около 3500 °С) происходит бурное плавление шихты. Плавка с окислением во многом сходна с мартеновским скрапрудным процессом. Обычно ее применяют для получения углеродистых сталей. Шихтой в этом случае служат стальной лом, передельный чугуны, кокс и известь в небольшом количестве (2–3%). Плавка имеет два периода: *окислительный* и *восстановительный*.

В первом – окислительном периоде плавки примеси окисляются кислородом, находящимся в печи (главным образом кислородом железной руды). Образующаяся закись железа растворяется в металле и вступает в соединение с кремнием, марганцем, фосфором и углеродом. Образующиеся окислы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$  и создают шлак.

Во втором восстановительном периоде электроплавки происходит науглероживание металла, если количество углерода окажется ниже заданной нормы, затем раскисление и удаление серы. Раскислителем служит карбид кальция  $\text{CaC}_2$ .

С целью получения легированных сталей производят доводку плавки: вводят феррохром, ферротитан, феррованадий и другие ферросплавы.

Для выплавки качественных высоколегированных сталей и сплавов специального назначения с низким содержанием углерода, а также для производства тонкостенного фасонного литья специальными методами (по выплавляемым моделям, под давлением и т.п.) применяется плавка в индукционных печах. Индукционная плавильная печь представляет собой электротермическую установку для плавки материалов с использованием индукционного нагрева. В промышленности применяют в основном *индукционные тигельные печи* и *индукционные канальные печи*.

Принцип индукционного нагрева заключается в преобразовании энергии электромагнитного поля, поглощаемой электропроводным нагреваемым объектом, в тепловую энергию. В установках индукционного нагрева электромагнитное поле создают индуктором, представляющим собой многовитковую цилиндрическую катушку (соленоид). Через индуктор пропускают переменный электрический ток, в результате чего вокруг индуктора возникает изменяющееся во времени переменное магнитное поле.

В плавильной индукционной канальной печи (рис. 2.41) цилиндрический многовитковый индуктор из медной профилированной трубки насажен на замкнутый сердечник из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Вокруг индуктора размещают огнеупорную керамическую футеровку с узким кольцевым каналом (горизонтальным или вертикальным), где находится жидкий металл. Необходимым условием работы является замкнутое электропроводное кольцо. Поэтому невозможно расплавить отдельные куски твердого металла в такой печи. Для пуска

печи приходится в канал заливать порцию жидкого металла из другой печи или оставлять часть жидкого металла от предыдущей плавки (остаточная емкость печи).

В стальном магнитопроводе индукционной канальной печи замыкается большой рабочий магнитный поток и лишь небольшая часть полного магнитного потока, создаваемого индуктором, замыкается через воздух в виде потока рассеяния. Поэтому такие печи успешно работают на промышленной частоте (50 Гц).

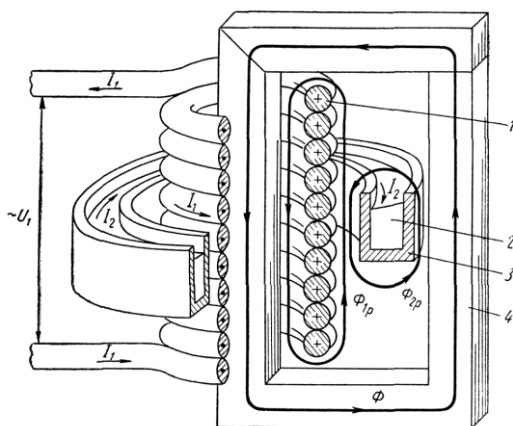


Рис. 2.41. Схема устройства индукционной канальной печи:  
 1 – индикатор; 2 – металл; 3 – канал; 4 – магнитопровод;  
 $\Phi$  – основной магнитный поток;  $\Phi_{1p}$  и  $\Phi_{2p}$  – магнитные потоки  
 рассеяния;  $U_1$  и  $I_1$  – напряжение и ток в цепи индуктора;  
 $I_2$  – ток проводимости в металле

В настоящее время существует большое число типов и конструкций таких печей (однофазные и многофазные, с одним и несколькими каналами, с вертикальным и горизонтальным закрытыми каналами разной формы). Эти печи

применяют для плавки цветных металлов и сплавов со сравнительно низкой температурой плавления, а также для получения высококачественного чугуна. При плавке чугуна печь используют либо в качестве копильника (миксера), либо в качестве плавильного агрегата. Конструкции и технические характеристики современных индукционных канальных печей приведены в специальной литературе.

В плавильной *индукционной тигельной* печи (рис. 2.42) расплавляемый металл находится в керамическом тигле, помещенном внутри цилиндрического многовиткового индуктора. Индуктор изготавливают из медной профилированной трубки, через которую пропускают охлаждающую воду.

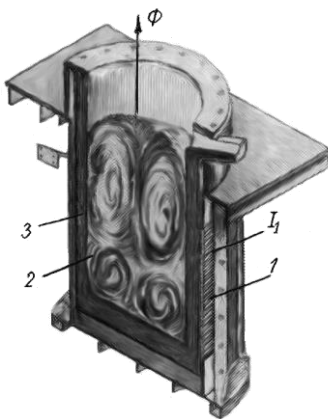


Рис. 2.42. Схема устройства индукционной тигельной печи:  
1 – индуктор; 2 – металл; 3 – тигель (стрелками показана траектория циркуляции жидкого металла в результате электродинамических явлений)



Отсутствие стального сердечника приводит к резкому увеличению магнитного потока рассеяния; число магнитных силовых линий, сцепляемых с металлом в тигле, будет крайне мало. Это обстоятельство требует соответствующего увеличения частоты изменения (во времени) электромагнитного поля. Поэтому для эффективной работы индукционных тигельных печей приходится питать их токами повышенной, а в отдельных случаях и высокой частоты от соответствующих преобразователей тока. Подобные печи имеют очень низкий естественный коэффициент мощности ( $\cos \varphi = 0,03-0,10$ ). Поэтому необходимо применять конденсаторы для компенсации реактивной мощности.

В настоящее время имеется несколько типов индукционных тигельных печей в виде соответствующих размерных рядов (по емкости) высокой, повышенной и промышленной частоты для плавки стали (тип ИСТ).

По сравнению с дуговыми печами индукционные печи обладают рядом преимуществ: выделяющееся непосредственно в металле тепло, высокая равномерность металла по химическому составу и температуре, отсутствие источников загрязнения металла (помимо футеровки тигля), удобство управления и регулирования процесса плавки, гигиеничность условий труда. Кроме этого, для индукционных тигельных печей характерны: более высокая производительность вследствие высоких удельных (на единицу емкости) мощностей нагрева; возможность плавить твердую шихту, не оставляя металл от предыдущей плавки (в отличие от канальных печей); малая масса футеровки по сравнению с массой металла, что уменьшает аккумуляцию

тепловой энергии в футеровке тигля, снижает тепловую инерцию печи и делает плавильные печи этого типа исключительно удобными для периодической работы с перерывами между плавками, в частности для фасонно-литейных цехов машиностроительных заводов; компактность печи, что позволяет достаточно просто изолировать рабочее пространство от окружающей среды и осуществлять плавку в вакууме или в газовой среде заданного состава (рис. 2.43). При плавке в таких печах получается очень чистая сталь, не содержащая оксидов. Поэтому в металлургии широко применяют вакуумные индукционные тигельные печи (тип ИСВ).

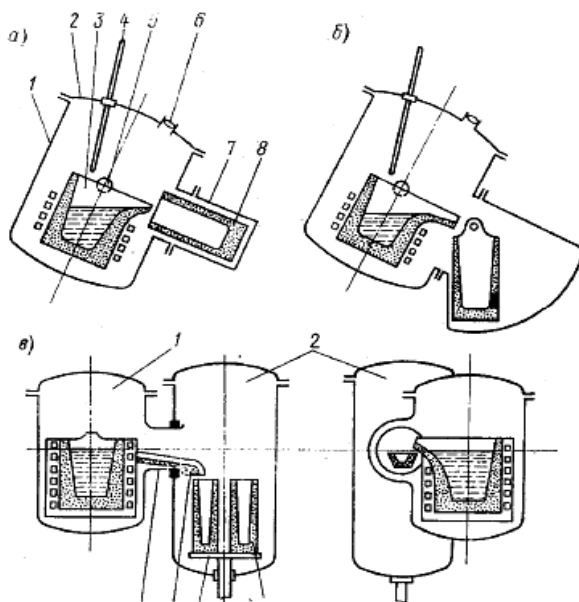


Рис. 2.43. Поворотные вакуумные индукционные тигельные печи:  
 а – с фиксированной изложницей; б – с качающейся изложницей; в – с выносной разливочной камерой

По конструктивному исполнению вакуумные индукционные тигельные печи можно классифицировать следующим образом: поворотные печи с фиксированной изложницей, с качающейся изложницей, с выносной разливочной камерой; печи с наклоняющимся тиглем внутри неподвижного кожуха, с неподвижными кожухом и тиглем, с индуктором, расположенным вне вакуумного пространства.

Поворотная печь с фиксированной изложницей (рис. 2.43, а) представляет собой герметичный кожух с крышкой (2) и боковой горловиной для присоединения камеры изложницы (7). Фланцы крышки и горловины имеют, как и у вакуумных печей других конструкций, резиновые уплотнения и охлаждаются водой для предохранения резиновых прокладок от перегрева. При сливе металла из тигля (3) в изложницу (8) наклоняется вся печь вместе с кожухом; изложница неподвижна относительно тигля. Откачка производится через полую ось наклона (5), что избавляет от необходимости устройства гибкого вакуумпровода. Печь снабжена застекленным смотровым окном (6) и ломиком (4), проходящим сквозь вакуумное уплотнение в крышке и позволяющим осаживать шихту без нарушения вакуума. Так как плавильная камера (1) такой печи при заданной ее емкости имеет минимальные размеры, а в отдельной разливочной камере (2) может располагаться на поворотном столе (4) большое число изложниц или форм (3). При разливке поворачивается плавильная камера; сливаемый металл по наклонному желобу (5), проходящему в соединительном патрубке (6), попадает

в изложницу (8), находящуюся в разливочной камере (7). Недостатком печи является попадание металла при сливе на боковую стенку изложницы, что приводит к ее размыву, а также ухудшает условия кристаллизации слитка, портит его поверхность и затрудняет извлечение его из изложницы. Для устранения этого недостатка разработаны поворотные печи с качающейся изложницей (рис. 2.43, б). В такой печи изложница, подвешенная на цапфах, располагается в достаточно просторной камере и при повороте печи занимает вертикальное положение в течение всего времени сливания металла.

По режиму работы обе рассмотренные печи относятся к классу печей периодического действия: при каждом рабочем цикле в печь напускается воздух и крышка печи поднимается. Емкость таких печей лишь несколько сотен килограммов. Значительно большую емкость – 10 т и более могут иметь вакуумные поворотные печи с выносной разливочной камерой (рис. 2.43, в), поскольку плавильная камера (1) такой печи при заданной ее емкости имеет минимальные размеры, а в отдельной разливочной камере (2) может располагаться на поворотном столе (4) большое число изложниц или форм (3). При разливке поворачивается плавильная камера; сливаемый металл по наклонному желобу (5), проходящему в соединительном патрубке (6), попадает в изложницу, находящуюся в разливочной камере.

Печи с выносными разливочными камерами могут быть как периодического, так и полунепрерывного действия. Последние отличаются сохранением вакуума в плавильной камере в течение всей эксплуатации, длительность

которой определяется состоянием тигля. Это резко повышает производительность печи за счет исключения операции откачки в каждом рабочем цикле и улучшает качество выплавляемого металла благодаря меньшему количеству адсорбированных печью газов. Печи полунепрерывного действия с выносной разливочной камерой оборудуются механизмом для втягивания желоба (5) в плавильную или разливочную камеру и вакуумным затвором, перекрывающим соединительный патрубок (6). Кроме того, они имеют загрузочную камеру, располагающуюся над тиглем и также отделяющуюся от плавильной камеры вакуумным затвором. Такое устройство позволяет производить загрузку печи и извлечение изложниц из разливочной камеры без нарушения вакуума в плавильной камере.

Наибольшее распространение имеют вакуумные печи с наклоняющимся тиглем внутри неподвижного кожуха. Их преимущества – возможность заливки металла в любое число изложниц или форм, удобство наблюдения за процессом разливки благодаря неподвижности смотровых окон, жесткое крепление системы откачки к кожуху печи без поворотных уплотнений. Печь с неподвижным кожухом и наклоняющимся тиглем периодического действия (рис. 2.44) имеет устройство для осаживания шихты (1) и смотровое окно (2), камера изложниц у нее не отделяется от плавильной камеры. Печь полунепрерывного действия отличается от нее наличием загрузочной камеры и камеры изложниц, отделяемых вакуумными затворами от плавильной камеры.

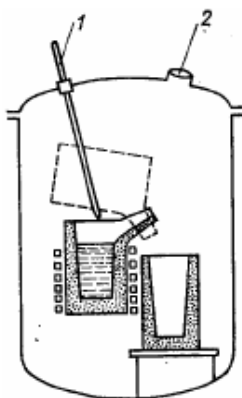


Рис. 2.44. Вакуумная индукционная тигельная печь с наклоняющимся тиглем внутри неподвижного кожуха

Вакуумные печи с неподвижным кожухом и тиглем (рис. 2.45) имеют донную разливку металла. Они выполняются небольшой емкости и позволяют получать слитки без неметаллических включений, поскольку шлак и примеси находятся на поверхности металла. Кроме того, печь с донным сливом имеет минимальные размеры кожуха, а срок службы тигля в такой печи возрастает благодаря отсутствию механических нагрузок, связанных с наклоном. Отверстие в дне тигля запирается внутренним или наружным стопором либо с помощью расплавляющейся пробки.

Достоинство печей с внутренним стопором (рис. 2.45, а) – возможность свободного истечения металла и выпуска его порциями, а недостатки – необходимость изготавливать шток стопора из материала, обладающего высокой огнеупорностью и химической стойкостью, а также уменьшение полезной емкости тигля и ухудшение условий его загрузки.

Печи с наружным стопором (рис. 2.45, б) лишены этих недостатков, но во избежание утечки металла пробка должна прижиматься к дну тигля с большой силой, а при открывании отверстия – быстро отводиться в сторону, чтобы предотвратить разбрызгивание металла и размыв пробки.

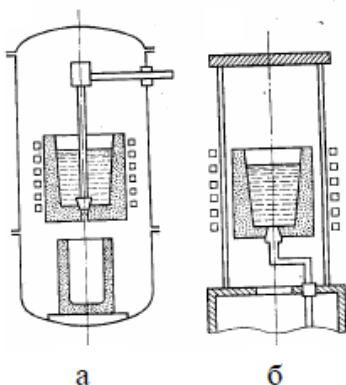


Рис. 2.45. Вакуумные индукционные тигельные печи с неподвижным кожухом и тиглем

Наиболее надежно работают печи с донными стопорами, имеющие графитовые тигли и графитовые пробки. Печи с донной разливкой с помощью расплавляющейся пробки, которая изготавливается из того же металла, что и расплавляемый в тигле, имеют удлиненный сливной носок, оборудованный дополнительным индуктором для расплавления пробки по окончании плавки.

Отдельную группу составляют печи с индуктором, расположенным вне вакуумного пространства (рис. 2.45, б), имеющие обычно донную разливку. В качестве кожухов этих печей, которые должны быть непроводящими и немагнитными, газонепроницаемыми и термостойкими,

используют трубы из кварца или плавленого электрокорунда, уплотненные на торцах стальными крышками. Однако по условиям механической прочности эти трубы не могут быть большого диаметра, вследствие чего печи такого типа не получили широкого распространения.

Современные вакуумные печи имеют также различные приспособления, позволяющие без нарушения вакуума производить необходимые технологические операции: бункера для дополнительных порций шихты, дозаторы для введения в тигель в определенном порядке присадочных материалов, устройства для измерения температуры жидкого металла термопарой и для взятия его проб, скребки для зачистки тигля после слива металла и др.

Герметичный кожух вакуумной индукционной печи представляет собой металлический замкнутый виток, охватывающий индуктор (исключение составляют печи с индуктором вне вакуумного пространства и немагнитическим кожухом). Увеличение диаметра кожуха с целью снижения потерь в нем связано с возрастанием вакуумируемого объема и необходимостью использования более мощной откачной системы, что нежелательно. Поэтому вакуумные печи даже небольшой емкости часто выполняют с магнитопроводом, что позволяет резко сократить потери в кожухе, не увеличивая его размеров. Для вакуумных печей удельные потери с поверхности пакетов магнитопровода не должны превышать  $525 \text{ Вт/м}^2$  при вакууме  $2,5 \text{ Па}$  и  $475 \text{ Вт/м}^2$  при  $0,15 \text{ Па}$ . Однако магнитопровод усложняет конструкцию печи и снижает ее вакуумные свойства, так как стальные пакеты имеют развитые поверхности, которые адсорбируют



газы. В зависимости от степени разрежения различают низковакуумные, средневакуумные и высоковакуумные печи. Большая часть вакуумных индукционных тигельных печей относится к низко- и средневакуумным. Система откачки печи состоит обычно из двух последовательно соединенных вакуумных насосов: механического, форвакуумного, позволяющего достигнуть давления 1 Па, и диффузионного, создающего более глубокое разрежение, но не работающего при выпускном давлении, превышающем 100–150 Па.

Для получения некоторых сплавов применяют так называемые вакуумнокомпрессионные печи, которые могут работать как при пониженном, так и при повышенном давлении. Использование их целесообразно, например, при необходимости введения в сплав летучих компонентов. В этом случае плавку проводят в вакууме, а в конце процесса создают в печи повышенное давление инертного газа, после чего вводят летучие присадки.

Первые вакуумные индукционные печи были периодического действия. После выпуска плавки вакуумную систему отключали и печь открывали для извлечения слитков и загрузки шихтовых материалов. Позже были созданы более совершенные печи полунепрерывного действия, позволяющие загружать шихту, устанавливать изложницы и извлекать слитки без нарушения вакуума в плавильной камере. Емкость существующих печей достигает 50 т.

Наряду с преимуществами у индукционных тигельных печей имеются следующие недостатки: наличие относительно холодных шлаков (температура шлака меньше температуры металла), затрудняющих проведение рафинировочных

процессов при выплавке качественных сталей; сложное и дорогое электрооборудование; низкая стойкость футеровки при резких колебаниях температуры вследствие небольшой тепловой инерции футеровки тигля и размывающего действия жидкого металла при электродинамических явлениях. Поэтому такие печи применяют для переплава легированных отходов с целью снижения утара элементов.

Отсутствие дуги позволяет выплавлять в индукционных печах металлы с малым содержанием углерода и газов. Возникающие электродинамические силы перемешивают жидкий металл, способствуя выравниванию химического состава и всплыванию неметаллических включений. Вакуумная плавка дорогостояща и применяется лишь в тех случаях, когда требуется особо прочная и надежная сталь.

## Т

**Технологии обработки давлением** – формирование заготовок (полуфабрикатов – сортового проката, поковок и пр., рис. 2.46) и изделий заданной формы и размеров (листов, полос, труб и др.) пластическим деформированием в твердом (холодном или горячем) состоянии в результате воздействия на него внешних сил без нарушения сплошности материала, т.е. без его макроразрушения. Включают в себя процессы обработки металлов давлением (ОМД): прокатку, волочение, прессование, ковку, объемную и листовую штамповку (рис. 2.47).

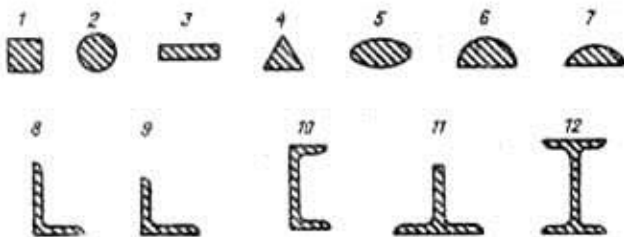


Рис. 2.46. Основные виды (сортамент) заготовок проката постоянного поперечного сечения по длине:  
 1 - квадратный; 2 - круглый; 3 - полосовой; 4 - треугольник; 5 - овал; 6 - полукруг; 7 - сегмент; 8 - уголок неравнобокий; 9 - уголок; 10 - швеллер; 11 - тавр; 12 - двутавр

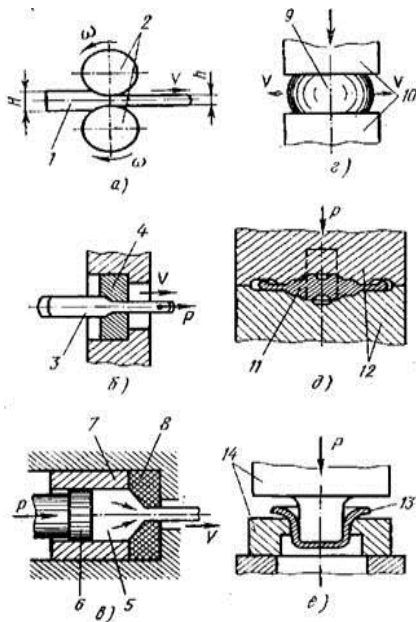


Рис. 2.47. Схемы основных способов обработки металлов давлением:  
 а - прокатка; б - волочение; в - прессование; г - ковка;  
 д - объемная штамповка; е - листовая штамповка;  
 1, 3, 5, 9, 11 - заготовки; 2 - валки; 4, 8, 13 - матрицы; 6 - пуансон;  
 7 - контейнер; 10 - бойки; 12, 14 - штампы

Процессы ОМД обеспечивают получение имеющих приближенные формы и размеры готовых деталей (рис. 2.48). Влияние обработки давлением на микроструктуру поковок отражает рис. 2.49.

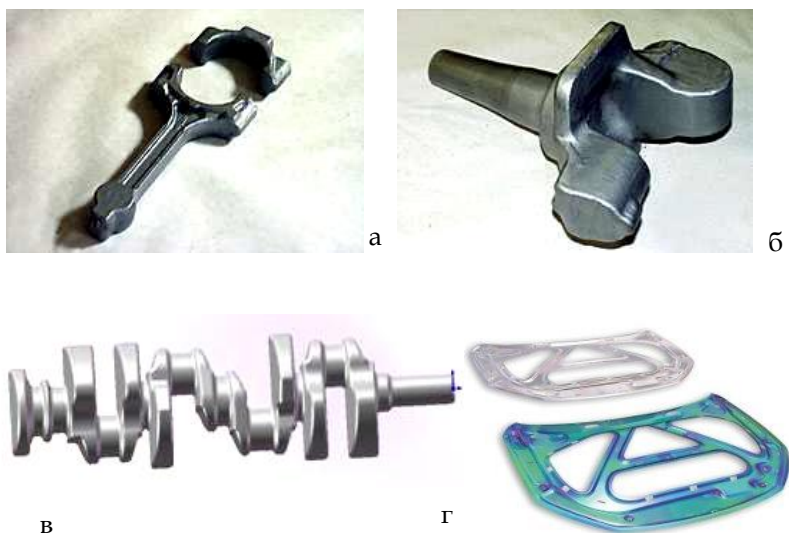


Рис. 2.48. Полуфабрикаты:  
а – шатуна; б – поворотного кулака; в – коленчатого вала;  
г – элементов кузова автомобиля

Наиболее широко распространенный процесс ОМД – процесс прокатки, который осуществляется между двумя или несколькими вращающимися приводными (рабочими) валками (рис. 2.50). При этом площадь поперечного сечения заготовки уменьшается, длина и ширина увеличиваются, изменяется форма.

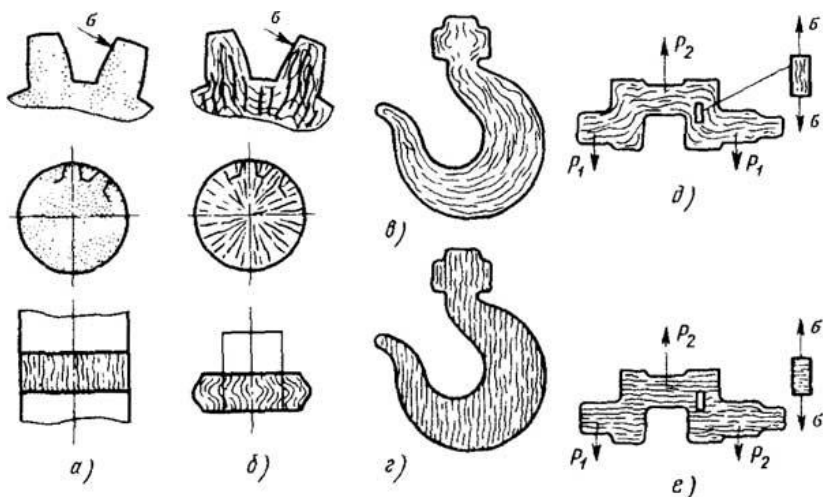


Рис. 2.49. Влияние обработки давлением на микроструктуру поковок:  
 а, б – шестерен; в, г – крюков; д, е – коленчатых валов

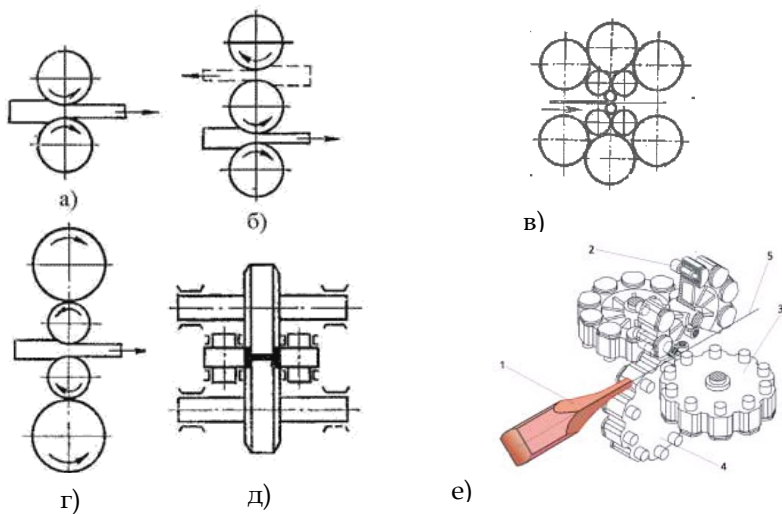


Рис. 2.50. Схемы процессов прокатки металлов:  
 а – двухвалкового; б – трехвалкового; в – шестивалкового  
 (валки большого диаметра – опорные); г – четырехвалкового;  
 д – универсального; е – планетарного

Прокатка служит не только для получения изделий требуемой формы. Она способствует улучшению структуры и повышению механических и служебных свойств прокатываемых профилей, а также обеспечивает хорошее качество поверхности и высокую точность геометрических размеров готового проката. В зависимости от направления вращения валков и направления движения слитка (заготовки, раската) относительно осей валков различают три основных способа прокатки: продольный, поперечный, поперечно-винтовой (рис. 2.51).

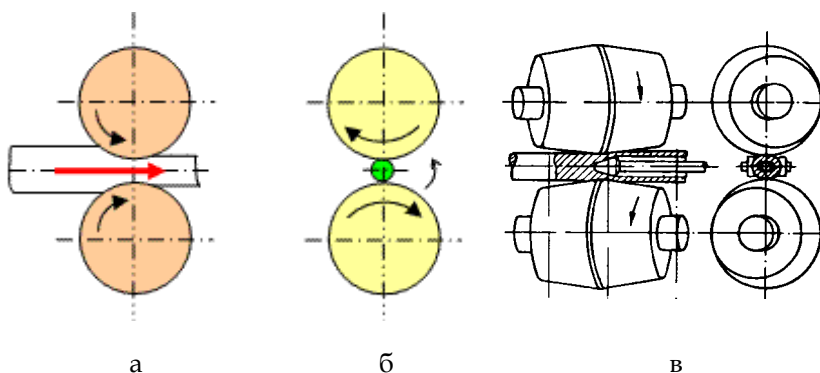


Рис. 2.51. Схемы основных способов прокатки:  
а - продольной; б - поперечной; в - поперечно-винтовой

В 60–70 годы XX в. на ряде металлургических мини-заводов производительностью 70–240 тыс. т/год широкое применение нашла комбинированная схема прокатных станов - продольной и поперечно-винтовой прокатки (рис. 2.52).

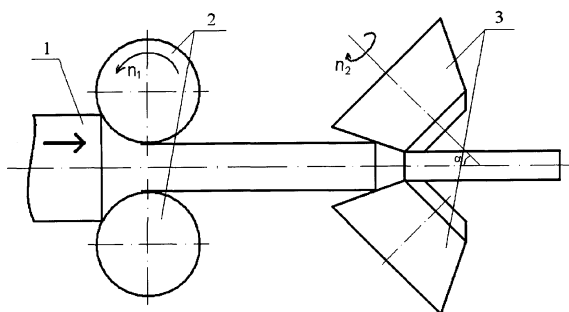


Рис. 2.52. Схемы комбинированного способа прокатки:  
 1 – прокатываемая заготовка; 2 – валки стана продольной прокатки; 3 – валки стана поперечно-винтовой прокатки

Продольная прокатка производится в гладких цилиндрических валках и валках, имеющих на своей поверхности особые проточки, называемые ручьями (рис. 2.53). При плотном соприкосновении валков их ручьи образуют закрытые контуры, называемые калибрами.

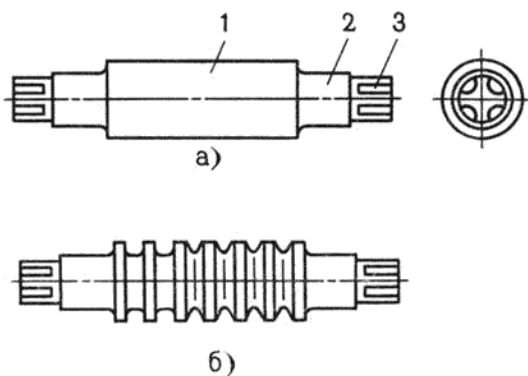


Рис. 2.53. Прокатные валки:  
 а – цилиндрические (с гладкой бочкой 1);  
 б – калиброванные (с проточками-ручьями)

Продольная прокатка в валках с гладкой бочкой позволяет получать ленты, листы и полосы, а в валках с нарезанными на их рабочей поверхности ручьями – различные прокатные профили (рис. 2.46, 1–2, 4–12).

Обычно относительное обжатие  $\varepsilon$  заготовки за один проход не превышает даже для нагретого (горячего) металла заготовки 30–70%, поэтому окончательный профиль прокатываемой заготовки (продукта) получается многократным процессом повторения ее обработки при постепенном уменьшении зазора между валками. Однократный проход прокатываемой заготовки через вращающиеся валки называется пропуском. Обычно прокатка осуществляется за несколько пропусков металла. При каждом пропуске заготовки площадь её поперечного сечения уменьшается, а форма и размеры постепенно приближаются к требуемым.

Способом поперечной прокатки получают тела вращения, в основном специального назначения – шестерни, оси, валы, втулки, которые, по сути, являются готовыми деталями, а способом поперечно-винтовой прокатки в основном – полые изделия круглой формы, бесшовные трубы, шары (рис. 2.51, в и 2.54).

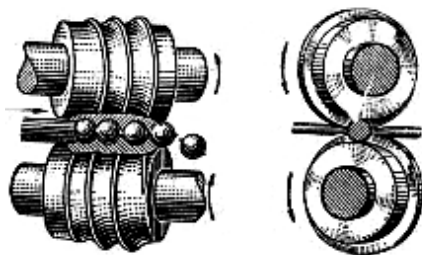


Рис. 2.54. Схема поперечно-винтовой прокатки шаров



Головной технологической операцией при производстве бесшовных труб является прошивка сплошной трубной заготовки в гильзу (стакан), т.е. получение толстостенной трубы на стане поперечно-винтовой прокатки. Заготовке одновременно сообщается вращательное и поступательное движение под некоторым углом к оси валков (рис. 2.51, в). Угол перекося оси валков  $5-17^\circ$ , поэтому осевое перемещение заготовки за каждый ее оборот невелико, и обжатие по диаметру заготовки за полуоборот составляет всего 1–3%. Вследствие этого поперечно-винтовая прокатка протекает в условиях неравномерной деформации, и из-за появления дополнительных напряжений в центральной части заготовки схема напряженного состояния металла близка к объемной схеме растяжения. Центральная часть заготовки деформируется вынужденно под действием периферийных обжимаемых слоев. Напряженное состояние – объемное растяжение в центральной части заготовки делает возможным прошивку в ней отверстия при значительном снижении усилия прошивки. Прошивные станы применяют с валками трех видов: бочковидными (рис. 2.51, в), дисковыми (рис. 2.55, а), грибовидными (рис. 2.55, б). На всех этих станах по мере своего продвижения заготовка обжимается валками, встречается с носком оправки и прошивается в гильзу с внутренним диаметром, близким к диаметру оправки. Наибольшее распространение получили прошивные станы с бочковидными валками (рис. 2.51).

Для прошивки применяют оправки двух типов: сменяемые и несменяемые (рис. 2.56).

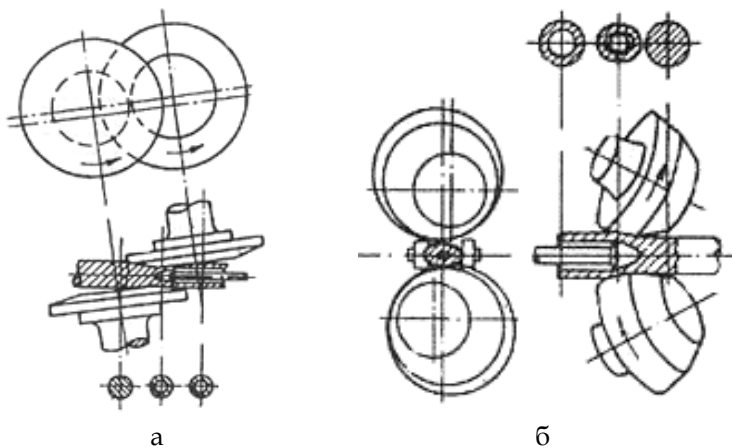


Рис. 2.55. Схема прошивки на станах с дисковыми (а) и грибовидными (б) валками

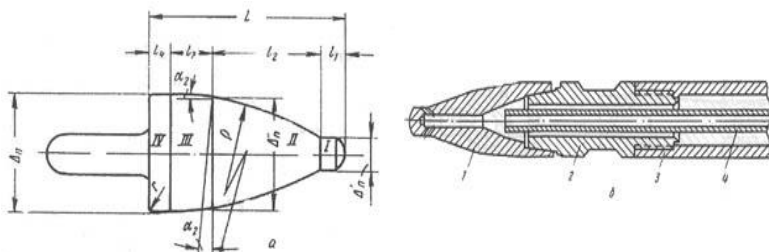


Рис. 2.56. Схема оправок для прошивки трубной заготовки: а) сменяемые; б) несменяемые; 1 – оправка водоохлаждаемая; 2 – переходной патрон; 3 – стержень; 4 – трубка для подачи воды

На рис. 2.57 представлена технологическая схема получения толстостенной трубы, начиная с операций нагрева и резки заготовки, прокатки в обжимной клети, зацентровки, прошивки и заканчивая правкой и упаковкой готовой толстостенной трубы. Для получения тонкостенной трубы необходимого диаметра и толщины стенки производят

следующую прокатку толстостенной трубы (гильзы) в горячем состоянии на: автоматическом стане; стане пилигримовой прокатки; непрерывном стане; раскаточных станах продольно-винтовой прокатки; рельсовом стане и пр.

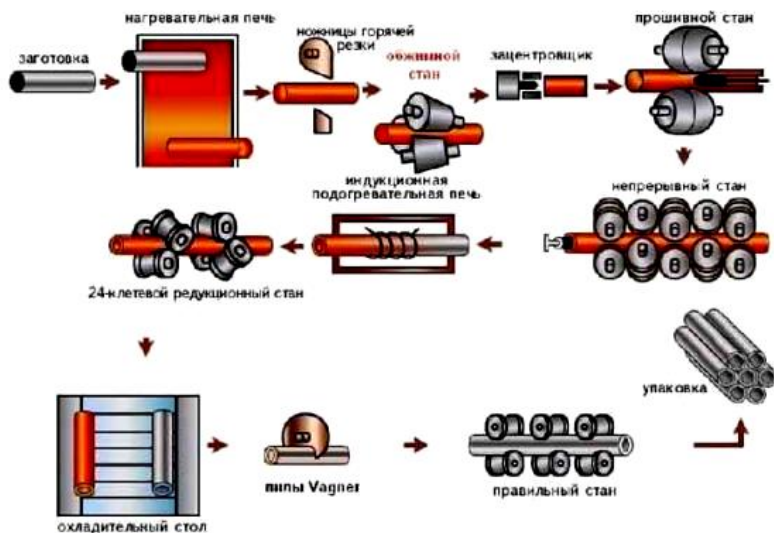


Рис. 2.57. Технологическая схема производства толстостенной трубы

Типовая схема технологического процесса производства труб на участках горячей прокатки с автоматическими станами (рис. 2.58) включает следующие операции: 1 – нагрев заготовок; 2 – зацентрировка заготовок; 3 – прошивка заготовок; 4 – подогрев гильз; 5 – вторая прошивка гильз; 6 – прокатка гильз в трубу; 7 – раскатка труб; 8 – калибрование; 9 – промежуточный подогрев; 10 – редуцирование; 11 – охлаждение; 12 – правка труб.

Деформирование металла при прокатке гильз в трубу происходит между валками и оправкой, при этом наряду с уменьшением толщины стенки наблюдается и некоторое уменьшение наружного диаметра изделия (рис. 2.59). Учитывая то, что прокатка на круглой оправке за один проход не обеспечивает равномерной деформации стенки изделия по его периметру, приходится давать два, а иногда и три прохода с поворотом трубы после каждого прохода на 90 град. Вытяжка за один проход не превышает 1,4–1,6, а общая вытяжка может составлять 1,5–2,1.

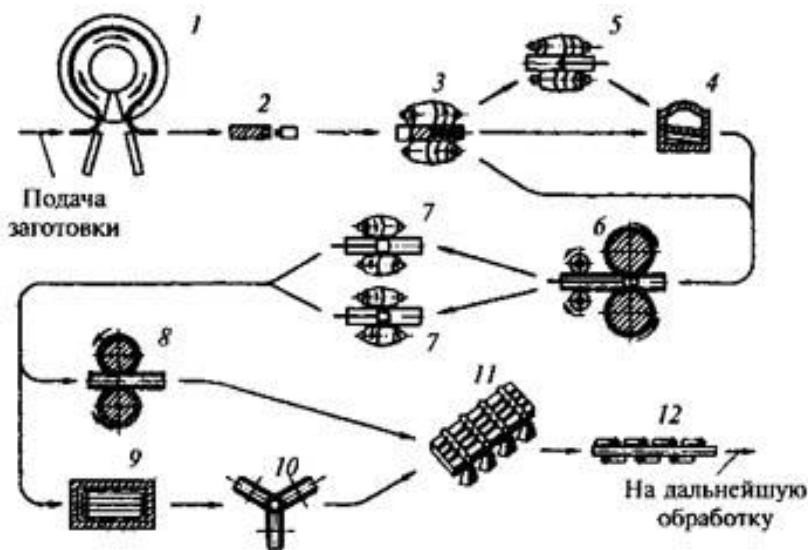


Рис. 2.58. Технологическая схема производства тонкостенной трубы на агрегатах с автоматическими станами

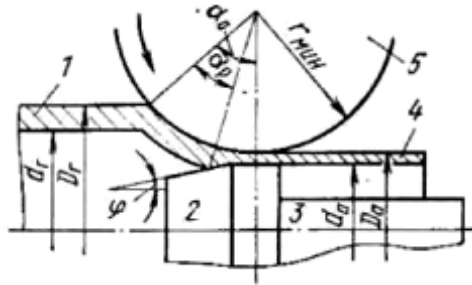


Рис. 2.59. Технологическая схема прокатки трубы в калибре автоматического стана:

1 - гильза; 2 - оправка; 3 - стержень; 4 - изделие; 5 - верхний валок

Во многих отраслях машиностроения применяются круглые изделия с переменным по длине диаметром (рис. 2.60). К ним относятся полуоси, валы, шпиндели и другие изделия. Обычные способы изготовления заготовок этих деталей токарной обработкой или штамповкой вызывают большие потери металла (до 25–35%) в стружку или на засенцы и в то же время являются малопродуктивными. Наиболее целесообразный способ получения заготовок для таких деталей – поперечно-винтовая прокатка на трехвалковых станах (рис. 2.61).

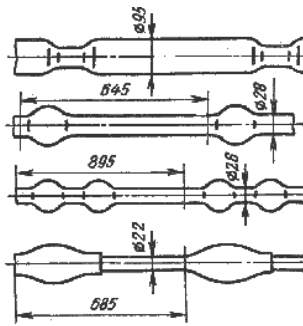


Рис. 2.60. Профильный периодический прокат

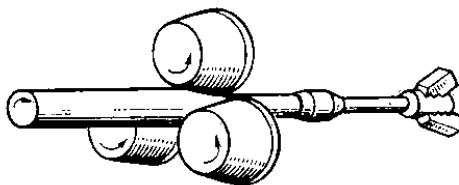


Рис. 2.61. Схема поперечно-винтовой прокатки на трехвалковых станах круглых изделий с переменным по длине диаметром

Этот способ заключается в том, что три приводных валка вращают заготовку, которая принудительно перемещается в осевом направлении со значительным натяжением, создаваемым натяжным устройством через свободно вращающийся патрон, захватывающий передний конец заготовки. Во время прокатки валки сближаются и разводятся на требуемый размер гидравлической следящей системой в соответствии с заданным профилем сменной копировальной линейки или путем числового программного управления по заранее заданной программе.

На трехвалковых станах поперечно-винтовой прокатки можно получать прокат любой формы, состоящей из соосно расположенных цилиндрических, конических, сферических или других поверхностей вращения. Трехвалковые станы поперечно-винтовой прокатки имеют сравнительно малые установочные мощности, занимают меньше производственной площади, проще в эксплуатации и при ремонте.

По сравнению с другими способами получения аналогичных деталей поперечно-винтовая прокатка профилей переменного сечения, кроме экономии металла до 15–30%, имеет следующие преимущества:

- возможность полной механизации и автоматизации процесса получения заготовок, начиная от загрузки заготовок в приемную часть нагревательного устройства до получения готового периодического проката;

- переход от одного профиля заготовки к другому без замены валков, только за счет смены копира или программы (это позволяет прокатывать широкий сортамент заготовок при малом парке инструмента);

- простота в переналадке стана к выпуску нового типоразмера проката (это дает возможность использовать способ для получения заготовок в условиях мелкосерийного производства);

- низкая стоимость и малый расход инструмента при изготовлении деталей по сравнению со штамповкой.

Один из древнейших видов ОМД – процессковки (рис. 2.47, г). Применениековки для получения заготовок объясняется рядом ее преимуществ по сравнению с другими видами обработки:

- 1) возможностью изготовления крупногабаритных поковок массой несколько сотен тонн, получение которых другими способами невозможно; использованием сравнительно маломощного оборудования при обработке таких поковок, так как обработка ведется деформированием отдельных участков заготовки;

- 2) возможностью получать поковки широкого ассортимента благодаря применению универсального оборудования и универсальной оснастки;

3) значительным улучшением качества металла, повышением его механических свойств, особенно пластичности и ударной вязкости.

При ковке формоизменение заготовки происходит вследствие течения металла в стороны, перпендикулярные к движению деформирующего инструмента – бойков, различной конфигурации – плоских, вырезных (рис. 2.62), а также их комбинаций – верхний боёк плоский, нижний вырезной (рис. 2.62, б), и верхний и нижний бойки вырезные (рис. 2.62, в).

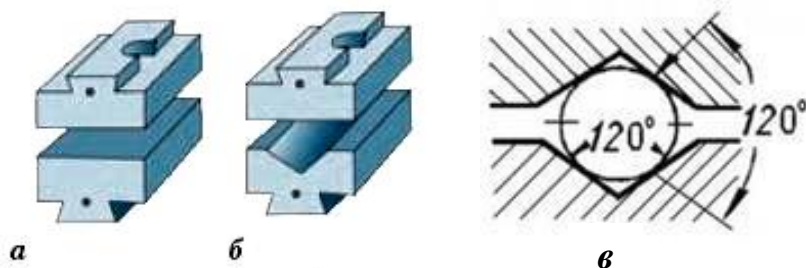


Рис. 2.62. Применяемые при ковке бойки:  
а – плоский; б – вырезной (нижний);  
в – вырезные верхний и нижний

Бойки не создают значительного сопротивления течению металла при давлении, причем это течение ограничено лишь трением на контактной поверхности «инструмент – деформируемый металл». Такой процесс называют свободной ковкой потому, что металл при деформировании течет свободно в направлениях, не ограниченных рабочими поверхностями деформирующего инструмента – бойков.



Свободную ковку осуществляют между двумя бойками, один из которых (нижний) неподвижный, второй (верхний) совершает возвратно-поступательные движения вверх-вниз. При ходе вниз осуществляется пластическая деформация заготовки (рабочий ход), при ходе вверх (холостой ход) заготовку продвигают на ширину бойка. При этом, если необходимо обжимать заготовку по высоте и ширине, ее поочередно кантуют на  $90^\circ$ , в остальных случаях на угол кантовки, отличающийся от  $90^\circ$ .

К основным операциям ковки относятся осадка (рис. 2.63), протяжка (рис. 2.64) и прошивка (рис. 2.65). Осадка (рис. 2.63, а) – одна из наиболее распространенных операций ковки, при которой высота заготовки уменьшается, а площадь поперечного сечения увеличивается. Поковки дисков, зубчатых колес и подобных им деталей изготавливают только осадкой.

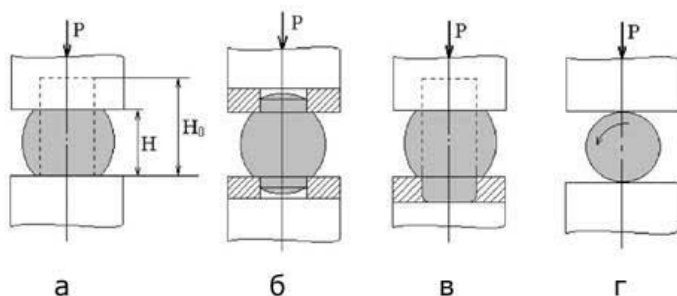


Рис. 2.63. Разновидности операций осадки (обозначения в тексте)

Осадка имеет следующие разновидности: осадка кольцевыми плитами (на рис. 2.63, б заштрихованы), применяемая при обработке заготовок больших размеров; высадка

(рис. 2.63, в), представляющая собой осадку на части длины деформируемой заготовки и обкатку ее по диаметру (рис. 2.63, г), используемую для устранения бочкообразования после осадки.

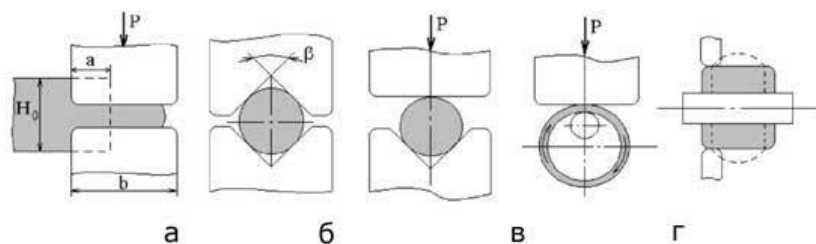


Рис. 2.64. Разновидности операций протяжки (обозначения в тексте)

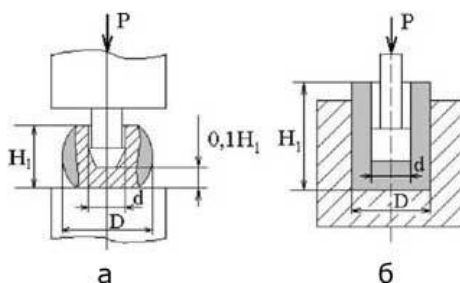


Рис. 2.65. Разновидности операций прошивки (обозначения в тексте)

*Протяжка* – операция удлинения заготовки или ее части за счет уменьшения площади поперечного сечения (рис. 2.64, а). Протяжкой получают поковки с удлиненной осью – валы, рычаги, тяги и т.п. Протяжка плоскими бойками (рис. 2.64, а) может видоизменяться за счет варьирования формы инструмента и назначения поковки. Так, разновидностями протяжки являются протяжка вырезными (рис. 2.64, б), комбинированными (рис. 2.64, в) бойками,

раскатка на оправке (рис. 2.64, г), при которой увеличивают внутренний и внешний диаметр заготовки за счет уменьшения толщины ее стенки, и протяжка на оправке (рис. 2.64, д), применяемая для увеличения длины толстостенных заготовок за счет уменьшения толщины ее стенок.

*Прошивка* – операция получения полостей в заготовке за счет вытеснения металла (рис. 2.65). При использовании операции прошивки получают поковки с отверстием, форма заготовки искажается и образуется отход – выдра. Как разновидности прошивку рассматривают открытую (рис. 2.65, а) и закрытую (рис. 2.65, б). Инструментом для прошивки являются *прошивни* – сплошные и пустотелые круглого или фасонного поперечного сечения. Пустотелыми прошивни используются при прошивке отверстий большого диаметра (400 –900 мм). Высокие массивные поковки прошивают в два перехода, образовав сначала глухую полость и, перевернув поковку, прошивают дно (рис. 2.66, а). При сквозной прошивке тонких поволок применяют *подкладные кольца* (рис. 2.66, б).

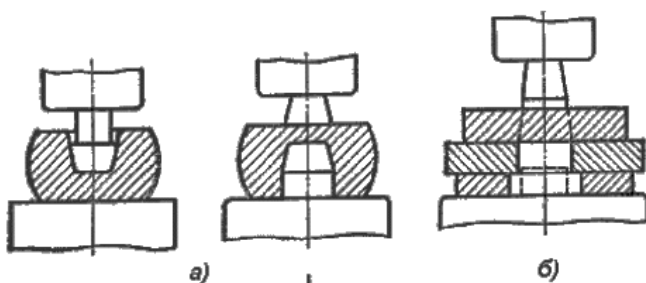


Рис. 2.66. Схемы прошивки:

а – двухсторонняя; б – односторонняя с подкладным кольцом

Получение поковок разнообразной формы и размеров требует применения и других операцийковки (рис. 2.67). Такими являются кузнечная гибка (рис. 2.67, а), скручивание (рис. 2.67, б), рубка (рис. 2.67, в), передача (рис. 2.67, г). К отделочным операциямковки относят обрезку, правку, проглаживание и др.

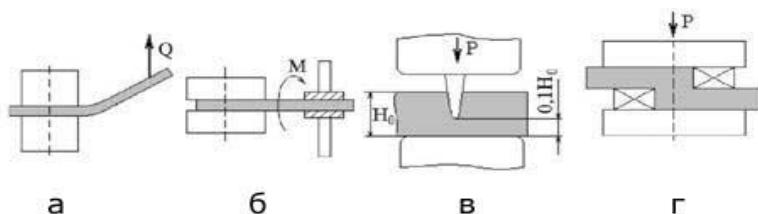


Рис. 2.67. Кузнечные операции:  
а – гибка; б – скручивание; в – рубка; г – передача

Ковкой обрабатывается примерно 20–25% всего выплавляемого черного металла; штампованные изделия составляют 60–85% массы тепловозов и электровозов, автомобилей, самолетов, тракторов и др.

## У

**Ультразвуковой контроль (Ультразвуковая дефектоскопия)** – метод, предложенный С.Я. Соколовым в 1928 году и основанный на исследовании процесса распространения ультразвуковых колебаний с частотой 0,5–25 МГц в контролируемых изделиях с помощью специального оборудования – ультразвукового дефектоскопа. Является одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля.

Звуковые волны не изменяют траекторию движения в однородном материале (рис. 2.68).

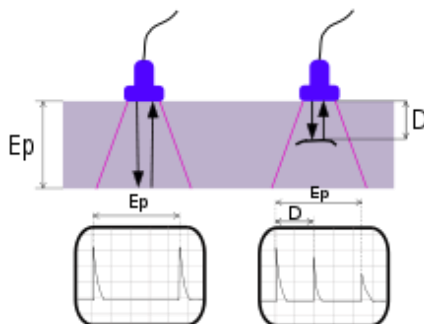


Рис. 2.68. Схема ультразвукового контроля полосового металла

Отражение акустических волн происходит от раздела сред с различными удельными акустическими сопротивлениями. Чем больше различаются акустические сопротивления, тем большая часть звуковых волн отражается от границы раздела сред. Так как включения в металле обычно содержат газ (смесь газов), возникающий вследствие процесса сварки, литья и т.п., и не успевают выйти наружу при затвердевании металла, смесь газов имеет на пять порядков меньшее удельное акустическое сопротивление, чем сам металл, то отражение будет практически полное.

Разрешающая способность акустического исследования, т.е. способность выявлять мелкие дефекты отдельно друг от друга, определяется длиной звуковой волны, которая в свою очередь зависит от частоты ввода акустических колебаний. Чем больше частота, тем меньше длина волны. Эффект возникает из-за того, что при размере препятствия меньше четверти длины волны, отражения колебаний практически не происходит, а доминирует их дифракция. Поэтому, как правило, частоту ультразвука

стремятся повышать. С другой стороны, при повышении частоты колебаний быстро растет их затухание, что сокращает возможную область контроля. Практическим компромиссом стали частоты в диапазоне от 0,5 до 10 МГц.

Применяется для поиска дефектов материала (поры, волосовины, различные включения, неоднородная структура и пр.) и контроля качества проведения работ – сварка, пайка, склейка и пр. Ультразвуковой контроль является обязательной процедурой при изготовлении и эксплуатации многих ответственных изделий, таких как части авиационных двигателей, трубопроводы атомных реакторов или железнодорожные рельсы.

## Ф

**Флюсы** – это различные минеральные вещества, добавляемые в доменную печь для понижения температуры плавления пустых пород, удаления золы и серы, а также остатков сгоревшего топлива. Флюсы образуют с пустой породой и золой топлива легкоплавкие сплавы, которые отделяются от металла в виде шлака. Способствуя образованию шлаков, флюсы тем самым дают возможность отделить от металла пустую породу.

При наличии в руде песчано-глинистых примесей в качестве флюса применяют известняк, а при известковистом составе пустой породы флюсом служат вещества, содержащие кремнезем, кварц и песчаник.

### III

**Штамповка** – процесс обработки металлов давлением, обеспечивающий получение деталей исключительно сложной формы.

Процессы штамповки подразделяются на:

- горячей и холодной объемной штамповки в открытых и закрытых штампах, выдавливанием;
- листовой штамповки (толстолистовой и тонколистовой).

Под объемной штамповкой понимают процесс, при котором металл заготовки деформируется с изменением всех размеров заготовки, принимая форму рабочей поверхности специального инструмента – штампа. При этом форма и размеры рабочей полости (ручья) штампа полностью определяют конфигурацию изготавливаемой поковки. Штампы по конструкции могут быть одноручьевыми – для деталей простой формы, и многоручьевыми – для деталей сложной формы.

Применение штамповки экономически выгодно лишь при серийном или массовом производстве. Применяют два основных метода штамповки: в открытых штампах, с образованием облоя, и в закрытых штампах – безоблойную. Штампы – это массивные толстостенные детали (рис. 2.69), в которых выполнены рабочие полости – гравюры, формообразующие поковку. Штамп состоит минимум из двух частей – половин.

Верхняя половина штампа (1) перемещается под действием силы  $P$  и давит на торцевые поверхности заготовки (5), которая деформируется в ручьях (6) штампа, образованного верхней (1) и нижней (2) половинами, и, заполняя его,

вытекает в заусенечную канавку (3). Сформированная таким образом поковка 4 имеет по периметру заусенец-облой (7). Для извлечения поковки из штампа служат штамповочные уклоны  $\alpha$ , величина которых составляет 5–10°.

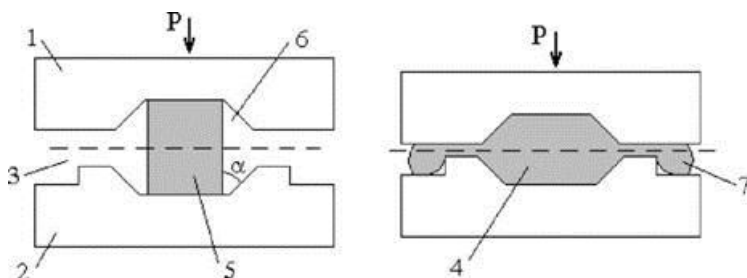


Рис. 2.69. Схема штамповки в открытых штампах (обозначения в тексте)

При открытой штамповке выделяют три основные стадии течения металла (рис. 2.70): свободную осадку (рис. 2.70, а); заполнение штампа (рис. 2.70, б) и выдавливание заусенца (рис. 2.70, в). На практике существует и четвертая (нежелательная) стадия, когда ручки штампа заполнены, но поковка не выполнена по высоте.

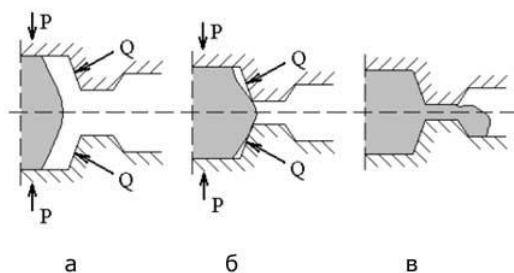


Рис. 2.70. Основные стадии течения металла при открытой штамповке



Основной недостаток штамповки в открытых штампах – это большие потери металла на заусенец, которые зависят от массы и формы поковок и могут достигать 30% и более. Кроме того, волокна металла при удалении облоя оказываются перерезанными, что существенно снижает качество поковок.

Если объем заготовки в точности равен объему полости гравюры (поковки), то заполнение гравюры будет идеальным, без облоя (заусенца), однако практически трудно получить заготовку точного объема, поэтому ее выполняют несколько большей, чтобы гарантировать заполнение гравюры. Избыток металла вытекает в разъем штампа в виде облоя-заусенца. Такую штамповку называют облойной, а штамп – облойным. Облой является отходом и подлежит удалению. Закрытые штампы от открытых отличаются тем, что гравюра выполняется в одной из половин штампа, а вторая половина входит в первую, запирая ее. В таком штампе весь объем металла заготовки остается в поковке. Выход для облоя не предусмотрен. Так как при закрытой штамповке не предусматривается заусенец, штамповку называют безоблойной, а штамп – безоблойным.

Штамповку в закрытых штампах (безоблойную штамповку) применяют для получения поковок сложной формы с небольшой разницей в размерах сечений. Штамповка в закрытых штампах характеризуется значительной экономией металла, отсутствием дополнительной операции обрезки облоя, благоприятной схемой всестороннего сжатия, меньшей величиной уклонов ( $\alpha = 1-3^\circ$ ), чем при открытой штамповке. Особенно эффективна схема

штамповки в закрытых штампах для малопластичных сплавов, т.к. боковой подпор стенок полости штампа значительно повышает гидростатическое давление, в результате чего пластичность металла возрастает и можно штамповать поковки из труднодеформируемых металлов и сплавов: титановых сплавов ВТ-1, ВТЗ-1, ВТ-5, жаропрочных сталей ЭИ417, ЭИ481 и др.

Сопоставляя качество макроструктуры поковок, отштампованных в открытых и закрытых штампах, необходимо отметить, что при закрытой штамповке макроструктура более качественная, так как процесс образования поковки в полости штампа протекает без нарушения сплошности волокон, при обрезке заусенца после открытой штамповки волокна оказываются перерезанными, что снижает прочность детали (рис. 2.71).

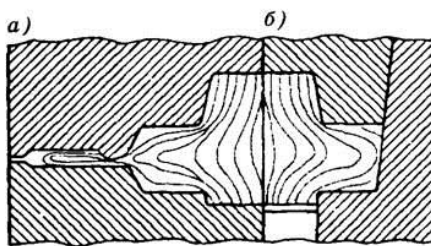


Рис. 2.71. Схема расположения волокон металла при открытой (а) и закрытой (б) штамповке

Штамповка в штампах для выдавливания – наиболее прогрессивный технологический процесс горячей штамповки, при его использовании значительно снижается расход металла (до 30%), повышается коэффициент весовой

точности, поковки получают максимально приближающиеся по форме и размерам к готовым деталям (4–5-й классы), что позволяет сократить их механическую обработку на 60–75%, производительность труда увеличивается в 1,5–2,0 раза.

**Штамповка листовая** – это один из видов холодной обработки металлов давлением, при котором листовый материал деформируется в холодном или подогретом состоянии. Основным признаком листовой штамповки – неизменность толщины заготовки в ходе обработки. В качестве заготовки используют лист, ленту, полосу, фасонный профиль и т.д.

Листовой штамповкой изготавливают: мелкие детали приборов; детали средних размеров, различные заглушки, крышки, кронштейны, диски; крупные облицовочные детали автомобилей, автобусов, тракторов – кузова, двери, крылья, крышки и т.д. (рис. 2.72).

Сваривая листовые штампованные детали, создают сложные и ответственные части машин, например, сложные штампосварные кузова автомобилей. Основные преимущества листовой штамповки:

- возможность изготовления прочных, легких и жестких тонкостенных деталей или изделий простой и сложной формы, получить которые другими способами невозможно или затруднительно;

- высокая производительность и экономное расходование металла;

- широкие возможности автоматизации и роботизации производственных процессов;

– взаимозаменяемость деталей и высокая чистота поверхности.

По сравнению с горячей штамповкой холодная листовая штамповка имеет следующие преимущества: нет операции нагрева металла, поверхностный слой металла не окисляется, изделия получаются более точными по размерам и с меньшей шероховатостью поверхности.

По сравнению с обработкой резанием холодная штамповка позволяет сократить расход материала, так как материал не отделяется в стружку, снизить трудоемкость изготовления деталей и повысить производительность труда. Одновременно холодная обработка давлением обеспечивает упрочнение обрабатываемого материала, что позволяет делать детали более легкими. Эти же преимущества позволяют заменять литые детали штампованными. Кроме того, преимущество холодной штамповки по сравнению с литьем заключается в том, что холодноштампованные изделия почти не требуют механической обработки.

Операции листовой штамповки подразделяют на: разделительные, когда одна часть металла отделяется от другой; формоизменяющие, при которых изменяется форма заготовок; комбинированные (сочетаются разделительные и формоизменяющие переходы обработки); штамповочные, при которых механически соединяют отдельные листовые штампованные детали.

Технологические процессы листовой штамповки могут быть рациональными лишь при условии создания технологичной конструкции или формы детали, допускающей наиболее простое и экономичное изготовление. Поэтому

технологичность листоштампованных деталей является наиболее важной предпосылкой прогрессивности технологических процессов и экономичности производства.

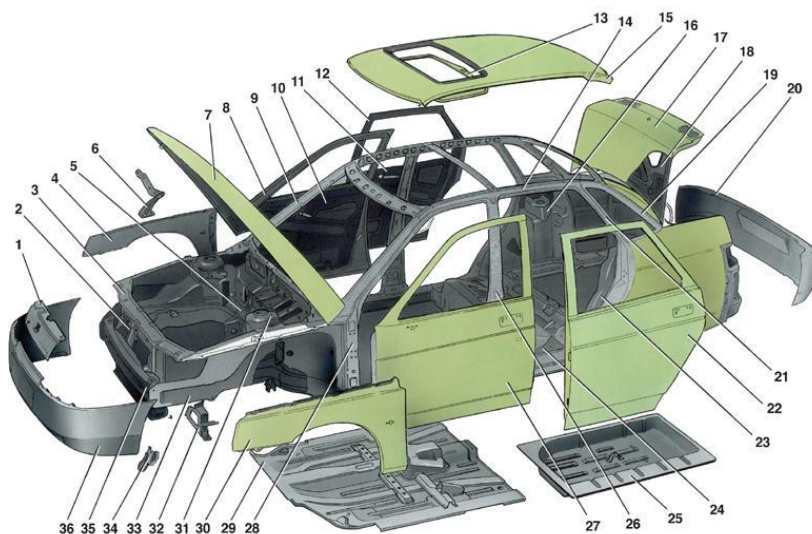


Рис. 2.72. Детали остова кузова автомобиля ВАЗ 2110:

- 1 – облицовка рамки радиатора; 2 – рамка радиатора;
- 3 – верхняя поперечина рамки радиатора; 4 – правое переднее крыло; 5 – щиток передка; 6 – петля капота; 7 – капот; 8 – правая передняя дверь; 9 – стойка ветрового окна; 10 – внутренняя панель передней двери; 11 – внутренняя панель задней двери; 12 – правая задняя дверь; 13 – рамка люка крыши; 14 – левая боковина; 15 – панель крыши; 18 – внутренняя панель крышки багажника; 19 – рамка окна боковины; 20 – задний бампер; 21 – задняя стойка; 22 – левая задняя дверь; 23 – арка заднего колеса; 24 – средний пол; 25 – ниша запасного колеса; 26 – центральная стойка; 27 – левая передняя дверь; 28 – передняя стойка

**Электрошлаковый переплав** (Electroslag remelting – ESR) – совершенно новый метод получения высококачественных легированных сталей для подшипников, жаропрочных, а также быстрорежущих сталей. Сущность его состоит в том, что слитки из стали, полученной в обычных печах, перерабатываются на электроды для последующей переплавки их в электрошлаковой печи. Плавление электродов происходит не за счет тепла электрической дуги, а за счет тепла, выделяющегося в слое расплавленного шлака, служащего сопротивлением при прохождении через него электрического тока (рис. 2.73).

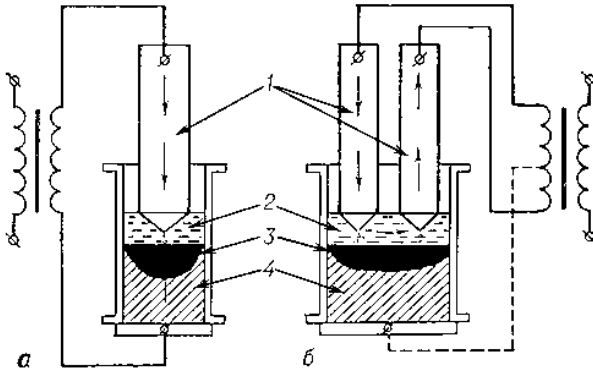


Рис. 2.73. Схема электрошлакового переплава с одним (а) и двумя (б) расходными электродами:  
1 – расходный электрод; 2 – шлаковая ванна;  
3 – металлическая ванна; 4 – слиток

Электрошлаковый переплав позволяет улучшить качество металла уменьшением в нём вредных примесей,

газов, неметаллических включений. В результате электрошлакового переплава содержание серы снижается в 2–5 раз, кислорода и неметаллических включений в 1,5–2,5 раза. Слиток характеризуется плотной направленной микроструктурой, свободен от дефектов литейного и усадочного происхождения. Химическая и структурная однородность слитка обуславливает изотропность физических и механических свойств металла в литом и деформированном видах.

В результате рафинирующего электрошлакового переплава исходный металл эффективно очищается от неметаллических включений и других нежелательных примесей, повышаются плотность и однородность его структуры, улучшаются свойства стали. Необходимость рафинирующего переплава металла обусловлена тем, что существующие на практике технологии производства стали не гарантируют получения металла с содержанием менее 0,002–0,004% азота и менее 0,005% кислорода (табл. 2.3). Эти значения на порядок превышают их допустимое содержание.

Таблица 2.3

Примерное содержание газов в стали  
различных способов производства

Способ производства	O <sub>2</sub> , %	N <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> , %
Электрическая печь	0,002–0,004	0,007–0,010	0,0004–0,0006
Мартеновская печь	0,005–0,008	0,004–0,006	0,0003–0,0007
Кислородный конвертер	0,005–0,008	0,002–0,005	0,0001–0,0003

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.elib.altstu.ru/.../pv2005\\_02\\_2/pdf/036guryev.pdf](http://www.elib.altstu.ru/.../pv2005_02_2/pdf/036guryev.pdf)
2. Определение железной руды, общие сведения о железной руде, классификация и виды железных руд, химический состав железных руд, происхождение железных руд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.forexaw.com/.../183\\_Железная\\_руда\\_Ironstone](http://www.forexaw.com/.../183_Железная_руда_Ironstone)
3. Белевитин, В.А. Технология конструкционных материалов. Заготовительное производство [Текст]: учебное пособие / В.А. Белевитин, С.Ю. Коваленко, А.В. Суворов. – Челябинск, Изд-во ЧППУ, 2014. – 237 с.: ил.
4. Бескоксовая металлургия: Технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rusmet.ru/.../52577/Beskoksovaya\\_metallurgiya](http://www.rusmet.ru/.../52577/Beskoksovaya_metallurgiya)
5. Технологии. Бескоксовое производство чугуна [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.technologiya-metallov.com/.../technologie\\_1.htm](http://www.technologiya-metallov.com/.../technologie_1.htm)
6. Технология металлов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metalstech.ru>
7. Брикетирование: металлургический словарь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.markmet.ru/slovar/briketirovanie>
8. Грануляция (гранулирование) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metallurgicheskij.academic.ru/.../>
9. Добывающая металлургия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.forexaw.com/Metallurgy>



10. Добывающая металлургия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// www.aitcom.ru/metallurgiya-otrasl-promyishlennosti](http://www.aitcom.ru/metallurgiya-otrasl-promyishlennosti)
11. Доменное производство – БСЭ –Яндекс. Словари [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.slovari.yandex.ru/~книги/БСЭ/Доменное производство](http://www.slovari.yandex.ru/~книги/БСЭ/Доменное_производство)
12. Сталеплавильное производство – БСЭ – Яндекс. Словари [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alcala.ru/bse/izbrannoe/slovar-D/G13126.shtml>
13. Промышленные технологии литья [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aitcom.ru/tehnologiya-litya-v-peschanyie-formy>
14. Обработка металлов давлением. Технология формирования изделий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vevivi.ru/.../Obработка-meta...-ref148969.html>
15. Технологии производства продукции методами обработки металлов давлением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pandia.ru/text/77/190/67188.php>

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
<b>Глава 1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....</b>	<b>5</b>
А Адсорбция .....	5
Азотирование .....	6
Аллотропия .....	7
Анизотропия .....	8
Аустенит .....	9
Б Баббиты .....	11
Бейнит .....	12
Белый чугун .....	12
Бориды .....	12
Борирование .....	13
Бронза .....	13
В Вакансия .....	13
Вещества аморфные .....	15
Вещества кристаллические .....	15
Возврат .....	16
Восстановление .....	16
Восстановление косвенное .....	17
Восстановление прямое .....	17
Выносимость .....	18
Вязкость твердых тел .....	19
Вязкость ударная .....	19
Г Гомогенизация .....	20
Графит .....	21
Графитизация .....	21
Графитопласт .....	22
Д Дендрит .....	23
Дефекты кристаллического строения .....	24
Дефекты линейные .....	24
Дефекты поверхностные .....	24

	Дефекты точечные .....	24
	Деформация .....	25
	Деформация изгиб .....	25
	Деформация кручения .....	25
	Деформация растяжения .....	26
	Деформация сдвиг .....	26
	Деформация сжатия .....	27
	Деформация горячая .....	27
	Деформация остаточная .....	28
	Деформация пластическая .....	28
	Деформация упругая .....	30
	Деформация холодная .....	30
	Деформирование .....	31
	Деформирование пластическое .....	31
	Деформирование поверхностное пластическое ...	31
	Диаграмма состояния .....	32
	Диаметр критический .....	34
	Дислокации .....	35
	Диффузия .....	37
	Дюралюмины .....	38
Ж	Жаропрочность .....	40
	Жаростойкость .....	40
	Железо .....	41
	Железо техническое .....	41
	Железографит .....	41
	Жидкотекучесть .....	42
З	Закаливаемость .....	42
	Закалка .....	43
	Закалка сталей .....	43
	Закалка сталей газопламенная .....	44
	Закалка сталей изотермическая .....	46
	Закалка сталей индукционная .....	47
	Закалка сталей непрерывная .....	47
	Закалка сталей прерывистая .....	48

	Закалка сталей самоотпуском .....	49
	Закалка сталей струйчатая .....	50
	Закалка сталей ступенчатая .....	50
	Зерно .....	50
	Зоны Гинье - Престона .....	52
И	Излом .....	52
	Излом вязкий .....	52
	Излом усталостный .....	53
	Излом хрупкий .....	54
	Износ .....	55
	Изотропия .....	56
	Индендор (наконечник) .....	56
К	Карбиды .....	56
	Компонент .....	56
	Коррозия .....	57
	Красноломкость .....	58
	Красностойкость .....	58
	Кристаллизация .....	59
	Кристаллизация вторичная .....	59
	Кристаллизация первичная .....	59
	Кристаллит .....	60
Л	Латуни .....	61
	Легирование .....	62
	Ледебурит (эвтектика) .....	63
	Ликвация .....	63
	Ликвация дендритная .....	64
	Ликвация зональная .....	65
	Линия ликвидуса .....	69
	Линия ограниченной растворимости .....	70
	Линия солидуса .....	71
М	Макроструктура.....	71
	Макрошлиф .....	73
	Мартенсит .....	75
	Межузельный атом .....	76

	Микроструктура .....	77
	Микрошлиф .....	78
	Модификаторы .....	79
	Модификаторы первого рода .....	80
	Модификаторы второго рода .....	80
	Монокристалл .....	81
Н	Наклеп .....	81
	Нитриды .....	82
	Нитроцементация .....	82
	Нормализация (нормализационный отжиг) .....	83
О	Отбел .....	85
	Отбелённый чугун, половинчатый чугун .....	85
	Отжиг .....	85
	Отжиг 1-го рода .....	87
	Отжиг 2-го рода .....	88
	Отжиг диффузионный (гомогенизация) .....	88
	Отжиг изотермический .....	89
	Отжиг неполный .....	90
	Отжиг полный .....	91
	Отжиг рекристаллизационный .....	92
	Отпуск .....	93
	Отпуск высокий .....	95
	Отпуск низкий .....	96
	Отпуск средний .....	96
П	Параметр (кристаллической решетки) .....	97
	Перлит .....	98
	Перлит зернистый .....	100
	Перлит пластинчатый .....	100
	Пермаллои .....	100
	Пластичность .....	100
	Плоскость скольжения .....	102
	Порог хладноломкости .....	103
	Правило Гиббса (правило фаз) .....	104
	Правило Курнакова .....	105

	Предел выносливости .....	107
	Предел ползучести .....	108
	Предел прочности .....	110
	Предел текучести условный .....	110
	Примесный атом .....	110
	Прочность .....	112
Р	Разгаростойкость .....	113
	Разрушение .....	113
	Разупрочнение .....	114
	Растворы твердые .....	116
	Растворы твердые внедрения .....	116
	Растворы твердые замещения .....	116
	Растворы твердые с неограниченной растворимостью .....	116
	Растворы твердые с ограниченной растворимостью .....	117
	Рекристаллизация металла .....	117
	Релаксация .....	119
	Решетка кристаллическая .....	120
С	Самоотпуск .....	122
	Сверхпластичность .....	123
	Силицирование .....	124
	Силумины .....	125
	Скорость закалки критическая .....	127
	Смесь механическая .....	128
	Сорбит .....	130
	Сорбит закалки .....	130
	Сорбит отпуска .....	130
	Сормайт .....	130
	Сплавы .....	132
	Сплав металлический .....	134
	Сплавы порошковые .....	134
	Среды закалочные .....	134
	Стали .....	135

Стали быстрорежущие .....	136
Стали жаропрочные .....	137
Стали жаростойкие (окалиностойкие) .....	138
Стали инструментальные .....	139
Стали кипящие .....	141
Стали коррозионностойкие (нержавеющие) .....	141
Стали легированные .....	143
Стали ПНП .....	144
Стали полуспокойные .....	146
Стали спокойные .....	146
Стали теплоустойчивые .....	147
Старение .....	147
Старение деформационное .....	149
Старение дисперсионное .....	149
Старение естественное .....	149
Старение искусственное (термическое) .....	150
Степень деформации критическая .....	150
Структура .....	150
Структура неравновесная .....	151
Структура равновесная .....	152
Структура строчечная .....	152
Сфероидизация .....	153
Т Твердение дисперсионное .....	155
Твердость .....	155
Твердость по Бринеллю (HB) .....	156
Твердость по Виккерсу (HV) .....	158
Твердость по Роквеллу (HRB, HRC, HRA) .....	158
Текстура деформации .....	160
Текстура рекристаллизации .....	161
Текстура роста .....	162
Текстура кристаллизации .....	162
Температура кристаллизации равновесная .....	163
Температура кристаллизации фактическая .....	163
Теплоемкость .....	163

	Теплопроводность .....	164
	Теплостойкость .....	164
	Термоциклирование .....	164
	Техника .....	166
	Томпак .....	166
	Точки критические .....	166
	Трещина горячая .....	166
	Трещина холодная .....	167
	Трещиностойкость .....	168
	Трипстали .....	168
	Троостит .....	168
	Троостит закалки .....	168
	Троостит отпуска .....	169
У	Углерод .....	170
	Удлинение относительное .....	170
	Улучшение .....	170
	Упрочнение (поверхностное) .....	170
	Упрочнение деформационное .....	173
	Упрочнение карбидное (дисперсионное) .....	174
	Упрочнение твердорастворное .....	176
	Упругость .....	178
	Усталость .....	179
Ф	Фаза .....	180
	Феррит .....	180
	Ферромагнетики .....	181
	Флокены .....	181
Х	Химико-термическая обработка .....	183
	Хладноломкость .....	184
	Хрупкость отпускная .....	185
	Хрупкость отпускная I рода (необратимая) .....	187
	Хрупкость отпускная II рода (обратимая) .....	187
Ц	Цементация .....	187
	Цементит .....	188
	Центр кристаллизации .....	189



	Цианирование .....	190
Ч	Число степеней свободы .....	191
	Чугун белый .....	191
	Чугун высокопрочный .....	193
	Чугун ковкий .....	194
	Чугун серый .....	195
Э	Эвтектика .....	198
	Эльбор .....	200
	Энергия системы свободная .....	200
Я	Ячейка элементарная .....	200

**Глава 2. ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ .....** 202

А	Агломерация .....	204
Б	Безкоксовая технология .....	207
	Брикетирование .....	210
	Брикеты .....	211
В	Возгонка .....	212
Г	Гранулирование, грануляция .....	213
	Грануляция мокрая .....	213
	Грануляция полусухая .....	214
	Грануляция сухая .....	215
Д	Дегидратация .....	215
	Добывающая металлургия .....	215
	Доменное производство .....	216
	Доменный процесс .....	219
Ж	Железные руды .....	224
	Железный блеск или гематит, красный железняк ...	225
	Железняк бурый .....	225
	Железняк магнитный, магнетит .....	227
	Железняк шпатоватый .....	227
З	Закись железа .....	228
Л	Литейное производство .....	228
	Литейный чугун .....	230

	Литьё в песчаные формы .....	232
	Литьё в разборные формы (кокиль) .....	238
	Литьё по выплавляемым моделям (ЛВМ) .....	248
	Литьё по газифицируемым моделям (ЛГМ) .....	258
	Литьё с использованием оболочковых форм .....	261
О	Оксиды железа .....	265
П	Передельный чугун .....	266
Р	Разливка стали .....	267
	Разливка стали в изложницы .....	268
	Разливка стали непрерывная .....	275
	Раскисление стали .....	281
С	Скрап .....	282
	Сталеплавильное производство .....	284
	Сталеплавильное производство в конверторе .....	288
	Сталеплавильное производство в мартеновской печи .....	292
	Сталеплавильное производство в электрических печах .....	298
Т	Технологии обработки давлением .....	314
У	Ультразвуковой контроль (УЗК-дефектоскопия) ..	332
Ф	Флюсы .....	334
Ш	Штамповка .....	335
	Штамповка листовая .....	339
Э	Электрошлаковый переплав .....	342
	БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	344

*Справочное издание*

**Белевитин Владимир Анатольевич  
Суворов Александр Владимирович  
Аксенова Людмила Николаевна**

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ:  
СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА**

Справочное пособие

**ISBN 978-5-906777-19-5**

Работа рекомендована РИСом университета  
Протокол №7 (пункт 32) от 2014 г.  
Издательство ЧГПУ  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Редактор Е.М. Сапегина  
Компьютерный набор В.А. Белевитин  
Технический редактор А.Г. Петрова

Подписано в печать 02.10.2014

Формат 60x841/16

Объем 13,0 уч.-изд. л.

Заказ №

Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии ЧГПУ  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69