

## Тема: ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ

1. Диаграмма состояния «железо-углерод».
2. Структурные превращения в железоуглеродистых сплавах.
3. Структура углеродистых сталей и белых чугунов.
4. Характеристика чугунов.

### 1. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ «ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД»

Железоуглеродистые сплавы - стали и чугуны - важнейшие металлические сплавы современной техники. Производство чугуна и стали по объему превосходит производство всех других металлов вместе взятых более чем в десять раз.

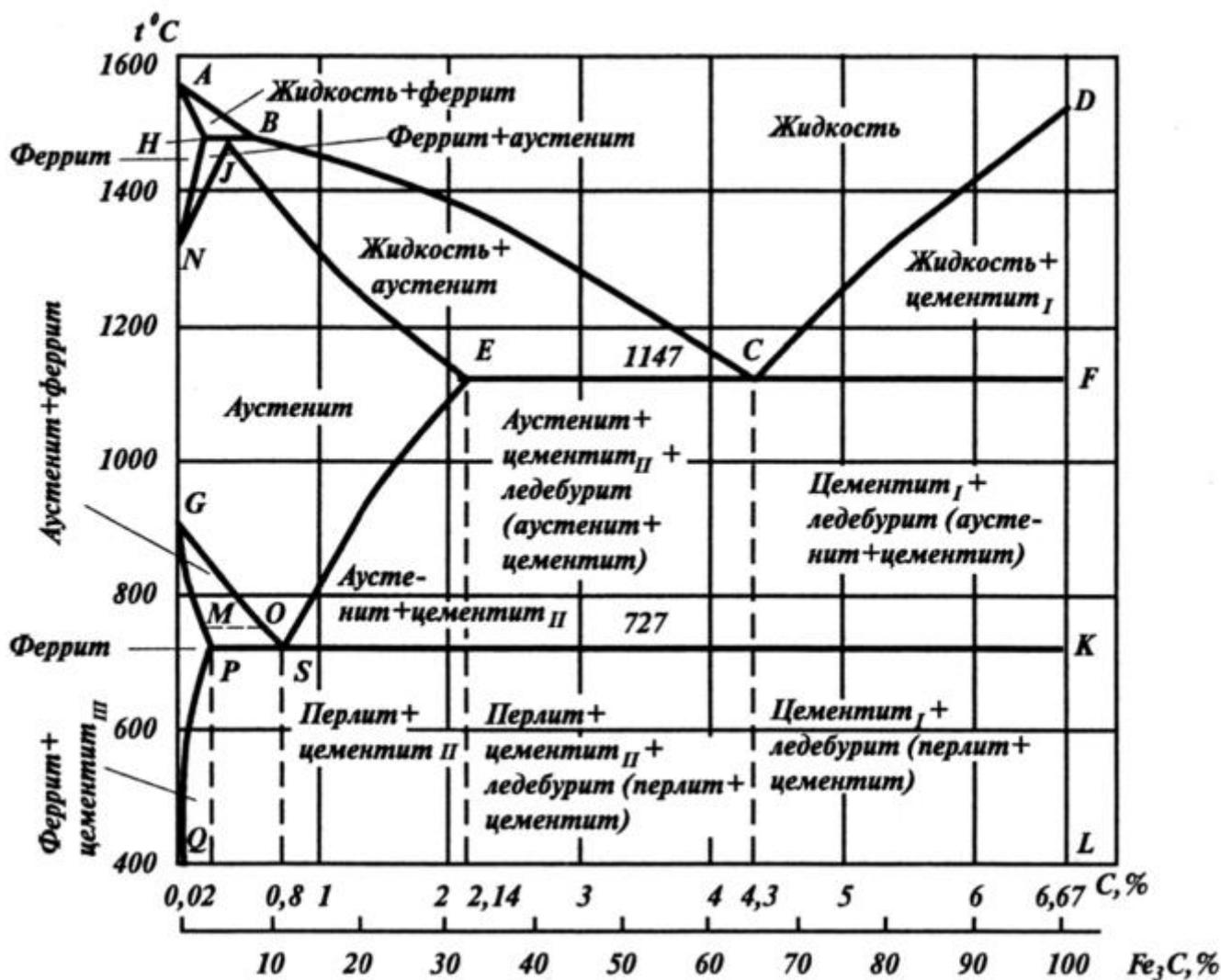


Рисунок 1. - Диаграмма состояния «железо – цементит»

Диаграмма состояния «железо – углерод» дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов - сталей и чугунов.

Начало изучению диаграммы «железо – углерод» положил Чернов Д.К. в 1868 году. Чернов впервые указал на существование в стали критических точек и на зависимость их положения от содержания углерода.

Диаграмма «железо – углерод» должна распространяться от железа до углерода. Железо образует с углеродом химическое соединение: цементит – Fe<sub>3</sub>C.

Каждое устойчивое химическое соединение можно рассматривать как компонент, а диаграмму - по частям. Так как на практике применяют металлические сплавы с содержанием углерода до 5 %, то нас интересует часть диаграммы состояния от железа до химического соединения цементита, содержащего 6,67% углерода. Диаграмма состояния «железо – цементит» представлена на рис. 1.

## КОМПОНЕНТЫ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо, углерод и цементит.

1. *Железо* — переходный металл серебристо-светлого цвета. Имеет высокую температуру плавления –  $1539\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$

В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения происходят при температурах  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При температуре ниже  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$  существует  $Fe_{\alpha}$  с объемно-центрированной кубической решеткой. В интервале температур  $911\text{...}1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  устойчивым является  $Fe_{\gamma}$  гранецентрированной кубической решеткой. Выше  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  железо имеет объемно-центрированную кубическую решетку и называется  $Fe_{\alpha}$  или высокотемпературное  $Fe_{\alpha}$ . Высокотемпературная модификация  $Fe_{\alpha}$  не представляет собой новой аллотропической формы. Критическую температуру  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$  превращения  $Fe_{\alpha} \leftrightarrow Fe_{\gamma}$  обозначают точкой  $A_3$ , а температуру  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  превращения  $Fe_{\alpha} \leftrightarrow Fe_{\gamma}$  - точкой  $A_4$ .

При температуре ниже  $768\text{ }^{\circ}\text{C}$  железо ферромагнитно, а выше - парамагнитно. Точка Кюри железа  $768\text{ }^{\circ}\text{C}$  обозначается  $A_2$ .

Железо технической чистоты обладает невысокой твердостью (80 НВ) и прочностью (предел прочности -  $\sigma_B = 250\text{ МПа}$ , предел текучести -  $\sigma_T = 120\text{ МПа}$ ) и высокими характеристиками пластичности (относительное удлинение —  $\delta = 50\text{ }%$ , а относительное сужение -  $\psi = 80\text{ }%$ ). Свойства могут изменяться в некоторых пределах в зависимости от величины зерна.

Железо характеризуется высоким модулем упругости, наличие которого проявляется и в сплавах на его основе, обеспечивая высокую жесткость деталей из этих сплавов.

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами - растворы замещения, с углеродом, азотом и водородом - растворы внедрения.

2. *Углерод* относится к неметаллам. Обладает полиморфным превращением, в зависимости от условия образования существует в форме графита с гексагональной кристаллической решеткой (температура плавления -  $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$  плотность —  $2,5\text{ г/см}^3$ ) или в форме алмаза со сложной кубической решеткой с координационным числом равным четырем (температура плавления -  $5000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В сплавах железа с углеродом углерод находится в состоянии твердого раствора с железом и в виде химического соединения — цементита ( $Fe_3C$ ), а также в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

3. *Цементит* ( $Fe_3C$ ) - химическое соединение железа с углеродом (карбид железа), содержит 6,67 % углерода.

Цементит аллотропических превращений не испытывает. Кристаллическая решетка цементита состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу.

Температура плавления цементита точно не установлена (1250, 1550 °С). При низких температурах цементит слабо ферромагнитен, магнитные свойства теряет при температуре около 217 °С

Цементит имеет высокую твердость (более 800 НВ, легко царапает стекло), но чрезвычайно низкую, практически нулевую, пластичность. Такие свойства являются следствием сложного строения кристаллической решетки.

Цементит способен образовывать твердые растворы замещения. Атомы углерода могут замещаться атомами неметаллов: азотом, кислородом; атомы железа - металлами: марганцем, хромом, вольфрамом и др. Такой твердый раствор на базе решетки цементита называется легированным цементитом.

Цементит - соединение неустойчивое и при определенных условиях распадается с образованием свободного углерода в виде графита. Этот процесс имеет важное практическое значение при структурообразовании чугунов.

## ФАЗЫ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

В системе «железо – углерод» существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит, аустенит, цементит.

1. Жидкая фаза. В жидком состоянии железо хорошо растворяет углерод в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

2. *Феррит* ( $\Phi$ ) ( $Fe_{\alpha}$ ) (С) — твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железо.

Феррит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную - 0,006 % при комнатной температуре (точка Q), максимальную — 0,02 % при температуре 727 °С (точка P). Углерод располагается в дефектах решетки.

При температуре выше 1392 °С существует высокотемпературный феррит ( $\delta$ ) ( $Fe_{\delta}$ ) (С), с предельной растворимостью углерода 0,1 % при температуре 1499 °С (точка J)

Свойства феррита близки к свойствам железа. Он мягок (твердость — 130 НВ, предел прочности -  $\sigma_B = 300$  МПа) и пластичен (относительное удлинение -  $\delta = 30\%$ ), магнитен до 768 °С

3. *Аустенит* (A)  $Fe_{\gamma}$  (С) - твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железо.

Углерод занимает место в центре гранцентрированной кубической ячейки.

Аустенит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную – 0,8 % при температуре 727 °С (точка S), максимальную - 2,14 % при температуре 1147 °С (точка E).

Аустенит имеет твердость 200...250 НВ, пластичен (относительное удлинение -  $\delta = 40...50\%$ ), парамагнитен.

При растворении в аустените других элементов могут изменяться свойства и температурные границы существования.

#### 4. Цементит.

В железоуглеродистых сплавах присутствуют следующие фазы *цементита*:

- цементит первичный ( $\text{Ц}_I$ ),
- цементит вторичный ( $\text{Ц}_{II}$ ),
- цементит третичный ( $\text{Ц}_{III}$ )

Химические и физические свойства этих фаз одинаковы. Влияние на механические свойства сплавов оказывает различие в размерах, количестве и расположении этих выделений.

Цементит первичный выделяется из жидкой фазы в виде крупных пластинчатых кристаллов.

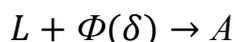
Цементит вторичный выделяется из аустенита и располагается в виде сетки вокруг зерен аустенита (при охлаждении — вокруг зерен перлита).

Цементит третичный выделяется из феррита и в виде мелких включений располагается у границ ферритных зерен.

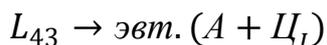
## 2. СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВАХ

Линия ABCD — ликвидус системы. На участке АВ начинается кристаллизация феррита ( $\delta$ ), на участке ВС начинается кристаллизация аустенита, на участке CD — кристаллизация цементита первичного.

Линия ANJECF — линия солидус. На участке AN заканчивается кристаллизация феррита (S). На линии NJB при постоянной температуре 1499 °C идет перетектическое превращение, заключающееся в том, что жидкая фаза реагирует с ранее образовавшимися кристаллами феррита ( $\delta$ ), в результате чего образуется аустенит:



На участке JE заканчивается кристаллизация аустенита. На участке ECF при постоянной температуре 1147 °C идет эвтектическое превращение, заключающееся в том, что жидкость, содержащая 4,3 % углерода превращается в эвтектическую смесь аустенита и цементита первичного:



Эвтектика системы «железо — цементит» называется *ледебуритом (Л)*, по имени немецкого ученого Ледебура — содержит 4,3 % углерода.

При температуре ниже 727 °C в состав ледебурита входят цементит первичный и перлит, его называют ледебурит превращенный (ЛП).

По линии NN начинается превращение феррита ( $\delta$ ) в аустенит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии NJ превращение феррита ( $\delta$ ) в аустенит заканчивается.

По линии GS превращение аустенита в феррит, обусловленное полиморфным превращением железа. По линии PG превращение аустенита в феррит заканчивается.

По линии ES начинается выделение цементита вторичного из аустенита, обусловленное снижением растворимости углерода в аустените при понижении температуры.

По линии MO при постоянной температуре 768 °С имеют место магнитные превращения.

По линии PSK при постоянной температуре 727 °С идет эвтектоидное превращение, заключающееся в том, что аустенит, содержащий 0,8% углерода, превращается в эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного:

По механизму данное превращение похоже на эвтектическое, но протекает в твердом состоянии.

Эвтектоид системы «железо – цементит» называется *перлитом (П)* - содержит 0,8% углерода.

Название получил за то, что на полированном и протравленном шлифе наблюдается перламутровый блеск.

Перлит может существовать в зернистой и пластинчатой форме, в зависимости от условий образования.

По линии PQ начинается выделение цементита третичного из феррита, обусловленное снижением растворимости углерода в феррите при понижении температуры.

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы «железо — цементит», т.е. критические точки, имеют условные обозначения.

Обозначаются буквой А (от французского *arrêt* - остановка):

A1 - линия PSK (727 °С) - превращение  $P \leftrightarrow A$ ;

A2 - линия MO (768 °С, т. Кюри) - магнитные превращения;

A3 — линия GOS (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) - превращение  $F \leftrightarrow A$ ;

A4 - линия NJ (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) - превращение  $A \leftrightarrow F(\delta)$ ;

Acm — линия SE (переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве) - начало выделения цементита вторичного (иногда обозначается A3).

Так как при нагреве и охлаждении превращения совершаются при различных температурах, чтобы отличить эти процессы вводятся дополнительные обозначения.

При нагреве добавляют букву “с”, т.е.  $A_{c1}$ , а при охлаждении - букву “r” - т.е.  $A_{r1}$ .

Особую группу составляют сплавы с содержанием углерода менее 0,02% (точка Р), их называют *техническое железо*. Микроструктуры сплавов представлены на рис. 2. Структура таких сплавов после окончания кристаллизации состоит или из зерен феррита (рис. 2,а) при содержании углерода менее 0,006 %, или из зерен феррита и кристаллов цементита третичного, расположенных по границам зерен феррита (рис. 2,б) при содержании углерода от 0,006 до 0,02 %.

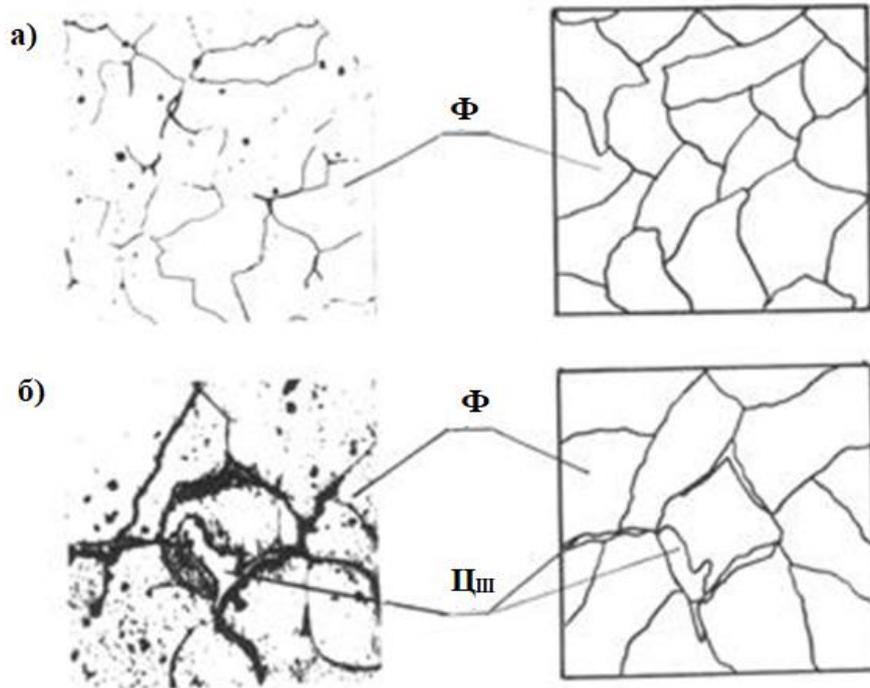


Рисунок 2. - Микроструктуры технического железа:  
 а) содержанию углерода менее 0,006%; б) содержанию углерода 0,006...0,02%

### 3. СТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И БЕЛЫХ ЧУГУНОВ

**Углеродистыми сталями** называют сплавы железа с углеродом, содержащие 0,02...2,14 % углерода, заканчивающие кристаллизацию образованием аустенита. Они обладают высокой пластичностью, особенно в аустенитном состоянии.

Структура сталей формируется в результате перекристаллизации аустенита. Микроструктуры сталей представлены на рис. 3.

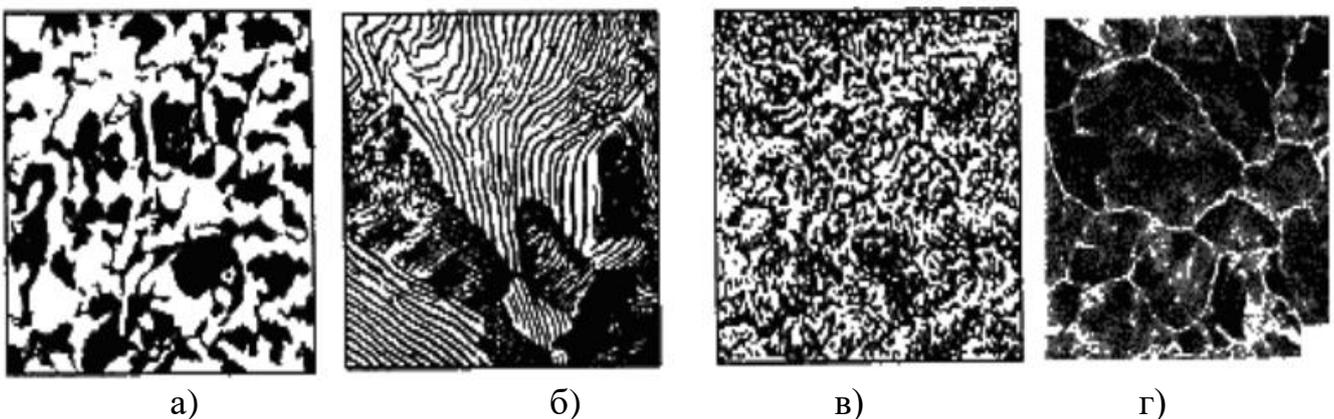


Рисунок 3. - Микроструктуры сталей:  
 а) доэвтектоидная сталь (Ф+П); б) эвтектоидная сталь (пластинчатый перлит);  
 в) эвтектоидная сталь (зернистый перлит); г) заэвтектоидная сталь

По содержанию углерода и по структуре стали подразделяются:  
 - доэвтектоидные ( $0,02\% < C < 0,8\%$ ), структура феррит + перлит (Ф+П) (рис. 3,а);

- эвтектоидные ( $C = 0,8\%$ ), структура перлит (П), перлит может быть пластинчатый или зернистый (рис. 3,б и 3,в);

- заэвтектоидные ( $0,8\% < C < 2,14\%$ ), структура перлит+цементит вторичный (П-Ц<sub>II</sub>), цементитная сетка располагается вокруг зерен перлита.

По микроструктуре сплавов можно приблизительно определить количество углерода в составе сплава, учитывая следующее: количество углерода в перлите составляет 0,8%, в цементите - 6,67%. Ввиду малой растворимости углерода в феррите, принимается, что в нем углерода нет.

**Сплавы железа с углеродом**, содержащие углерода более 2,14 % (до 6,67 %), заканчивающие кристаллизацию образованием эвтектики (ледебурита), называют **чугунами**.

Наличие легкоплавкого ледебурита в структуре чугунов повышает их литейные свойства.

Чугуны, кристаллизующиеся в соответствии с диаграммой состояния «железо – цементит», отличаются высокой хрупкостью. Цвет их излома - серебристо-белый. Такие чугуны называются **белыми чугунами**. Микроструктуры белых чугунов представлены на рис. 4.

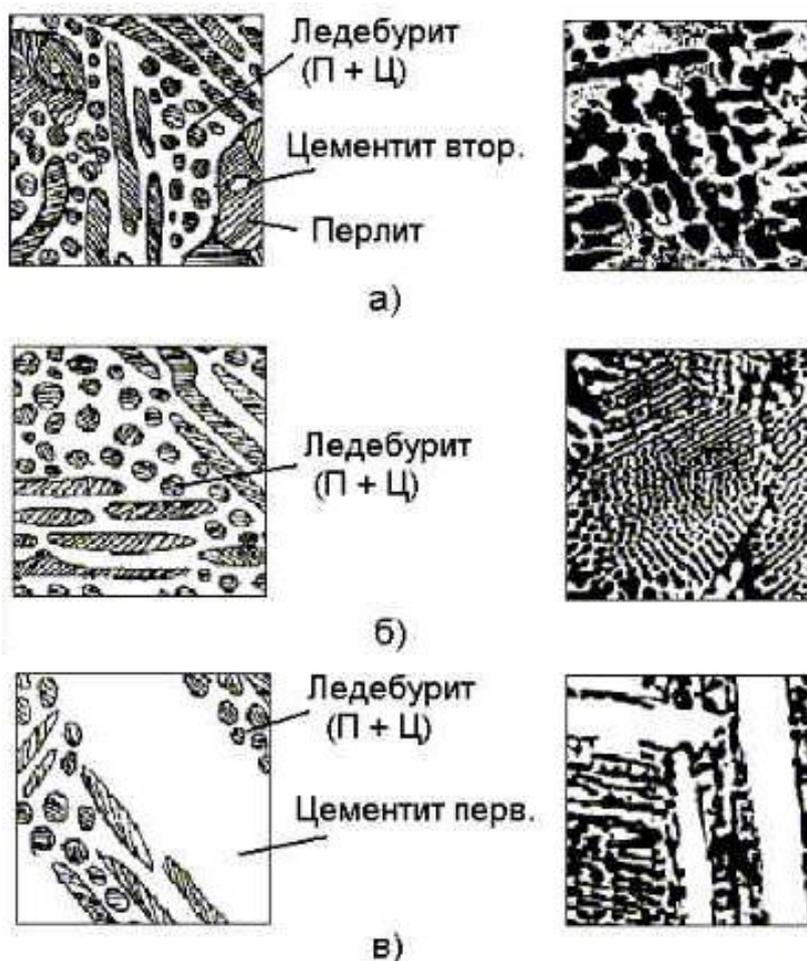


Рисунок 4. - Микроструктуры белых чугунов:

а) доэвтектический белый чугун (П+Л+Ц<sub>II</sub>); б) эвтектический белый чугун (Л);

в) заэвтектический белый чугун (Л+Ц<sub>I</sub>).

По количеству углерода и по структуре белые чугуны подразделяются на:

- доэвтектические ( $2,14\% < C < 4,3\%$ ), структура перлит + ледебурит + цементит вторичный (П+Л+Ц<sub>II</sub>); эвтектические ( $C = 4,3\%$ ), структура ледебурит (Л) (рис. 4,б);

- заэвтектические ( $4,3\% < C < 6,67\%$ ), структура ледебурит + цементит первичный (Л+Ц<sub>I</sub>) (рис. 4,в).

В структуре доэвтектических белых чугунов присутствует цементит вторичный, который образуется в результате изменения состава аустенита при охлаждении (по линии ES). В структуре цементит вторичный сливается с цементитом, входящим в состав ледебурита.

Фазовый состав сталей и чугунов при нормальных температурах один и тот же, они состоят из феррита и цементита. Однако свойства сталей и белых чугунов значительно различаются. Таким образом, основным фактором, определяющим свойства сплавов системы «железо – цементит» является их структура.

#### 4. ХАРАКТЕРИСТИКА ЧУГУНОВ

**Чугун** — сплав железа с углеродом (и другими элементами), в котором содержание углерода - не менее 2,14 %.

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 – Fe<sub>3</sub>C, 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.

## СЕРЫЕ ЧУГУНЫ

**Серыми** называют чугуны с пластинчатой формой графита.

По химическому составу серые чугуны бывают 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 скорости – количество химически связанного углерода.

Ухудшая механические свойства, графит в то же время придает чугуну ряд ценных свойств:

- способствует измельчению стружки 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. 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 – Fe<sub>3</sub>C (рис. 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 разобщенное графитовые включения, тем меньше их отрицательное влияние.

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

1. Серый перлитный со структурой (рис. 5,а): перлит + графит (рис. 6, область III). В этом чугуне количество связанного углерода составляет  $\approx 0,8\%$ .
2. Серый ферритно-перлитный со структурой (рис. 5,б): феррит + перлит + графит (рис. 6, область IIIа). Количество связанного углерода в нем менее  $0,8\%$ .
3. Серый ферритный со структурой (рис. 5,в): феррит + графит (рис. 6 область IIIб). В этом чугуне весь углерод находится в виде графита.

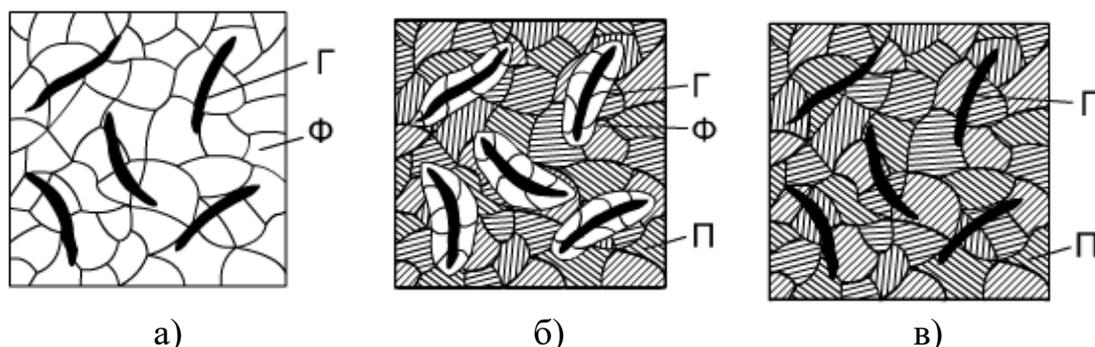


Рисунок 5. - Микроструктуры серых чугунов (пластинчатая форма графита): а) перлитного; б) ферритно-перлитного; в) ферритного

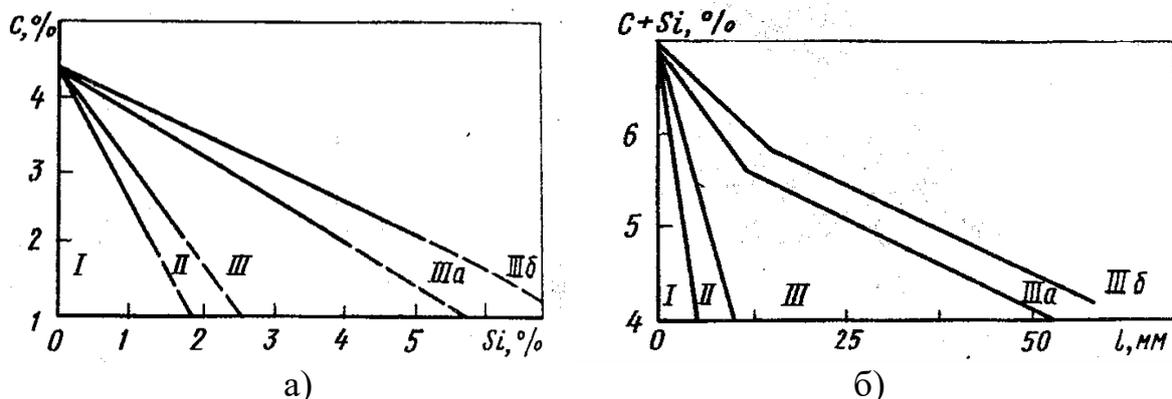


Рисунок 6. - Структурная диаграмма чугунов в зависимости от содержания кремния и углерода (а) и толщины стенки отливки (б):  
I – белый чугун; II – половинчатый чугун; III, IIIа, IIIб – серый перлитный, ферритно-перлитный и ферритный чугун соответственно

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 1).

Таблица 1

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

Чугун	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	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/см<sup>2</sup>.

## ВЫСОКОПРОЧНЫЕ ЧУГУНЫ

**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).

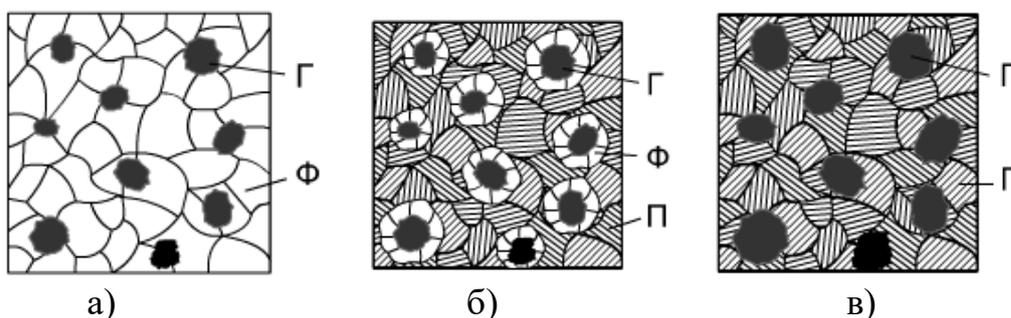


Рисунок 7. - Микроструктура высокопрочного чугуна (шаровидная форма графита): а) ферритный; б) ферритно-перлитный; в) перлитный

**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 2).

Таблица 2

Механические свойства некоторых высокопрочных чугунов  
(ГОСТ 7293-85)

Чугун	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	Структура металлической основы
ВЧ 38-17	380	17	1400-1700	Феррит 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 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); кузнечнопрессовое оборудование (траверса прессы, шабот ковочного молота); в турбиностроении – корпуса 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.

### КОВКИЕ ЧУГУНЫ

**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, ферритно-перлитными и перлитными (рис. 8).

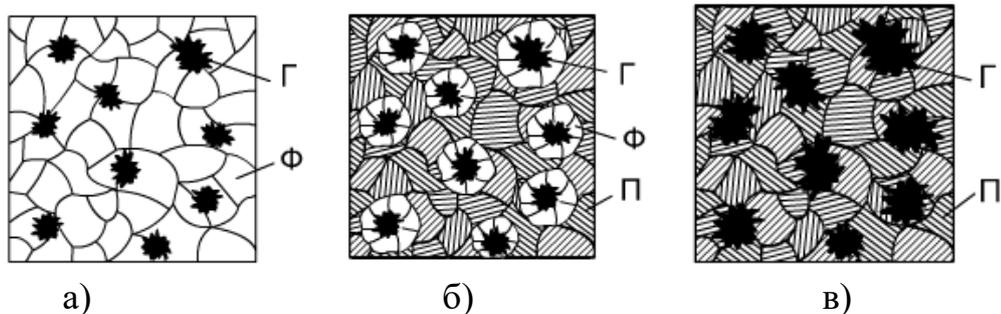


Рисунок 8. Микроструктура ковких чугунов (хлопьевидная форма графита): а) ферритный; б) ферритно-перлитный; в) перлитный

Отжиг на ферритные чугуны проводят по режиму 1 (рис. 9), обеспечивающему графитизацию всех видов цементита белого чугуна. Перлитный ковкий чугун получают отжигом, который проводят в окислительной среде по режиму 2 (рис. 9).

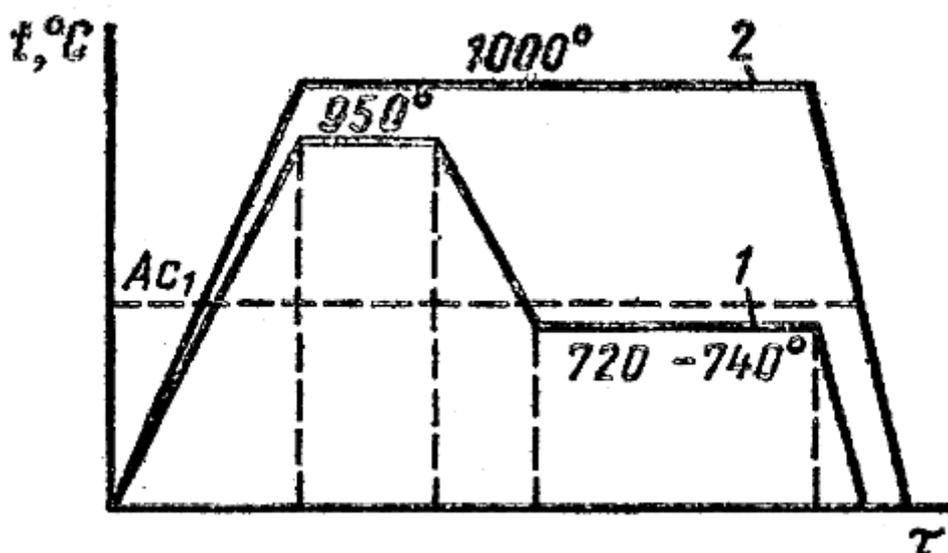


Рисунок 9. Схема отжига белого чугуна на ковкий: 1 – на ферритный; 2 – на перлитный

Таблица 3

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

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

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  $\sigma_B$  -  $\delta$  (таблица 3).

Из таблицы 3 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.

### ЧУГУНЫ С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ

**Чугуны с вермикулярным графитом (ЧВГ)** представляют собой литейные чугуны, обладающие промежуточными механическими и физическими свойствами между серыми чугунами (СЧ) и высокопрочными чугунами (ВЧ). **ЧВГ** удачно комбинируют прочность, теплопроводность и прочие свойства. ЧВГ обладают хорошими литейными характеристиками и требуют технологического контроля, который применяется при производстве высокопрочных чугунов.

ЧВГ представляют собой чугун в котором графит находится в вермикулярной форме. Вермикулярный графит подобно пластинчатому графиту виден на металлографическом шлифе в форме прожилок, но они меньшего размера, утолщенные, с округлыми краями (рис. 10). Микроструктура металлической основы ЧВГ также как у других графитизированных чугунов может быть ферритной, перлитной и феррито-перлитной.



Рисунок 10. Микроструктура чугунов с вермикулярным графитом:  
а) ферритный; б) ферритно-перлитный; в) перлитный

**Чугун с вермикулярным графитом** - это относительно новый материал, производство и потребление которого развивается очень интенсивно благодаря уникальным свойствам сплава. С каждым годом машиностроительная отрасль всё больше отдаёт предпочтение ЧВГ, многие заводы внедряют этот чугун на своих производствах (например - в 2005 году была изготовлена первая партия такой продукции на литейном заводе ОАО "КАМАЗ-Металлургия", и с тех пор номенклатура только расширяется). ЧВГ применяется, в частности, в

автомобильной промышленности при изготовлении двигателей, которые работают при очень высоком давлении.

Честь разработки **технологии получения ЧВГ** принадлежит компании SinterCast (Швеция), которая долгие годы посвятила **исследованию чугуна с вермикулярным графитом**.

Марки чугуна для отливок, имеющего в структуре графит вермикулярной формы (ВГ), определяемые на основе механических свойств, с количеством шаровидного графита не более 40%, регулируются межгосударственным стандартом ГОСТ 28394-89 «Чугун с вермикулярным графитом для отливок. Марки.» Этот стандарт выделяет четыре марки ЧВГ: ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40, ЧВГ45.

Аббревиатура ЧВГ - это условное обозначение чугуна с вермикулярным графитом. **Условное обозначение ЧВГ** включает в себя также цифровое обозначение минимального значения временному сопротивлению разрыву при растяжении, в МПа·10<sup>-1</sup>. Например, ЧВГ45 (450 МПа).

Таблица 4

Химический состав и механические свойства чугуна с вермикулярным графитом (ГОСТ 28394-89)

Марка чугуна	Массовая доля элементов, %							Механические свойства				Структура металлической основы
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Временное сопротивление при растяжении $\sigma_r$ , МПа (кг/мм <sup>2</sup> )	Условный предел текучести $\sigma_{0.2}$ , МПа (кг/мм <sup>2</sup> )	Относительное удлинение $\delta$ , %	Твердость по Бринеллю НВ	
ЧВГ30	3,5–3,8	2,2–3,0	0,2–0,6	До 0,08	До 0,025	До 0,15	–	300 (30)	240 (24)	3,0	130–180	Феррит
ЧВГ35	3,5–3,8	2,2–2,8	0,2–0,6	До 0,08	До 0,025	До 0,15	–	350 (35)	260 (26)	2,0	140–190	Феррит
ЧВГ40	3,1–3,5	2,0–2,5	0,4–1,0	До 0,08	До 0,025	До 0,2	0,4–0,6	400 (40)	320 (32)	1,5	170–220	П+Ф
ЧВГ45	3,1–3,5	2,0–2,5	0,8–1,2	До 0,05	До 0,025	До 0,3	0,8–1,0	450 (45)	380 (38)	0,8	190–250	Перлит

**Твёрдость ЧВГ** меняется в зависимости от марки; значения твёрдости по Бринеллю от 130 до 250 НВ.

**Чугуны с вермикулярным графитом** получают, как и высокопрочные чугуны, модифицированием, только в расплав при этом вводится комплексный модификатор, содержащий магний и редкоземельные металлы.

По механическим свойствам чугуны с вермикулярным графитом превосходят серые чугуны и близки к высокопрочным чугунам, а демпфирующая способность и теплофизические свойства ЧВГ выше, чем у высокопрочных чугунов.

Чугуны с вермикулярным графитом более технологичны, чем высокопрочные, и соперничают с серыми чугунами. Для них характерны высокая жидкотекучесть, хорошая обрабатываемость резанием, малая усадка.

Чугуны с вермикулярным графитом широко используются в мировом и отечественном автомобилестроении, тракторостроении, судостроении, дизелестроении, энергетическом и металлургическом машиностроении для деталей, работающих при значительных механических нагрузках в условиях износа, гидрокavitации, переменном повышении температуры. Например, ЧВГ используется для производства цилиндрических крышек и втулок, поршней судовых и тепловозных двигателей, корпусов газовых турбин и компрессоров.