

## ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ

*Цель работы:* ознакомиться с маркировкой, свойствами и применением чугунов; изучить микроструктуры чугунов.

*Приборы и материалы:* микроскоп ММУ-3, травитель, спирт, фильтровальная бумага, вата, коллекция микрошлифов чугунов.

Выполнение работы рекомендуется проводить в следующем порядке:

### 1. Ознакомиться по методическому указанию с маркировкой, свойствами, структурой и применением чугунов

**Чугунами** называются сплавы железа с углеродом, содержащие углерода от 2,14 % до 6,67 %. В состав чугунов входят также кремний (1,2-3,5 %), марганец (0,5-1,4 %), сера (0,05-0,2), фосфор (0,05-0,8 %).

**Чугун** – важнейший литейный материал, широко применяющийся в металлургии и машиностроении. Около 68 % отливок изготавливается из чугуна. Чугуны находят широкое применение в качестве конструкционного материала благодаря сочетанию высоких литейных свойств, достаточной прочности, износостойкости, а также невысокой стоимости. Чугуны отличаются низкой чувствительностью к качеству поверхности и надрезам; и благодаря этому, присутствующие в любой отливке отверстия, углы, резкие переходы, раковины, поры, неметаллические включения сравнительно мало влияют на ее реальную конструкционную прочность. Другими преимуществами чугуна являются: высокая прочность при сжатии, высокое значение предела выносливости при кручении (у высокопрочного чугуна даже на 20-30 % больше, чем у стали), хорошие антифрикционные свойства (графит выполняет роль смазки).

Особенностью чугунов является возможность существования двух высокоуглеродистых фаз: графита (стабильная фаза) и цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) (метастабильная фаза).

**Цементит (Ц)** – это химическое соединение  $\text{Fe}_3\text{C}$  – карбид железа. В цементите 6,67 % С. Характеризуется очень высокой твердостью (~ 800 НВ) и практически нулевой пластичностью ( $\delta \approx 0 \%$ ), т. е. хрупкий. Цементит имеет сложную ромбоэдрическую кристаллическую решетку.

**Графит (Г)** – одна из двух (алмаз, графит) кристаллических модификаций углерода (100 % С). Прочность и пластичность графита весьма низки. Кристаллическая структура гексагональная слоистая (рис. 1). (В чугунах встречается и менее устойчивая модификация графита – ромбическая). Из-за легкой подвижности слоев графит является наименее прочной и наименее пластичной фазой чугуна. Графит слабо электропроводен и химически стоек.

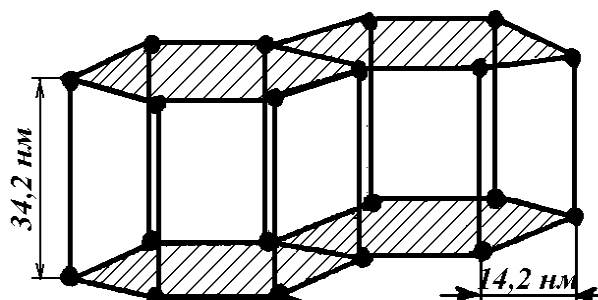


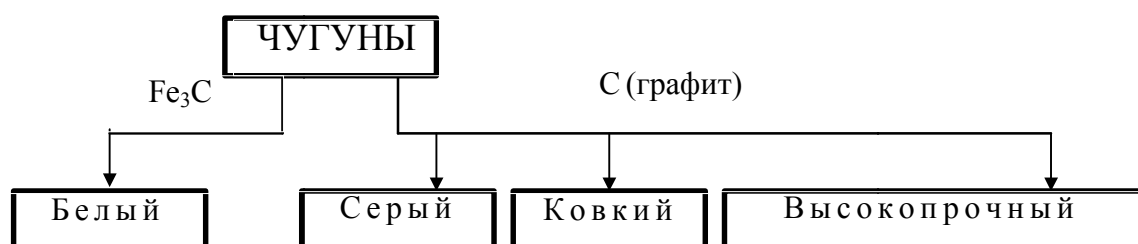
Рис. 1. Кристаллическая решетка графита

В зависимости от состояния углерода в чугуне различают:

- **белый чугун** – весь углерод находится в связанном состоянии в виде цементита;
- **серый чугун** – углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме пластинчатого графита;
- **высокопрочный чугун** – углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме шаровидного графита;
- **ковкий чугун** – углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме хлопьевидного графита.

Примечание. В серых, ковких и высокопрочных чугунах та часть углерода, которая находится в связанном состоянии в виде цементита, входит в состав перлита – металлической основы чугуна.

Таким образом, чугун (кроме белого) отличается от стали наличием в структуре графитовых включений, а между собой чугуны различаются формой этих включений.



### Белый чугун

Кристаллизация белых чугунов происходит в соответствии с метастабильной диаграммой Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$  (рис. 2), сплошные линии при больших скоростях охлаждения расплавов.

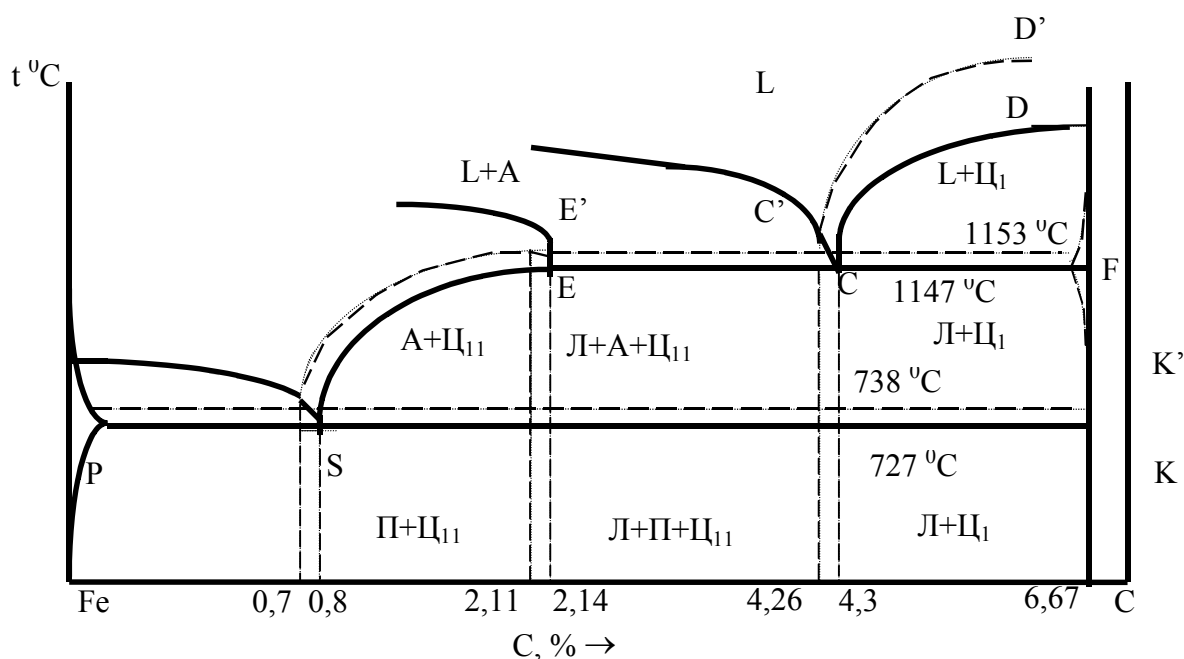


Рис. 2. Диаграмма состояния Fe – C сплавов

При температуре  $1147^{\circ}\text{C}$  из металлической жидкости, содержащей 4,3 % C, одновременно выделяется аустенит состава точки E (рис. 2) и цементит. Образующаяся смесь этих фаз называется ледебуритом, а превращение эвтектическим  $L_C \rightarrow L_C (A_E + \text{Ц})$ . При дальнейшем охлаждении концентрация углерода в аустените изменяется по линии ES (рис. 2) вследствие выделения вторичного цементита и к моменту достижения температуры эвтектоидного превращения ( $727^{\circ}\text{C}$ ) принимает значение 0,8% C. При температуре  $727^{\circ}\text{C}$  на линии PSK (рис. 2) аустенит, находящийся как в структурно-свободном состоянии, так и входящий в состав ледебурита, претерпевает эвтектоидное превращение в перлит  $A_S \rightarrow P_S (\text{Ф}_P + \text{Ц})$ .

По структуре белые чугуны разделяются:

- доэвтектические, содержащие углерода до 4,3 %, со структурой ледебурит, перлит и цементит вторичный;
- эвтектические, содержащие углерода 4,3 %, со структурой ледебурит;
- заэвтектические, содержащие углерода более 4,3 %, со структурой ледебурит и цементит первичный.

Белые чугуны из-за присутствия в них большого количества цементита твердые (HB 450-500), хрупкие и для изготовления деталей машин не используются. Ограниченное применение имеют отбеленные чугуны – отливки из серого чугуна со слоем белого чугуна в виде твердой корки на поверхности. Из них изготавливают: тормозные колодки, прокатные валики, лемехи плугов и др. детали, работающие в условиях износа.

Белые доэвтектические чугуны подвергаются специальной термической обработке, в результате которой происходит распад цементита с образованием графита хлопьевидной формы, и чугун наряду с высокой

прочностью приобретает и удовлетворительную пластичность. Образующийся чугун называется ковким.

### Ковкий чугун

Чугун с хлопьевидной формой графита называется **ковким**.

Отжиг белого чугуна на ковкий обычно ведут по графику, показанному на рис. 3.

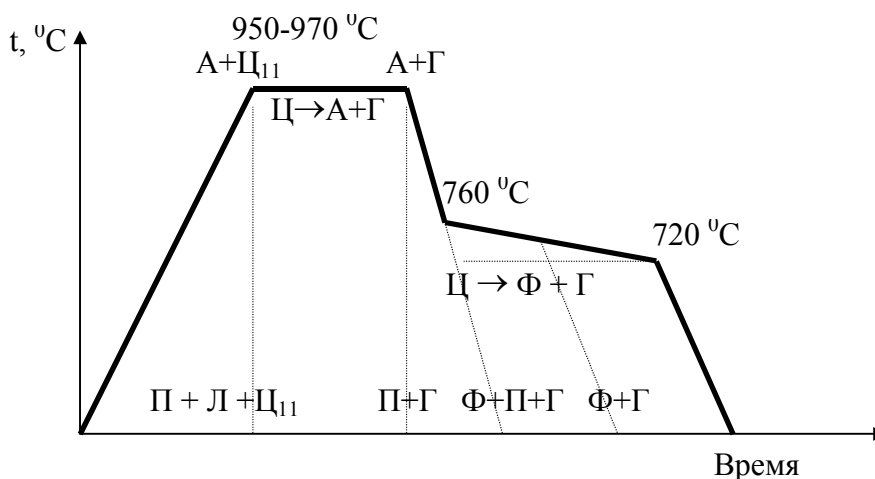


Рис. 3. График отжига белого доэвтектического чугуна на ковкий

Графит, образующийся в результате распада цементита, называют углеродом отжига.

Исходная структура доэвтектического чугуна состоит из перлита, ледебурита и цементита вторичного. При нагреве чугуна до температуры 950-1050 °C в сплаве протекает сначала превращение перлита в аустенит, а затем происходит растворение цементита вторичного в аустените. Во время длительной выдержки при указанных температурах цементит, являясь метастабильной фазой, распадается на аустенит и хлопьевидный графит.

Структура металлической основы чугуна зависит от режима охлаждения. Если после завершения графитизации провести охлаждение сразу до низких (комнатных) температур, то структура чугуна будет состоять из перлита и графита. Такой чугун называют перлитным ковким чугуном.

Если в температурном интервале 760-700 °C отливки охлаждать очень медленно (3-5 °C в час), то происходит распад аустенита на феррит и графит, который наслаивается на уже имеющиеся хлопья. Медленное охлаждение можно заменить изотермической выдержкой при температурах 720-700 °C, в результате которой происходит распад цементита, входящего в состав перлита, на феррит и графит. Такой режим отжига применяют чаще и называют второй стадией графитизации или второй стадией отжига. Структура чугуна после двухстадийного отжига состоит из феррита и графита, а чугун называют ферритным ковким чугуном. Если вторую стадию отжига сократить, то часть цементита, входящего в состав перлита, не распадется и структура чугуна будет состоять из перлита, феррита и графита — такой чугун называют феррито-перлитным ковким чугуном; чем короче

вторая стадия отжига, тем больше в структуре содержится перлита. Ферритный ковкий чугун характеризуется большей пластичностью, но меньшей прочностью, чем перлитный чугун. Для повышения пластичности перлитного чугуна с сохранением высокой прочности его подвергают сфероидизирующему (неполному) отжигу. Чугуны, подвергающиеся сфероидизирующему отжигу, содержат повышенное количество марганца (0,9-1,0 %) или небольшие добавки хрома и никеля для предотвращения распада аустенита на феррит и графит. Ковкий чугун со структурой зернистого перлита обладает большей прочностью на разрыв ( $\sigma_B = 400 - 600$  МПа), сравнительно хорошей пластичностью ( $\delta = 10,0 - 4,0$  %), хорошей обрабатываемостью резанием, повышенными антифрикционными свойствами и более высокой, чем у серого и ковкого ферритного чугунов, коррозионной стойкостью.

Согласно ГОСТа 1215-79 имеются следующие марки ковкого чугуна:

- ферритные и ферритно-перлитные: КЧ30-6, КЧ33-10, КЧ37-12;
- перлитные: КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5, где буквы “КЧ” обозначают ковкий чугун; цифры до дефиса временное сопротивление разрыву в кгс/мм<sup>2</sup>, а цифры после дефиса – относительное удлинение в %.

Ковкие чугуны нашли широкое применение в сельскохозяйственном, автомобильном и текстильном машиностроении, в судо-, котло-, вагоно- и дизелестроении. Из них изготавливают: башмаки, коробки, муфты, фланцы, головки, хомутики, ступицы, картеры редукторов, тормозные колодки, звездочки и звенья приводных цепей и др. детали.

Все указанные детали изготавливают тонкостенными. Они не должны иметь сечение более 50 мм, иначе в сердцевине при кристаллизации выделяется пластинчатый графит и чугун отжигать не имеет смысла.

В настоящее время выпуск ковкого чугуна сокращается и происходит замена его высокопрочным чугуном, т. к. себестоимость 1 т. годных отливок из высокопрочного чугуна ниже. Масса отливки из ВЧ на 20-30 % меньше (благодаря более высоким механическим свойствам).

### **Серый чугун**

Серым чугуном называется чугун с пластинчатой формой графита. Содержание углерода в серых чугунах колеблется в пределах 2,2 – 3,7 %. Чем выше концентрация углерода, тем больше выделений графита в чугуне и тем ниже его механические свойства. По этой причине его максимальное содержание ограничивается доэвтектической концентрацией. В то же время снижение содержания углерода отрицательно сказывается на жидкотекучести и, следовательно, на литейных свойствах. Нижний предел содержания углерода (2,2 %) принимают для толстостенных отливок, верхний (3,7 %) – для тонкостенных. Кристаллизация серого чугуна протекает в соответствии со стабильной диаграммой Fe-C рис. 2. (пунктирные линии).

В системе железо-графит эвтектика образуется при температуре  $1153^{\circ}\text{C}$ . Она содержит 4,26 % С и состоит из аустенита и графита. Ее называют графитной эвтектикой.

В интервале температур  $1153-738^{\circ}\text{C}$  из аустенита выделяется вторичный графит. При этом аустенит изменяет свой состав по линии  $E'S'$  (рис. 2). Эвтектоидное превращение у сплавов в этой системе протекает при температуре  $738^{\circ}\text{C}$ , причем эвтектоидная точка ( $S'$ ) (рис. 2) соответствует содержанию 0,7% С. Эвтектоид в этом случае является смесью феррита и графита и называется графитным.

Таким образом, диаграмма состояния железо-графит принципиально не отличается от диаграммы железо-цементит, за исключением того, что во всех случаях из сплавов выделяется не цементит, а графит. Т. к. графитизация происходит в соответствии с рис. 2 в узком температурном интервале, то для образования графитного зерна необходима малая скорость охлаждения и наличие примесей, способствующих графитизации.

Наиболее сильное влияние на графитизацию оказывает кремний, содержащийся в количестве 0,8-3 %. Кристаллизации графита пластинчатой формы также способствуют микродобавки алюминия, кальция, меди, церия.

Степень графитизации определяет характер металлической основы серого чугуна. В зависимости от того, какая часть углерода содержится в цементите, различают ферритные, феррито-перлитные и перлитные чугуны.

Значительное влияние на структуру чугуна также оказывают технологические факторы, главным из которых является скорость охлаждения. С уменьшением скорости охлаждения увеличивается количество графита. При выборе скорости охлаждения принимают во внимание толщину стенки отливки. Чем больше толщина стенки отливки, тем меньше скорость охлаждения и полнее протекает процесс графитизации.

Наличие пластинчатого графита всегда создает как бы внутренние надрезы, поэтому серый чугун характеризуется низкой прочностью и очень низкой пластичностью. Серый чугун обнаруживает заметные пластические деформации только в условиях сжатия (осадка 20-40 %). При растяжении максимальные пластические деформации в момент разрушения не превышают 1-2 %, так как разрушение происходит путем отрыва по выделениям графита. Чем мельче графитные пластины и чем больше они изолированы друг от друга, тем выше прочностные и пластические свойства чугуна при одной и той же металлической основе. Но в то же время наличие пластинчатого графита обеспечивает чугуну бóльшую демпфирующую способность и тем бóльшую, чем больше графитных включений и чем они крупнее. Пластичность чугуна, в противоположность пластичности стали, может понижаться или, наоборот, возрастать с увеличением прочности: все зависит от того, за счет чего повышается прочность. Если увеличение прочности происходит за счет увеличения количества перлита и его измельчения, то пластичность уменьшается. Если увеличение прочности происходит за счет улучшения формы включений графита или уменьшения их количества, то увеличивается модуль упругости и пластичность



повышается одновременно с прочностью. Сопротивление усталости у чугунов, как и у сталей, растет с увеличением статической прочности. Чем мельче графит и больше перлитной составляющей, тем больше предел выносливости. Наиболее высокое сопротивление усталости чугунов сжимающим напряжениям. При пульсирующем цикле сжатия оно в 5-6 раз выше, чем при пульсирующем цикле растяжения. Таким образом, чугуны целесообразнее использовать для деталей, работающих в условиях сжатия и вибраций.

Номенклатура отливок из серого чугуна и их масса разнообразна: от деталей в несколько граммов (например, поршневые кольца двигателей) до отливок в 100 т. и более (санины станков). Из серых чугунов изготавливают крышки, фланцы, маховики, корпуса редукторов, подшипников, насосов, а также блоки цилиндров, барабаны сцепления, санины станков, зубчатые колеса, шпиндели, поршни цилиндров, корпуса насосов и компрессоров и др. детали.

Согласно ГОСТа 1412-85 предусматриваются следующие марки серого чугуна: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45, где буквы СЧ обозначают серый чугун, а цифры – минимальное значение временного сопротивления при разрыве в МПа · 10<sup>-1</sup>.

**Примечание.** Иногда в одной отливке можно встретить все структурные виды чугуна: ускоренно охлажденная зона имеет структуру белого чугуна, медленно охлажденная – структуру серого чугуна, а зона, кристаллизующаяся при средних скоростях охлаждения, – структуру половинчатого чугуна. Такие чугуны называют отбеленными.

### **Высокопрочный чугун**

Высокопрочным называют чугун, у которого графит имеет шаровидную, глобулярную форму. Чугуны с шаровидной формой графита получают модифицированием перед разливкой жидкого серого чугуна магнием в количестве 0,01-1,0 % к весу металла или церием в количестве 0,03-0,08 %. Большую часть высокопрочного чугуна производят сейчас с помощью Fe-Si-Mg лигатур с 3-10 % Mg; такие лигатуры содержат до 11 % Се и 0,2-4,0 % Са. Совершенствование технологии процесса модифицирования – это один из методов улучшения качества высокопрочного чугуна. Чугун после модифицирования имеет следующий химический состав: 3,0-3,6% С; 1,1-2,9% Si; 0,3-0,7 Мп; до 0,02% S и до 0,1% Р.

Высокопрочный чугун, получаемый в производственных условиях, как правило, не имеет 100 % глобулярности графита. Увеличение доли нешаровидного графита в структуре чугуна снижает предел текучести, предел прочности при растяжении, относительное удлинение и модуль упругости.

По структуре металлической основы высокопрочный чугун может быть ферритным (допускается до 20 % перлита) и перлитным (допускается до 20 % феррита).

Шаровидные включения графита являются меньшими концентраторами напряжений, чем пластинчатые, и поэтому меньше снижают механические

свойства металлической основы. Металлическая основа является доминирующим фактором, определяющим величину ударной вязкости, в то время как изменение числа глобулярных включений графита не оказывает на нее влияние. Чем больше феррита и мельче перлит, тем выше ударная вязкость. Причем распределение феррита влияет на уровень ударной вязкости в большей степени, чем дисперсность перлита. Чугун с ферритной оторочкой вокруг шаровидного графита имеет более высокие показатели, чем чугун, в котором феррит распределен по границам зерен. Благоприятное влияние на ударную вязкость оказывает измельчение зерна феррита и увеличение чистоты границ зерен. Предел статической прочности увеличивается перлитной составляющей, но ферритный чугун обладает меньшей чувствительностью к надрезам, более высокой сопротивляемостью перегрузкам и большей эффективностью поверхностного упрочнения.

**Примечание.** Интересен факт, что предел текучести и относительное удлинение чугуна с шаровидным графитом выше, если заданная структура металлической основы получена за счет термообработки, а не в литом состоянии.

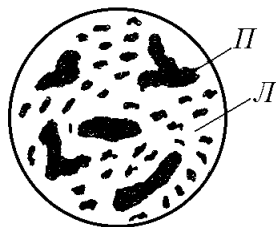
Высокопрочный чугун эффективно заменяет сталь во многих изделиях. Из него изготавливают: прокатные валки, траверсы прессов, лопатки турбин, коленчатые валы, поршни, шестерни, звездочки, ступицы, кронштейны рессор, корпуса вентиля и т. д.

Согласно ГОСТа 7293-85 высокопрочный чугун маркируется ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100, где буквы “ВЧ” обозначают высокопрочный чугун, а цифры – минимальное значение временного сопротивления при разрыве в МПа · 10<sup>-1</sup>.

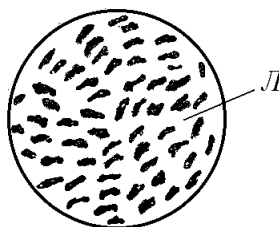
## 2. Получить коллекцию микрошлифов различных чугунов, изучить и зарисовать микроструктуры

Вначале по нетравленной поверхности изучить форму графитного зерна и определить, какой это чугун, а потом по протравленной поверхности шлифа определить металлическую основу чугуна.

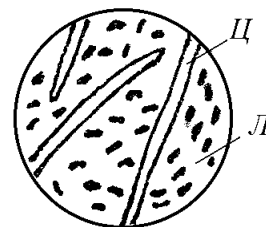
### Микроструктура белых чугунов



а) доэвтектического



б) эвтектического



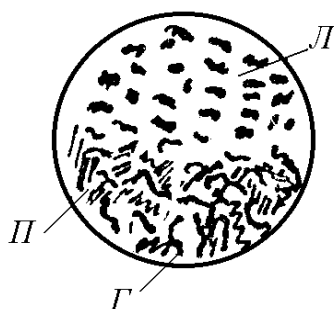
в) заэвтектического

Перлит – темные зерна. Цементит первичный – крупные светлые пластины. Цементит вторичный – частично виден в виде светлых выделений по границам зерен перлита, а частично сливается с цементитом ледебурита.



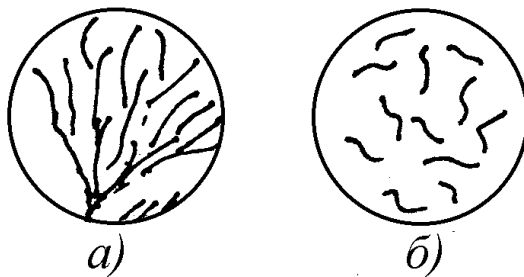
Ледебурит – светлые цементитные поля с равномерно расположенными на них темными перлитными участками.

### Микроструктура отбеленных чугунов



### Микроструктура серых чугунов

Расположение пластин графита зависит от того, как плоскость шлифа разрезает колонию графита.



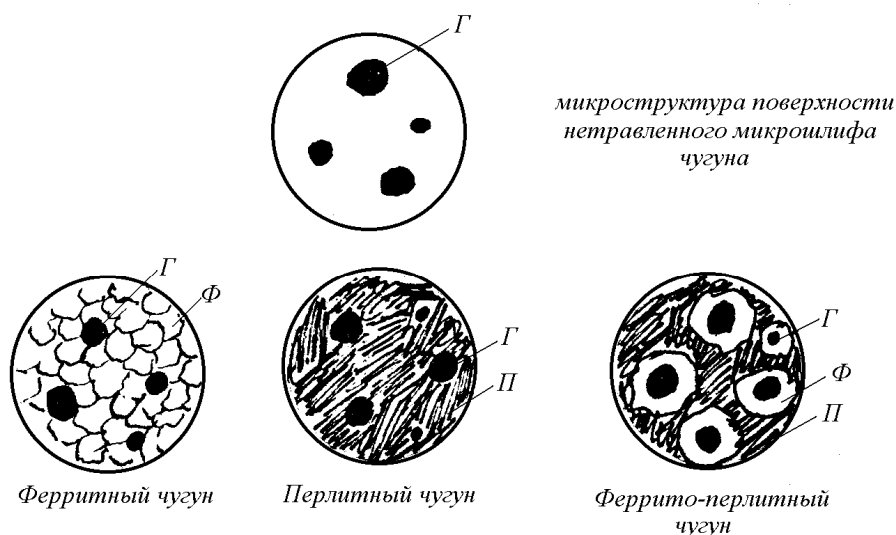
Участок колонии графита при разрезе через центр (а) и по периферии (б)



### Микроструктура ковких чугунов



### Микроструктура высокопрочных чугунов



## 3. Содержание отчета

1. Основные теоретические данные о применении, свойствах и маркировке чугунов.
2. Рисунки микроструктур чугунов из коллекции микрошлифов с указанием структурных составляющих.

## 4. Контрольные вопросы

1. Классификация чугунов по состоянию углерода, по форме графитного зерна и структуре металлической основы.
2. Маркировка и область применения белых, ковких, высокопрочных и серых чугунов.
3. Особенности получения белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.
4. Связь структуры чугуна с его свойствами.