

7 АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ «ЖЕЛЕЗО - УГЛЕРОД»

Компоненты системы – железо Fe и углерод C (рис. 7.1).

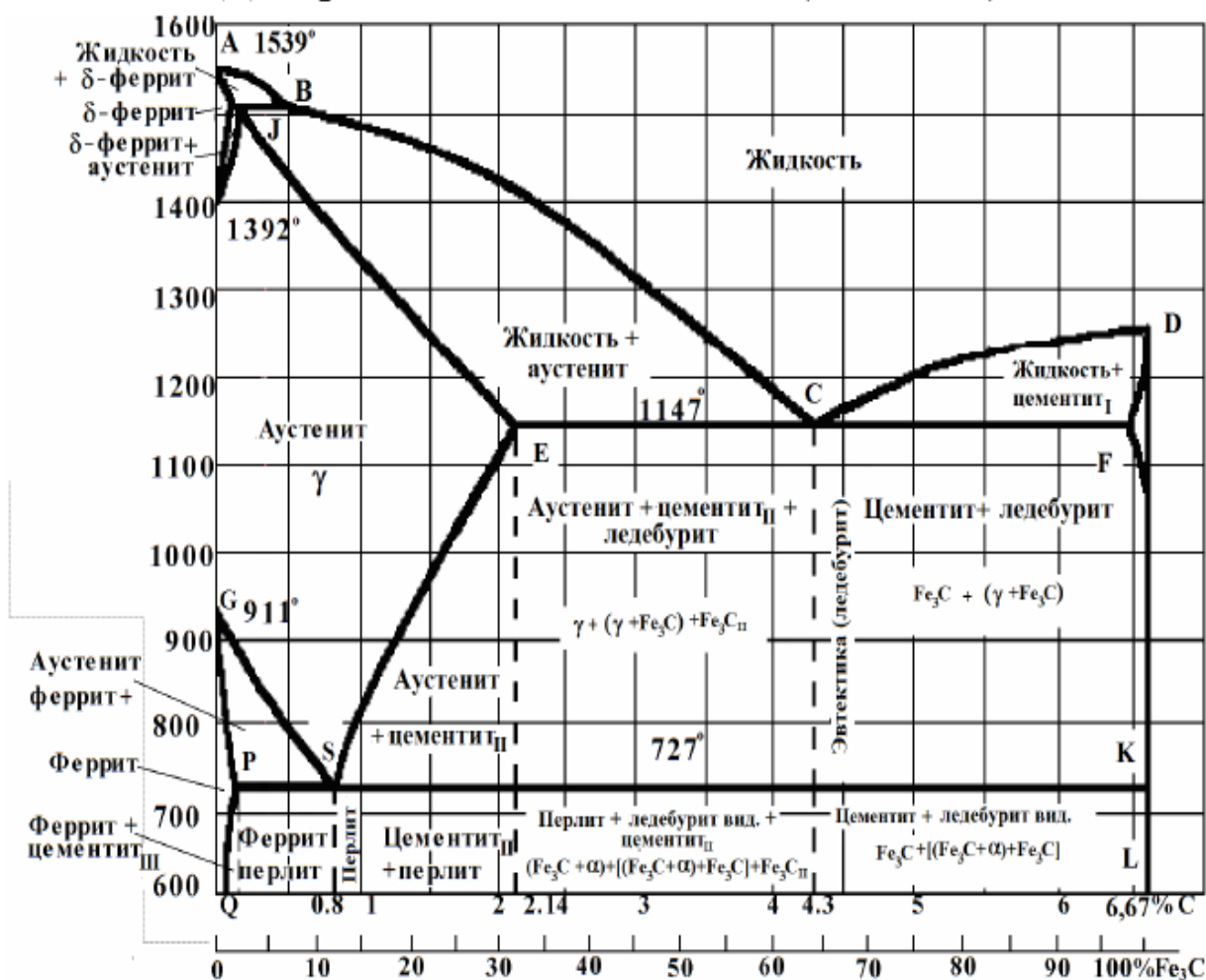


Рис. 7.1. Диаграмма состояния «Железо – карбид железа» (Fe – Fe₃C)

Особенности диаграммы определяются **полиморфизмом железа** и углерода, а также **ферромагнетизмом** железа:

- от 1539 – 1392 °С железо имеет решетку ОЦК, такая модификация железа называется **δ(Fe)**;

- от 1392 – 911 °С железо имеет решетку ГЦК, такая модификация железа называется **γ(Fe)**;

- ниже 911 °С железо имеет решетку ОЦК, такая модификация называется **α(Fe)**;

- при температуре 768 °С железо теряет магнитные свойства, и эта температура называется **точкой Кюри**.

В каждой модификации железа растворяется строго определенное количество углерода с образованием твердых растворов внедрения:

- δ - феррит – раствор углерода в $\delta(\text{Fe})$ с ОЦК решеткой. Максимальная растворимость углерода в $\delta(\text{Fe})$ составляет 0,1 % при температуре 1499 °С;

- аустенит – твердый раствор углерода в $\gamma(\text{Fe})$ с ГЦК решеткой. Максимальная растворимость углерода в $\gamma(\text{Fe})$ составляет 2,14 % при температуре 1147 °С;

- α - феррит – твердый раствор углерода в $\alpha(\text{Fe})$ с ОЦК решеткой. Максимальная растворимость углерода в $\alpha(\text{Fe})$ составляет 0,025 % при температуре 727 °С.

Кроме указанных выше твердых растворов в системе Fe – C образуются две **высокоуглеродистые** фазы:

- **цементит** – химическое соединение Fe_3C со сложной орторомбической решеткой, которое содержит 6,67 % углерода и имеет температуру плавления $T_{\text{пл}} = 1260$ °С. Эта фаза метастабильная, способная к распаду ($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}_{\text{гр}}$);

- **графит** – модификация углерода с ГПУ решеткой. Эта фаза стабильная, состоит на 100 % из углерода и имеет температуру плавления $T_{\text{пл}} = 3600$ °С.

В дополнение к фазам в виде твердых растворов на диаграмме имеются области существования **механических смесей**:

- **перлит** – механическая смесь (эвтектоид) феррита и цементита, содержащая 0,8 % С (рис. 7.1, точка S);

- **ледебурит** – механическая смесь (эвтектика) аустенита и цементита в интервале температур 1147 – 727 °С или перлита и цементита при температурах ниже 727 °С, содержащая 4,3 % углерода (рис. 7.1, точка C).

Сплошными линиями изображена диаграмма Fe – Fe_3C , штриховыми – диаграмма Fe – C (рис.7.1). Основной является диаграмма Fe – Fe_3C . Однофазные области диаграммы:

- выше линии ABCD (линия ликвидус) – жидкость (L);
- область AHN – область δ - феррита;
- область NJESG – область аустенита;
- область GPQ – область α - феррита;
- линия LD или KD – область цементита Fe_3C .

Остальные области диаграммы (рис. 7.1) – двухфазные: ледебурит, перлит и их комбинации.

7.1. Характеристика линий и точек диаграммы Fe – Fe_3C

Линия ABCD - **линия ликвидус** – линия начала кристаллизации сплава и состоит она из трех частей:

- АВ – начало образования δ- феррита;
- ВС – начало кристаллизации аустенита;
- CD – начало кристаллизации цементита Fe₃C.

Линия АНJECF – линия **солидус** – линия конца кристаллизации сплава и состоит она из нескольких частей:

- АН – конец кристаллизации δ- феррита;
- JE – конец кристаллизации аустенита;
- HJB - линия перитектического превращения:



- ECF – линия эвтектического превращения:



Остальные линии соответствуют превращениям в твердом состоянии:

- NH и NJ (A₄) – линии начала и конца полиморфного превращения Fe_δ ↔ Fe_γ;
- GS (A₃) и GP – линии начала и конца полиморфного превращения Fe_γ ↔ Fe_α;
- ES(A_{ст}) – линия выделения вторичного цементита из аустенита (Fe₃C_{II}) за счет изменения растворимости углерода в γ-железе. Эта линия называется линия **сольвиус**;
- PQ – линия выделения третичного цементита (Fe₃C_{III}) за счет изменения растворимости углерода в α- железе;
- PSK (A₁) – линия эвтектоидного превращения во всех сплавах независимо от содержания углерода:



- KD – линия существования химического соединения Fe₃C (цементит);
- MO (A₂) – 768 °C - линия магнитного превращения феррита (потеря магнитных свойств железа).

Физический смысл точек диаграммы:

- А – температура плавления и кристаллизации чистого железа;
- В – перитектическая точка;
- С – эвтектическая точка;
- D – температура плавления и кристаллизации цементита;
- N и G - температуры полиморфных превращений чистого железа;

- Н – предельная растворимость углерода в δ - железе;
- Е – предельная растворимость углерода в γ - железе;
- S – эвтектоидная точка;
- Р и Q – точки предельной растворимости углерода в α - железе;
- М – точка магнитного превращения железа (точка Кюри).

A_1, A_2, A_3, A_4 – принятые условные обозначения фазовых превращений.

7.2. Практическое применение диаграммы Fe – Fe₃C

Диаграмма Fe – Fe₃C позволяет:

- определить температуры фазовых превращений (плавления, кристаллизации, полиморфных превращений, температуры растворимости фаз;
- определить температурные интервалы термической обработки, горячей и холодной обработки металлов давлением.

7.3. Классификация сплавов системы Fe – Fe₃C

Сплавы железа с углеродом делятся на две группы:

- стали: сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14 %С, кристаллизация которых заканчивается образованием аустенита, они обладают высокой пластичностью, хорошо деформируются;
- чугуны: сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14 %С и кристаллизация которых заканчивается образованием эвтектики (ледебурита). Чугуны менее пластичны, обладают хорошими литейными свойствами.

7.3.1. Углеродистые стали классифицируются:

- по химическому составу, структуре;
- по способу выплавки;
- по степени раскисления;
- по качеству;
- по назначению.

По **химическому составу и микроструктуре** стали делятся на три группы:

- доэвтектоидные, которые содержат от 0,02 до 0,8 % углерода и имеют структуру феррит (Ф) или феррито-перлитную (Ф + П) (рис. 7.2а);
- эвтектоидные, которые содержат 0,8 % углерода и имеют структуру 100 % перлита (рис. 7.2б);
- заэвтектоидные, которые содержат от 0,8 до 2,14 % углерода и имеют структуру перлит – цементитную (П + Ц) (рис. 7.2в).

Сплав, содержащий углерода менее 0,02 % углерода и имеющий структуру 100 % феррита (Ф), называется техническим железом (Армко).

Для изменения химического состава и, соответственно, свойств стали в нужном направлении, в нее вводят специальные примеси, которые называются *легирующими*, а сами стали называются *легированными*.

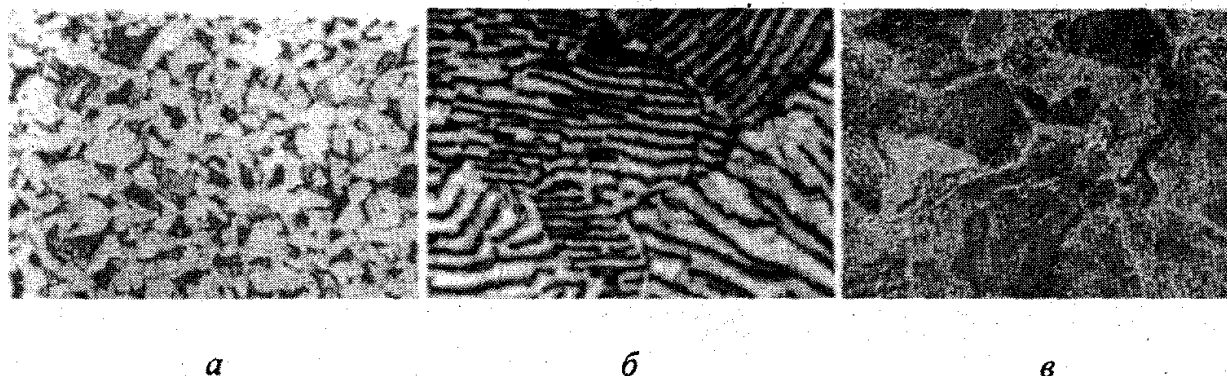


Рис. 7.2. Микроструктуры углеродистых сталей: а – доэвтектоидных; б – эвтектоидных; в – заэвтектоидных

Углеродистые стали – основной конструкционный материал, свойства которого зависят от количества углерода, структуры и содержания примесей. С ростом содержания углерода меняется структура, уменьшается количество феррита, увеличивается количество перлита, а, соответственно, увеличиваются прочность и твердость и уменьшается пластичность (рис. 7.3)

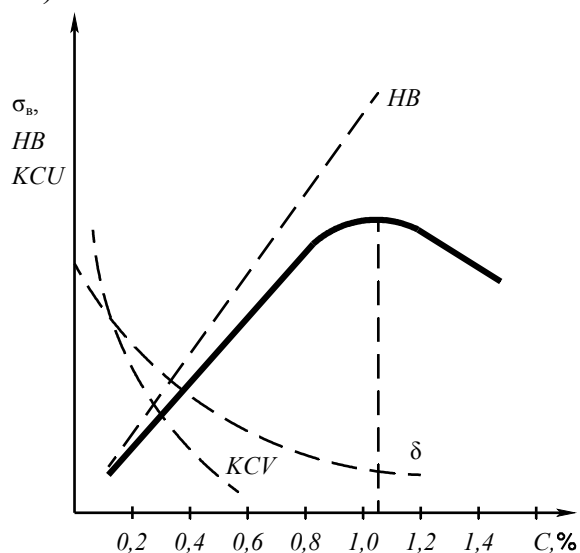


Рис. 7.3. Влияние углерода на механические свойства стали

Прочность стали (σ_B) растет только до содержания углерода 1,0 %, а затем падает за счет образования сетки вторичного цементита по границам зерен (рис. 7.4).



Рис. 7.4. Микроструктура стали с сеткой вторичного цементита по границам зерен

По *способу выплавки* стали делятся на мартеновскую, электросталь, выплавленную в электродуговых печах и конверторную, выплавленную в кислородно-конверторных печах.

По *способу раскисления* различают стали спокойные (сп), полуспокойные (псп), кипящие (кп).

По *качеству*, которое определяют постоянные в стали вредные примеси (S, P), стали делятся на стали общего назначения, качественные и высококачественные.

В конструкционных углеродистых сталях *общего назначения* допускается до 0,05 % серы и до 0,04 % фосфора. В *качественных* конструкционных сталях допускается содержание серы и фосфора менее 0,04 %. *Высококачественные* стали содержат серы и фосфора менее 0,035 %. *Особо высококачественные* стали (только легированные) содержат серы менее 0,015 % и фосфора менее 0,025 %.

Сера нерастворима в железе и образует с ним химическое соединение FeS. Следствие чего – *красноломкость*, т.е. сталь становится хрупкой при повышенных температурах.

Фосфор растворяется в феррите, уменьшая пластичность, склонен к ликвации на границах зерен и вызывает *хладноломкость*.

Скрытые примеси (газы азот, кислород, водород), содержание которых составляет 10^{-2} - 10^{-4} %, ухудшают пластические свойства стали.

Знак качества обозначается буквой А и проставляется в конце обозначения марки стали. Например: сталь инструментальная У10А, содержащая 1 % углерода.

По *назначению* стали делятся на конструкционные и инструментальные.

7.3.2. **Чугуны**, в зависимости от того, в какой форме присутствует углерод в сплавах, различают белые, серые, высокопрочные и ковкие. Высокопрочные чугуны являются разновидностью серых, но из-за повышенных механических свойств их выделяют в особую группу.

Белыми называют чугуны, в которых весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита. Эти чугуны, фазовые превращения которых протекают согласно диаграмме состояния Fe – Fe₃C, подразделяют на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические.

Из-за большого количества цементита белые чугуны тверды (4500-5500 НВ), хрупки и для изготовления деталей машин мало используются. Ограниченное применение имеют отбеленные чугуны – отливки из серого чугуна со слоем белого чугуна в виде твердой корки на поверхности. Из них изготавливают прокатные валки, лемехи плугов, тормозные колодки и другие детали, работающие в условиях износа.

В промышленности широко применяют серые, высокопрочные и ковкие чугуны, в которых весь углерод или часть его находится в виде графита. Графит обеспечивает пониженную твердость, хорошую обрабатываемость резанием, а также высокие антифрикционные свойства вследствие низкого коэффициента трения. Вместе с тем включения графита снижают прочность и пластичность, так как нарушают сплошность металлической основы сплава. Серые, высокопрочные и ковкие чугуны различаются условиями образования графитных включений и их формой, что отражается на механических свойствах отливок.

Серыми называют чугуны с пластинчатой формой графита.

По химическому составу серые чугуны разделяют на обычные (нелегированные) и легированные. Обычные серые чугуны – сплавы сложного состава, содержащие основные элементы: Fe-C-Si и постоянные примеси: Mn, P, S. В небольших количествах в обычных чугунах может содержаться Cr, Ni и Cu, которые попадают из руды. Почти все эти элементы влияют на условия графитизации, количество графитных включений, структуру металлической основы и, как следствие, свойства чугуна.

Углерод оказывает определяющее влияние на качество чугуна, изменяя количество графита и литейные свойства. Чем выше концентрация углерода, тем больше выделений графита в чугуне и тем ниже его механические свойства.

Кремний обладает сильным графитизирующим действием; способствует выделению графита в процессе затвердевания чугуна и разложению выделившегося цементита.

Марганец затрудняет графитизацию чугуна, несколько улучшает его механические свойства, особенно в тонкостенных отливках.

Сера – вредная примесь. Она ухудшает механические и литейные свойства чугунов: понижает жидкотекучесть, увеличивает усадку и повышает склонность к образованию трещин.

Фосфор в количестве до 0,3 % растворяется в феррите. При большей концентрации он образует с железом и углеродом тройную «фосфидную» эвтектику. Она имеет низкую температуру плавления (950 °С), что увеличивает жидкотекучесть чугуна, но дает высокую твердость и хрупкость.

Таким образом, степень графитизации в чугуне возрастает с увеличением содержания углерода и кремния.

Кроме химического состава, структура чугуна и его свойства зависят от технологических факторов, главным из которых является скорость охлаждения. С уменьшением скорости охлаждения увеличивается количество графита, с увеличением – количество химически связанного углерода.

Ухудшая механические свойства, графит в то же время придает чугуну ряд ценных свойств. Он измельчает стружку при обработке резанием, оказывает смазывающее действие и, следовательно, повышает износостойкость чугуна, придает ему демпфирующую способность. Кроме того, пластинчатый графит обеспечивает малую чувствительность чугуна к дефектам поверхности. Благодаря этому сопротивление усталости деталей из чугуна соизмеримо со стальными деталями.

В чугунах с высоким содержанием кремния при медленном охлаждении отливки первичная кристаллизация происходит в соответствии со стабильной диаграммой Fe – C (рис. 7.1); в этом случае графит появляется непосредственно из жидкой фазы. С увеличением скорости охлаждения создаются условия для первичной кристаллизации в соответствии с метастабильной диаграммой Fe – Fe₃C (рис. 7.1); из жидкой фазы выделяется цементит, а графит образуется вследствие его распада при дальнейшем охлаждении.

Чем крупнее и прямолинейнее форма графитовых включений, тем ниже сопротивление серого чугуна разрыву. И, наоборот, чем мельче и разобщиеннее графитовые включения, тем меньше их отрицательное влияние.

По *структуре металлической основы* серые чугуны разделяют на три вида.

1. Серый перлитный со структурой (рис.7.5а) перлит + графит (рис. 7.6, область III). В этом чугуне количество связанного углерода составляет $\approx 0,8 \%$.

2. Серый ферритно-перлитный со структурой (рис.7.5б) феррит + перлит + графит (рис.7.6, область IIIа). Количество связанного углерода в нем менее 0,8 % .
3. Серый ферритный со структурой (рис.7.5в) феррит + графит (рис.7.6, область IIIб). В это чугуны весь углерод находится в виде графита.
- 4.



Рис. 7.5. Микроструктуры серых чугунов: а – перлитного; б – ферритно-перлитного; в – ферритного

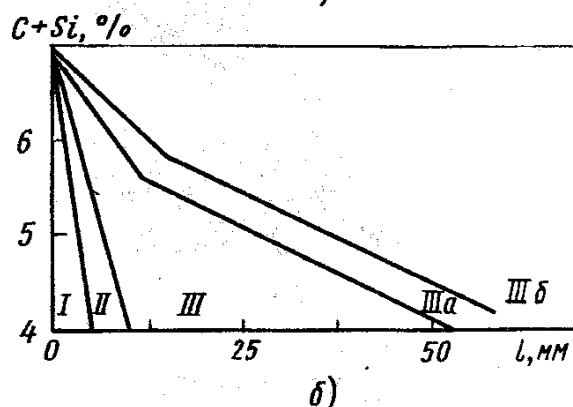
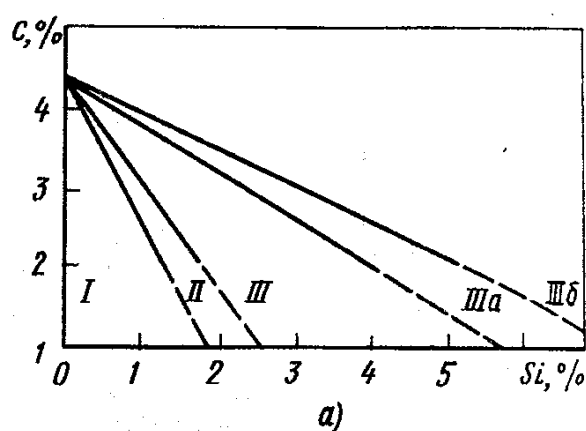


Рис. 7.6. Структурная диаграмма чугунов в зависимости от содержания кремния и углерода (а) и толщины стенки отливки (б): I – белый чугун; II – половинчатый чугун; III, IIIа, IIIб – серый перлитный, ферритно-перлитный и ферритный чугун соответственно

Механические свойства серого чугуна зависят от свойств металлической основы и, главным образом, количества, формы и размеров графитных включений. Прочность, твердость и износостойкость чугунов растут с увеличением количества перлита в металлической основе, которая по строению аналогична сталям. Решающее значение графита обусловлено тем, что его пластинки, прочность которых ничтожно мала, действуют как надрезы или трещины, пронизывающие металлическую основу и ослабляющие ее.

Номенклатура отливок из серого чугуна и их масса разнообразны: от деталей в несколько граммов (например, поршневые кольца двигателей) до отливок в 100 т и более (станины станков). Выбор марки чугунов для конкретных условий работы определяется совокупностью технологических и механических свойств (таблица 7.1).

Таблица 7.1

Механические свойства некоторых марок серых чугунов (ГОСТ 1412-85)

Чугун	σ_b , МПа	δ , %	НВ	Структура металлической основы
СЧ 15	150	-	1630-2290	Феррит
СЧ 25	250	-	1800-2500	Феррит + перлит
СЧ 40	400	-	2070-2850	Перлит
СЧ 45	450	-	2290-2890	Перлит

Марка серого чугуна состоит из букв СЧ (серый чугун) и цифры, показывающей значение временного сопротивления при растяжении в кгс/см²

Высокопрочными чугунами называют чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Их получают модифицированием магнием, который вводят в жидкий чугун в количестве 0,02-0,08 %. Ввиду того, что модифицирование чугунов чистым магнием сопровождается сильным пироэффектом, чистый магний заменяют лигатурами (например, сплавом магния и никеля).

По структуре высокопрочный чугун может быть ферритным, ферритно-перлитным или перлитным (рис.7.7).

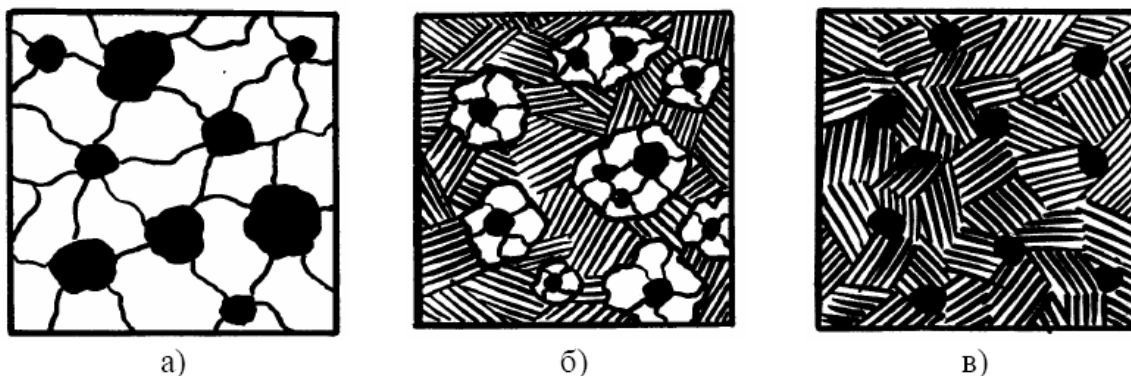


Рис. 7.7. Микроструктура высокопрочного чугуна, (х 300): а – ферритный; б - ферритно-перлитный; в – перлитный

Шаровидный графит – менее сильный концентратор напряжений, чем пластинчатый графит, и поэтому меньше снижает механические свойства основы. Чугуны с шаровидным графитом обладают более высокой прочностью и некоторой пластичностью. Маркируют высокопрочные чугуны по пределу прочности и относительному удлинению (таблица 7.2).

Таблица 7.2

Механические свойства некоторых высокопрочных чугунов
(ГОСТ 7293-85)

Чугун	σ_b , МПа	δ , %	НВ	Структура металлической основы
ВЧ 38-17	380	17	1400-1700	Феррит с небольшим количеством перлита
ВЧ 42-12	420	12	1400-2000	
ВЧ 50-7	500	7	1710-2410	
ВЧ 60-2	600	2	2000-2800	Перлит с небольшим количеством феррита
ВЧ 80-2	800	2	2500-3300	
ВЧ 120-2	1200	2	3020-3800	

Высокопрочные чугуны применяют в различных отраслях техники, эффективно заменяя сталь во многих изделиях и конструкциях. Из них изготавливают оборудование прокатных станов (прокатные валки массой 12 т), кузнечно-прессовое оборудование (траверса пресса, шабот ковочного

молота), в турбостроении – корпус паровой турбины, лопатки направляющего аппарата, в дизеле-, тракторо- и автомобилестроении – коленчатые валы, поршни и многие другие ответственные детали, работающие при высоких циклических нагрузках и условиях изнашивания.

В некоторых случаях для улучшения механических свойств применяют термическую обработку отливок; для повышения прочности – закалку и отпуск при 500-600 °С; для увеличения пластичности – отжиг, способствующий сфероидизации перлита.

Ковкими называют чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Их получают отжигом белых доэвтектических чугунов. По этой причине графит ковких чугунов называют углеродом отжига. Такой графит, в отличие от пластинчатого, меньше снижает механические свойства металлической основы, вследствие чего ковкий чугун по сравнению с серым обладает более высокой прочностью и пластичностью.

Отливки из белого чугуна, подвергаемые отжигу на ковкий чугун, изготавливают тонкостенными. Они не должны иметь сечение более 50 мм, иначе в сердцевине при кристаллизации выделяется пластинчатый графит, чугун становится непригодным для отжига.

По структуре металлической основы, которая определяется режимом отжига, ковкие чугуны бывают ферритными и перлитными (рис. 7.8).

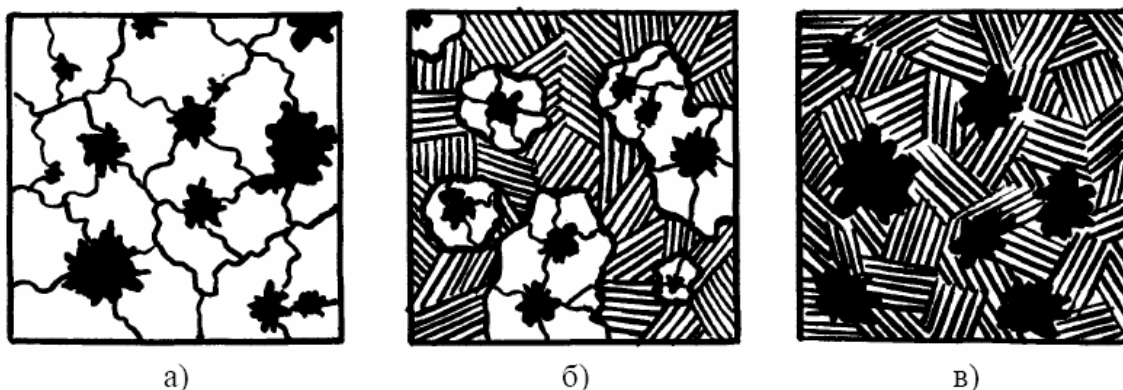


Рис. 7.8. Микроструктура ковких чугунов, (х 300): а – ферритный; б – ферритно – перлитный; в - перлитный

Отжиг на ферритные чугуны проводят по режиму **1** (рис. 7.9), обеспечивающему графитизацию всех видов цементита белого чугуна. Перлитный ковкий чугун получают отжигом, который проводят в окислительной среде по режиму **2** (рис. 7.9).

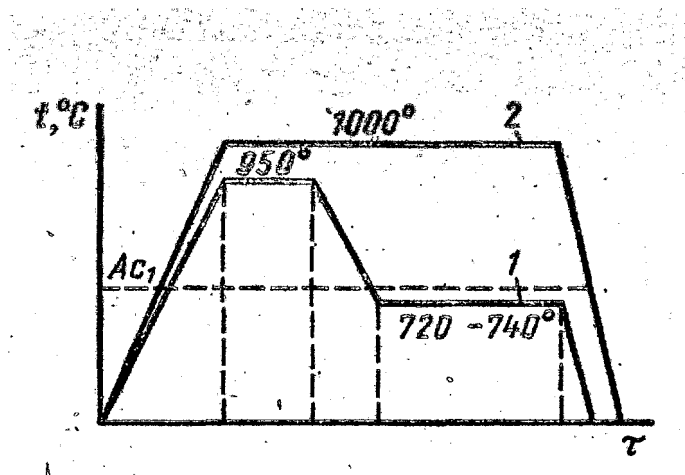


Рис. 7.9. Схема отжига белого чугуна на ковкий: 1 – на ферритный; 2 – на перлитный

Графитизация цементита перлита практически не происходит, чугун приобретает структуру, состоящую из перлита и углерода отжига. Отсутствие литейных напряжений, которые полностью снимаются во время отжига, компактная форма и изолированность графитных включений обуславливают высокие механические свойства ковких чугунов. Принцип их маркировки тот же, что и высокопрочных чугунов : КЧ σ_b - δ (таблица 7.3).

Таблица 7.3
Механические свойства некоторых марок ковких чугунов (ГОСТ 1215-79)

Чугун	σ_b , МПа	δ , %	НВ	Структура металлической основы
КЧ 30-6 КЧ 35-10 КЧ 37-12	300 350 370	6 10 12	1000-1630 1000-1630 1100-1630	Феррит + (10-3 %) перлита
КЧ 45-7 КЧ 60-3 КЧ 80-1,5	450 600 800	7 3 1,5	1500-2070 2000-2690 2700-3200	Перлит + (20-0 %) феррита

Из таблицы видно, что ферритные чугуны имеют более высокую пластичность, а перлитные – более высокую прочность и твердость.

Ковкие чугуны нашли широкое применение в сельскохозяйственном, автомобильном и текстильном машиностроении, в судо-, котло-, вагоно- и дизелестроении. Из них изготавливают детали высокой прочности, работающие в тяжелых условиях износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки. Большая плотность отливок ковкого чугуна позволяет изготавливать детали водо- и газопроводных установок; хорошие литейные свойства исходного белого чугуна – отливки сложной формы.

Недостаток ковких чугунов – повышенная стоимость из-за продолжительного дорогостоящего отжига.