

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА

Рекомендовано Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана» в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 150400.62 «Металлургия», 17.06.2013

Красноярск
СФУ
2014

УДК 669.112(07)
ББК 34.222я73
О-753

О-753 Основы получения отливок из сплавов на основе железа :
учеб. пособие / А. И. Булгакова, Т. Р. Гильманшина, В. Н. Баранов,
Т. Н. Степанова. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2014. – 220 с.
ISBN 978-5-7638-2926-6

В учебном пособии рассмотрены особенности кристаллизации сплавов на основе железа, а также технологические, литейные и эксплуатационные свойства чугуна и стали.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 150400.62 «Металлургия».

Электронный вариант издания см.:
<http://catalog.sfu-kras.ru>

УДК 669.112(07)
ББК 34.222я73

ISBN 978-5-7638-2926-6

© Сибирский федеральный
университет, 2014

ВВЕДЕНИЕ

Металлы – наиболее распространенные материалы, широко используемые во всех отраслях промышленности.

Одним из основных методов производства, от получения жидких сплавов до изготовления отливок для всех отраслей промышленности, и прежде всего для машиностроения, является литейное производство, которое позволяет обеспечивать однородность структуры и свойств литых изделий, а также получать отливки любых размеров и масс.

Формообразование отливок осуществляется из материалов в расплавленном состоянии. В этом важнейшее достоинство и перспективность технологии литья, так как для придания детали любой конфигурации из любого расплава требуются минимальные затраты энергии. Но это же приводит к главному недостатку отливок: в результате затвердевания расплава в них возникает ряд дефектов, ухудшающих свойства отливок. Для предотвращения этих дефектов необходимо знание технологии выплавки и особенностей получения отливок из конкретных сплавов.

Производство стальных и чугунных отливок непрерывно расширяется. Ни один из промышленных металлов и сплавов не является столь универсальным с точки зрения диапазона свойств, как сталь и чугун. Путем рационального легирования, модифицирования и термической обработки достигаются оптимальные физико-механические свойства отливок, обуславливающие надежность и долговечность машин и конструкций. Стальное и чугунное литье применяют тогда, когда от металла требуются примерно такие же свойства, как от катаной или кованой продукции, а получение изделий заданной формы с экономической или технологической точки зрения более целесообразно путем литья.

В настоящем учебном пособии теоретический материал делится на два раздела: «Производство отливок из чугуна» и «Производство отливок из стали». Особое внимание авторы уделили современным представлениям об эксплуатационных, технологических и литейных свойствах чугунов и сталей, а также методикам определения этих свойств и формированию служебных характеристик сплавов в отливках. В пособии подробно рассмотрены свойства чугунов и сталей, которые должны учитываться технологами при ведении плавки и разработке технологического процесса изготовления отливок из чугунов и сталей. Изложены физико-химические и технологические основы плавки чугунов и сталей, приведены схемы печей и принципы их действия. Вопросы конструкции печей освещены лишь в том объеме, который обеспечивает понимание технологии и методов управления технологическими процессами плавки.

ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ ЧУГУНА

1.1. Общие сведения о структуре и свойствах чугунов

Современное состояние, перспективы и задачи производства железоуглеродистых сплавов. Основные направления повышения эффективности производства отливок

Фасонные отливки применяются во всех отраслях промышленности. Область применения литых деталей постоянно расширяется, так как помимо общего роста машиностроительного производства происходит замена деталей из поковок, штамповок и проката отливками, что обуславливает большую экономию металла и снижение затрат труда.

Из чугуна получают около 80 % фасонного литья в мире. В мировом производстве масса фасонных стальных отливок составляет 15 % и лишь 5–6 % приходится на отливки из сплавов цветных металлов.

Широкое распространение отливок из чугуна и стали объясняется тем, что эти материалы обладают многими ценными качествами, в частности высокими (у чугуна) и удовлетворительными (у стали) литейными свойствами, легко обрабатываются резанием. Важным обстоятельством является также сравнительно невысокая стоимость чугуна и стали.

Современное машиностроение значительно повысило требования, предъявляемые к чугунным отливкам. Применение чугуна для ответственных деталей потребовало улучшения качества чугуна, главным образом его структуры. Для получения легированных и модифицированных чугунов появилась необходимость введения в чугун специальных добавок.

Задача изготовления качественных отливок из серого чугуна с улучшенной структурой сводится к получению однородного перлитного чугуна во всех частях отливки независимо от толщины стенок. Такая структура может быть получена регулированием химического состава, температуры выпускаемого из печи чугуна и скорости охлаждения его в форме. Для этого суммарное содержание в отливке углерода и кремния обеспечивают равным 4 %. Чугун перегревают до температуры ~1 500 °С и замедляют охлаждение его в форме.

Легированными называют чугуны, в состав которых введены специальные примеси: никель, хром, молибден, титан и др. В результате введения этих примесей наблюдается повышение механических свойств чугуна.

Влияние легирующих элементов весьма разнообразно и в настоящее время позволяет применять чугун там, где раньше применялась сталь.

На практике наибольшее значение имеет модифицирование чугуна. Во время выпуска серого чугуна из вагранки или другого плавильного агрегата в расплав добавляется небольшое количество (0,5–0,6 %) специальных графитизирующих присадок – *модификаторов*. Серый излом этих отливок объясняется тем, что структурно модифицированный чугун представляет собой перлит с включениями пластинок графита. Термообработка такого чугуна повышает его механические свойства, приближая их к свойствам стали.

В качестве модификаторов могут служить 75 %-ный ферросилиций, силикокальций (СК10) и др. Введение этих модификаторов может производиться в ковш во время наполнения его чугуном или же на желоб, в струю металла, во время выпуска чугуна из плавильного агрегата. После ввода модификаторов и перемешивания чугуна время выдержки до заливки чугуна в формы должно быть 2–4 мин. При более длительных выдержках заметного изменения структуры и механических свойств не происходит.

В результате модифицирования образуется более мелкозернистая металлическая основа чугуна. Кроме того, графитовые включения равномернее распределяются в металлической основе в виде тонких и коротких включений. Это обеспечивает значительное повышение механических свойств модифицированных чугунов по сравнению с серыми. Такой чугун применяется для изготовления ответственных деталей машиностроения, таких как рамы двигателей, тонкостенные отливки сложных форм (толщина стенок до 6 мм), поршневые кольца, цилиндры, малые коленчатые валы, головки блока и т. д. Модифицирование применяется также как способ устранения отбела в тонких сечениях чугунных отливок. В ряде случаев модифицированный чугун применяется в качестве антифрикционного материала – заменителя бронз.

В ближайшей перспективе чугун останется ведущим конструкционным материалом. Диапазон технических свойств чугуна весьма широк: серый чугун (СЧ) имеет хорошие антифрикционные свойства, высокопрочные и ковкий чугуны отличаются высокой прочностью и пластичностью. По износостойкости, низкой чувствительности к надрезам и технологичности чугун превосходит сталь.

Получение чугуна различных марок потребовало совершенствования традиционных и разработки новых процессов плавки и внепечной обработки чугуна. Сегодня внедряются современные коксовые, коксогазовые и газовые вагранки, широкое распространение получают электроплавка и плавка чугуна дуплекс-процессом (вагранка – электропечь).

В общем случае можно рекомендовать применение вагранок (коксовых с холодным или горячим дутьем, коксогазовых, газовых) для получения

серого чугуна до марки СЧ30; duplex-процесса – для СЧ35 и ковкого чугуна (КЧ); индукционных тигельных печей – для СЧ25, СЧ30, легированных и специальных чугунов, ковких чугунов и чугунов с шаровидным графитом (ВЧ), вермикулярным графитом (ЧВГ), а также для чугунов любых других марок при использовании в шихте стальных отходов.

Таким образом, чугун – это уникальный литейный сплав, имеющий хорошие литейные свойства. Кроме того, он и дешевле стали.

Структурные составляющие и свойства сплавов в жидком и твердом состояниях

Чугуны представляют собой сплавы железа, содержащие свыше 2,14 % углерода и примеси кремния от 0,4 до 3,5 %, марганца от 0,2 до 1,5 %, фосфора от 0,04 до 1,5 % и серы от 0,02 до 0,2 %.

Структура и свойства чугуна в основном определяются тем, в каком количестве и в каком виде (свободном или связанном) содержится в нем углерод. Свободный углерод в чугуне представляет собой равномерно распределенные в металлической основе сплава включения *графита* – неметаллического материала, обладающего малой прочностью и твердостью, имеющего в различных чугунах разную форму: пластинчатую, шаровидную, хлопьевидную.

Связанный углерод входит в состав чугуна в виде химического соединения Fe_3C – цементита. Чем больше по количеству и размерам включения графита в чугуне, тем меньше его прочность. Наиболее высокими механическими свойствами обладают высокопрочные чугуны с шаровидной формой графита и ковкие чугуны, в которых благодаря специальной термической обработке обеспечивается выделение углерода отжига в виде хлопьевидных частиц. Высокое (от 2 до 4 %), по сравнению со сталями, содержание углерода в чугуне оказывает положительное влияние на литейные свойства чугуна: понижает температуру плавления, повышает жидкотекучесть, уменьшает усадку. Поэтому из чугуна можно получать более тонкостенные, чем из стали, отливки, меньше расходовать металла на литниковую систему и прибыли.

Итак, к основным составляющим структуры различных чугунов, определяющим их свойства, помимо графита относят феррит, цементит, перлит, аустенит, ледебурит.

Феррит (Ф) – твердый раствор углерода (до 0,02 %) в $\alpha\text{-Fe}$. Феррит мягок и пластичен, если не содержит легирующих примесей, повышающих его твердость, прочность, хрупкость.

Цементит (Ц) (карбид железа – Fe_3C) представляет собой химическое соединение (Fe_3C), содержащее 93,33 % железа и 6,67 % углерода; является наиболее твердой и хрупкой составляющей чугунов.

Перлит (П) – эвтектоидная механическая смесь цементита и феррита. Мельчайшие частицы цементита, находящиеся в пластичной массе

феррита, придают этой смеси хорошие прочностные свойства. В перлите содержится 0,83 % углерода.

Аустенит (А) – твердый раствор углерода в γ -Fe. Аустенит немагнитен.

Ледебурит (Л) – эвтектическая механическая смесь аустенита и цемента.

Рассмотрим диаграмму состояния железо – углерод (рис. 1).

При температурах, отвечающих линии *BC*, из жидкого сплава кристаллизуется А (аустенит), а при температурах, соответствующих линии *CD*, – цементит (Fe_3C). В точке *C* при 1 147 °С и концентрации углерода 4,3 % из жидкого сплава одновременно кристаллизуются А и Fe_3C , образуя эвтектику (ледебурит).

При кристаллизации доэвтектических сплавов (рис. 1), содержащих от 2,0 до 4,3 % С, из жидкой фазы по достижении температур, соответствующих линии ликвидуса *BC*, сначала выделяются кристаллы аустенита, а при 1 147 °С (линия *EC*) сплавы окончательно затвердевают с образованием эвтектики – ледебурита. Следовательно, доэвтектические сплавы после затвердевания имеют структуру А + Л (ледебурит).

Заэвтектические сплавы, содержащие от 4,3 до 6,67 % углерода, начинают затвердевать по достижении температур, отвечающих линии *CD*. Первоначально из жидкой фазы выделяются кристаллы цемента, а по достижении 1 147 °С (линия *CF*) сплавы окончательно затвердевают с образованием эвтектики – ледебурита. После затвердевания сплавы получают следующую структуру: кристаллы Ц + Л. Этот цементит, образующийся из жидкой фазы, называется *первичным цементом*.

Как было сказано выше, чугуны (по сравнению со сталью) обладают лучшими литейными свойствами и более низкой температурой плавления. Однако они хрупки и практически не поддаются ковке. Это объясняется присутствием в структуре чугунов легкоплавкой и хрупкой эвтектики – ледебурита (или графита – при стабильном равновесии).

Вторичная кристаллизация. Рассмотрим превращения, протекающие в твердом состоянии. Эти превращения связаны с переходом при охлаждении γ -Fe в α -Fe и, как следствие, с распадом А (аустенита).

Линия *ES* показывает изменение растворимости углерода в аустените с 2 % (точка *E*) до 0,8 % (точка *S*). При этом из аустенита выделяется цементит, который, в отличие от цемента (Fe_3C), кристаллизующегося из жидкой фазы, называется *вторичным цементом*.

По достижении 727 °С происходит распад аустенита с одновременным выделением из него феррита и цемента, образующих эвтектоидную смесь – перлит. Таким образом, *перлит* – это механическая смесь двух фаз: феррит + цементит. Точка *P* характеризует предельную растворимость углерода в феррите (α -Fe) при температуре 727 °С, она составляет 0,025 % углерода.

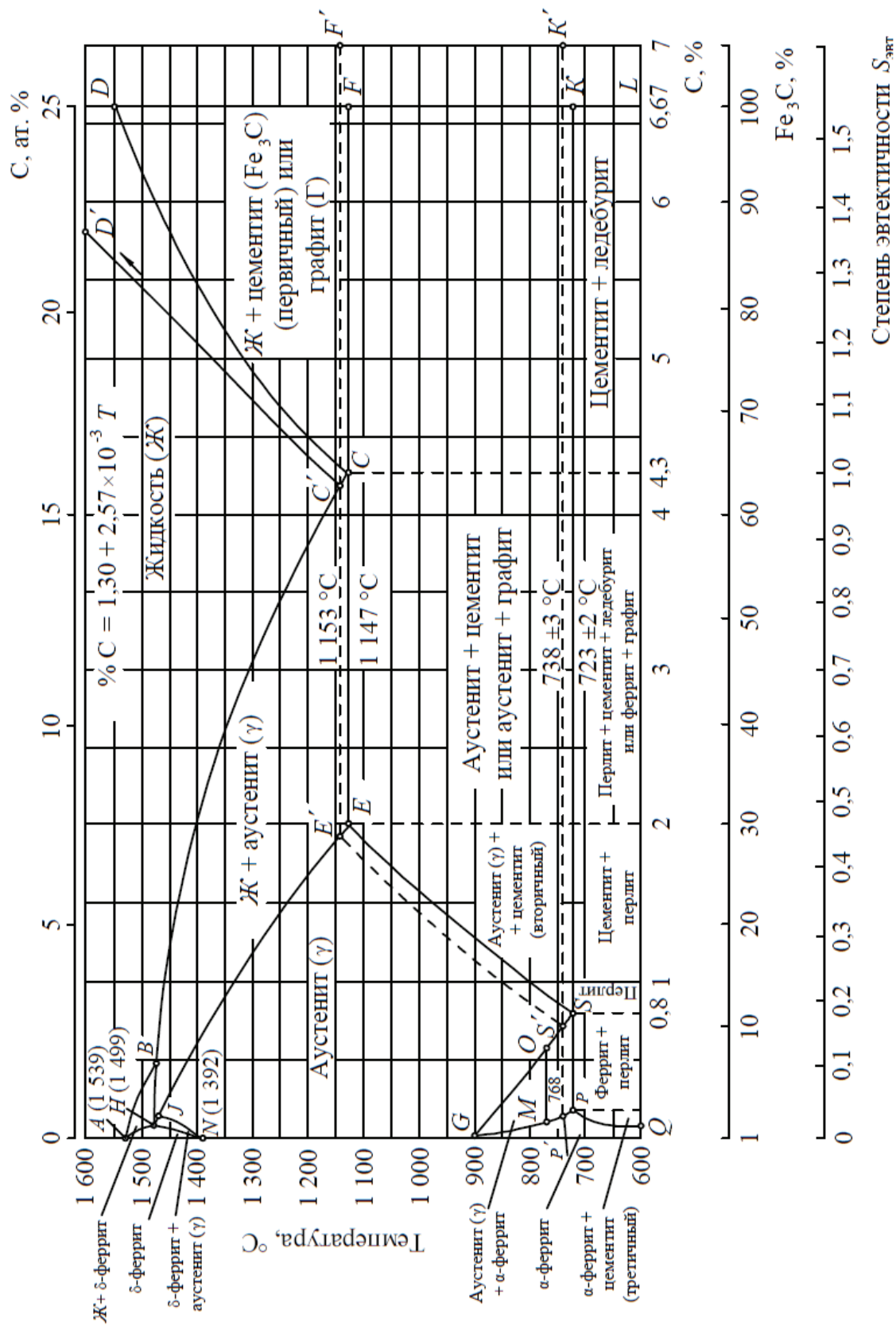


Рис. 1. Диаграмма состояния железа – углерод

По достижении температуры, соответствующей линии PSK ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$), аустенит, обедненный углеродом доэвтектоидного состава (точка S соответствует $0,8\text{ \% C}$), превращается в перлит. Таким образом, доэвтектические чугуны после окончательного охлаждения имеют структуру $\Pi + \text{Л}$ (рис. 2, a).

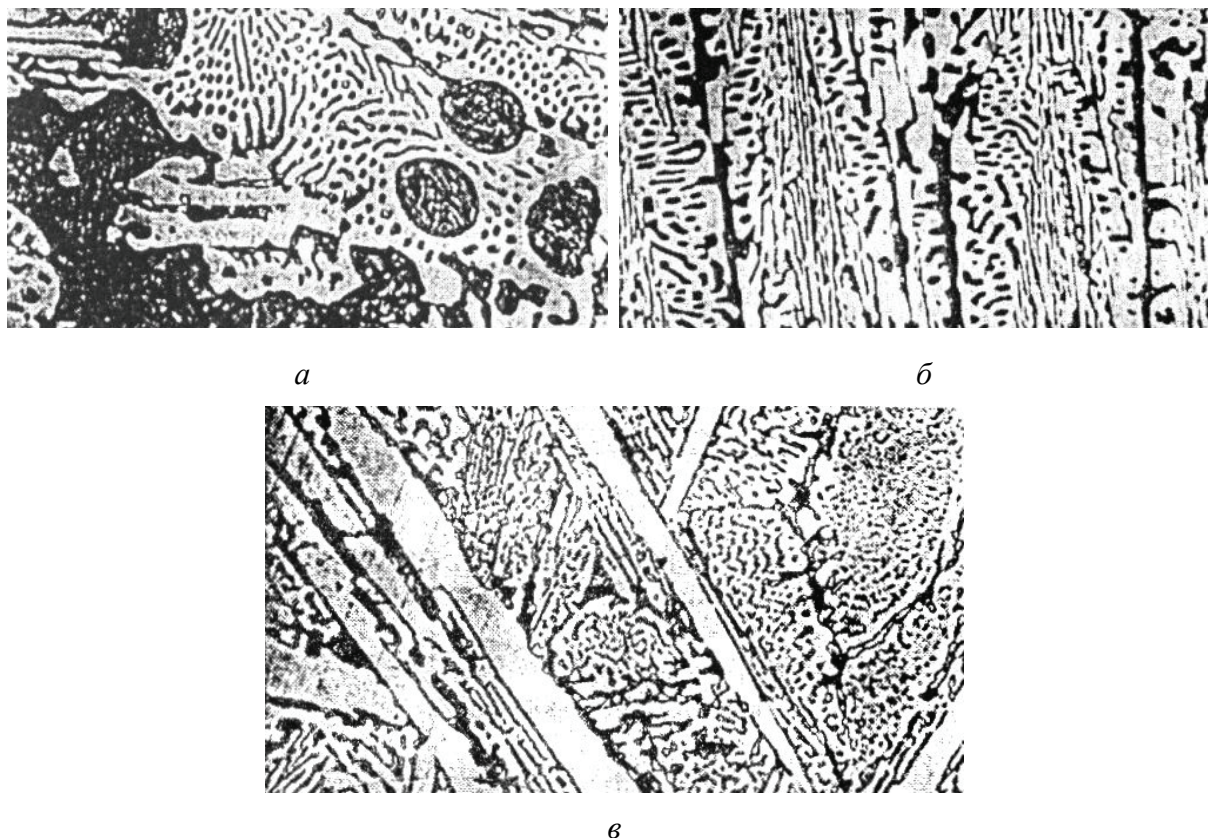


Рис. 2. Микроструктура чугуна, $\times 500$: a – доэвтектический чугун: перлит (темные участки) и ледеburит (светлые участки); b – эвтектический чугун: ледеburит (темные участки – перлит; светлые – цементит); v – заэвтектический чугун: цементит (светлые пластины) и ледеburит (темные участки – перлит; светлые – цементит)

Эвтектический чугун ($4,3\text{ \% C}$) состоит только из ледеburита, при температуре выше $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ – из аустенита + цементита, ниже $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ – из перлита + цементита (рис. 2, b). *Ледеburит* представляет собой выделения цементита, часто пластинчатой формы (они плохо травятся), и мелкие (иногда разветвленные) включения перлита, образовавшегося в участках залегания аустенита.

Заэвтектический чугун при температурах ниже $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ состоит из первичного цементита, имеющего форму пластин, и ледеburита ($\text{Ц} + \text{Л}$) (рис. 2, v).

Процесс графитизации и структура серого чугуна. В условиях стабильного равновесия сплавов $\text{Fe}-\text{C}$ высокоуглеродистой фазой является не цементит, а графит.

Образование стабильной фазы – графита – в чугуне может иметь место либо за счет непосредственного выделения его из жидкого (твердого) раствора, либо в результате распада предварительно образовавшегося цемента.

В стабильной системе при температурах, соответствующих линии $C'D'$, кристаллизуется первичный графит (Г), а при температурах, соответствующих линии $E'C'F'$ (1 153 °C), – эвтектический графит.

По линии $S'E'$ выделяется вторичный графит (Г), а по линии $P'S'K'$ (738 °C) – эвтектоидный графит (рис. 1).

Следует иметь в виду, что образование графита из жидкой фазы возможно лишь *при очень малой скорости охлаждения* (когда степень переохлаждения не превышает 5 °C/ч). Ускоренное охлаждение частично или полностью подавляет кристаллизацию графита и способствует образованию цемента.

В жидком чугуне присутствуют различные включения, многие из которых (графит, SiO_2 , Al_2O_3 и др.) находятся в структурном и размерном соответствии с кристаллизующимся графитом. Эти частицы играют роль готовой подкладки, облегчая образование и рост графитных зародышей. В этом случае процесс образования графита может протекать и при температурах ниже 1 147 °C.

Для ускорения процесса графитизации из жидкой фазы, в чугун нередко вводят модификаторы, образующие добавочные центры кристаллизации. При небольших перегревах и малой степени переохлаждения возникают крупные малоразветвленные лепестки графита. При большой степени переохлаждения и большом перегреве образуются разветвленные тонкие графитовые лепестки, которые составляют основу эвтектического зерна.

В плоскости шлифа графит имеет вид прямолинейных или завихренных пластинок. Форма и размеры этих включений сильно зависят от температуры перегрева чугуна (выше температуры плавления) и скорости его последующего охлаждения (степени переохлаждения).

Аустенит, входящий в эвтектику и кристаллизующийся вслед за графитом, отлагается на его поверхности. Если в процессе кристаллизации образуется цементит (первичный или эвтектический), то при определенных условиях возможен его распад с образованием аустенита и графита ($A + Г$).

Процесс образования графита из жидкой фазы, а также распад первичного и эвтектического цемента (Ц) на аустенит (А) и графит (Г) называют *первичной стадией графитизации*.

При последующем медленном охлаждении термодинамически возможно выделение вторичного графита из аустенита, называемое *промежуточной стадией графитизации*.

Образование эвтектоидного графита (Г), а также распад эвтектоидного цемента на графит и феррит называют *второй стадией графитизации*.

Основная масса графита (Г) в сером чугунах образуется в период первой стадии графитизации. Графит (Г), возникающий на промежуточной и второй стадиях графитизации, не образует самостоятельных выделений, а наслаивается на имеющихся графитных включениях, увеличивая их размеры.

Если чугун, в котором углерод находится в виде цементита, подвергнуть длительному нагреву при высоких температурах, в нем также протекает процесс графитизации, т. е. распад цементита (Ц) на графит (Г) и феррит (Ф) при температурах ниже 727 °С или графит (Г) и аустенит (А) при более высокой температуре.

В зависимости от количества углерода, связанного в цементит, различают следующие виды чугунов [4]:

1) *белый чугун*, в котором весь углерод находится в виде карбида Fe_3C . Структура такого чугуна – ледебурит (Л) и перлит (П) (рис. 3, а);

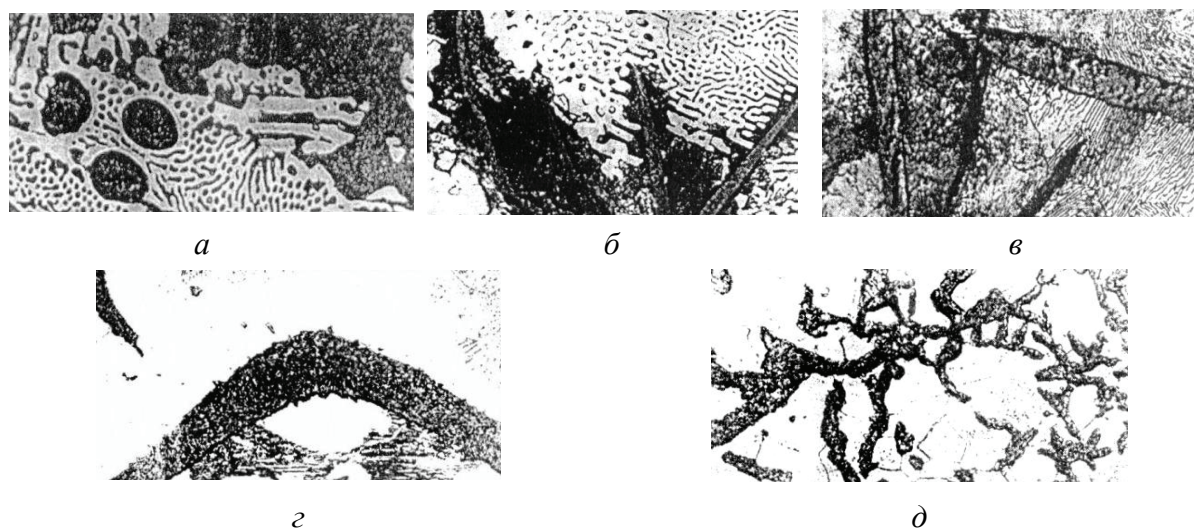


Рис. 3. Структура чугуна, $\times 600$

2) *половинчатый чугун*, в котором большая часть углерода (более 0,8 %) находится в виде Fe_3C . Структура такого чугуна – ледебурит (Л), перлит (П) и пластинчатый графит (ПГ) (рис. 3, б);

3) *перлитный серый чугун*. Структура – перлит (П) и пластинчатый графит (ПГ) (рис. 3, в). В этом чугуне 0,7–0,8 % углерода находится в виде Fe_3C , входящего в состав перлита;

4) *феррито-перлитный серый чугун*. Структура – перлит (П), феррит (Ф) и пластинчатый графит (ПГ) (рис. 3, г). В этом чугуне, в зависимости от степени распада эвтектоидного цементита, в связанном состоянии находится от 0,7 до 0,1 % углерода, входящего в состав перлита (П);

5) *ферритный серый чугун*. Структура – феррит (Ф) и пластинчатый графит (ПГ) (рис. 3, д). В данном случае весь углерод находится в виде графита.

Влияние состава чугуна на графитизацию. Химический состав чугуна оказывает на графитизацию большое влияние: Si, C и Al – *графитообразующие элементы* – ускоряют первую и вторую стадию графитизации; Ni, Cu ускоряют первую стадию и задерживают вторую стадию; Mn, Cr, Mo, W, V, Mg – *карбидообразующие элементы* – задерживают процесс графитизации и способствуют получению белого чугуна. Влияние S и P невелико.

Таким образом, процесс графитизации и структура чугуна зависят от двух основных факторов: от состава чугуна, главным образом от содержания C, Si и Mn, и скорости охлаждения.

Сравнительная интенсивность влияния элементов на графитизацию (отбеливаемость) выражается следующим рядом:

+ Si, Al, C, Ti, Ni, Cu, P, Zr, [Nb], W, Mn, Cr, V, S, Mg, Ce, Te, B –

От ниобия Nb влево возрастает графитизирующая способность, а вправо – карбидообразующая (т. е. способствующая отбелу).

К графитизированным чугунам относятся серый и ковкий чугуны, высокопрочный чугун с шаровидным или вермикулярным графитом.

Основные характеристики структурных составляющих чугуна

По ГОСТ 3443–87 структуру чугуна классифицируют по графиту и по матрице (металлической основе).

Разнообразные формы графита в чугуне – пластинчатый (ПГ), вермикулярный (ВГ), хлопьевидный (ХГ), шаровидный (ШГ) – определяют основные типы чугунов: серый с пластинчатым графитом (СЧ), с вермикулярным графитом (ЧВГ), высокопрочный с шаровидным графитом (ВЧШГ, или ВЧ), ковкий с компактным графитом (КЧ).

При оценке графита определяют форму, размер, характер распределения и количество включений.

Ф о р м а г р а ф и т а в значительной степени определяет механические свойства чугунов. В зависимости от вида чугуна различаются следующие формы графита (рис. 4, а):

- для серого чугуна – четыре формы: ПГф1 (пластинчатая прямолинейная), ПГф2 (пластинчатая завихренная), ПГф3 (игольчатая), ПГф4 (гнездообразная);

- для высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом – три формы: ВГф1 (узелковая), ВГф2 (извилистая), ВГф3 (утолщенная);

- для чугуна с шаровидным графитом – пять форм: ШГф1 (разорванная), ШГф2 (звездообразная), ШГф3 (компактная), ШГф4 (шаровидная неправильная), ШГф5 (шаровидная правильная);

- для чугуна с компактным графитом – три формы: КГф1 (нитевидная), КГф2 (хлопьевидная), КГф3 (компактная).

Размеры включений графита оцениваются по длине l или по диаметру d (в микронах) от $\Gamma_{\text{разм}} 15$ до $\Gamma_{\text{разм}} 1000$ баллами. Для оценки пластинчатого графита используются восемь баллов, а для шаровидного и компактного – только первые шесть. Для оценки определяются средние значения длины или диаметра трех наибольших включений графита, видимых в поле зрения и измеренных не менее чем в трех местах шлифа.

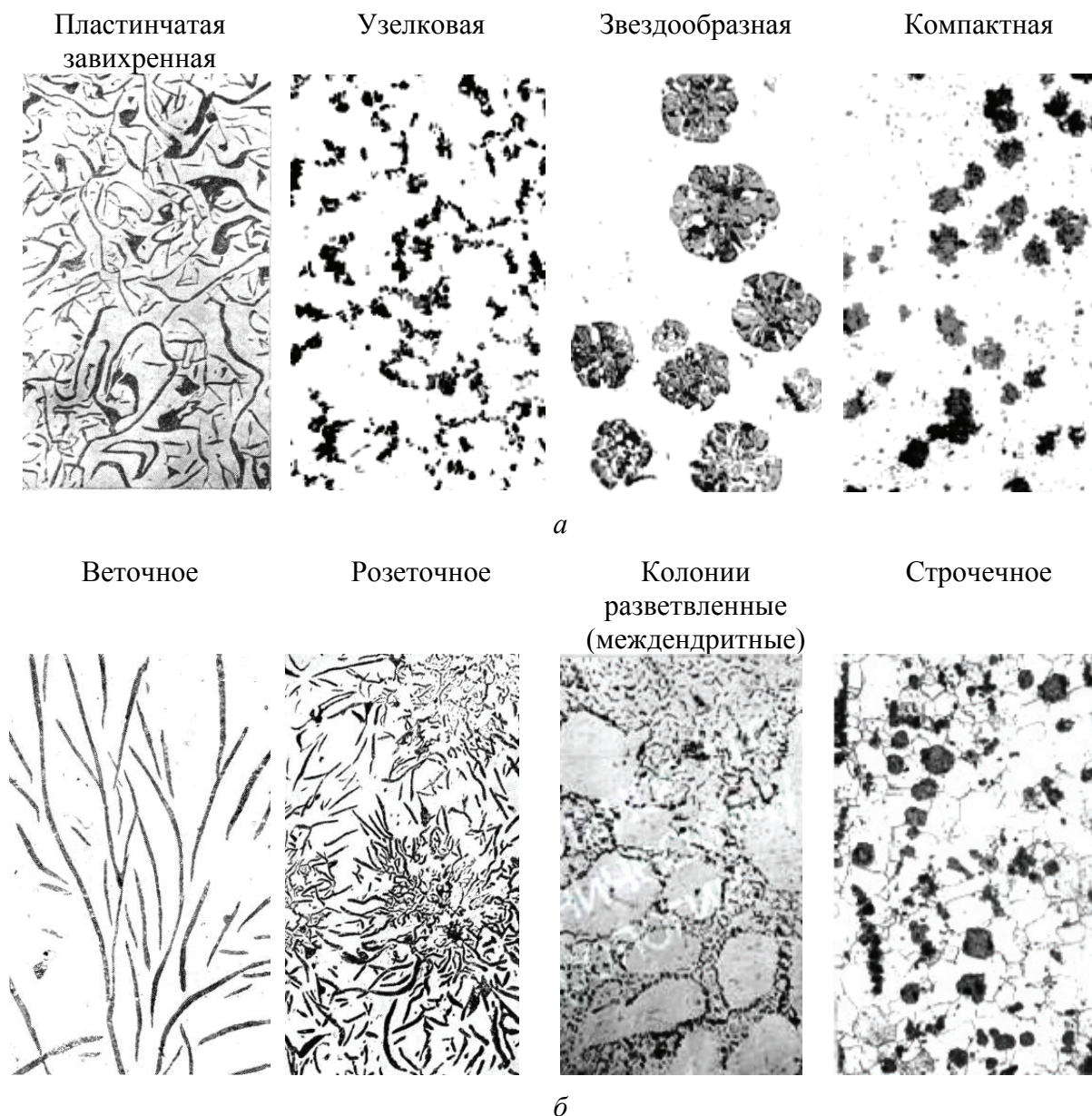


Рис. 4. Разновидности графита по форме (а) и распределению включений (б)

Распределение включений графита оценивается для пластинчатого, вермикулярного и шаровидного графита (рис. 4, б):

- для пластинчатого графита – девять видов: ПГр1 (равномерное) – ПГр9 (междендритное пластинчатое);

- для высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом – пять видов распределения: ВГр1 (равномерное) – ВГр5 (колонии изолированные, междендритные);

- для чугуна с шаровидным графитом – четыре вида: ШГр1 (равномерное) – ШГр4 (скопление мелких включений).

Количество включений графита определяют визуально на микрошлифах путем сравнения с эталонными структурами или инструментальными методами и обозначают Г2, Г4, Г6, Г10 и Г12, где числа – это площадь, занимаемая графитом на шлифах, соответственно до 3 %, 3–5 %, 5–8 %, 8–12 % и более 12 %.

Если в структуре чугуна есть графит различной формы, размеры его включений определяются для каждой формы. При этом следует визуально оценить процентную долю каждой и указать ее при обозначении структуры.

Матрица чугунов оценивается по типу металлической основы, дисперсности перлита, размеру включений цементита и фосфидной эвтектики (ФЭ состава $\text{Fe-Fe}_3\text{C-Fe}_3\text{P}$ с температурой плавления 950 °С).

Тип матрицы оценивается по шести показателям (типам): феррит (Ф), перлит пластинчатый (Пт1), перлит зернистый (Пт2), троостит (Т), бейнит (Б), мартенсит (М).

Количество перлита пластинчатого (Пт1) и феррита (Ф) оценивается в зависимости от средней площади (%), занимаемой тем и другим на шлифе; в характеристике указывается площадь перлита: П, П96, П92, П85, П77, П45, П20, П6, П0, остальное по умолчанию феррит (Ф).

Дисперсность перлита (Пд) оценивается по пятибалльной шкале путем определения расстояния между соседними пластинами цементита.

Структура ледебурита в отбеленных чугунах оценивается по общей площади включений цементита (%) пятью баллами по шкале от Ц2 до Ц40 и по площади отдельных наиболее крупных включений цементита (мкм^2) пятью баллами по шкале от Ц2000 до Ц25000.

Фосфидная эвтектика оценивается по четырем основным параметрам: строению (Ф1 – Ф5), характеру распределения (Фр1 – Фр3), диаметру ячеек сетки ($\Phi_{\text{разм}250} - \Phi_{\text{разм}1250}$) и средней площади (мкм^2) трех наибольших включений (Фп2000 – Фп25000).

Наряду с формой и размерами графита и составляющих матрицы большое значение имеет размер эвтектического зерна. Границы зерен в чугуне определяются расположением включений фосфидной эвтектики по границам эвтектического зерна обычным травлением. При низком содержании фосфора, когда выявить фосфидную эвтектику практически не удастся, эвтектическое зерно выявляют при травлении на ликвацию кремния. В перлитном чугуне эвтектическое зерно выявляется сеткой цементита Ц или ледебурита Л. Для оценки размеров эвтектического зерна предусмотрено восемь баллов.

Итак, наряду со словесным описанием структуры приводят ряд принятых обозначений, например: чугун Гф1–Г2–Г_{разм}90–Пт1–П20–Пд1,0–Ф3; Фр1–Ф_{разм}400–Фп13000.

Классификация сплавов по их составу и свойствам, области применения. Характеристика служебных и литейных свойств чугуна. Технологические и механические свойства чугуна

Структура серого чугуна состоит из металлической основы и вкрапленных в нее пластинчатых включений графита. Поэтому свойства такого чугуна определяются строением металлической основы и размерами, формой и распределением графитных включений. Графит обладает очень низкими механическими свойствами. Чем больше графитных включений и чем они крупнее, тем меньше прочность чугуна при одной и той же металлической основе.

Графитные включения можно рассматривать как внутренние надрезы, нарушающие целостность металла. Но графит играет и положительную роль:

- улучшает обрабатываемость резанием, делая стружку ломкой;
- повышает износостойкость и антифрикционные свойства чугуна благодаря своему «смазывающему» действию;
- гасит вибрацию и резонансные колебания;
- нарушая сплошность металлической основы и как бы надрезая ее, делает чугун малочувствительным к всевозможным концентраторам напряжений (дефектам поверхности, надрезам, выточкам и т. д.);
- улучшает литейные свойства (высокая жидкотекучесть) и, вследствие графитизации, уменьшает коэффициент усадки чугуна.

Следует отметить также, что графитные включения мало снижают предел прочности при сжатии и твердость, величина которых определяется главным образом металлической основой чугуна. При сжатии чугун претерпевает значительные деформации, и разрушение имеет характер среза под углом 45°. Разрушающая нагрузка при сжатии, в зависимости от качества чугуна и его структуры, в 3–5 раз больше, чем при растяжении. Поэтому чугун рекомендуется использовать для изделий, работающих на сжатие.

Пластинки графита в меньшей мере, чем при растяжении, снижают прочность и при изгибе, так как часть металла испытывает сжимающие напряжения. Предел прочности при изгибе имеет промежуточное значение между пределом прочности на растяжение и на сжатие.

Известно, что литейные, механические, технологические и специальные свойства чугуна зависят от его химического состава, матрицы, формы, количества и характера распределения графита, скорости охлажде-

ния, природы шихтовых материалов и др. Плотность чугуна составляет 6,8–7,5 г/см³, коррозионная стойкость серых чугунов повышается по мере измельчения графита при однофазной матрице, а также при уменьшении содержания кремния, фосфора, серы. Окалиностойкость увеличивается при уменьшении количества графита и его измельчении.

Металлическая основа в серых чугунах обеспечивает наибольшую прочность и износостойкость, если она имеет перлитную структуру. Присутствие в структуре феррита, не увеличивая пластичности и вязкости чугуна, снижает прочность и износостойкость. Поэтому наименьшей прочностью обладает ферритный серый чугун.

Ферритные и феррито-перлитные серые чугуны применяют для менее ответственных деталей, испытывающих небольшие нагрузки при работе.

Перлитные серые чугуны применяют для отливки станин, поршней цилиндров (к ним относятся сталистый и модифицированный серый чугун). Сталистые чугуны (при их выплавлении в шихту добавляют 20–30 % стального лома) отличаются пониженным содержанием углерода, что обеспечивает получение перлитной основы с небольшим количеством графитных включений.

Применяют такие чугуны для деталей, работающих на износ, например для зубчатых колес, тормозных барабанов, цилиндров паровых машин и т. д.

Литейные свойства чугунов. Как уже говорилось выше, чугуны обладают лучшей жидкотекучестью, чем сталь. Определяется жидкотекучесть по спиральной или комплексной пробе. Чем больше углерода и графита, тем лучше жидкотекучесть.

Усадка чугуна самая низкая (0,7–1,3 %). Она зависит от содержания углерода и графита: чем больше углерода выпадает в виде графита, тем меньше усадка. Усадка определяется по пробе Большакова или комплексной пробе.

Механические свойства чугунов. Прочность и твердость чугуна снижаются с увеличением содержания углерода и графита. По сравнению со сталью прочность чугуна ниже.

Прочность чугуна определяется в соответствии со стандартами: механические свойства чугунов – по ГОСТ 27208–87; заготовки для определения механических свойств отливают по ГОСТ 24648–90.

Для определения прочности серого чугуна используют цилиндрические заготовки диаметром $d = 30$ мм и длиной $l = 300$ мм. Эти заготовки получают заливкой специальной пробы на механические свойства.

В ГОСТ 24648–90 дополнительно указываются следующие требования к образцам:

1. При применении термообработки (ТО) отливок, заготовки для определения механических свойств должны проходить ТО вместе с отливками, т. е. условия ТО должны быть одинаковыми.

2. При получении неудовлетворительных результатов испытания, проводят повторные испытания еще на двух образцах.

Определение прочности отливок из высокопрочного чугуна проводят по ГОСТ 1497–84 на одном образце диаметром $d = 14$ мм с расчетной длиной $L_0 = 70$ мм (рис. 5). Для получения образца применяют отдельно отлитые заготовки, форма и размеры которых приведены на рис. 6.

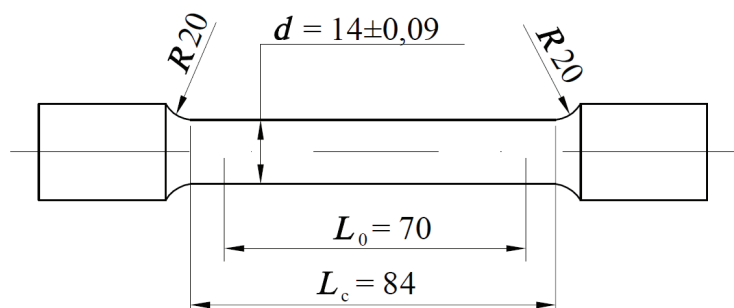


Рис. 5. Образец для определения прочности отливок из высокопрочного чугуна: L_c – рабочая длина образца

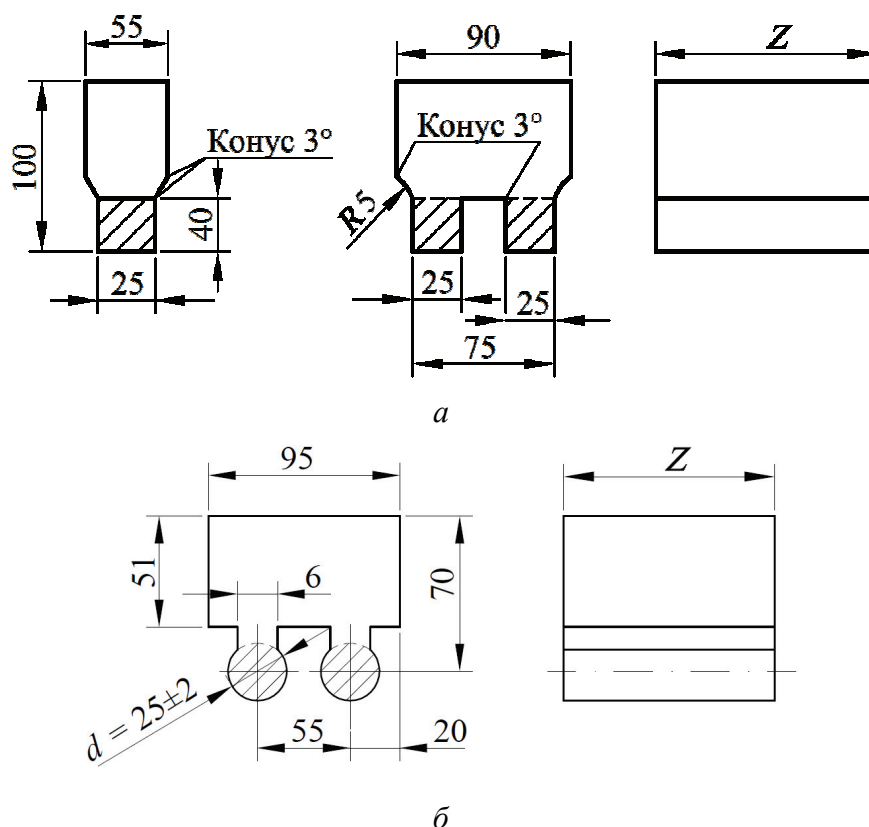


Рис. 6. Форма и размеры литых заготовок для изготовления образцов с различной формой сечения: а – прямоугольная; б – круглая; Z выбирается в зависимости от размера и количества образцов. Заштрихованные участки соответствуют месту вырезки образцов

Определение твердости чугунов с вермикулярным графитом проводят по ГОСТ 27208–87, высокопрочных модифицированных чугунов с шаровидной формой графита – по ГОСТ 24805–81.

Измерение твердости, вследствие быстроты и простоты испытания, а также возможности без разрушения изделия судить о его свойствах, получило широкое применение для контроля качества металла. Существуют несколько методов определения твердости, наиболее распространенными из которых являются метод Бринелля и метод Роквелла.

Определение твердости вдавливанием стального шарика (метод Бринелля) состоит в следующем. В плоскую поверхность металла под постоянной нагрузкой вдавливается стальной твердый шарик. После снятия нагрузки в металле образуется отпечаток (лунка). Число твердости по Бринеллю (НВ) представляет отношение нагрузки к поверхности полученного отпечатка.

Диаметр шарика (D) и нагрузка (P) выбираются в зависимости от состава металла, твердости и толщины испытуемого образца. При испытании стали и чугуна согласно ГОСТ 9012–59* с изменениями от 1979 г., устанавливают $D = 10$ мм и $P = 3\,000$ кг.

Для определения твердости измеряют диаметр (d) лунки и находят по нему число твердости в специальных таблицах (ГОСТ 9012–59*).

Определение твердости по глубине вдавливания алмазного конуса (метод Роквелла). Конус вдавливается двумя последовательными нагрузками: предварительной $P_0 = 10$ кг и основной $P_1 = 140$ кг (шкала С). Твердость по Роквеллу измеряется по глубине отпечатка конуса в условных единицах, обозначается, например, 60HRC и может быть пересчитана в единицы НВ по специальным таблицам.

Определение отбела чугуна. Для определения склонности чугуна к отбелу применяют клиновую пробу или пробу с подкалом. Использование пробы с подкалом дает более точные и стабильные результаты.

Влияние химического состава чугуна на его свойства

Углерод в чугуне обычно находится в виде графита, твердых растворов и карбидов.

С увеличением содержания углерода увеличивается количество графита, уменьшается объем усадочных раковин и пористость. Это происходит вследствие того, что понижение температуры вызывает уменьшение объема на 1,1–1,8 % на каждые 100 °С. Графитизация чугуна, наоборот, дает увеличение объема на 2,2 % на 1 % выделившегося графита (т. е. часть возможной усадки компенсирует объем графита). В связи с этим усадка для серых чугунов низких марок (СЧ10, СЧ15) составляет 0,7–1,0 %, для СЧ30 и СЧ35 – выше 1,0–1,3 %.

С увеличением содержания углерода резко повышается жидкотекучесть чугуна, уменьшается склонность к отбелу, предел прочности при растяжении (σ_b) уменьшается.

Кремний действует так же, как углерод, но менее значим. С увеличением содержания кремния укрупняется графит, уменьшается склонность

к отбелу. Вследствие того что химическая связь Fe–Si больше, чем Fe–C, растворимость углерода в жидком чугуна уменьшается. Таким образом, кремний является сильнейшим графитизатором. Не случайно графитизирующие модификаторы чугуна содержат кремний, например ферросилиций или силикокальций.

С увеличением содержания кремния матрица чугуна из перлитной превращается в ферритную, а графит в структуре укрупняется (т. е. выделяется в более грубой форме).

Кремний повышает износо- и окалинстойкость чугуна.

Поскольку углерод и кремний во многом действуют в одном направлении, их воздействие следует учитывать одновременно. Оно оценивается диаграммой Маурера (рис. 7).

Марганец способствует образованию перлитной матрицы: он стабилизирует перлит и увеличивает его дисперсность. Марганец увеличивает растворимость углерода в чугуне и тормозит графитизацию. При содержании в чугуне более 1,5 % марганца увеличивается склонность к отбелу.

Установлено, что с повышением содержания марганца на 1 % σ_B увеличивается на 10 %, а твердость – на 15 ед. При этом обрабатываемость отливок резко ухудшается и повышается склонность к образованию трещин.

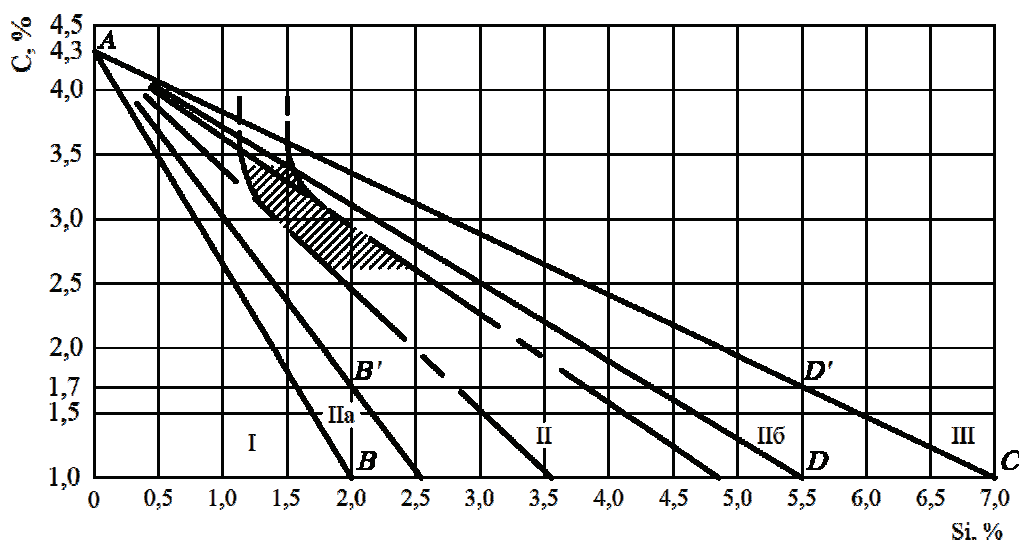


Рис. 7. Диаграмма Маурера: I – белый чугун; II – серый перлитный чугун; IIб – серый перлитно-ферритный чугун; III – серый ферритный чугун; — — — левая пограничная линия области перлита для отливок с толщиной стенок около 10 мм; — — — правая пограничная линия области перлита для отливок с толщиной стенок около 10 мм; // область перлитной структуры

Марганец вводится в чугун:

- для устранения вредного влияния серы (образует MnS);
- как легирующий элемент для улучшения свойств чугуна.

Сульфид марганца MnS имеет высокую температуру плавления ($1620\text{ }^{\circ}C$) и обычно присутствует в сплаве в виде обособленных включений. Сульфид железа FeS относительно легкоплавок ($1193\text{ }^{\circ}C$) и при избытке серы образует при температуре $985\text{ }^{\circ}C$ легкоплавкую эвтектику $Fe-FeS$, которая располагается по границам зерен, затвердевая позже, чем основная масса металла. В результате в отливках появляются краснеломкость и трещины. Понятно, что MnS является гораздо менее вредным соединением, чем FeS или эвтектика $Fe-FeS$, поэтому на практике в чугунах и сталях стремятся иметь достаточное количество марганца для связывания всей серы и не допустить образования сульфида железа.

Хром является сильнейшим карбидообразующим элементом. При этом резко повышается твердость (при увеличении хрома на 1 % возрастает на 100 ед.) и прочность чугуна, а также его износостойкость и жаропрочность.

Хром, увеличивая растворимость углерода в жидком чугуне, резко повышает склонность чугуна к отбелу. В обычных чугунах содержится до 0,3 % хрома.

Сера является примесным элементом, но оказывает сильное влияние на свойства чугуна и структурообразование. Она тормозит графитизацию, являясь отбеливающим элементом, снижает жидкотекучесть и твердость.

В чугуне сера (при отсутствии марганца) находится в виде FeS , т. е. в связанном состоянии, что охрупчивает структуру чугуна, так как Fe , Fe_3C и FeS образуют тройную эвтектику, ослабляющую связи между зернами матрицы.

Сера влияет на форму и размеры графита. С увеличением ее содержания пластинчатый графит утончается и удлиняется. Сера препятствует образованию шаровидного графита: она выступает в роли демодификатора, т. е. размодифицирует структуру. Установлено, что при содержании серы больше 0,04 % получить графит в шаровидной форме нельзя.

В обычных серых чугунах вредное влияние серы нейтрализуют введением марганца, которого по отношению к сере должно быть $Mn/S = 3,5-5$ и даже 7. При введении марганца в чугун содержание серы в чугуне не уменьшается, изменяются форма состояния серы в чугуне и распределение сульфидов. Сера равномерно распределяется по всему объему.

Фосфор в чугуне находится в виде фосфидной эвтектики ($Fe-Fe_3C-Fe_3P$ с температурой плавления $950\text{ }^{\circ}C$), которая, обладая низкой температурой плавления, располагаясь по границам эвтектических зерен, ослабляет тем самым силы связи между зернами.

Фосфор повышает жидкотекучесть, понижает вязкость чугуна, улучшает смачиваемость стенок формы. Но с увеличением содержания фосфора возрастает склонность к образованию трещин (из-за образования фосфидной эвтектики).

Прочность при растяжении возрастает при увеличении содержания фосфора до 0,7–0,8 %, затем резко падает.

Фосфор в чугун часто вводят специально, с целью повышения жидкотекучести сплава (особенно для тонкостенных отливок в художественном литье).

Углеродный эквивалент и степень эвтектичности

Ввиду того что чугун – это многокомпонентный сплав, для практического применения считаются удобными характеристики *углеродный эквивалент* (C_E) и *степень эвтектичности* ($S_{эвт}$), которые позволяют определить для каждого химического состава чугуна положение относительно точки эвтектики.

Выражаются C_E и $S_{эвт}$ в процентах и показывают эквивалентное (или приведенное) содержание углерода, учитывающее влияние других элементов чугуна на степень его эвтектичности.

Углеродный эквивалент можно рассчитать по формулам

$$C_E = [\% C] + \frac{[\% Si]}{3},$$

$$C_E = [\% C] + \frac{[\% Si] + [\% P]}{3},$$

$$C_E = [\% C] + 0,31[\% Si] + 0,33[\% P] + 0,4[\% S] - 0,27[\% Mn],$$

где $[\% C]$, $[\% Si]$, $[\% P]$, $[\% S]$, $[\% Mn]$ – процентное содержание в чугуне углерода, кремния, фосфора, серы и марганца соответственно.

При $C_E = 4,2\text{--}4,3$ % чугун считается эвтектическим, при $C_E < 4,2$ – доэвтектическим, а при $C_E > 4,26$ – заэвтектическим.

Углеродный эквивалент можно определить термографическим методом по кривой охлаждения чугуна, на которой фиксируются температуры ликвидуса и солидуса.

Степень эвтектичности рассчитывается по формулам

$$S_{эвт} = \frac{[\% C]}{4,23 - \frac{[\% Si]}{3,2}},$$

$$S_{эвт} = \frac{[\% C]}{4,23 - \frac{[\% Si]}{3,2} - \frac{[\% P]}{3}}.$$

Чугун считается доэвтектическим при $S_{эвт} < 1$, эвтектическим – при $S_{эвт} = 1$, заэвтектическим – при $S_{эвт} > 1$.

Эвтектичность определяет структуру чугуна и его важнейшие механические свойства.

Необходимо учитывать, что углеродный эквивалент и степень эвтектичности являются скорее литейными, чем металлографическими характеристиками. При содержании углерода более 4,3 % степень эвтектичности $S_{эвт}$ становится больше 1,0 (100 %), хотя доля эвтектики в сплаве падает. В легированных чугунах углеродный эквивалент будет более сложным образом зависеть от содержания других элементов. Например, многие высокоуглеродистые среднелегированные инструментальные стали по структурному типу являются чугунами (имеют в структуре эвтектику).

В настоящее время разработаны более сложные формулы расчета состава, учитывающие влияние марганца, кремния и других элементов на структуру и свойства чугуна.

Контрольные вопросы и задания

1. Какова область применения отливок из чугуна?
2. Какие современные способы плавки чугуна вам известны?
3. Какие компоненты входят в состав чугуна?
4. Какова роль эвтектического превращения в формировании структуры чугуна?
5. Перечислите структурные превращения при кристаллизации доэвтектических, эвтектических и заэвтектических чугунов.
6. Какой цементит называют первичным, а какой вторичным?
7. Что такое перлит? Каковы его состав, строение, свойства?
8. Расскажите о превращениях, протекающих в твердом состоянии при кристаллизации чугуна.
9. Классифицируйте чугуны по виду углерода и форме графита.
10. Какая стадия графитизации называется первичной?
11. Какова роль включений графита в структуре чугуна?
12. Каково влияние химического состава на литейные и механические свойства чугуна?
13. Для получения каких отливок применяют перлитные серые чугуны?
14. Какие заготовки используют для определения прочности серого чугуна?
15. Какова усадка серого чугуна?
16. Перечислите методы определения твердости чугуна.
17. Каково влияние углерода на жидкотекучесть чугуна и его склонность к отбелу?
18. Каково влияние кремния на свойства чугуна?
19. Для каких целей в чугун вводят марганец?
20. Можно ли получить графит в шаровидной форме, если содержание серы в металле будет более 0,04 %?
21. Для каких целей используют такие обобщенные характеристики, как углеродный эквивалент и степень эвтектичности?