

ДИАГРАММА Fe–C (Fe–Fe₃C) И МИКРОСТРУКТУРА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы. Научиться читать диаграмму железо–углерод. Исследовать микроструктуру технического железа, доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталей, находящихся в равновесном состоянии. Исследовать микроструктуру белых, серых, ковких и высокопрочных чугунов.

Задание. По диаграмме Fe–C (Fe–Fe₃C) определить структурный и фазовый состав для заданных преподавателем сплавов в различных областях диаграммы.

1 Диаграмма Fe–C (Fe–Fe₃C)

На рисунке 1 представлена диаграмма железо–углерод (железо–цементит). Левая ордината соответствует чистому железу (0 % C, 100 % Fe). Температуры, отмеченные на этой ординате, – критические точки железа. Правая ордината – сплав с содержанием углерода 6,67 %, т. е. цементит. Сплавы с большим содержанием углерода (> 5 %) практического применения не находят.

Структура стали и чугуна состоит из отдельных, прочно сцепленных между собой составляющих, отличающихся друг от друга химическим составом, внутренним устройством и свойствами. Так как эти составляющие имеют микроскопические размеры и обнаруживаются только с помощью микроскопа, они получили название микроструктурных составляющих. В целях сокращения их иногда называют структурными составляющими, опуская слово «микро».

При медленном затвердевании и дальнейшем медленном охлаждении в железоуглеродистых сплавах образуется шесть видов микроструктурных составляющих: аустенит, феррит, цементит, перлит, ледебурит и графит.

Аустенит – твердый раствор углерода в гамма-железе. Растворимость углерода в гамма-железе зависит от температуры. В соответствии с этим аустенит имеет переменную растворимость: с повышением температуры растворимость углерода в аустените увеличивается, с понижением – падает. Максимальная растворимость углерода в аустените наступает при 1147 °C и составляет 2,14 %. Аустенит мягок, пластичен, хорошо куется (твердость HB 160–200 кгс/мм²; $\delta \leq 30\text{--}40\%$). В железоуглеродистых сплавах аустенит наблюдается при температурах выше 723 °C.

Феррит – твердый раствор углерода в альфа-железе. Растворимость углерода в феррите, как и в альфа-железе, переменная и зависит от температуры: с повышением температуры растворимость увеличивается, с понижением – падает. Максимальная растворимость углерода в феррите имеет место при 723 °C и составляет всего 0,025 %. С понижением температуры растворимость падает и при 0 °C составляет только 0,008 %. Столь ничтожное содержание углерода в феррите позволяет определить его как почти чистое железо. Феррит пластичен, мягок, это самая мягкая структурная составляющая железоуглеродистых сплавов (твердость HB 80 кгс/мм²; $\delta = 50\%$).

Цементит (карбид железа Fe₃C) – химическое соединение железа с углеродом (6,67 %). Он хрупок, очень тверд. Это самая твердая микроструктурная составляющая (HB 820 кгс/мм², $\delta < 1\%$).

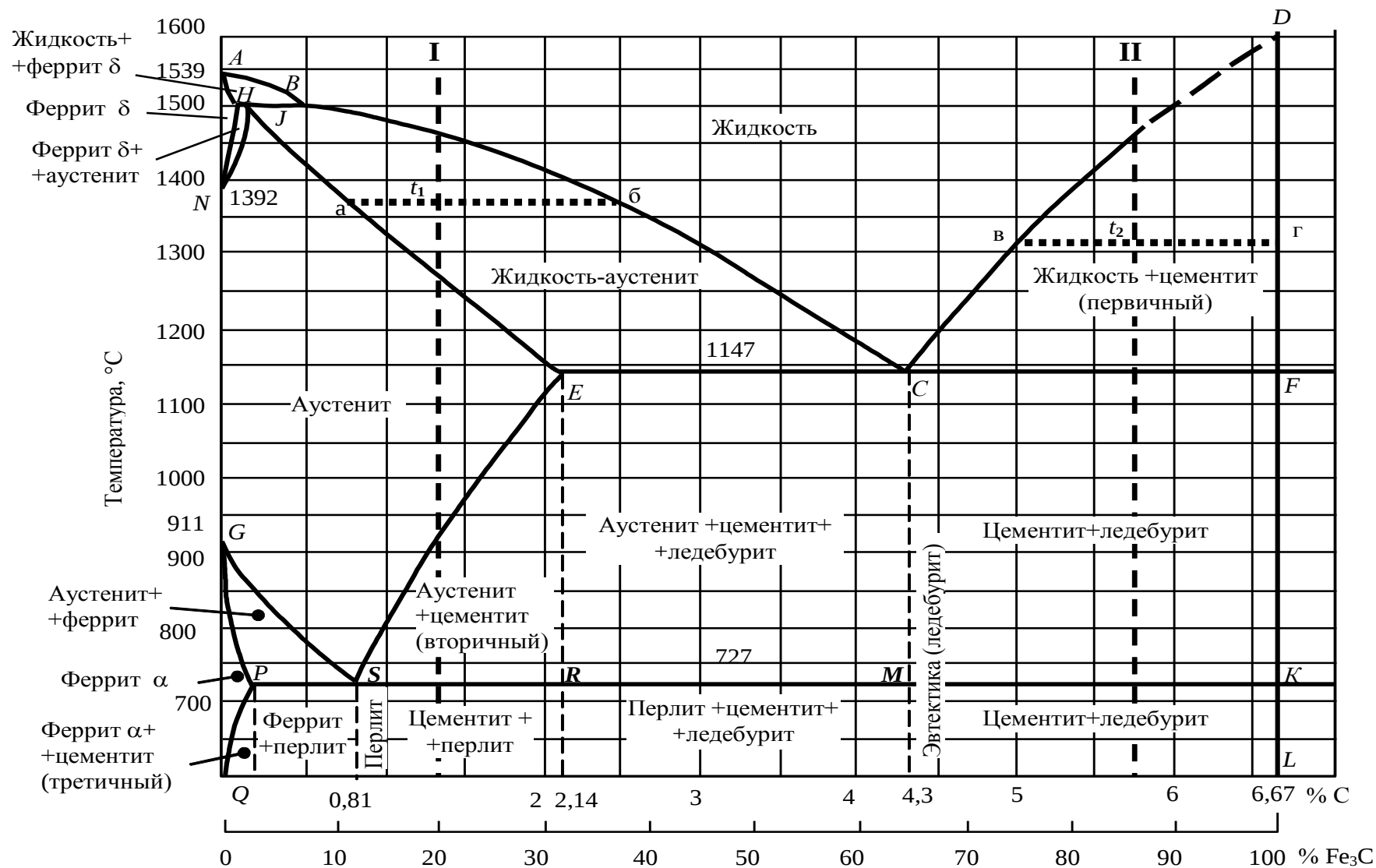


Рисунок 1 – Диаграмма железо–углерод (железо–цементит)

Различают три вида цементита: первичный, вторичный и третичный. Первичный цементит – цементит, выпадающий из охлаждаемого жидкого сплава, при температурах 1147 °С и выше. Вторичный цементит – цементит, выпадающий из охлаждаемого аустенита при температурах 727 °С и выше. Третичный цементит – цементит, выпадающий из охлаждаемого феррита при температурах ниже 727 °С. По химическому составу все три вида цементита одинаковы и описываются формулой Fe_3C . Поэтому указанное деление цементита на три вида – условно. Оно необходимо для удобства описания структур и превращений, протекающих в железоуглеродистых сплавах.

Перлит – механическая смесь феррита и цементита, содержащая 0,8 % углерода. Перлит прочен и упруг, образуется в результате распада аустенита, содержащего 0,8 % углерода. Этот распад происходит при 727 °С. В зависимости от формы цементитных включений перлит бывает двух видов: пластинчатый и зернистый. В пластинчатом перлите цементит имеет форму пластинок, в зернистом – зерен (глобул) (НВ 250 кгс/мм², $\delta = 20\%$).

Ледебурит – механическая смесь аустенита и цементита при температуре более 727 °С или перлита и цементита – при меньшей температуре. В ледебурите 4,3 % углерода, он очень тверд и хрупок (НВ 620 кгс/мм², $\delta > 50\%$).

Графит – свободный углерод. Механические свойства графита очень низки. Включения графита наблюдаются в чугунах.

В процессе перехода из жидкого в твердое состояние и дальнейшего охлаждения железоуглеродистые сплавы претерпевают два вида превращений: первичную и вторичную кристаллизации. Первичная кристаллизация – переход из жидкого в твердое состояние, вторичная – перекристаллизация уже затвердевшего сплава. Поэтому на диаграмме различают два вида линий: первичной и вторичной кристаллизации.

Линии первичной кристаллизации. ABCD – линия ликвидуса и ANJECF – линия солидуса. Выше ликвидуса все сплавы находятся в жидком состоянии (Ж), ниже солидуса – в твердом, а в интервале ликвидус–солидус – в двухфазном состоянии. В сплавах, по достижении отдельных элементов ликвидуса и солидуса, наблюдаются следующие превращения:

AB – из жидкости начинает выделяться дельта-феррит ($\Phi\delta$), представляющий твёрдый раствор углерода в дельта-железе. Ниже этой линии сплавы состоят из жидкости и дельта-феррита.

BC – из жидкости начинает выделяться аустенит (A). Ниже линии BC сплавы состоят из жидкости и аустенита.

CD – из жидкости начинает выделяться первичный цементит (ЦI). Ниже этой линии сплавы состоят из жидкости и первичного цементита.

АН – последняя капля жидкости превращается в феррит $\Phi\delta$. Ниже линии АН сплавы состоят из одного дельта-феррита.

НВ – линия перитектического превращения; на линии НJ оставшийся жидкий сплав, взаимодействуя с частью ранее выпавшего $\Phi\delta$, превращается в аустенит А; ниже этой линии сплавы состоят из дельта-феррита $\Phi\delta$ и аустенита. На линии JB ранее выпавший дельта-феррит, взаимодействуя с частью жидкого сплава, превращается в аустенит. Ниже линии JB сплавы состоят из жидкости и аустенита.

JE – последняя капля жидкости превращается в аустенит. Ниже этой линии сплавы состоят из одного аустенита.

EF – линия ледебуритного (эвтектического) превращения: жидкий сплав, содержащий 4,3 % С, превращается в ледебурит (Л). На линии ЕС оставшийся жидкий сплав, обогащенный углеродом до 4,3 %, превращается в ледебурит. При этом аустенит, выпавший в интервале ликвидус–солидус, и аустенит ледебурита содержат 2,14 % С. При снижении температуры ниже 1147 °С растворимость углерода в аустените падает, в результате чего из последнего выделяется вторичный цементит (Ц). Индекс «2» у вторичного цементита можно не ставить. Следовательно, ниже линии ЕС сплавы состоят из аустенита, вторичного

цементита и ледебурита. На линии CF оставшийся жидкий сплав, обедненный углеродом до 4,3 %, превращается в ледебурит, аустенит которого содержит 2,14 % С. Итак, ниже линии CF сплавы состоят из ледебурита и первичного цементита. В составе ледебурита находится вторичный цементит, выпавший из аустенита ледебурита, вследствие падения растворимости углерода в аустените при понижении температуры ниже 1130 °С.

Линии вторичной кристаллизации описывают превращения, протекающие в затвердевших сплавах, вследствие аллотропических превращений железа.

HN – из раствора Фδ начинают выделяться первые кристаллы аустенита. Ниже этой линии сплавы состоят из дельта-феррита и аустенита.

NJ – последний кристалл раствора Фδ превращается в аустенит. Ниже линии NJ сплавы состоят из одного аустенита.

GS – из аустенита начинает выделяться феррит (Ф). Ниже этой линии сплавы состоят из аустенита и феррита. С понижением температуры количество аустенита в сплаве будет уменьшаться, а феррита увеличиваться.

SE – из аустенита начинает выделяться вторичный цементит. Ниже линии SE сплавы состоят из аустенита и вторичного цементита. С дальнейшим понижением температуры количество цементита увеличивается, а аустенита остается меньше. Эта линия характеризует растворимость углерода в аустените при различных температурах. Например, при температуре 1147 °С (точка E) имеет место максимальная растворимость углерода в аустените – 2,14 %. С понижением температуры растворимость падает и при 727 °С (точка S) составляет 0,8 %.

PG – последний кристалл аустенита превращается в феррит. Ниже линии PG сплавы состоят из одного феррита.

PS – оставшийся аустенит, обогащенный углеродом до 0,8 %, превращается в перлит (П). Указанное обогащение произошло вследствие выпадения из аустенита феррита при охлаждении от линии GS до линии PS. Так как растворимость углерода в феррите незначительна (< 0,025 %), то при выпадении последнего остающийся аустенит обогащается углеродом. Ниже линии PS сплавы состоят из перлита и феррита.

SR – остающийся аустенит, обедненный углеродом до 0,8 %, превращается в перлит. Обоеднение связано с предшествующим выпадением (в интервале линий SE–SR) из аустенита цементита, богатого углеродом (6,67 %). Ниже SR сплавы состоят из перлита и цементита.

RM – оставшийся аустенит, содержащий 0,8 % С, превращается в перлит. Ниже этой линии сплавы состоят из ледебурита, перлита и цементита.

МК – аустенит ледебурита, содержащий 0,8 % С, превращается в перлит. Ниже линии МК сплавы состоят из ледебурита и первичного цементита.

Обоеднение аустенита углеродом до 0,8 %, при подходе к линиям RM и МК происходит вследствие того, что в интервале линий EF–РК из него выпадает цементит.

Таким образом, достигая линии РК, аустенит любого сплава содержит 0,8 % С и превращается в перлит. Поэтому линию РК называют линией перлитного превращения.

Линия PQ – из феррита начинает выделяться третичный цементит. Ниже этой линии сплавы состоят из феррита и третичного цементита. Линия PQ характеризует растворимость углерода в феррите в зависимости от температуры. Например при 727 °С (точка Р) в феррите растворяется 0,025 % С. Это максимальная растворимость углерода в феррите. При падении температуры растворимость уменьшается и в точке Q составляет 0,005 %.

Особые точки диаграммы – это точки E, С и S. Сплавы, соответствующие этим точкам, являются граничными при классификации железоуглеродистых сплавов.

Точка E соответствует сплаву, содержащему 2,14 % С. Правее точки E в структуре сплавов появляется составляющая ледебурита, которая делает их хрупкими, неподдающимися ковке. Левее точки E в сплавах ледебурита нет. Такие сплавы пластичны, поддаются ковке. Таким образом, в точке E железоуглеродистые сплавы резко меняют свои

механические свойства, в связи с чем делятся на два вида: стали и чугуны. Стали – железоуглеродистые сплавы, содержащие не более 2,14 % углерода. На диаграмме они лежат левее точки Е. Чугуны – жезоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % углерода. На диаграмме им соответствует участок правее точки Е. Стали – пластичны, чугуны хрупки. Участок диаграммы, относящийся к сталям, называют иногда стальным, а к чугунам – чугунным.

Точка С соответствует чугуну, имеющему минимальную температуру плавления (затвердевания). Чугун, соответствующий точке С (содержит 4,3 % С), называется эвтектическим; чугуны, лежащие на диаграмме левее точки С, – доэвтектическими, правее – заэвтектическими.

Точка S соответствует стали, имеющей минимальную температуру полного аустенитного превращения. Сталь, соответствующая точке S (содержит 0,8 % С), называется эвтектоидной. Стали, содержащие углерода менее 0,8 %, называются доэвтектоидными, а более 0,8 % – заэвтектоидными.

Таким образом, различают три вида сталей: доэвтектоидные, эвтектоидная и заэвтектоидные, и три вида чугунов: доэвтектические, эвтектический и заэвтектические.

Определение весового количества фаз. Весовое соотношение сосуществующих фаз в процессе кристаллизации непрерывно меняется. Оно может быть определено с помощью правила отрезков. Например, для сплавов I и II (см. рисунок 1) при температурах t_1 и t_2 имеют место соотношения:

$$\frac{Q_T}{Q_{\text{ж}}} = \frac{bt_1}{at_1}; \quad \frac{Q_T}{Q_{\text{ж}}} = \frac{bt_2}{gt_2},$$

где Q_T , $Q_{\text{ж}}$ – веса твердой и жидкой фаз в сплаве при данной температуре.

Аналогично можно установить весовое соотношение сосуществующих фаз для других температур и сплавов.

Определение состава фаз. С изменением температуры состав сосуществующих фаз изменяется. Диаграмма железо–углерод позволяет определить концентрацию фаз в любой момент кристаллизации сплава. Для этого достаточно через данную температурную точку сплава провести горизонталь так, чтобы она пересекла линии, ограничивающие рассматриваемую фазовую область. Точки пересечения и определяют концентрацию фаз при данной температуре. Рассмотрим пример применения данного правила.

Сплав II, содержащий 5,7 % С. В интервале температур, соответствующих точкам на линиях ликвидус и солидус, сплав состоит из жидкости и цементита первичного. Между этими точками количество твердой фазы (цементита) в сплаве увеличивается, а жидкой – уменьшается. При этом состав фаз непрерывно меняется. Например, при температуре t_2 концентрация выпадающего аустенита определяется точкой в, а оставшегося жидкого сплава – точкой г. При охлаждении от точки t_2 до линии солидус концентрация остающейся жидкости меняется по ликвидусу, а выпадающего цементита будет постоянной. Количественное соотношение фаз в любой момент кристаллизации таково, что среднее содержание углерода в сплаве остается постоянным, равным концентрации сплава II.

2 Микроструктура углеродистых сталей в равновесном состоянии

Механические свойства металлических конструкционных материалов зависят не только от химического состава, но и от микроструктуры. Зная микроструктуру, можно судить о свойствах материала. Например, крупное зерно снижает ударную вязкость стали, при обезуглероживании поверхностного слоя стальной детали в нем наблюдается мягкая ферритная структура и т.д.

Микроструктура формируется в процессе технологических обработок, которым подвергается металл при изготовлении из него изделия: ковке, штамповке, термической обработке и др. Исследуя с помощью металлографического микроскопа микроструктуру

металла, можно оценить его качество, выявить различные нарушения технологии его обработки, например перегрев, недостаточную температуру жидкого металла, залитого в литейную форму при получении отливки, и принять оперативные меры для устранения возникшего брака. В этом практическое значение знания структуры металла. Особенно важно знать микроструктуру сталей и чугунов, так как в современном машиностроении, в том числе и на железнодорожном транспорте, углеродистые сплавы – наиболее распространенный конструкционный материал.

Стали – железоуглеродистые сплавы, содержащие менее 2,14 % углерода (практически 0,1–1,6 %). В настоящее время выплавляются сотни марок сталей. Для удобства их классифицируют по различным признакам.

По химическому составу стали делят на углеродистые и легированные.

По способу выплавки стали делят на мартеновские, конвертерные, электростали и стали, полученные особыми методами выплавки.

По структуре стали делят на перлитные, аустенитные, ферритные и карбидные.

По назначению различают стали конструкционные, инструментальные и стали с особыми свойствами. Из конструкционных сталей изготавливают колонны, фермы, мосты, детали машин и т.п., из инструментальных – различные инструменты: режущие (резцы, сверла, фрезы, зубила и др.), штамповые (штампы для холодной и горячей штамповки) и измерительные (штангенциркули, микрометры, линейки, калибры и др.). К сталям с особыми свойствами относятся жаропрочные, окалиностойкие, нержавеющие (коррозионностойкие) и стали с особыми физическими свойствами: магнитные (магнитотвердые и магнитомягкие), с высоким электрическим сопротивлением, с особыми тепловыми и упругими свойствами.

По качеству стали делят на стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные. Качество стали определяется содержанием в ней вредных примесей (серы и фосфора), неметаллических включений и др. Например, в сталях обыкновенного качества допускается содержание серы не более 0,05, фосфора 0,04, качественных – соответственно 0,03 и 0,035 и высококачественных – 0,02 и 0,03 %.

По степени раскисления стали изготавливаются кипящими, спокойными и полуспокойными.

2.1.1 Углеродистые стали, их виды и марки

По условиям выплавки в углеродистых сталях содержатся следующие примеси: углерод, кремний, марганец, сера, фосфор, кислород, водород и азот. Эти примеси называются постоянными (или неизбежными). На свойства углеродистых сталей решающее влияние оказывает углерод. Например, с повышением содержания углерода твердость и прочность стали повышаются, а пластичность и ударная вязкость снижаются. Некоторые марки полуспокойных сталей выплавляются с повышенным содержанием марганца.

В соответствии с ГОСТами выплавляются следующие основные виды углеродистых сталей: низкоуглеродистые (менее 0,3 % C), среднеуглеродистые (0,3–0,7 % C) и высокоуглеродистые (более 0,7 % C); по назначению: на конструкционные обыкновенного качества и качественные (в том числе – цементируемые, улучшаемые, высокопрочные и рессорно-пружинные), инструментальные для режущего и измерительного инструмента, а также штампов холодного (менее 200 °C) и горячего прессования.

Сталь углеродистая обыкновенного качества конструкционная выплавляется по ГОСТ 380–85 и поставляется потребителю в виде прутков, листов и других профилей проката. В зависимости от назначения и гарантируемых металлургическим заводом характеристик сталь подразделяется на три группы: А, Б, В, которые, в свою очередь, делятся на категории.

Сталь группы А поставляется по механическим свойствам и изготавливается следующих марок: Ст0, Ст1 кп (сп), Ст2 кп (пс и сп), Ст3 кп (пс, гпс, гсп), Ст4 кп (пс), Ст5 пс, Ст6сп (пс).

Сталь группы Б поставляется по гарантированному химическому составу и изготавливается следующих марок: БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6.

Сталь группы В поставляется по гарантированным механическим свойствам и химическому составу и изготавливается следующих марок: ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5.

Знание химического состава необходимо в том случае, когда сталь у потребителя подвергается горячей штамповке, а изготовленные из неё детали – термической обработке, поскольку температура нагрева выбирается в зависимости от содержания углерода в стали.

По степени раскисления сталь всех групп с номерами 1, 2, 3, 4 изготавливается кипящей, спокойной и полуспокойной, а с номерами 5 и 6 – только спокойной и полуспокойной. Стали Ст0 и БСт0 по степени раскисления не разделяются. Сталь марок ВСт1, ВСт2, ВСт3 всех степеней раскисления поставляется с гарантией свариваемости.

Расшифровка марок:

а) буквы Б и В перед буквами Ст – группа стали; группа А не указывается, например Ст3, БСт3, ВСт3;

б) буквы Ст – сталь, цифры, от 0 до 6 – условный номер марки; с повышением номера растёт содержание углерода в стали и ее прочность. Например, в сталях Ст3 и Ст5 содержание углерода соответственно: 0,14–0,22 и 0,23–0,37 %; временное сопротивление σ_B : 380–490 (38–49) и 560–640 (56–64) МПа (кгс/мм²);

в) буквы, добавляемые после номера марки, – степень раскисления: кп – кипящая, пс – полуспокойная, сп – спокойная, например Ст3кп;

г) буква Г – повышенное содержание марганца (Ст3Гпс, ВСт3Гсп);

д) цифра в конце марки – категория стали (Ст3пс2, БСт3кп2, ВСт3Гпс3).

Область применения:

– ж.-д. колеса, валы, шкивы, шестерни;

– детали грузоподъемных машин;

– слабонагруженные детали машин и приборов;

– сварные фермы, различные рамы; железобетонные конструкции.

Сталь качественная конструкционная выплавляется по ГОСТ 1050–88, поставляется по химическому составу и механическим свойствам следующих марок: 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60. Марка означает среднее содержание (массовую долю) углерода в сотых долях процента. Помимо указанных, поставляются стали марок 05 и 58 (55 пп – сталь пониженной прокаливаемости).

По раскисленности выплавляются стали: кипящие (кп) – 05 кп, 08 кп, 10 кп, 15 кп, 20 кп; полуспокойные (пс) – 08 пс, 10 пс, 15 пс, 20 пс (листовая сталь для холодной штамповки); спокойные (сп) – 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 (индекс сп в марке не ставится).

По состоянию сталь изготавливается без термической обработки, термически обработанная Т (отожженная, высокоотпущенная или нормализованная) и нагартованная Н (калиброванная, серебрянка).

По назначению различают подгруппы стали: а – для горячей обработки давлением; б – для холодной механической обработки (обточки, фрезерования, строжки и т.д.); в – для холодного волочения.

Область применения:

– для холодной штамповки и глубокой вытяжки (0,5–20);

– вагоно- и автомобилестроение;

– слабонагруженные зубчатые колеса и кулачки;

– емкости, трубы, консервные банки.

Рессоры и пружины изготавливаются из сталей, выплавляемых по ГОСТ 14959–79 (сталь рессорно-пружинная углеродистая и легированная). Углеродистая рессорно-пружинная сталь поставляется в виде прутков круглого, квадратного и профильного сечения, полос и мотков следующих марок: 65, 70, 75, 80 и 85.

Сталь инструментальная углеродистая выплавляется по ГОСТ 1435–90, поставляется по химическому составу и механическим свойствам (твердости). По химическому составу сталь делится на качественную и высококачественную. Качественные стали содержат вредные примеси серы не более 0,03 и фосфора 0,035 %. В высококачественных сталях – серы не более 0,02 % и фосфора 0,03 %, меньше чем в качественных сталях неметаллических включений, а также более сужены пределы содержания, кремния и марганца. Сталь поставляется в отожженном состоянии твердостью НВ 187–217. Твердость после закалки HRC 62.

Марки сталей: качественных – У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13; высококачественных – У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А. Выпускаются также стали с повышенным содержанием марганца марок У8Г и У8ГА, в которых содержание марганца находится в пределах 0,35–0,60 %.

В обозначении марки буква У означает углеродистую инструментальную сталь, цифры – среднее массовое содержание углерода в десятых долях процента, буква А – сталь высококачественную, буква Г – повышенное содержание марганца.

Область применения:

- зубила, молотки, отвертки, центры токарных станков (У7, У7А);
- пуансоны, матрицы, ножницы, пилы (У8, У8А);
- керны, деревообрабатывающий инструмент (У9, У9А);
- резцы, метчики, развертки, фрезы (У10, У10А);
- штампы вырубные, пилы, пресс-формы (У11, У11А);
- резцы, сверла, фрезы, метчики (У12, У13, У13А).

Сталь автоматная выплавляется по ГОСТ 1414–75 следующих марок: А11, А12, А20, А30, А35Е, А40Г. Стали содержат вредные добавки серы 0,08–0,25 и фосфора 0,06–0,15 %. Для улучшения обрабатываемости резанием в стали вводят свинец (до 0,3 %), марганец (до 1,5 %) и селен (до 0,1 %) (АС14, АС35Г и А35Е).

Область применения:

- детали крепежа (болты, гайки);
- втулки, валики, детали двигателя.

Сталь литейная выплавляется по ГОСТ 977–79 следующих марок: 15Л, 20Л, ..., 55Л.

Область применения:

- отливки мелких и крупных машиностроительных деталей;
- литые коленчатые валы;
- детали подвижного состава.

2.1.2 Легированные стали, их виды и марки

Легированные стали отличаются от углеродистых сталей:

- повышенной жаростойкостью, сопротивлением коррозии;
- значительной ударной вязкостью;
- высокими значениями σ_T и γ ;
- большим электросопротивлением;
- обладают лучшей прокаливаемостью;
- увеличивают количество остаточного аустенита.

В диаграмме состояния Fe – легирующий элемент Ni и Mn – расширяют область существования γ -фазы; Mo, Ti – сужают область существования γ -фазы; Si, Al, W, Sn, Mo и Ti – расширяют область α -фазы. Основными легирующими элементами в стали являются

Cr, Ni, Si, Mn. Никель – увеличивает пластичность и вязкость стали; уменьшает температуру порога хладноломкости [1 % Ni – на 60–80 °C]; уменьшает чувствительность стали к концентрации напряжения. Хром увеличивает жаростойкость и коррозионную стойкость стали; увеличивает электрическое сопротивление; уменьшает коэффициент линейного расширения; увеличивает прокаливаемость стали; замедляет распад мартенсита. Кремний увеличивает жаростойкость стали [5 % Cr + 1 % Si → 12 % Cr]; затрудняет формирование и рост цементитных частиц; используется как раскислитель при плавке стали.

W, Mo, V, Ti, B – дополнительно улучшают свойства стали. Mo и W – увеличивают прокаливаемость стали (+ Ni); способствуют измельчению зерна; подавляют отпускную хрупкость стали.

V, Ti, Ni, Zr – образуют труднорастворимые в аустените карбиды; (до 0,15 %) измельчают зерна; снижают порог хладноломкости.

B – повышает прочность и прокаливаемость стали (0,001–0,005 %).

Эффективность легированных элементов достигается при их оптимальном содержании в стали.

легированные стали классифицируют:

- по типу равновесной структуры;
- структуре после нормализации;
- химическому составу;
- назначению.

Легированные стали относят: к доэвтектоидным (феррит + легированный перлит); заэвтектоидным (легированный перлит + карбиды); эвтектоидным.

Разделяют стали на 3 основных класса:

- перлитный (сорбит, тростит и бейнит);
- мартенситный (в легированных);
- аустенитный (в высоколегированных).

Легированные стали делятся:

– по химическому составу: на хромистые; марганцовистые; хромоникелевые; хромоникельмолибденовые и т.д.;

– по общему количеству легирующих элементов в них: на низколегированные (до 2,5 %); легированные (2,5–10 %); высоколегированные (свыше 10 %);

– по назначению: на конструкционные (цементуемые, улучшаемые); инструментальные; с особыми свойствами («автоматные» пружинные, шарикоподшипниковые, износостойкие, коррозионностойкие, теплоустойчивые, жаропрочные, электротехнические и др. стали).

Маркировка легированных сталей: А – азот, Б – ниобий, В – вольфрам, Г – марганец, Д – медь, Е – селен, Т – титан, К – кобальт, Н – никель, М – молибден, П – фосфор, Р – бор, С – кремний, Ф – ванадий, Х – хром, Ц – цирконий, Ч – редкоземельные, Ю – алюминий.

Машиностроительные цементируемые улучшаемые стали содержат 0,1–0,3 % углерода и 0,2–4,4 % легирующих элементов. После насыщения углеродом, закалки и низкого отпуска детали из таких сталей имеют высокую поверхностную твердость (до 58–63 HRC) при вязкой центральной части. Стали 15ХФ, 15Х, 20Х (с пределом текучести до 700 МПа) используют для изготовления небольших нагруженных деталей, испытывающих средние по величине знакопеременные и ударные нагрузки. Стали 12ХН3А, 20ХН3А, 20ХН4А (с пределом текучести более 700 МПа) используют для изготовления деталей средних и больших размеров, работающих в условиях интенсивного изнашивания, при повышенных нагрузках. Особо ответственные детали, например зубчатые колеса авиационных и судовых двигателей, изготавливают из сталей 18Х2Н4МА, 18Х2Н4ВА. Экономно легированные стали 18ХГТ, 30ХГ, 25ХГТ имеют наследственную мелкозернистую структуру, что позволяет сократить технологический цикл обработки детали. Такие стали применяют для изготовления ответственных деталей крупносерийного

и массового производства.

Машиностроительные улучшаемые легированные стали содержат 0,3–0,5 % углерода и до 5 % легирующих элементов. Используются преимущественно после улучшения (закалки и высокого отпуска при температуре 500–600 °С на сорбит). Основное применение – ответственные детали машин, эксплуатируемые при воздействии циклических или ударных нагрузок. Для изготовления средненагруженных небольших деталей машин и механизмов без значительных динамических нагрузок применяют хромистые стали 30Х, 38Х, 40Х, 50Х. С увеличением содержания углерода возрастает прочность этих сталей, но несколько снижается их вязкость и пластичность. Из хромоникелевых сталей 40ХН, 50ХН, а также из хромокремнемарганцевых сталей 30ХГСА, 35ХГСА, которые обладают высокими прочностными и вязкостными свойствами, изготавливают ответственные детали, работающие при воздействии динамических нагрузок.

Хромоникельмолибденовые стали 40ХНМА, 38ХМЗМА обладают повышенными механическими свойствами при температуре до 450 °С.

Мартенситостареющие высокопрочные стали (с пределом прочности 1800–2000 МПа) – безуглеродные (не более 0,03 % С) сплавы железа с никелем, легированные кобальтом, молибденом, титаном и другими элементами. Высокие механические свойства сталей Н18К9М5Т, Н12К15М10 достигаются за счет совмещения мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, старения мартенсита и легирования твердого раствора. Эти стали сохраняют высокие механические характеристики при низких температурах вплоть до температур сжиженных газов. Такие стали теплоустойчивы до температур 500–700 °С. Находят применение для ответственных деталей в авиации, судостроении.

Износостойкие конструкционные стали обладают высоким сопротивлением контактной усталости и истиранию за счет высокой твердости, однородности структуры, минимального содержания неметаллических включений и металлургических дефектов. Термическая обработка (закалка и низкий отпуск) стали ШХ15ГС обеспечивает их твердость HRC 60–66. Для деталей, работающих в агрессивных средах (морской воде, слабых растворах кислот, щелочах), применяют коррозионностойкую высокоуглеродную сталь 95Х18. Детали, эксплуатируемые при воздействии ударных нагрузок, вызывающих их поверхностный наклеп, а следовательно, снижение износостойкости обычных сталей, изготавливают из аустенитной высокомарганцевистой стали Г13Л. Для изготовления деталей, эксплуатируемых в условиях трения скольжения, применяют графитизированную сталь, имеющую структуру ферритно-цементитной смеси и графита. Последний играет роль смазочного материала, предотвращающего схватывание контактирующих деталей.

Коррозионно-стойкие стали и сплавы устойчивы к коррозии на воздухе, в воде (в т.ч. морской), в ряде кислот, солей и щелочей. Из хромистых сталей Х25Т, Х28, имеющих ферритную структуру, изготавливают детали, эксплуатируемые в высокоагрессивных средах, например в кипящей азотной кислоте. Хромоникелевые стали 04Х18Н10, 08Х18Н10, 12Х12Н10Т, имеющие аустенитную структуру, используют в авиа- и судостроении.

Жаропрочные стали и сплавы обеспечивают эксплуатацию деталей при температуре выше 500 °С. Для деталей, эксплуатируемых в среде с температурой 500–580 °С, используют низкоуглеродистые стали, имеющие структуру пластинчатого перлита, легированные кобальтом, молибденом, ванадием, в частности 16М, 25ХМ, 12Х1МФ. Нагруженные детали, эксплуатируемые в среде с температурой до 450–470 °С, изготавливают из высокохромистых сталей 15Х11НМФ, 1ХКВНМФ, имеющих в зависимости от температуры отпуска структуру сорбита или троостита.

2.1.3 Микроструктура углеродистых сталей в равновесном состоянии

Сплавы достигают равновесного состояния, т.е. минимума свободной энергии, в случае кристаллизации при очень медленном охлаждении – не более $1\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$. Представление о микроструктуре железоуглеродистых сплавов – сталей и чугунов – в равновесном состоянии дает диаграмма железо–цементит. Рассмотрим кристаллизацию доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сплавов.

Кристаллизация доэвтектоидной стали. На рисунке 2 изображен стальной участок диаграммы Fe–C и пространственная кривая охлаждения сплава К – доэвтектоидной стали, содержащей 0,63 % С. Кривая охлаждения $m-1-2-3-4_{\text{H}}-4_{\text{K}}$ и ниже построена по критическим точкам сплава К. На ней построена пространственная кривая охлаждения; границы фазовых областей нанесены с использованием правила отрезков.

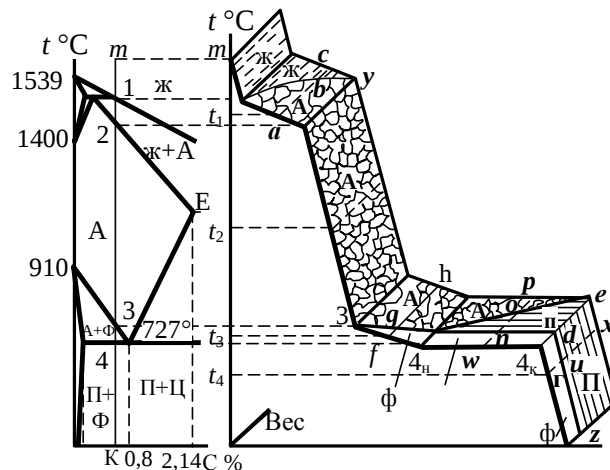


Рисунок 2 – Пространственная кривая охлаждения доэвтектоидной стали.

При температуре точки m сплав находится в жидком перегретом состоянии. Охлаждаясь, он остается жидким до точки 1. В точке 1 (ликвидус) из жидкого сплава (Ж) выпадает первый кристалл аустенита (А). По мере снижения температуры происходит выпадение новых и рост ранее выпавших кристаллов.

Участок 1–2 пространственной кривой линией 1–у делится на две области: аустенита и жидкости. С понижением температуры количество аустенита растет, а жидкости – соответственно уменьшается. Например, при температуре t_1 количество аустенита в сплаве определяется отрезком $a-b$, а оставшегося жидкого сплава – отрезком $b-c$. С изменением температуры величина отрезков, а следовательно, весовое соотношение твердой и жидкой фазы в сплаве изменяется. В точке 2 последняя капля жидкости превращается в аустенит. Структура сплава при t_1 представляет собой жидкость, в которой плавают кристаллы аустенита. Таким образом, в точке 2 (солидус) заканчивается первичная кристаллизация: весь сплав затвердел, превратившись в аустенит.

От точки 2 до точки 3 в сплаве изменения не происходят. Структура сплава – сросшиеся между собой зерна аустенита. Аналогичная однофазная структура будет при любой температуре в интервале точек 2–3.

В интервале точек 3– 4_{K} начинается и завершается вторичная кристаллизация. В точке 3 из аустенита выпадает первый кристалл феррита (Ф). По мере охлаждения выпадают новые кристаллы феррита, а ранее выпавшие растут. Участок 3– 4_{H} пространственной кривой линией 3–l делится на две области: феррита и аустенита. С понижением температуры количество феррита увеличивается, а аустенита – уменьшается. При температуре t_3 количество выпавшего феррита определяется отрезком $f-g$, а оставшегося аустенита – отрезком $g-h$. Структура сплава при температуре t_1 представляет зерна аустенита, по границам которых в виде прослоек расположен феррит. Аналогичная структура будет и при других

температурах, только соотношение феррита и аустенита получится иное, так как по мере перехода от точки 3 к точке 4_н количество феррита в структуре непрерывно увеличивается.

В точке 4_H (727 °C) сплав состоит из феррита и аустенита. Количество феррита соответствует отрезку 4_H-l , а аустенита – отрезку $l-k$. При этом в аустените содержится 0,8 % C. Обогащение аустенита углеродом произошло вследствие выпадения феррита, который по своей природе беден углеродом.

В точке 4_H начинается эвтектоидное превращение: оставшийся аустенит (содержащий 0,8 % С) начинает превращаться в перлит (эвтектоид). Превращение заканчивается в точке 4_K , когда последний кристалл аустенита превратится в перлит (П). Эвтектоидное превращение протекает при постоянной температуре, равной 727 °С.

Участок 4_H-4_K пространственной кривой линиями $l-d$ и $l-e$ делится на три области: феррита (постоянная по ширине), перлита (расширяющаяся) и аустенита (сужающаяся). Следовательно, при движении от точки 4_H к 4_K количество аустенита уменьшается, перлита – увеличивается, а феррита – остается постоянным. В момент времени w количество Φ в сплаве пропорционально отрезку $w-n$, перлита – отрезку $n-o$ и оставшегося аустенита – отрезку $o-p$. Структура сплава: зерна аустенита, окруженные каймой перлита, между которыми расположены прослойки феррита, выпавшего в интервале точек $3-4_H$. Аналогичную структуру, только с различным количественным соотношением аустенита и перлита, сплав будет иметь на всем участке 4_H-4_K .

В точке 4_K последний кристалл аустенита превращается в перлит. В этой точке количество феррита определяется величиной отрезка 4_K-d , а перлита – отрезком $d-e$. В точке 4_K заканчивается вторичная кристаллизация. Ниже точки 4_K превращений в сплаве нет.

Участок пространственной кривой ниже точки 4_K линией $d-z$ делится на две постоянные по ширине области: феррита и перлита. Сбоку кривой для температуры t_4 показана структура сплава: зерна перлита, разобщенные ферритными прослойками, образующими в плоскости шлифа сетку. Количество феррита определяется отрезком $r-u$, перлита – $u-x$.

Кристаллизация эвтектоидной стали. На рисунке 3 показана пространственная кривая охлаждения эвтектоидной стали (0,8 % С) в сочетании с диаграммой Fe–С. От точки *m* до точки 1 сплав остается жидким (Ж).

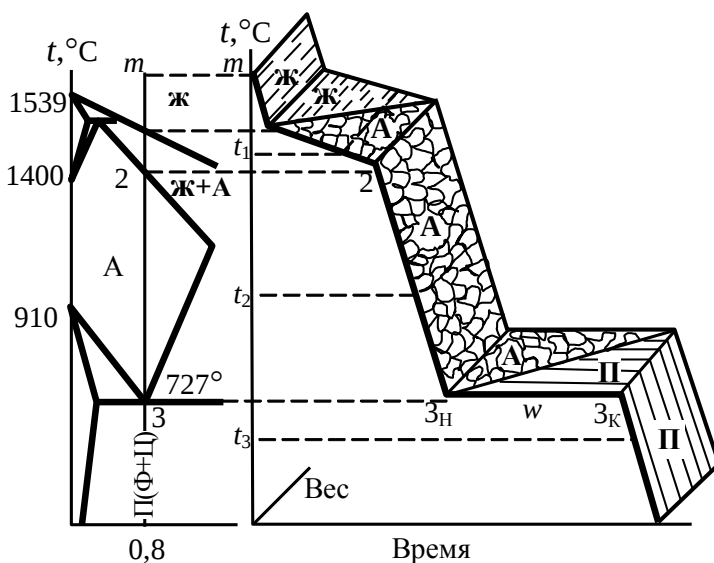


Рисунок 3 – Пространственная кривая охлаждения эвтектоидной стали

В точке 1 (ликвидус) начинается, а в точке 2 (солидус) заканчивается первичная кристаллизация. В точке 1 из жидкого сплава выделяется первый кристалл аустенита, а в точке 2 – последняя капля жидкости превращается в аустенит. Структура сплава при температуре t_1 : кристаллы аустенита плавают в жидкости. От точки 2 до точки 3_H в сплаве

изменений нет. Структура сплава при температуре t_2 – сросшиеся между собой зерна аустенита. В точке 3_H начинается эвтектоидное превращение: переход аустенита в перлит. В точке 3_K это превращение заканчивается – последний кристалл аустенита превращается в перлит. Структура в момент w представляет зерна аустенита, окруженные перлитом. Ниже точки 3_K превращений в сплаве не происходит. Структура сплава при температуре t_3 представляет зерна перлита, сросшиеся между собой.

Кристаллизация заэвтектоидной стали. Процесс кристаллизации заэвтектоидной стали показан на рисунке 4.

Однако диаграмма не дает прямого ответа о форме зёрен, составляющих структуру, и как они расположены друг относительно друга. На этот вопрос отвечает металлографическое исследование. Необходимо из сплава изготовить микрошлиф и выполнить по нему на металлографическом микроскопе микроструктурный анализ. Современные оптические металлографические микроскопы (МИМ-7 и МИМ-8) позволяют сфотографировать при различных увеличениях микроструктуру любого участка микрошлифа. В некоторых случаях, например, при предварительном микроисследовании, в учебных целях, ограничиваются зарисовкой наблюдаемой микроструктуры. На рисунке 5 приведены зарисованные микроструктуры различных сплавов при комнатной температуре.

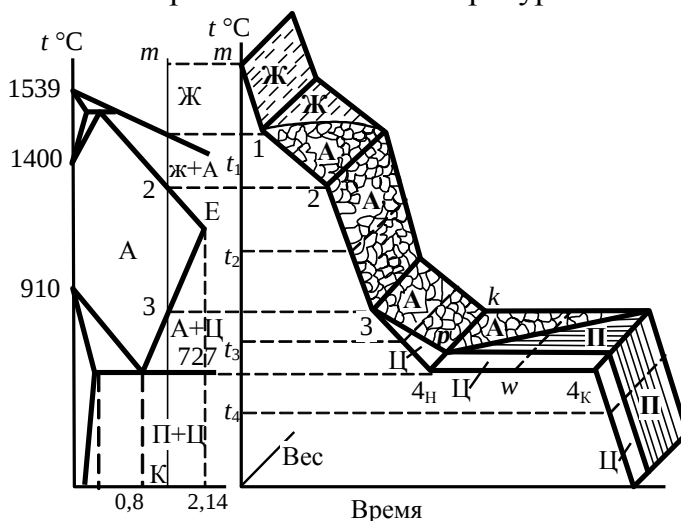


Рисунок 4 – Пространственная кривая охлаждения заэвтектоидной стали (приводится для самостоятельного изучения)

Микроструктура сплава а (техническое железо) представляет собой зерна феррита, по границам которых в виде прослоек располагается третичный цементит Ц_3 (см. рисунок 5, а).

Концентрация углерода в зернах феррита соответствует точке Q (см. рисунок 1). Третичный цементит выпал после ее пересечения линии PQ . Последняя показывает растворимость углерода в феррите при различных температурах. Например, при 727°C растворимость углерода в феррите соответствует точке P (0,025 %), а при нулевой температуре – точке Q (0,005 %).

Некоторые травители окрашивают цементит в черный цвет. Травление микрошлифа 3-4 %-ным раствором азотной кислоты в спирте (наиболее употребительный реактив для травления сталей и чугунов) не окрашивает цементит, он остается светлым и структурно под микроскопом (на микрофотографии) не дифференцируется, сливаясь со светлыми зернами феррита.

В структуре доэвтектоидных сталей марок 10, 20 и 50 (рисунок 5, б, в, г) наблюдаются темные зерна пластинчатого перлита и светлые зерна феррита. С повышением содержания углерода микроструктура темнеет, так как возрастает площадь перлитной составляющей $F_{\text{П}}$, а феррита становится меньше. При содержании 0,6–0,7 % С феррит выделяется не в виде отдельных зерен, а оторочкой вокруг зерен перлита и наблюдается в плоскости шлифа как ферритная сетка, неравномерная по толщине (см. рисунок 5, д).

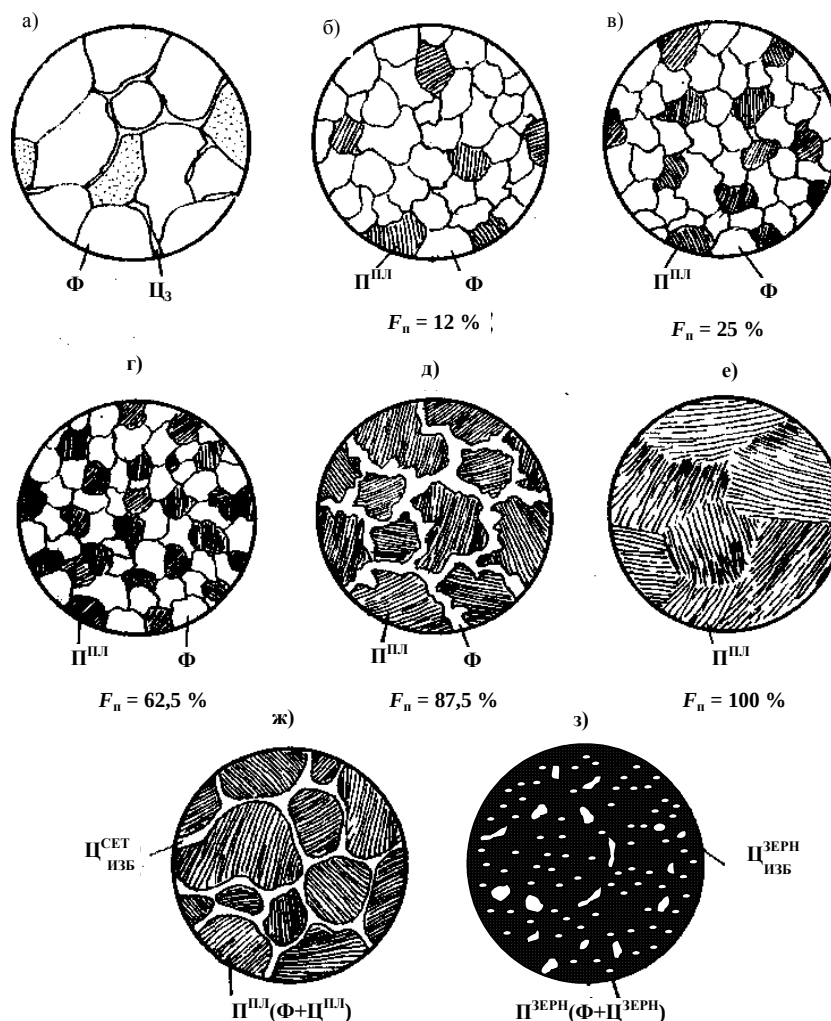


Рисунок 5 – Микроструктура углеродистых сталей: а – 0,01 % С (техническое железо); б – 0,1 % С; в – 0,2 % С; г – 0,5 % С; д – 0,7 % С (ферритная сетка); е – 0,8 % С; ж – 1,2 % С (пластинчатый перлит, избыточный цементит в виде цементитной сетки); з – 1,2 % С (зернистый перлит, избыточный цементит в виде отдельных зерен), $F_{\text{п}}$ – площадь перлитной составляющей, %

У эвтектоидной стали (0,8 % С) микроструктура становится совсем темной, поскольку состоит только из зерен пластинчатого перлита (перлитных колоний), сросшихся между собой (см. рисунок 5, е). По ориентировке пластин различают зерна (колонии) перлита.

Микроструктура заэвтектоидной стали (см. рисунок 5, ж) представляет зерна пластинчатого перлита, разобщенные прослойками избыточного вторичного цементита, которые в совокупности образуют в плоскости шлифа цементитную (карбидную) сетку $\Pi_{\text{цет.изб.}}^{\text{сет.}}$. Вторичный цементит выпал как избыточная фаза в интервале точек 3–4 (см. рисунок 4) из зерен аустенита, образовав вокруг них сплошную оболочку (рубашку).

Цементитная сетка и пластинчатый перлит неблагоприятно влияют на механические и технологические свойства: снижается ударная вязкость и ухудшается обрабатываемость резанием. Наилучшей структурой заэвтектоидной стали является зернистый перлит и разорванная цементитная сетка. Такую структуру получают, подвергая сталь, в структуре которой имеется цементитная сетка, вначале нормализации, а затем отжигу на зернистый перлит (сферотизация).

При нормализации избыточный вторичный цементит выпадает не в виде сетки, а в виде отдельных включений $\Pi_{\text{изб.}}^{\text{зерн.}}$. В процессе сферотизирующего отжига пластинчатый

цементит перлита коагулирует, превращаясь в мелкие зерна $\Pi^{\text{зерн}}$, которые в совокупности с окружающим их ферритом образуют зернистый перлит $\Pi^{\text{зерн}}$ (см. рисунок 5, з).

По микроструктуре можно определить содержание углерода в стали. Например, в доэвтектоидных сталях содержание углерода C , %, определяется по площади перлитной составляющей F_{Π} :

$$C = F_{\Pi} 0,8 / 100.$$

3 МИКРОСТРУКТУРЫ ЧУГУНОВ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Чугуны – железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % углерода.

Углерод в чугунах бывает двух видов: *химически связанный* (в *цементите*) и свободный (*графит*). Выделение углерода в свободном состоянии, т.е. в виде графита, называется **графитизацией**.

В чугунах графит выделяется в форме: пластин (пластинчатый графит), хлопьев (хлопьевидный графит), или шариков (шаровидный графит) (рисунок 1).

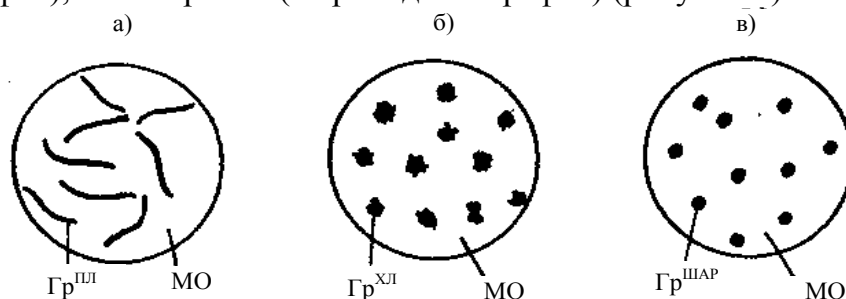


Рисунок 1 – Формы графитовых включений: а – пластинчатый графит $\text{Гр}^{\text{Пл}}$; б – хлопьевидный графит $\text{Гр}^{\text{Хл}}$; в – шаровидный графит $\text{Гр}^{\text{Шар}}$; МО – металлическая основа

Графитовые включения окружены так называемой металлической основой, например, ферритом, перлитом и другими структурными составляющими, основную массу которых составляет металл (железо). По структуре металлической основы различают ферритные, перлитные и ферритно-перлитные чугуны.

Графит имеет низкие механические свойства. Поэтому графитовые включения в чугуне рассматриваются как пустоты, разобщающие металлическую основу. При данном объеме включений пластинчатого, хлопьевидного и шаровидного графита включение пластинчатого графита будет иметь наибольшую поверхность. Поэтому пластинчатый графит разобщает металлическую основу значительно больше, чем хлопьевидный и шаровидный. Разобщение металлической основы приводит к снижению прочности чугуна. Очевидно, при переходе его от пластинчатого к хлопьевидному, а затем к шаровидному графиту, прочность чугуна будет возрастать.

Включения графита являются концентраторами напряжений.

Пластинчатый графит, будучи острым надрезом (трещиной) внутри металла, более активный концентратор, чем хлопьевидный или шаровидный, так как по мере скругления графитовых включений их активность (острота) как концентраторов напряжений понижается, что благоприятно сказывается на пластичности чугуна.

Чугуны относятся к наиболее распространенным литейным сплавам. Изделия из них получают методом литья в виде отливок. Детали машин, изготовленные из чугунных отливок, значительно дешевле деталей, изготовленных из стальных заготовок (проката, поковок и штамповок).

В зависимости от вида углерода и формы графитовых включений различают *белый, серый, ковкий и высокопрочный* чугуны

3.1 Белый чугун

Чугун, в котором весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита, называется *белым*. Цементит придает излому такого чугуна светлый блестящий вид.

Представление о структуре белых чугунов дает диаграмма железо–цементит (рисунок 2). На диаграмме проведены линии трех сплавов: 1-й – доэвтектический, 2-й – эвтектический, 3-й – заэвтектический чугун. Диаграмма показывает, что в охлажденном состоянии при комнатной температуре структура доэвтектического чугуна составлена перлитом, вторичным цементитом и ледебуритом; эвтектического – только ледебуритом; заэвтектического – ледебуритом и первичным цементитом. Каково же в действительности взаимное расположение этих микроструктурных составляющих в структуре чугунов, выявляется микроисследованием.

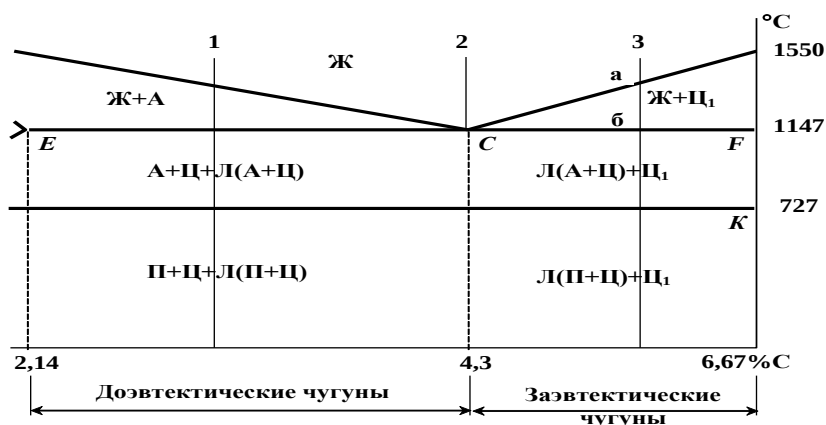


Рисунок 2 – Диаграмма железо-цементит (участок чугунов): Ж – жидкий металл; Ц1 – первичный цементит, выпавший из жидкости; Л – ледебурит (механическая смесь аустенита и цементита или перлита и цементита).

На рисунке 3 представлена микроструктура чугунов в плоскости шлифа, наблюдаемая с помощью оптического микроскопа.

Микроструктура доэвтектического чугуна показана на рисунке 3, а. Крупные зерна пластинчатого перлита $\Pi^{\text{пл}}$, отороченные каймой вторичного избыточного цемента $\text{Ц}_{\text{изб}}$ окружены ледебуритом Л. Ледебурит представляет мелкую механическую смесь перлита и цементита. Перлит ледебурита $\Pi_{\text{л}}^{\text{пл}}$ имеет пластинчатое строение и наблюдается в виде мелких темных зерен, а цементит $\text{Ц}^{\text{лед}}$ – в виде светлого поля, окружающего эти зерна. Перлитные зерна $\Pi^{\text{пл}}$ и $\Pi_{\text{л}}^{\text{пл}}$ имеют различную форму: круглые и вытянутые, с ровными и волнистыми очертаниями. При анализе наблюдаемой структуры необходимо иметь в виду следующее:

а) в интервале ликвидус-солидус выделяется избыточный аустенит в виде крупных трехмерных дендритов, которые сохраняют свою форму при дальнейшем охлаждении;

б) кристаллизация эвтектики – ледебурит (при 1147 °С) протекает путем кооперативного прорастания дендритов цементита и аустенита, в результате чего образуется ледебуритная колония, т.е. бикристаллитное образование, представляющее сросшиеся между собой дендриты аустенита и цементита (эвтектического);

в) при температуре солидуса (1147 °С) избыточный аустенит и аустенит ледебурита содержат 2 % углерода. При снижении температуры растворимость углерода в аустените падает, благодаря чему из аустенита выпадает (как внутри дендритов избыточного аустенита, так и на периферии) избыточный вторичный цементит. Содержание углерода в остающемся

аустените снижается, достигая 0,8 % при 727 °С, и он превращается в пластинчатый перлит: $P_{ПЛ}$ и (см. рисунок 3, а).

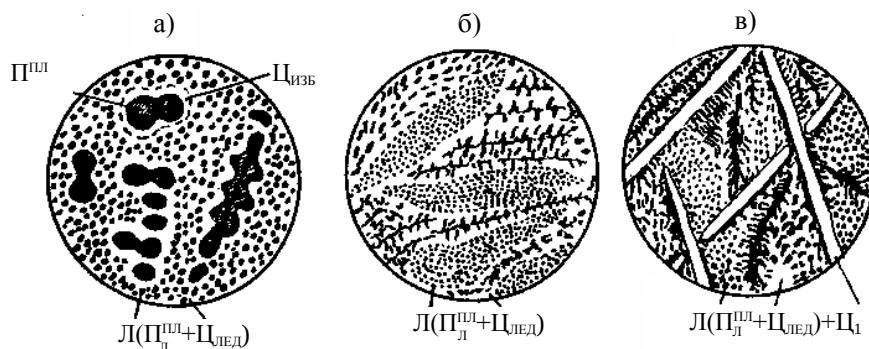


Рисунок 3 – Микроструктура белых чугунов: а – доэвтектического, б – эвтектического, в – заэвтектического; $P_{ПЛ}$ – пластинчатый перлит; $C_{ИЗБ}$ – вторичный цементит; Л – ледебурит; $C_{ЛЕД}$ – цементит, входящий в состав ледебурита; – перлит ледебурита

Таким образом, зерна перлита $P_{ПЛ}$ и $P_{Л}^{ПЛ}$, изображенные на рисунке 3, а, являются сечениями дендритов избыточного аустенита и аустенита ледебурита. На рисунке 3, а показаны зерна перлита ($P_{ПЛ}$ и $P_{Л}^{ПЛ}$), представляющие продольные сечения дендритов (вытянутые с волнистыми очертаниями) и поперечные сечения ветвей дендритов (округлые и вытянутые с ровными очертаниями).

Эвтектический цементит и вторичный цементит (выделившийся из избыточного аустенита и аустенита ледебурита в интервале линий ледебуритного и перлитного превращения) после травления имеют светлый вид и под микроскопом не дифференцируются, так как сливаются вместе в одно целое. Поэтому на рисунке 3, а граница между $P_{ПЛ}$ и $C_{ИЗБ}$, проведенная штриховой линией, фактически не наблюдается.

Микроструктура эвтектического чугуна показана на рисунке 3, б. В структуре наблюдается только ледебурит Л: мелкие темные зерна перлита $P_{Л}^{ПЛ}$ различной формы (круглые, вытянутые), окруженные цементитом $C_{ЛЕД}$. В зависимости от размера перлитных зерен различают ледебурит грубого и тонкого строения.

Микроструктура заэвтектического чугуна (рисунок 3, в) содержит крупные кристаллы первичного цемента P_1 , выпавшего в интервале точек а-б (ликвидус–солидус, см. рисунок 2), окруженные ледебуритом тонкого и более грубого строения: в первом случае перлитные зерна мелкие, во втором – более крупные.

Наблюдаемые в эвтектическом и заэвтектическом чугунах перлитные зерна так же следует рассматривать, как продольные и поперечные сечения дендритов и их ветвей.

При частичной графитизации цементита ледебурита в структуре белого чугуна появляется графит. Чугун, в структуре которого одновременно присутствует ледебурит и графит, называется **половинчатым**.

Большое количество цементита делает белый чугун очень твердым, трудно обрабатываемым резанием и хрупким. Вследствие этого белый чугун имеет ограниченное применение для деталей простой конфигурации, работающих в условиях повышенного абразивного износа. Например, применяются отливки с отбеленной поверхностью: прокатные валки, лемеха плугов, шары размольных мельниц и др. По тем же причинам не получил широкого распространения и половинчатый чугун. Он применяется в качестве фрикционного материала, работающего в условиях сухого трения (тормозные колодки), а также для изготовления деталей повышенной износостойкости (прокатные, бумагоделательные, мукомольные валки). Маркировка белых и половинчатых чугунов ГОСТом не предусмотрена.

3.2 Серые литейные чугуны

Серым называется чугун, в котором часть или весь углерод находится в свободном состоянии в виде графита, имеющего в плоскости микрошлифа форму прямолинейных или слегка изогнутых пластин, а также разветвленных розеток с пластинчатыми лепестками (см. рисунок 1, а). В серых чугунах кроме железа и углерода содержится кремний, а также марганец, фосфор и сера, как неизбежные примеси. Графит придает излому чугуна темно-серый цвет.

В машиностроении наиболее широкое применение получили доэвтектические чугуны, содержащие 2,4–3,8 % углерода. С повышением содержания углерода графита образуется больше, что снижает механические свойства чугуна. По этой причине количество углерода в серых чугунах обычно не более 3,8 %. Уменьшение содержания углерода снижает **жидкотекучесть чугуна** – способность хорошо заполнять литейную форму. Поэтому в серых чугунах содержится углерода не менее 2,4 %.

Кремний способствует графитизации, он – обязательная присадка в серых чугунах. Графитизации способствуют также увеличенное содержание углерода, введение в чугун меди и никеля.

Марганец затрудняет графитизацию, способствует отбелу чугуна, т.е. увеличению в структуре связанного углерода. Содержание марганца в серых чугунах не превышает 1,4 %. Аналогичное влияние оказывают сера и хром.

Фосфор оказывает двойное влияние на чугун. Фосфор связан с железом и углеродом в "фосфидной" эвтектике, высокая твердость и хрупкость которой делает чугун твердым и хрупким. По этой причине – содержание фосфора в сером чугуне не должно превышать 0,2 %. Но фосфидная эвтектика, имея низкую температуру плавления (950 °С), улучшает литейные свойства чугуна: он становится более жидкотекучим, хорошо заполняет литейную форму. Чугуны с повышенным содержанием фосфора (до 1,0 %) применяются для художественного литья.

Высокая твердость фосфидной эвтектики делает чугун изнosoустойчивым. Отливки, от которых требуется высокая изнosoустойчивость, изготавливаются из чугунов с повышенным содержанием фосфора (до 0,7 %).

Сера – вредная примесь. Помимо отбеливающего влияния, она ухудшает литейные свойства чугуна: снижает жидкотекучесть, увеличивает усадку и склонность к образованию трещин. Содержание серы – не более 0,12 %.

Структура серых чугунов показана на рисунке 4. Она состоит из металлической основы и графитовых включений пластинчатой формы. Свойства серого чугуна зависят от структуры металлической основы, формы, величины, количества и характера распределения включений графита.

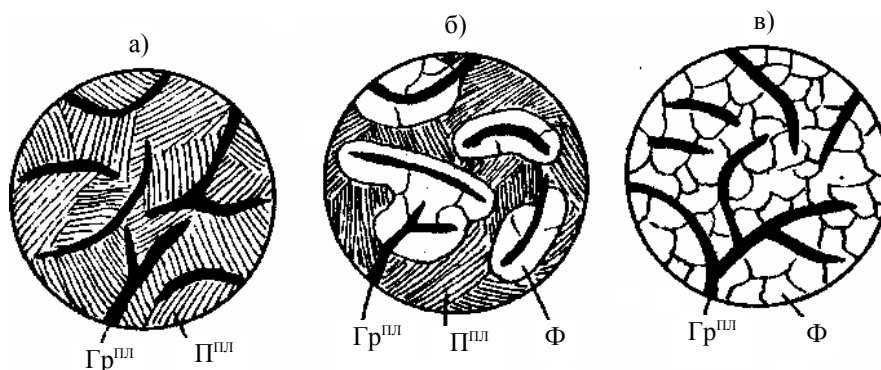


Рисунок 4 – Микроструктура серого литейного чугуна: а – перлитного; б – феррито-перлитного; в – ферритного

Наибольшей прочностью обладает чугун с перлитной металлической основой, наименьшей – с ферритной. Чугуны с ферритно-перлитной металлической основой занимают промежуточное положение. Твердость чугуна определяется твердостью металлической основы и колеблется в пределах $HB\ 143-289\ \text{кгс/мм}^2$.

Решающее влияние на механические свойства чугуна оказывает графитная составляющая структуры. Как уже указывалось, пластинчатый графит сильно разобщает металлическую основу, снижая тем самым механические свойства чугуна. Особенно сильно снижают прочность прямолинейные крупные графитовые включения. Такой чугун имеет грубозернистый излом. Прочность серого чугуна увеличивается при уменьшении количества графита, мелком и завихренном графите, увеличении изолированности графитовых включений друг от друга.

Пластинки графита сильно уменьшают сопротивление чугуна отрыву и мало влияют на снижение предела прочности при сжатии. Поэтому чугун более целесообразно использовать для изделий, работающих на сжатие.

Кроме отрицательного графит оказывает и положительное влияние на свойства чугуна. Серый чугун мало чувствителен к внешним концентраторам напряжений (надрезам, дефектам поверхности и др.), что связано с тем, что графит нарушает сплошность металлической основы. Графит, обладая "смазывающим" действием, повышает износостойкость и антифрикционные свойства чугуна, улучшает обрабатываемость резанием, делая стружку ломкой.

Структура серого чугуна зависит не только от химического состава, но и от скорости охлаждения в процессе первичной кристаллизации. Эту скорость на практике удобно характеризовать толщиной стенки отливки; чем тоньше стенка, тем скорость охлаждения отливки больше, и наоборот.

При данном содержании углерода и кремния в чугуне графитизация его структуры тем полнее, чем медленнее отводится тепло (чем толще стенка отливки). Увеличение скорости охлаждения (тонкая стенка) снижает степень графитизации. Следовательно, в чугунах, из которых отливаются тонкостенные отливки, надо увеличивать содержание кремния. Толстостенные отливки охлаждаются медленно, содержание кремния в них может быть меньше. Наглядное представление о влиянии углерода, кремния и скорости охлаждения (толщины стенки отливки) на степень графитизации чугуна дают структурные диаграммы чугунов.

Серые чугуны получают название по металлической основе. Различают три вида серых чугунов: перлитный, феррито-перлитный и ферритный чугун. В структуре перлитного чугуна наблюдается перлит (металлическая основа) и включения пластинчатого графита (см. рисунок 4, а); феррито-перлитного чугуна – феррито-перлитная металлическая основа и пластинчатый графит (см. рисунок 4, б); ферритного чугуна – феррит (металлическая основа) и включения пластинчатого графита (см. рисунок 4, в).

Стандартные марки серых чугунов обозначаются по ГОСТ 1412–85 буквами С – серый и Ч – чугун. После букв следует число, означающее предел прочности при растяжении в кгс/мм^2 . Например: СЧ 20 – серый чугун, предел прочности при растяжении $20\ \text{кгс/мм}^2$ ($200\ \text{МПа}$).

Согласно ГОСТ 1412–85 различают следующие марки серых чугунов: СЧ 10; СЧ 15; СЧ 20; СЧ 25; СЧ 30; СЧ 35; СЧ 40; СЧ 45. Кроме этих марок указанный ГОСТ содержит марки: СЧ 18; СЧ 21; СЧ 24. Марки СЧ 21 и СЧ 24 предназначены для автомобильной промышленности.

Характеристика и примеры применения отливок из серого чугуна: СЧ 10 – неответственное литье (плиты, грузы, корыта, крышки и т.п.); СЧ 15 – малоответственное литье с толщиной стенки 8–15 мм (шкивы, маховики, арматура, тонкостенные отливки, блоки цилиндров и компрессоров, радиаторы, трубы, ванны, детали счетных, швейных, текстильных машин и т.п.); СЧ 20 – ответственное литье с толщиной стенки 10–30 мм, работающие при

температуре до 300 °С (блоки цилиндров, зубчатые колеса, станины с направляющими большинства металлорежущих станков, тормозные барабаны); СЧ 25 – ответственное сложное литье с толщиной стенки 20–60 мм (детали, работающие при температуре до 300 °С: корпуса насосов и гидроприводов, поршни и гильзы дизелей, цилиндры и головки дизелей, рамы, блоки цилиндров, головки блоков, зубчатые колеса и т.п.); СЧ 30 – ответственное высоконагруженное литье с толщиной стенки 20–100 мм; детали, работающие при температуре до 300 °С (маховики, тормозные барабаны, картеры и др.); СЧ 35 – ответственное тяжело нагруженное литье с толщиной стенки 200 мм и более (крупные толстостенные втулки, зубчатые колеса, крупные коленчатые валы; цепные звездочки, зубчатые и червячные колеса, тормозные барабаны, муфты, диски сцепления, клапаны, поршневые кольца).

Для повышения механических свойств серого чугуна применяют модифицирование. **Модифицирование** состоит в том, что в расплав серого чугуна в желобе вагранки или в ковше вводят измельченные ферросилиций или силикокальций. Вводят также комплексные модификаторы: кремний, алюминий, цирконий и др. Модификаторы измельчают структурные составляющие чугуна. В модифицированных чугунах распределение графитовых включений более равномерное. Чугуны марок СЧ 30, СЧ 35, СЧ 40, СЧ 45 относятся к модифицированным.

3.3 Ковкие чугуны

Ковкими называются чугуны, в которых графит имеет хлопьевидную форму. Такой чугун получают в отливках, изготовленных из белого доэвтектического чугуна и подвергнутых последующему графитизирующему отжигу, в результате чего цементит распадается, образуя при этом графит хлопьевидной формы. Графит ковких чугунов называют также **углеродом отжига**.

Механические свойства ковкого чугуна определяются структурой металлической основы, количеством и степенью компактности включений графита. В зависимости от режима отжига металлическая основа может быть ферритной, феррито-перлитной и перлитной. На рисунке 5, а представлена структура ферритного ковкого чугуна: включения хлопьевидного графита $Гр^{ХЛ}$ окружены зернами феррита, составляющего металлическую основу этого чугуна. Наиболее высокими свойствами обладает ковкий чугун, имеющий металлическую основу (матрицу) со структурой зернистого перлита.

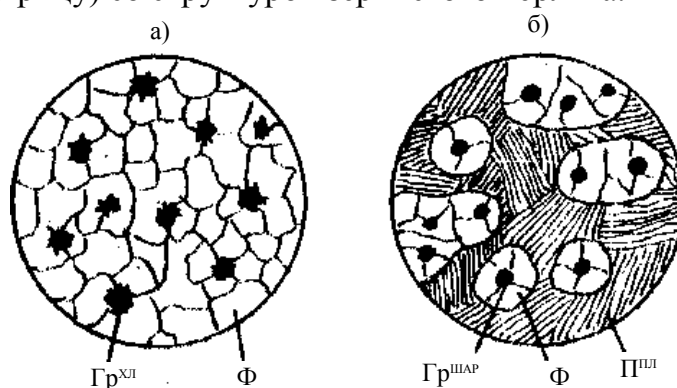


Рисунок 5 – Микроструктура ковкого (а) и высокопрочного (б) чугуна

Когда требуется повышенная пластичность, применяют ковкий чугун с ферритной металлической основой. Твердость ковких чугунов колеблется в пределах $HB\ 163\text{--}269\text{ кгс/мм}^2$.

Количество графита и степень его компактности в ковком чугуне зависят от содержания углерода и кремния в белом чугуне. Более низкое содержание углерода (2,5–2,8 %) уменьшает количество графита, выделяющегося при отжиге; пониженное содержание кремния (0,7–1,5 %) предупреждает выделение пластинчатого графита.

Отсутствие литейных напряжений, которые полностью снимаются во время графитизирующего отжига, благоприятная форма и изолированность графитовых включений обуславливают высокие механические свойства ковких чугунов.

Ковкие чугуны нашли широкое применение в машиностроении. Из них изготавливают детали высокой прочности, работающие в тяжелых условиях износа, способные воспринимать ударные и знакопеременные нагрузки.

Стандартные марки ковких чугунов обозначаются по ГОСТ 26358–84 буквами: К – ковкий, Ч – чугун. После букв следуют числа. Первое – предел прочности при растяжении в кгс/мм², второе – относительное удлинение в %. Например, КЧ 30-6 означает: ковкий чугун, предел прочности при растяжении 30 кгс/мм² (300 МПа), относительное удлинение – 6 %.

По ГОСТ 26358–84 различают следующие марки ковких чугунов: КЧ 30-6; КЧ 33-8; КЧ 35-10; КЧ 37-12; КЧ 45-6; КЧ 50-4; КЧ 55-4; КЧ 60-3; КЧ 65-2. Структура металлической основы: у первых четырех марок – феррит и 3–10 % перлита; у остальных – перлит и 0–20 % феррита. Ферритная металлическая основа указывается буквой Ф, перлитная – П (например, КЧ 30-6-Ф, КЧ 60-3-П).

Ковкий чугун применяется в основном для небольших отливок, работающих в условиях динамических нагрузок (тормозные барабаны, картеры, ступицы колес, коленчатые валы и др.). Необходимость длительной, дорогостоящей термической обработки и ограниченные допускаемые размеры сечений (не более 30–40 мм) породили тенденцию к замене ковкого чугуна высокопрочным с шаровидным графитом.

3.4. Высокопрочные чугуны

Высокопрочными называются чугуны, в которых графит имеет шаровидную форму. Высокопрочный чугун получают модифицированием жидкого чугуна присадками магния, церия, иттрия, кальция и некоторых других элементов (в чистом виде или в составе сплавов-лигатур). Чаще применяют магний в количестве 0,03–0,07 %. По содержанию остальных элементов высокопрочный чугун не отличается от серого чугуна. Под действием модификатора, например магния, графит в процессе кристаллизации принимает шаровидную форму.

Стандартные марки высокопрочных чугунов обозначаются по ГОСТ 7293–85 буквами В – высокопрочный, Ч – чугун. После букв следуют числа – такие же, как и при обозначении марок серых чугунов – предел прочности при растяжении в кгс/мм². Например, ВЧ 60 – высокопрочный чугун с шаровидным графитом, предел прочности при растяжении 60 кгс/мм² (600 МПа), относительное удлинение 2 %.

По ГОСТ 7293–85 различают следующие марки высокопрочных чугунов: ВЧ 35; ВЧ 40 с ферритной металлической основой; ВЧ 45; ВЧ 50 с перлитно-ферритной металлической основой; ВЧ 60; ВЧ 70; ВЧ 80; ВЧ 100, ВЧ 120 с перлитной металлической основой.

Твердость высокопрочных чугунов колеблется в пределах *HB* 140–380 кгс/мм², ударная вязкость не менее 13 Дж/см² (1,3 кгс·м/см²). Высокопрочный чугун применяется как новый материал и как заменитель стали, ковкого чугуна и серого чугуна с пластинчатым графитом. По сравнению со сталью высокопрочный чугун обладает большей износостойкостью, лучшими антифрикционными и антикоррозионными свойствами, лучшей обрабатываемостью резанием. В отличие от ковкого, из высокопрочного чугуна можно отливать детали любого сечения, массы и размеров. Например: в станкостроении – суппорты, резцедержатели, тяжелые планшайбы, шпиндели, рычаги и др.; для прокатного и кузнечно-прессового оборудования – прокатные валки, станины прокатных станов и ковочных молотов и др. Из высокопрочных чугунов отливают коленчатые и распределительные валы.

На рисунке 5, б показана микроструктура высокопрочного чугуна с перлитно-ферритной металлической основой: на поле пластинчатого перлита П^{ПЛ} наблюдаются включения шарового графита Гр^{ШАР}, окруженные зернами феррита Ф.

К категории высокопрочных чугунов относятся чугуны, имеющие включения *вермикулярного графита* – утолщенные изогнутые пластины со скругленными краями. По своим свойствам эти чугуны занимают промежуточное положение между чугунами с шаровидным и пластинчатым графитом. По ГОСТ 28394–89 изготавливают (из СЧ + 0,1 % Mg) следующие марки: ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40, ЧВГ45. Чугун с вермикулярным графитом (ЧВГ) применяется при изготовлении прокатных станков, лопаток паровых турбин, а также в дизелестроении и других областях машиностроения.

3.5 Антифрикционные чугуны

Антифрикционные чугуны обладают низким коэффициентом трения и удовлетворительной стойкостью против износа. Они применяются для подшипников, втулок и подобных деталей в качестве заменителей бронзы при легких условиях работы. В выходящих на поверхность детали графитных гнездах масло задерживается, что улучшает условия смазки.

Антифрикционные чугуны изготавливаются по ГОСТ 1518–85. Стандартные марки: антифрикционных чугунов обозначаются тремя буквами и условным номером: АЧС-15, АЧК-2, АЧВ-1. Буквенная часть марки означает: АЧ – антифрикционный чугун, С – серый чугун (с пластинчатым графитом), К – ковкий чугун (с хлопьевидным графитом), В – высокопрочный чугун (с шаровидным графитом). Пример маркировки отливки: "Отливка АЧС-1 ГОСТ 1518–85". В зависимости от марки антифрикционные чугуны имеют перлитную, перлитно-ферритную, ферритную и аустенитную металлическую основу. Для получения заданной металлической основы чугуны легируют хромом, медью, никелем, титаном, сурьмой, марганцем, алюминием, свинцом и другими элементами в различных сочетаниях и соотношениях.

По ГОСТ 1518–85 изготавливают следующие антифрикционные чугуны: АЧС-1, АЧС-2, АЧС-3, АЧС-4, АЧС-5, АЧС-6, АЧВ-1, АЧВ-2, АЧК-1, АЧК-2.

Подшипники из антифрикционных чугунов успешно работают в различных условиях: в паре с валом, в узлах трения с температурой до 300 °С, при повышенных окружных скоростях и т.п.

3.6 Легированные чугуны

Легирование – введение в процессе выплавки в состав чугуна (чаще серого) хрома, никеля, молибдена, титана, вольфрама и других легирующих элементов. Легированием достигается улучшение прочностных и эксплуатационных характеристик чугуна или придание ему особых свойств: износостойкости, жаропрочности, жаростойкости, коррозионной стойкости, немагнитности и др. Чаще применяется комплексное легирование.

По основному легирующему элементу различают хромистые, никелевые, алюминиевые и другие легированные чугуны. В зависимости от степени легирования легированные чугуны делятся на низколегированные – до 2,5 % легирующих элементов, среднелегированные – от 2,5 до 10 %, высоколегированные – свыше 10 %. Низколегированные чугуны имеют перлитную или бейнитную структуру матрицы (металлической основы), среднелегированные – мартенситную, высоколегированные – аустенитную или ферритную. По назначению различают износостойкие, жаростойкие, жаропрочные и коррозионностойкие чугуны.

Примеры легированных чугунов: силал (5–7 % кремния) – жаростойкий материал; ферросилид (12–18 % кремния) – высокая коррозионная стойкость в растворах солей, кислот (кроме соляной) и щелочей; чугаль (19–25 % алюминия) – высокая жаростойкость.

Обозначение марок легированных чугунов состоит из букв, указывающих, какие легирующие элементы входят в состав чугуна и стоящих непосредственно за каждой буквой цифр, характеризующих среднее содержание в процентах данного легирующего элемента; при содержании легирующего элемента менее одного процента цифра не ставится.

Например: ЧН19ХЗ – легированный чугун, содержащий примерно 19 % никеля и 3 % хрома. Если в легированном чугуне регламентирована шаровидная форма графита, в конце марки добавляется буква Ш (ЧН19ХЗШ).

Износостойкие чугуны (ЧХ9Н5, ЧХ16М2, ЧХ28Д2 и др.) применяются при изготовлении тормозных барабанов, дисков сцепления, гильз цилиндров и др.

Жаростойкие чугуны (ЧХ2, ЧЮХШ, ЧЮ7Х2, ЧЮ30) применяют при изготовлении роликов прокатных станков, турбокомпрессоров, деталей печного оборудования и др.

Жаропрочные чугуны (ЧНМШ, ЧН11Г7Х2Ш, ЧН14Х2Д7) применяют для изготовления деталей дизелей, газовых турбин и др.

Коррозионно-стойкие чугуны (ЧХНМД, ЧН2Х, ЧХ28, ЧС13, ЧС17) применяют для изготовления поршневых колец, деталей дизелей, компрессоров, химического оборудования и др.

Порядок выполнения работы

1. Изучить диаграмму железо–углерод.
2. Для заданного сплава железо-углерод построить кривую охлаждения.
3. Установить весовое соотношение сосуществующих фаз.
3. Сделать выводы.

Содержание отчета

1. Краткие сведения из теории.
2. Основные определения, касающиеся диаграммы железо-углерод.
3. Кривая охлаждения и весовое соотношение фаз.
4. Выводы по работе.