

669
Л12
Министерство высшего и среднего специального образования БССР

**БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С.М.КИРОВА**

Кафедра материаловедения и технологии металлов

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ"

для студентов спец. 0516, 0519, 0562

Часть I

**Составители: Н.А.Свидуневич,
И.М.Урбанек,
А.И.Гарост**

Минск 1985

УДК 621.7;669.017

Рассмотрен и рекомендован к изданию Редакционно-издательским советом института.

Составители: Н.А.Свидуневич,
Ж.М.Урбанек, А.И.Гарост.

Научный редактор А.Ф.Дулевич,
доцент.

Рецензенты: Ю.В.Соколов, доцент
кафедры материаловедения и ли-
тейного производства (БПИ);
лаборатория материаловедения
ФТИ АН БССР.

В первой части практикума приведены лабораторные
работы по разделам "Стали" и "Чугуны".

Л 2106000000 - 060 15-85
М 339 - 85

© Белорус. ордена Трудо-
вого Красного Знамени
технол. ин-т им.С.М.
Кирова, 1985.



ВЫДАНЕ

Задачей курса "Материаловедение" является изучение строения и свойств материалов (прежде всего металлических), используемых в машиностроении, для получения навыков правильного применения при создании надежных, долговечных в эксплуатации и экономичных конструкций. В связи с этим в данном разделе представлены работы по основным металлическим материалам - сталям и чугунам, их классификация и области применения.

Практикум подготовлен в соответствии с примерным перечнем лабораторных работ по курсу "Материаловедение" согласно программе, утвержденной учебно-методическим управлением по высшему образованию 22.07.83г.

Студенты самостоятельно до проведения работы изучают теоретический материал по каждой теме, используя настоящий практикум и другие источники, рекомендуемые преподавателем, и после собеседования допускаются к выполнению работы. По каждой работе должен быть представлен отчет в соответствии с указанными требованиями.

Лабораторная работа №1 ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы: изучение микроструктуры и свойств углеродистых сталей в отожженном (равновесном) состоянии; их классификация по структуре и применению.

Приборы и материалы: коллекция протравленных (4%-ным раствором HNO_3 в спирте) микрошлифов отожженных углеродистых сталей и металлографический микроскоп ММУ-3.

1. Теоретическая часть

Равновесным называется состояние, в котором в конце концов приходит термодинамическая система, находящаяся при неизменных внешних условиях (температуре и давлении), и при котором нет тенденции к какому-либо изменению.

Для изучения строения, превращений и свойств сплавов в материаловедении существуют понятия фаз, структуры и системы.

Системой называют совокупность фаз, находящихся в состоянии равновесия. Фаза - однородная часть системы, отличающаяся определенными составом, свойствами, одно и то же агре-

Чуждое состояние и отделенная от остальных ее частей поверхность раздела. (Однородный жидкий металл или сплав является однофазной системой. Состояние, когда одновременно присутствуют жидкий сплав (металл) и кристаллы, представляет двухфазную систему. Если в твердом состоянии сплав содержит зерна металлической матрицы и частицы карбидов, то он также двухфазный.) Под структурой понимают форму, размеры и характер взаимного расположения соответствующих фаз; структурная составляющая – элемент структуры (обособленная часть сплава) с одинаковым строением (из одной или более фаз) и присущими ему характерными особенностями.

Равновесное состояние сплава – такое, когда все фазовые превращения в нем полностью закончились в соответствии с диаграммой состояния, показывающей, какие при данных условиях существуют равновесные фазы (т.е. с минимумом свободной энергии), что достигается только медленным охлаждением. Следовательно, основой для определения фазовых и структурных составляющих железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов) в равновесном состоянии является диаграмма железо-углерод. Основоположник ее – русский ученый, "отец металлографии железа" Д.К.Чернов – впервые в 1868 г. установил в стали критические точки и их зависимость от содержания углерода, т.е. было дано первое представление о диаграмме железо-углерод, а позже изображены графически очерченные важнейших линий.

1.1. Компоненты, их взаимодействие и примеси железоуглеродистых сплавов

Основные компоненты сталей и чугунов – железо и углерод.

Железо – металл серебристо-белого цвета, атомный радиус – 0,127 нм ($1 \text{ нм} = 10^9 \text{ \AA} = 10^{-7} \text{ см}$). В чистом железе, которое можно получить в настоящее время, 99,999% железа, а технически чистое железо армо – содержит 99,8–99,9% железа и производится для электротехнических целей. Температура плавления железа 1539°C (т.А, рис.1). В твердом состоянии оно может быть в двух полиморфных модификациях: α и γ .

α – железо существует при температурах ниже 911°C (т.Г) и выше 1392°C (т.Н) (рис.1). В интервале температур 1392 – 1539°C α – железо обозначают как δ – железо. Кристаллическая решетка α -железа – объемноцентрированный куб с

Периодом 0,28 606 нм, плотность его 7,68 г/см³. Ниже 768°С α -железо магнитно (ферромагнитно). Критическую точку М, соответствующую магнитному превращению, называют точкой Кюри и обозначают A_2 . Магнитные свойства железа сильно зависят от его чистоты и режимов термической обработки.

γ -железо существует в интервале температур 911-1392°С; оно парамагнитно. Кристаллическая его решетка - гранецентрированный куб с периодом 0,3645 нм. Плотность γ -железа выше, чем α -железа, и равна 8,0-8,1 г/см³, т.е. превращение $\alpha \rightarrow \gamma$ сопровождается сжатием (примерно на 1,0%). Критическую точку $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ -превращения при 911°С обозначают как A_3 (при нагреве) и A_7 (при охлаждении), а при 1392°С - как A_4 (при нагреве) и A_2 (при охлаждении).

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

Углерод - неметаллический элемент, плотность 2,5 г/см³, температура плавления 3500°С, атомный радиус 0,077 нм. Он растворим в железе в жидком и твердом состояниях, а также образует с ним химическое соединение - цементит (карбид железа Fe_3C). Растворимость углерода в железе в твердом состоянии зависит от кристаллического строения железа: в α -железе она менее 0,02% и в 100 раз больше (до 2,14%) в γ -железе, в центре кристаллической решетки которого - поры диаметром 0,102 нм.

Кроме основных компонентов, железоуглеродистые сплавы содержат различное количество примесей, которые делят на постоянные (или обыкновенные), скрытые, случайные и специальные (легирующие).

К постоянным примесям относят марганец, кремний и алюминий, вводимые для раскисления (в кипящей стали содержание кремния и алюминия невелико). К этой группе относят серу и фосфор, от которых полностью освободиться при массовом производстве невозможно. Содержание постоянных примесей в стали обычно находится в следующих пределах, %: 0,3-0,7 Mn; 0,17-0,37 Si (в кипящей до 0,03 Si); 0,01-0,02 Al; 0,01-0,05 P; 0,01-0,04 S.

К числу примесей скрытых относят кислород, водород и азот, присутствующие в любой стали в малых количествах.

Случайными примесями являются мышьяк, свинец и другие элементы, переходящие в расплав из шихтовых материалов - легированного металлического лома (Св, Ni и др.) или попадающие случайно.

Специальные (легирующие) элементы вводят для получения нужных (по условиям эксплуатации деталей) свойств. Легированной считают сталь со специально введенными легирующими элементами для существенного изменения определенных свойств по сравнению с углеродистой. Легированной также является сталь с содержанием кремния более 0,5%, а марганца - более 1%.

Небольшое количество примесей влияет на формирование структуры и свойства железоуглеродистых сплавов, но не оказывает существенного влияния на положение критических точек и характер линий диаграммы состояния. Поэтому состав и структура медленно охлажденных сплавов достаточно точно согласуются с диаграммой железо-углерод, построенной для чистых от примесей сплавов, и определяются содержанием углерода.

1.2. Диаграмма железо-углерод, фазы и структурные составляющие железоуглеродистых сплавов.

В зависимости от внешних условий углерод в равновесии с жидким или твердым растворами железа может находиться в виде графита и цементита (карбида железа). Наиболее устойчивым из них является графит (обладает меньшей свободной энергией), но кинетически легче кристаллизуется цементит (работа образования его зародыша меньше, как и необходимые для этого диффузионные изменения). Поэтому, если кинетические условия позволяют, то образуются структуры с графитом, если нет - то с цементитом.

Цементит - неустойчивое химическое соединение: при достаточно высоких температурах и длительной выдержке он диссоциирует с выделением кристаллов графита, причем неустойчивость его возрастает с повышением содержания углерода. В сплавах с относительно низким содержанием углерода (стали) цементит достаточно устойчив, и графит в них может появиться лишь после длительного пребывания тысяч часов при температурах 500-700 °C. В сплавах с

высоким содержанием углерода (чугунах) графит часто образуется при медленном охлаждении или при нагреве и относительно кратковременной выдержке при повышенной температуре. Поэтому существует два варианта диаграммы железо-углерод (рис. I): железо-цементит (метастабильная), полученная при относительно небольших скоростях охлаждения (несколько градусов в минуту), и железо-графит (стабильная), полученная при очень медленном охлаждении. Система железо-графит является более близкой к состоянию полного равновесия, чем железо-цементит, но последняя (сплошными линиями) имеет большее практическое значение (с помощью ее объясняют превращения в сталях и белых чугунах, определяют оптимальные режимы термообработки), так как образование цементита более вероятно при наиболее часто применяемых скоростях охлаждения.

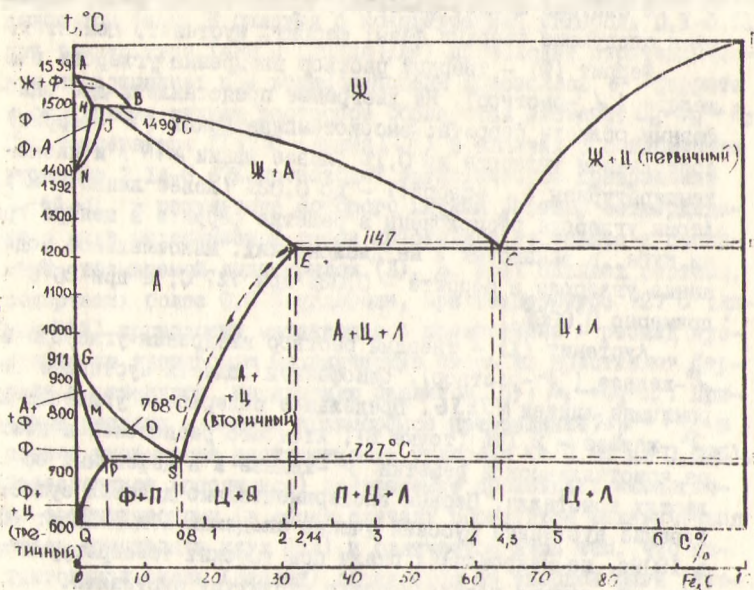


Рис. I. Диаграмма состояния железо-углерод.

Диаграмма состояния железо-углерод ограничена содержанием углерода до 6,67%, так как сплавы, содержащие более 6,67% углерода, не представляют практического интереса. Цифра 6,67% взята потому, что при таком количестве углерода об-

зует с железом химическое соединение Fe_3C (цементит), которое может рассматриваться как самостоятельный компонент и служит естественным пределом диаграммы.

Преобразования в металлах и сплавах, как известно, происходят только при некотором их переохлаждении (перенагреве) ниже (выше) температуры равновесного состояния (для создания термодинамически выгодных условий развития процесса), поэтому о необходимости переохлаждения для начала процессов превращения в дальнейшем не упоминаем.

Углерод при содержании его в количестве до 6,67% неограниченно растворяется в жидком железе, т.е. выше линии $ABCD$ (ликвидус) все сплавы однофазны (фаза - жидкий раствор). Первичная кристаллизация их происходит в интервале температур между линиями ликвидус $ABCD$ и солидус $AHJECF$.

В системе железо-цементит, кроме жидкой фазы, образуются следующие твердые фазы: феррит, аустенит, цементит.

Феррит (F) - твердый раствор внедрения углерода в α -железе (α -раствор). На диаграмме представлены две однофазные области феррита: высокотемпературная (F -феррит) с содержанием углерода до 0,1% (левее линии AHN) и низкотемпературная (α -феррит) - до 0,02% (левее линии GPQ). Атомы углерода расположены в решетке феррита в центре грани куба, в вакансиях и на дислокациях. Максимальное содержание углерода в феррите - 0,02% при $727^\circ C$, а при $20^\circ C$ - примерно 0,006%.

Аустенит (A) - твердый раствор внедрения углерода в γ -железе (γ -раствор). Однофазная область аустенита ограничена линией $NJESG$. Предельное содержание углерода в γ -железе - 2,14% (точка E). Атом его расположен в центре кристаллической решетки γ -железа и в дефектных областях кристалла. Первым экспериментально доказал существование аустенита русский ученый академик А.А. Байков: он в 1909г. на микрошлифах стали при высоких температурах в вакууме выявил полиэдрическую структуру аустенита.

Цементит (C) - химическое соединение железа с углеродом - карбид железа (Fe_3C). Содержит 6,67% углерода; ему соответствует правая ордината диаграммы (линия $DFKL$). Имеет сложную орторомбическую решетку с плотной упаковкой атомов. Температура плавления точно не определена в связи

с возможностью его распада и принимается равной примерно 1500°C (по некоторым данным 1250°C). Цементит образуется в жидкой и твердой фазах: выделяющийся из жидкой фазы (при кристаллизации) называется первичным, из аустенита - вторичным, из феррита - третичным. До 217°C цементит ферромагнитен.

Таким образом, диаграмма имеет три однофазные области (жидкого раствора, феррита и аустенита), а все остальные являются двухфазными: область ABN - жидкий раствор и кристаллы феррита; HJN - кристаллы феррита и аустенита; $JBCF$ - жидкий раствор и кристаллы аустенита; CDF - жидкий раствор и кристаллы цементита; $SECFK$ - кристаллы аустенита и цементита; $QPSKL$ - кристаллы феррита и цементита.

Горизонтальные линии диаграммы соответствуют температурным и концентрационным условиям, когда в равновесии находятся три фазы. В сплавах с концентрацией углерода $0,1-0,51\%$ при температуре 1499°C (линия HJB) происходит перитектическое превращение: при взаимодействии кристаллов δ -феррита с окружающим жидким раствором образуется аустенит $L_{\delta} + \Phi_{\delta} \rightarrow A_{\gamma}$. При температуре 1147°C (линия ECF) в сплавах с содержанием углерода $2,14-6,67\%$ происходит эвтектическое превращение $L_{\epsilon} \rightarrow A_{\epsilon} + C$, в результате которого жидкий раствор затвердевает в виде механической смеси кристаллов аустенита и цементита, называемой ледебуритом (L). Во всех сплавах системы, содержащих более $0,02\%$ углерода, при температуре 727°C (линия PSK) происходит эвтектоидное превращение - распад аустенита на дисперсную механическую смесь из кристаллов феррита и цементита, называемую перлитом (P): $A_{\gamma} \rightarrow \Phi_{\gamma} + C$. Причиной распада является полиморфное превращение $Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$ и резкое уменьшение растворимости углерода (с $0,8\%$ до $0,02\%$). Эвтектоидное (перлитное) превращение происходит аналогично эвтектическому (в обоих случаях образуется механическая смесь кристаллов двух фаз) и отличается лишь тем, что эвтектоидная смесь (перлит) образуется из твердой фазы (аустенита), а не из жидкой, как эвтектическая (ледебурит).

Следовательно, железо при взаимодействиях с углеродом образует (в определенных интервалах температур и концентраций последнего) следующие фазовые составляющие: жидкий расплав (L), твердые растворы - аустенит (A) и феррит (Φ), химическое соединение - цементит (C); структурными же мо-

гут быть указанные фазы и образуемые ими механические смеси — перлит (П) и ледебурит (Л). Как видим, структурное состояние железоуглеродистых сплавов сложнее, чем фазовое, так как кристаллические фазы, во-первых, образуют сложные структурные составляющие — эвтектику и эвтектоид; во-вторых, с понижением температуры уменьшается растворимость в них углерода.

У всех сплавов, содержащих углерода менее 2,14%, при первичной кристаллизации образуется твердый раствор — аустенит, а более 2,14% — структуре состоит из механической смеси — ледебурита с избыточным аустенитом или цементитом. Такое различие в структуре при высоких температурах создает существенное различие в технологических и механических свойствах этих сплавов. Наличие хрупкой эвтектики делает сплав нековким и исключает обработку его давлением. Однако высокоуглеродистые сплавы имеют низкую температуру плавления, и их применяют как литейный материал. Это различие в технологических свойствах — причина того, что содержание углерода 2,14% является границей, которая делит железоуглеродистые сплавы на две группы — стали и чугуны. Следовательно, количество углерода в железоуглеродистых сплавах определяет их структуру и свойства, поведение при производстве, обработке и в эксплуатации.

1.3. Фазовые превращения в углеродистых сталях при медленном охлаждении

Железоуглеродистые сплавы с концентрацией углерода до 0,02% называют железом, от 0,02 до 2,14% — сталями; углеродистые из них те, в состав которых специально введен только один элемент — углерод.

Кристаллизация сталей, содержащих менее 0,5% углерода, начинается при температурах, соответствующих линии АВ, содержащих до 0,1% углерода с образованием δ -феррита. Кристаллизация сплавов с 0,1–0,5% углерода начинается с образования δ -феррита, который при перитектической температуре (линия HJB), взаимодействуя с жидким раствором, образует δ^* -твердый раствор (аустенит): $L_2 + \delta_1 \rightarrow A_2$. Перитектическое превращение в сплавах, содержащих 0,1–0,16% углерода, идет до исчезновения жидкой фазы, а с содержанием 0,16–0,51% углерода — до исчезновения δ -феррита. При дальней-

С понижением температуры в сплавах с содержанием углерода 0,1-0,16% происходит перекристаллизация в аустенит оставшегося феррита, а с большим (0,16-0,51%) содержанием углерода кристаллизация оставшегося жидкого раствора в аустенит. Ниже линий NI и JE все эти сплавы одной фазы.

Стали, содержащие 0,51-2,14% углерода, начинают кристаллизоваться с образования аустенита, температурный интервал их кристаллизации определяется линиями BC и JE .

Таким образом, после затвердевания у всех сталей одна фаза структура (аустенит) и дальнейшие фазовые изменения в них связаны с полиморфизмом железа и уменьшением растворимости углерода в аустените и феррите с понижением температуры. Перестройка решетки чистого железа ($\gamma \rightarrow \alpha$) происходит при температуре $911^{\circ}C$ (точка G), но сплавы, содержащие до 0,02% углерода (точка P), испытывают полиморфное ($\gamma \rightarrow \alpha$) превращение при охлаждении в интервале температур между линиями GS и GP . Превращение идет путем образования и роста зародышей феррита по границам аустенитного зерна и поглощения ими зерен аустенита. При температуре ниже линии GP существует только феррит, дальнейшее охлаждение которого (ниже линии PQ) сопровождается выделением цементита третичного в связи с уменьшением растворимости углерода в феррите при понижении температуры; располагается он в виде сетки по границам ферритных зерен.

В сталях, содержащих свыше 0,02% углерода, $\gamma \rightarrow \alpha$ - превращение начинается при более низких (линия GS) температурах (достигших $727^{\circ}C$ при содержании углерода 0,8%) образованием зародышей феррита, которые растут, превращаясь в зерна. При этом количество аустенита уменьшается, а содержание в нем углерода возрастает, так как образующийся феррит почти не содержит углерода ($< 0,02\%$). При $727^{\circ}C$ содержание углерода в аустените достигает 0,8% (точка S) и полиморфное превращение заканчивается эвтектоидной реакцией - распадом аустенита с одновременным выделением из него феррита и цементита, образующих механическую смесь - перлит.

Чем больше в стали углерода, тем меньше в ее структуре избыточного (ранее выделившегося) феррита и больше перлита. При содержании углерода 0,8-0,7% феррит выделяется в

виде оторочки вокруг перлита (ферритная сетка). В стали, содержащей 0,8% углерода, ~~где~~ превращение идет при постоянной температуре (727°C) и весь аустенит превращается в перлит. В сталях, содержащих 0,8-2,14% углерода, при понижении температуры (ниже линии ES) аустенит становится пересыщенным углеродом и из него выделяется вторичный цементит. По мере выделения цементита концентрация углерода в аустените уменьшается и при температуре 727°C аустенит, содержащий 0,8% углерода, превращается в перлит. Вторичный цементит располагается в виде сетки по границам бывших зерен аустенита. Количество избыточного (вторичного) цементита в стали возрастает с увеличением содержания углерода.

Таким образом, фазовый состав медленно охлажденных сталей независимо от содержания в них углерода при нормальной температуре одинаков и включает феррит и цементит.

1.4. Структура и механические свойства отожженных углеродистых сталей

Фазовые превращения в сталях при охлаждении их из аустенитной области совпадают с превращениями при отжиге, т.е. при нагреве сталей до аустенитного состояния и последующем медленном охлаждении вместе с печью. Поэтому основой для определения структурных составляющих углеродистых сталей в отожженном состоянии является диаграмма железо-углерод (рис.1), согласно которой их делят на доэвтектоидные со структурой феррита и перлита (содержащие до 0,8% углерода), эвтектоидные со структурой перлита (0,8% углерода) и заэвтектоидные со структурой перлита и цементита вторичного (более 0,8% углерода), и в соответствии с этой классификацией (в зависимости от содержания углерода) рассматривают их структуру и свойства.

Техническое железо содержит до 0,02% углерода и бывает двух- и однофазным сплавом. Структура его при содержании углерода до 0,01% состоит только из феррита (рис.2а), а при 0,01-0,02% углерода - из феррита и небольшого количества третичного цементита по границам ферритных зерен (рис.2б). Сетка третичного цементита видна только в низкоуглеродистых сталях ($C < 0,02\%$) после очень медленного их охлаждения. Под микроскопом феррит представляет собой светлые зерна неодинаковой яркости из-за их разной триви-

мости вследствие анизотропии свойств.

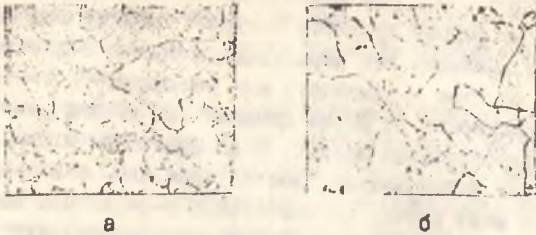


Рис.2. Микроструктура феррита (а) и феррита с третичным цементитом.

Феррит – самая пластичная и мягкая структурная составляющая. Механические свойства его зависят от степени чистоты и величины зерна и составляют: σ_b – предел прочности – 180–250 МПа; σ_T – предел текучести – 90–170 МПа; δ – относительное удлинение – 30–50%; ψ – относительное сужение – 70–80%; a_n – ударная вязкость – 1,8–2,5 МДж/м²; НВ – твердость по Бринелю – 45–80.

Стали с содержанием углерода 0,02–0,8% и структурой из зерен феррита (светлые) и перлита (темные) называют доэвтектоидными. Перлит в структуре появляется только при наличии в стали углерода свыше 0,02% (рис.3).

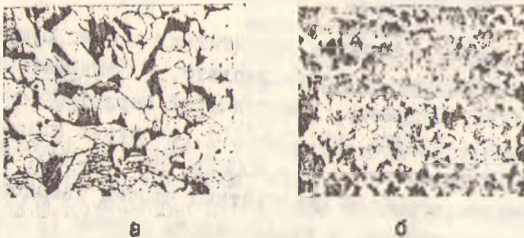


Рис.3. Микроструктура стали 20 (а) и стали 45 (б).

Перлит – эвтектоидная механическая смесь двух фаз (пластинок или зернышек феррита и цементита) образуется при медленном охлаждении ниже 727°C в результате диффузионного распада аустенита, содержащего 0,8% углерода, т.е. содержание углерода в перлите всегда постоянно и равно 0,8%. При изготовлении шлифа цементит, значительно более твердый, чем феррит, сошлифовывается меньше и выступает над поверх-

костью феррита, что еще более усиливает последующее травление, так как феррит травится быстрее. Поэтому под микроскопом перлит выглядит как чередующиеся темные и светлые полоски (более светлые - цементит) или зернышки.

В зависимости от формы цементитных частиц различают зернистый и пластинчатый перлит. В пластинчатом - цементит и феррит имеют форму мелких пластин (рис. 4а), а в зернистом - цементит в виде зерен, расположенных в ферритной основе (рис. 4б). Обе указанные формы цементита - продукты диффузионного превращения аустенита, причем пластинчатая возникает из однородного аустенита, а зернистая - из неоднородного. Размер цементитных частиц зависит от скорости охлаждения аустенита, с увеличением которой они уменьшаются.

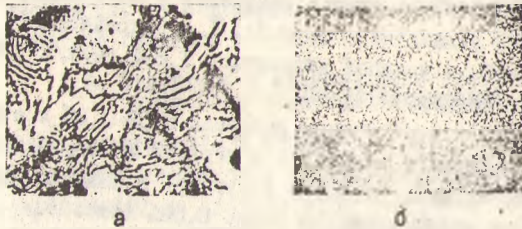


Рис. 4. Микроструктура стали с пластинчатым (а) и зернистым (б) перлитом.

От формы и размера цементитных частиц существенно зависят механические свойства перлита, а следовательно, и свойства стали. Например, пластинчатый перлит более прочен и тверд ($\sigma_b = 820 \text{ МПа}$, НВ 200-250), но менее пластичен ($\delta = 15\%$), чем зернистый ($\sigma_b = 630 \text{ МПа}$, НВ 160-220, $\delta = 20\%$). С уменьшением размеров цементитных частиц твердость и прочность перлита возрастают, а пластичность падает (у крупнопластинчатого перлита $\sigma_b = 550 \text{ МПа}$ и $\delta = 5\%$).

В доэвтектоидных сталях количественное соотношение между перлитом и ферритом зависит от содержания углерода, с увеличением которого пропорционально возрастает количество перлитной составляющей (рис. 3). Поэтому, считая, что феррит практически не содержит углерода, а в структуре перлита его 0,8%, можно приблизительно определить содержание углерода в любой доэвтектоидной стали по соотношению площадей феррита и перлита. Для этого определяют площадь (в %), занимаемую

перлитом, и умножают ее на 0,8. Возрастание в структуре доли перлитной составляющей повышает твердость и прочность, но снижает пластичность стали из-за увеличения количества цементитной фазы.

Сталь с содержанием 0,8% углерода называют эвтектоидной. Ее структура состоит из одной структурной составляющей - перлита (рис.4). Твердость и прочность эвтектоидной стали выше, чем доэвтектоидной, а пластичность ниже по той же причине - повышается количество цементита.

Стали с содержанием углерода от 0,8 до 2,14% называют заэвтектоидными. Структура их состоит из перлита (темные зерна) и цементита вторичного, выделившегося из аустенита в связи с уменьшением растворимости в нем углерода при охлаждении. Вторичный цементит располагается в виде сетки или вытянутых зерен (цепочкой) по границам бывших зерен аустенита и под микроскопом обычно выглядит светлым (рис.5).



Рис.5. Микроструктура стали У12 (перлит + цементит вторичный).

В сомнительных случаях (когда, например, в доэвтектоидных сталях с содержанием углерода близким к 0,8% феррит также образует светлую сетку по границам зерен перлита) выделившуюся фазу определяют травлением пикратом натрия, от которого цементит темнеет, а феррит по-прежнему остается светлым.

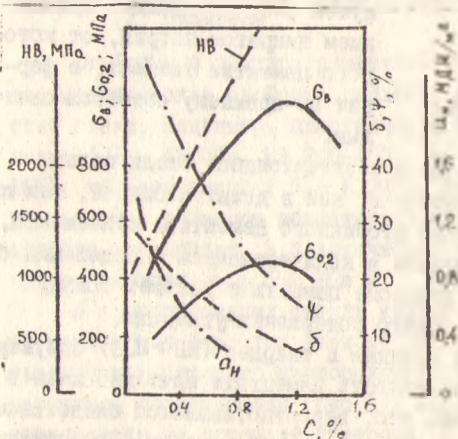
Содержание углерода в заэвтектоидной стали нельзя определять таким же способом, как в доэвтектоидной, так как узнать точное количество вторичного цементита невозможно, и даже небольшая погрешность в количественном определении богатого по содержанию углерода цементита вызовет большую ошибку в определении общего содержания углерода.

Цементит - самая хрупкая и твердая ($HB > 800$) структурная составляющая. Пластичность цементита ничтожно мала и практически равна нулю, что, вероятно, является следствием сложного строения его кристаллической решетки. Цементитная сетка в структуре стали снижает ее пластичность, а твердость увеличивает. Поэтому с возрастанием количества вторичного

цементита в структуре заэвтектоидной стали (что обычно пропорционально увеличению концентрации в ней углерода) твердость ее повышается, а пластичность падает.

Таким образом, свойства стали после медленного охлаждения определяются свойствами ее структурных составляющих и их количественным соотношением. Структура же стали состоит из перлита с избыточным или ферритом, или цементитом, в зависимости от количества в ней углерода. Следовательно, именно содержание углерода в стали определяет ее механические и технологические свойства - прочность, твердость, пластичность, вязкость,

Количество цементита в структуре стали возрастает прямо пропорционально содержанию углерода, а как указывалось выше, твердость цементита $HV > 800$ (8000-8500 МПа) на порядок больше твердости феррита $HV 45-80$ (450-800 МПа). Кроме того, частицы цементита повышают сопротивление движению дислокаций, т.е. повышают сопротивление деформации, уменьшают пластичность и вязкость. Вследствие этого с увеличением в стали содержания углерода до 1,0% возрастают твердость, прочность, предел текучести и понижаются показатели пластичности (относительное удлинение и сужение) и ударная вязкость (рис.6).



При содержании углерода свыше 1,0-1,1% твердость стали в отожженном состоянии возрастает, а прочность уменьшается из-за наличия вторичного цементита, образующего сплошную сетку и вызывающего хрупкое преждевременное разрушение.

Рис. 6. Влияние углерода на механические свойства стали.

Повышение содержания углерода способствует переходу стали в хладноломкое состояние. Предполагается, что каждая 0,1% углерода повышает температуру порога хладноломкости примерно на 20°C и расширяет переходной интервал от вязкого к хрупкому состоянию. На практике отжигу подвергают только доэвтектоидные конструкционные стали после литья или горячей обработки давлением. Отжиг проводят для получения мелкозернистой структуры и снятия внутренних напряжений, а также для понижения твердости и улучшения обрабатываемости.

1.5. Технологические свойства углеродистой стали и область ее применения

Стальные изделия изготавливают обработкой резанием, ковкой, штамповкой, сваркой, литьем. Поведение сталей при обработке (технологические свойства) влияет на их качество, себестоимость и производительность труда.

Обрабатываемость резанием углеродистой стали характеризуется стойкостью режущего инструмента (время работы между переточками), допустимыми скоростями и усилиями резания, чистой обработанной поверхностью. С увеличением прочности и твердости, т.е. с повышением содержания углерода в стали, обрабатываемость ее ухудшается, но стали и с очень малым содержанием углерода (со структурой почти чистого феррита) обрабатываются плохо из-за низкой чистоты поверхности. Оптимальной обрабатываемостью обладают доэвтектоидные стали со структурой пластинчатого (а эвтектоидные и заэвтектоидные - со структурой зернистого) перлита. Обрабатываемость зависит также от величины зерна: лучше обрабатываются крупнозернистые стали (образуется сыпучая стружка). Хорошо обрабатываются стали с повышенным содержанием серы и фосфора (до 0,1-0,3%).

Штампуемость ухудшается с повышением прочностных свойств стали, особенно предела текучести ($\sigma_{0.2}$). Способность стали к вытяжке характеризуется отношением $\sigma_{0.2}/\sigma_B$, которое для глубокой вытяжки равно 0,65-0,70, а сталь должна содержать около 0,08% С, до 0,4% Мп и не более 0,3% Si (т.е. обычная "кипячая" сталь). Большое влияние на качество штамповок оказывает величина зерна: крупнозернистые стали с неоднородным зерном дают шероховатую поверхность и склонны к образованию разрывов при штамповке, а очень мелкозернистые - при-

живат и сильно изнашиваются штампы.

Свариваемость стали определяется качеством металла в сварном шве и околошовной зоне. Чем шире температурный интервал кристаллизации, тем легче образуются горячие трещины. Интервал кристаллизации возрастает с увеличением содержания углерода (см. рис. I), следовательно, свариваемость ухудшается. Кроме того, повышение содержания углерода увеличивает закаляемость стали, что способствует образованию трещин при пониженных температурах (холодные трещины). Поэтому содержание углерода в свариваемых сталях ограничивается.

Литейные свойства стали - жидкотекучесть (заполняемость металлом формы), склонность к ликвации, чистота поверхности отливок (пригар), объёмная усадка (склонность к образованию усадочных раковин и рыхлости), линейная усадка (склонность к образованию трещин) - ухудшаются с повышением содержания углерода. Поэтому для литья используют обычно стали с содержанием углерода до 0,4%. Но в этом случае литейные свойства стали невысокие: имеется склонность к образованию раковин, трещин, плохая жидкотекучесть, большой пригар.

Структура стали характеризует ее свойства, а следовательно, и область применения.

Довлекторные стали являются конструкционным материалом, применяемым для изготовления большой номенклатуры деталей машин.

Стали, содержащие более 0,7% углерода, используются в основном как инструментальные. Высокоуглеродистые ($C > 1\%$) стали повышенной стойкости и износостойкости, применяют для изготовления режущего инструмента; стали с меньшим содержанием углерода, обладающие одновременно достаточной вязкостью, используют для изготовления инструмента, работающего с ударными нагрузками.

2. Порядок выполнения работы

Прежде чем приступить к изучению структур микрошлифов, необходимо согласно диаграмме (рис. I) четко представить все этапы формирования структур сталей в зависимости от содержания углерода.

Изучить под микроскопом структуры микрошлифов, зарисовать их и указать для каждого структурные и фазовые составляющие.

Определить по структуре процентное содержание углерода в каждом шлифе и марку стали.

Написать отчет в соответствии с вышеуказанными пунктами.

Содержание отчета

При составлении отчета необходимо начертить часть диаграммы состояния $Fe-Fe_3C$, относящуюся к области сталей, указать на ней изучаемые стали и зарисовать их структуру. Построить для каждой стали кривую охлаждения или нагревания и указать, какие изменения происходят на каждом отрезке кривой. Охарактеризовать фазы и структурные составляющие изучаемых сталей.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Что такое фаза, структура и структурные составляющие? 2. Какое состояние сплава называется равновесным и почему считается, что после отжига сталь находится в равновесном состоянии? 3. Как классифицируются стали по структуре в отожженном состоянии? 4. Как определить содержание углерода в стали по микроструктуре? 5. Как влияет количество углерода в стали на ее структуру, механические и технологические свойства?

Лабораторная работа №2

СТРУКТУРА, СВОЙСТВА, ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СТАЛЕЙ

Цель работы: ознакомление со строением, свойствами, упрочнением и применением конструкционных сталей; приобретение навыков по их выбору и упрочнению для деталей машин.

Материалы и оборудование: рабочие чертежи деталей с указанием условий эксплуатации, технических условий на изготовление и серийности производства; ГОСТы и справочники по металлосведению и термической обработке.

1. Теоретическая часть

Целомки и преждевременный износ деталей машин вызывает простои, снижает производительность труда и требует дополнительных затрат на изготовление запасных частей и ремонт.

Следовательно, эффективность производства в значительной мере зависит от работоспособности деталей оборудования, эксплуатационная надежность и долговечность которых находится в прямой зависимости от прочности, износостойкости, термической и коррозионной стойкости материала, используемого для их изготовления. Поэтому первоочередной и важнейшей задачей при изготовлении деталей машин является правильный выбор материала и метода его упрочнения. Материал можно считать правильно выбранным, если после упрочнения он обладает необходимым комплексом служебных свойств (прочность, твердость, вязкость и т.д.) при заданных условиях эксплуатации (температура, среда), т.е. обеспечивает надежную и долговечную работу изготовленных деталей. (Надежность — способность выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки. Долговечность — свойство длительно сохранять работоспособность.) Для правильного выбора материала необходимо хорошо ориентироваться в огромном количестве металлических и неметаллических материалов, существующих в настоящее время.

1.1. Общая классификация металлических сплавов и сталей

Количество применяемых металлических сплавов исчисляется тысячами и постоянно растет в связи с новыми требованиями техники. Все сплавы невозможно характеризовать по какому-нибудь общему признаку, так как состав, свойства и назначение их слишком различны. Классификация металлических сплавов по химическому составу (по главному компоненту — железу, меди, алюминию и т.д.) делит их на основные классы: стали, чугуны, медные, алюминиевые, магниевые, титановые и подшипниковые сплавы. (Сплавы на основе никеля, молибдена, хрома или спекаемые окислы и карбиды указаны в группах сталей аналогичного назначения). Внутри каждого класса невозможно классифицировать сплавы даже по близким свойствам, так как характерные и наиболее важные для одних (например, механические свойства и прокаливаемость для конструкционных сталей) часто являются второстепенными для других (например, для многих сталей с особыми физическими или химическими свойствами, некоторых инструментальных сталей и т.д.).

Поэтому в пределах каждого класса их подразделяют на группы (а стали и на подгруппы) по характерным, наиболее важным только для них признакам: чаще всего - по применению в технике, реже - по химическому составу и свойствам.

Основной металлический сплав, широко применяемый для изготовления машин, приборов и инструмента, - сталь - обладает ценным комплексом механических, физико-химических и технологических свойств, сравнительно недорога и производится в большом количестве. Развитие науки и техники, повышение рабочих параметров машин предъявляют все возрастающие требования к свойствам и качеству стали, поэтому разрабатываются новые марки сталей, преимущественно специализированного назначения, совершенствуются технологические процессы их изготовления и упрочнения. В настоящее время стали представлены очень большим числом марок (составов) и классифицируются по назначению, химическому составу, способу производства и качеству, структуре.

По назначению различают конструкционные, инструментальные стали и стали специального назначения с особыми свойствами. Конструкционные стали, составляющие наиболее обширную группу, предназначены для изготовления строительных сооружений, деталей машин и приборов; инструментальные - для изготовления режущего, мерительного и штампового инструмента; к специальным относят коррозионноустойчивые, нержавеющие, жаростойкие, жаропрочные, электротехнические стали и др.

По химическому составу стали классифицируют на углеродистые и легированные (хромистые, марганцовистые, хромоникелевые, хромомарганцовистые и др.), в которые для получения нужных свойств специально введены добавки. По количеству введенных элементов различают низко-, средне- и высоколегированные стали: в низколегированных количестве легирующих элементов не превышает 5%, в среднелегированных - 5-10%, в высоколегированных - более 10%. По концентрации углерода все стали подразделяют на низко- (до 0,3% С), средне- (0,3-0,5% С) и высокоуглеродистые (свыше 0,7% С). Классификация по химическому составу применяется чаще для конструкционных сталей (различают углеродистые, хромистые, хромоникелевые и т.д.), а для инструмен-

тальных, жаропрочных, с особыми физическими и химическими свойствами она недостаточно характерна: у многих из них - близкие свойства и одинаковое назначение, но различный химический состав, и их пришлось бы искусственно разделить по разным подгруппам.

Различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особовысококачественные, понимая под качеством совокупность свойств, зависящих от металлургического процесса производства и определяемых содержанием вредных примесей - серы и фосфора. Стали обыкновенного качества содержат до 0,05% S и 0,04% P, качественные - не более 0,04% S и 0,035% P, высококачественные - не более 0,025% S и 0,025% P, особовысококачественные - не более 0,015% S и 0,025% P. Кроме того, в качественных и высококачественных меньше неметаллических включений, чем в сталях обыкновенного качества. Стали обыкновенного качества выплавляют только углеродистыми (до 0,5% C), качественные и высококачественные - углеродистыми и легированными, особовысококачественные - только легированными, т.е. углеродистые стали могут быть обыкновенного качества, качественными и высококачественными, а легированные - качественными, высококачественными и особовысококачественными. Количество вредных примесей зависит от способа выплавки стали: сталь обыкновенного качества получают мартеновским или конвертерным способами, качественную - в основных мартеновских печах со строгим соблюдением состава шихты, высококачественную - в электропечах с максимальным удалением серы, фосфора и кислорода, а особовысококачественную - в электропечах с электрошлаковым переплавом. Классификация сталей по способу производства дает необходимую, но лишь предварительную их оценку, т.к. в одинаковых условиях металлургического передела производят стали разного назначения, от которых требуются и различные свойства. Например, высококачественными должны быть такие разные по эксплуатационным свойствам стали, как большинство инструментальных, магнитные, нержавеющие, некоторые конструкционные.

В зависимости от способа раскисления (удаления кислорода из жидкого металла) и характера затвердевания стали бывают спокойные, полуспокойные и кипящие. Спокойные (рас-

Кисляют марганцем, кремнием и алюминием) содержат мало кислорода и затвердевают спокойно (без газовыделения) с образованием усадочных раковин. Кипящие (раскисляют только марганцем) содержат повышенное количество кислорода, который при затвердевании частично удаляется в виде CO и создает вид кипения стали (отсюда и название). Полуспокойные (раскисляют марганцем и кремнием) по степени раскисления — промежуточные между спокойными и кипящими. Углеродистые стали производят спокойными, полуспокойными и кипящими. Низкоуглеродистые стали производят кипящими. Они самые дешевые (отходы минимальны) по сравнению со спокойной и полуспокойной сталями, более склонны к хладноломкости и хуже свариваются, но хорошо деформируются в холодном состоянии. Сварные конструкции изготовляют из спокойных и полуспокойных низкоуглеродистых сталей. Легированные стали производят спокойными.

По структуре стали классифицируют в отожженном и нормализованном состояниях. По структуре в отожженном (равновесном) состоянии их делят на: а) доэвтектоидные (структура — избыточный феррит и перлит); б) эвтектоидные (структура — перлит); в) заэвтектоидные (структура — перлит и вторичные карбиды); г) ледебуритные (в структуре имеются первичные карбиды); д) аустенитные (структура — аустенит); е) ферритные (структура — феррит).

Углеродистые стали могут быть первых трех классов, легированные — всех классов, но по сравнению с углеродистыми границы между ними соответствуют меньшим концентрациям углерода, так как легирующие элементы сдвигают влево точки S и E диаграммы Fe-Fe₃C. Ледебуритные стали содержат около 1% углерода и большое количество легирующих элементов (Cr, W, V и др.), образующих стойкие карбиды. Стали аустенитного класса образуются при наличии большого количества легирующих элементов (Ni, Mn), расширяющих γ -область, а ферритного — при введении элементов (Cr, Si, V, W и др.), расширяющих α -область. При определенном соотношении легирующих элементов возможно частичное $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ -превращение и образование промежуточных классов — полуферритных и полуаустенитных.

По структуре после нормализации (охлаждение на спокойном воздухе с температуры нагрева под закалку) стали делят

на перлитные, мартенситные и аустенитные. В сталях перлитного класса (рис. 7а) аустенит неустойчив и при охлаждении на воздухе превращается в перлит, сорбит или троостит (с избыточным ферритом или вторичными карбидами). К ним относятся все углеродистые и низколегированные (до 3-5%) стали. Аустенит мартенситных сталей более устойчив, его охлаждение до температуры мартенситного превращения без распада возможно и на воздухе (рис. 7б). К мартенситным относятся стали с относительно небольшой концентрацией углерода и суммарным содержанием легирующих элементов 7-14%. В сталях аустенитного класса (рис. 7в) повышенное содержание никеля или марганца (обычно с хромом) снижает температуру начала мартенситного превращения ниже 0°C, а высокая устойчивость аустенита позволяет при охлаждении на воздухе сохранить аустенитное состояние.

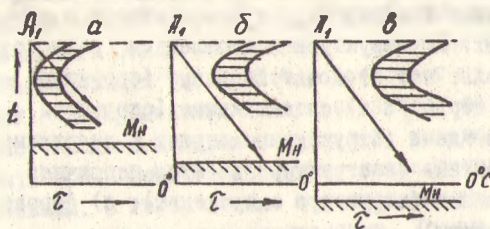


Рис. 7. Диаграмма изотермического распада аустенита сталей: а- перлитного, б- мартенситного, в- аустенитного классов.

К аустенитным относятся стали с содержанием никеля более 8% и марганца свыше 12% (при общем количестве легирующих элементов более 15-25%), т.е. высоколегированные.

Классификация в нормализованном состоянии условна и относится к образцам небольших размеров (ϕ до 25 мм). Изменяя условия охлаждения, можно получить разные структуры: закалкой перлитной стали получают мартенсит, очень медленное охлаждение мартенситной стали приводит к перлитному превращению, а охлаждением аустенитной стали ниже нуля получают мартенсит.

1.2. Конструкционные стали

Конструкционными называют стали, применяемые в машиностроении и строительстве для изготовления деталей машин и конструкций. Эти стали, кроме высоких механических свойств, определяемых стандартными испытаниями ($\sigma_B, \sigma_T, \delta, \psi, \alpha_n, HB$), должны обладать в условиях эксплуатации высок

кой конструктивной прочностью - способностью противостоять внезапным разрушениям при пиковых нагрузках; должны быть технологичны - хорошо обрабатываться давлением и резанием, иметь высокую прокаливаемость и малую склонность к обезуглероживанию, деформациям и трещинообразованию при термической обработке и т.д.; строительные - должны хорошо свариваться всеми видами сварки, а легированные - содержать как можно меньше дорогих и дефицитных элементов. Конструкционные стали выплавляют в основных и кислых мартеновских печах, электропечах и конвертерах, рафинируют жидким синтетическим шлаком в ковше или применяют электрошлаковый и вакуумно-дуговой переплав, выплавку в вакуумных индукционных печах, чтобы снизить загрязненность неметаллическими включениями (оксиды, сульфиды, силикаты), вредными примесями и газами, уменьшить количество дефектов (волосовины и пористость) и, следовательно, повысить конструктивную прочность. Конструкционные стали могут быть углеродистыми и легированными с содержанием углерода до 0,8-0,9%, но чаще не более 0,5-0,6%.

1.2.1. Углеродистые конструкционные стали

Около 80% объема производства сталей составляют углеродистые - наиболее дешевые и обладающие сочетанием удовлетворительных механических свойств с высокой технологичностью. К их недостаткам относят: а) низкую (до 15 мм) прокаливаемость и необходимость закалки в воде, что вызывает значительные деформации; б) невысокую стойкость при отпуске (одинаковая прочность с легированными сталями достигается низким отпуском с сохранением значительных закалочных напряжений). Поэтому обычно из них изготавливают простые детали небольших сечений. Углеродистые конструкционные стали производят обыкновенного качества и качественные.

Стали обыкновенного качества (0,06-0,5% С) - самые дешевые, в них допускается наиболее высокое содержание серы и фосфора, газонасыщенность и загрязненность неметаллическими включениями. Их производят в нормализованном состоянии в виде проката (листы, прутки, балки, швеллеры, уголки) и в зависимости от назначения и гарантируемых свойств поставляют трех групп: А, Б и В. Маркируют сочетанием букв "Ст" и цифр (ст. 0 до 6), указывающей номер марки. Группа

а в обозначении марки стали не указывается, а стали групп Б и В имеют перед маркой эти буквы. Степень раскисления обозначается индексами: спокойные стали - "сп", полуспокойные - "по", кипящие - "кп".

Стали группы А поставляют с гарантированными механическими свойствами (σ_s , σ_t , δ); с увеличением их номера повышается предел прочности и снижается пластичность стали, а химический состав не регламентируется. Они предназначены для изделий, изготавливаемых без горячей обработки, когда сохраняется структура после нормализации и механические свойства, гарантируемые стандартом.

Стали группы Б поставляют с гарантированным химическим составом: с увеличением номера стали в ней повышается количество углерода, а механические свойства не гарантируются. Эти стали предназначены для изготовления изделий горячей обработкой (ковкой, сваркой, термообработкой), после чего исходная структура и механические свойства не могут сохраниться, а для определения режимов обработки необходимо знание химического состава.

Стали группы В поставляют с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Состав стали соответствует химическому составу аналогичной марки группы Б, а механические свойства - той же марки группы А. Их применяют для сварных конструкций, когда важно знать исходные, механические свойства, не изменяющиеся на участках, не подвергаемых нагреву, а для оценки свариваемости нужны сведения о химическом составе.

Углеродистые стали обыкновенного качества всех групп предназначены для изготовления металлоконструкций и слабонагруженных деталей машин: низкоуглеродистые (до 0,27% С) - для строительных конструкций (арматуры, ферм и т.п., изготавливаемых сваркой и холодной деформацией), крепежных и некоторых цементуемых деталей; среднеуглеродистые (0,28-0,5% С), обладающие большей прочностью, - для рельсо, железнодорожных колес, валов, шестерен и других деталей машин, некоторые из которых улучшают закалкой и высоким отпускком. Стали группы В имеют и специализированное назначение - их применяют в мосто- и судостроении, при изготовлении деталей котлов, тисков и железнодорожных вагонов.

Качественные углеродистые стали (0,05-0,9% С) выплавляют с повышенными требованиями к составу шихты, ведению плавки и разливки из-за более жестких ограничений как по содержанию вредных примесей и неметаллических включений, так и по макро- и микроструктуре. Их поставляют в виде проката или поковок с гарантированным химическим составом и механическими свойствами в нормализованном, термически обработанном или нагартованном состоянии. Маркируют двухзначными цифрами (05, 10...85), указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента. Спокойные стали (маркируют без индекса) выплавляют с любым содержанием углерода (0,05-0,9%), кипящие - производят марок 05кп-20кп, а полуспокойные - 08пс-20пс. Качественные углеродистые стали обладают широким диапазоном механических и технологических свойств, применяются в различных отраслях промышленности и в зависимости от содержания углерода подразделяются на следующие виды:

а) низкоуглеродистые (0,05-0,14% С) высокой пластичности и свариваемости применяют без термообработки для мало нагруженных деталей - прокладок, шайб, труб, емкостей (стали 05-10), но чаще - для холодной штамповки и глубокой вытяжки кузовов, дверей, капотов машин и тракторов (стали 08пс, 08кп); низкоуглеродистые (0,10-0,3% С) меньшей пластичности используют нормализованными для ответственных деталей - кронштейнов, поперечин, шкивов, но чаще применяют для слабо нагруженных деталей небольшого размера - кулачков, рычагов, осей, втулок, вилок, зубчатых колес (стали 15-25); из них также изготовляют ответственные сварные конструкции, но с повышением содержания углерода свариваемость их ухудшается и возрастает склонность к трещинообразованию;

б) среднеуглеродистые (0,30-0,50% С) слабозакалившиеся стали 30 и 35 используют нормализованными для слабо нагруженных деталей; стали 40-55 чаще применяют улучшенными (после закалки и высокого отпуска на сорбит) для изготовления штоков, лемехов, муфт, валов, шатунов, зубчатых колес и других деталей с циклическими нагрузками; крупные слабо нагруженные детали изготовляют из среднеуглеродистых нормализованных сталей с поверхностной закалкой токами высокой частоты (ТВЧ), например, шеек валов, зубьев пестерен, так как прокаливаемость их невелика;

в) стали с повышенным (0,60-0,9% С) содержанием углерода применяют для изготовления рессор и пружин (стали 60-85) с закалкой и средним отпуском на троостит для получения вы- , соких упругих и прочностных свойств в сочетании с удовлетворительной вязкостью; в нормализованном состоянии из них изготавливают прокатные валки, шпиндели, крановые колеса, диски сцепления;

г) литейные стали применяют для изготовления литьём фасонных деталей с минимальным объёмом последующей механической обработкой - корпусных деталей, дисков, ступиц, колес, зубчатых колес, муфт, маховиков; маркируют их двухзначным числом, указывающим содержание углерода в остях долях процента, с добавлением буквы Л (15Л, 25Л).

1.2.2. Легированные конструкционные стали

Механические свойства сталей и, следовательно, конструктивная прочность повышается введением в их состав легирующих добавок, основные из которых - хром, никель, кремний и марганец. Другие легирующие элементы (вольфрам, молибден, ванадий, титан, бор) вводят обычно в сочетании с основными для дополнительного улучшения свойств, обусловленного их влиянием на свойства феррита, прокаливаемость, устойчивость мартенсита при отпуске, дисперсность карбидной фазы и размер зерен. Применяют легированные стали, как правило, с закалкой и отпуском, так как их положительные качества обнаруживаются только после термического упрочнения и состоят в следующем: а) у всех термоупрочненных легированных сталей сопротивление пластической деформации (σ_T) выше, чем у углеродистых (при равном содержании углерода); б) прокаливаемость легированных сталей выше, чем углеродистых (большинство легирующих элементов увеличивает устойчивость аустенита), поэтому нагруженные детали крупного сечения изготавливают из легированных сталей со сквозной прокаливаемостью; в) повышенная устойчивость аустенита легированных сталей позволяет применять при закалке "мягкие" охладители - масла и снизить брак по закалочным трещинам и короблению в изделиях сложной формы; г) легирование никелем, повышая вязкость стали и сопротивление ее хладноломкости, увеличивает эксплуатационную надеж-

ность деталей машин, поэтому тяжелонагруженные детали ответственного назначения изготавливают из сталей, содержащих от 1-3% никеля до 9-18%. Таким образом, наиболее важной характеристикой легированных конструкционных сталей являются механические свойства и распределение их по сечению, при этом уровень механических свойств стали и ее закаляемость (способность воспринимать закалку) зависят от содержания углерода, а прокаливаемость (глубина закаленной зоны), закаляемость и несколько механические свойства (не считая никеля и молибдена, значительно улучшающих вязкость) - от состава и количества легирующих элементов. К недостаткам легированных сталей относят: а) склонность к обратной отпускной хрупкости, дендритной ликвации и флокенообразованию; б) повышенное количество остаточного аустенита после закалки, понижающего твердость и сопротивление усталости; в) дефицитность и высокую стоимость легирующих элементов.

Производят легированные стали качественными, высококачественными и особовысококачественными, но в основном выплавляют качественными, а по степени раскисления - спокойными. Они идут на изготовление разнообразных деталей (валов, осей, шестерен, пружин и т.д.) практически во всех отраслях машиностроения и несколько меньше - на изготовление строительных конструкций. Маркируют конструкционные легированные стали буквами и цифрами, по которым в большинстве случаев можно судить об их качественном и, в первом приближении, о количественном составе. Основные легирующие элементы обозначают соответствующими буквами: Ni - Н, Cr - Х, Co - К, Mo - М, Mn - Г, Si - Д, В - Р, Nb - Б, N - А, S - С, W - В, Ti - Т, V - Ф, Al - Ю. Цифры после буквы, соответствующей легирующему элементу, указывают его содержание в целых процентах; если элемента менее 1-1,5% - число не ставится. Количество углерода указывается двузначным числом в начале марки стали и соответствует содержанию его в сотых долях процента (например: 40Х - углерода 0,40%, хрома - 1%). Если сталь высококачественная, то в конце марки ставится буква А, если особовысококачественная - буква Ш (например: 40ХМА - высококачественная легированная конструкционная сталь, 30ХГС-Ш - особовысококачественная конструкционная сталь). Конструкционные легированные ста-

ли, как правило, подвергают термической обработке, в зависимости от режима которой их делят на цементуемые (подвергаемые цементации) и улучшаемые (подвергаемые закалке и отпуску), а используемые без термической обработки представляют отдельную группу - строительных и автоматных сталей.

Строительные стали предназначены для строительных конструкций (мостов, газо- и нефтепроводов, ферм, котлов и т.д.)

которые обычно изготовляют сварными, поэтому свариваемость - основное свойство таких сталей. Низколегированные стали (повышенной прочности), которые содержат до 0,22% углерода и до 2-3% недефицитных легирующих элементов (17ГС, 16Г2АФ, 14ХГС, 09Г2С), мало различаются по составу и свойствам; их структура (феррит + перлит) и служебные свойства формируются при производстве (например контролируемой прокаткой). Применяют эти стали вместо углеродистых для конструкций, где необходим материал с высоким пределом текучести. Стали, легированные хромом, никелем и медью, имеют повышенную вязкость и коррозионную стойкость, а кремнием и марганцем - используя в котлостроении до 470°C; профилями с повышенным содержанием углерода (0,20-0,35%) армируют железобетон.

Автоматные стали предназначены для изготовления деталей массового производства на станках-автоматах и отличаются хорошей обрабатываемостью резанием из-за повышенного содержания серы (0,08-0,3%) и фосфора (0,06%), способствующих образованию ломкой "сыпучей" стружки. Их маркируют буквой А (автоматная) и цифрами, указывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента (А12, А30, А40Г - сернистые; АС14, АС40, АС35Г2 - свинецсодержащие; А35Е, А40ХЕ - сернистоселенистые; АЦ20, АЦ40Г - кальцийсодержащие). Наличие серы и фосфора, улучшая обрабатываемость, ухудшает качество стали: понижает вязкость, пластичность, усталостную прочность и коррозионную стойкость. Эти стали используют для крепежных и мелких слабонагруженных деталей. Улучшают обрабатываемость резанием и другие элементы: химические аналоги серы - селен и теллур, которые вводят в высоколегированные нержавеющие стали; небольшие добавки свинца (0,1-0,3%), не понижающие механические характеристики стали; микродобавки кальция (0,002-0,008%).

Цементуемые - низкоуглеродистые (не более 0,25-0,3% С) низко- и среднелегированные стали, которые после цементации и нитроцементации, закалки и низкого отпуска имеют высокую поверхностную твердость (HRC 58-62) при вязкой, но достаточно прочной сердцевине. Они предназначены для деталей, работающих на износ при переменных и ударных нагрузках, т.е. работоспособность которых зависит от свойств поверхностного слоя и сердцевины. Высокие служебные свойства в поверхностном слое (высокая твердость, контактная выносливость и предел усталости при изгибе) получают при его высокой закалке, что зависит прежде всего от содержания углерода. Легирующие элементы оказывают косвенное влияние на свойства слоя, изменяя в нем концентрацию углерода: карбидообразующие увеличивают степень науглероживания и поверхностную твердость, повышая тем самым износостойкость и контактную выносливость (чрезмерно высокая твердость - HRC >63 нежелательна из-за опасности хрупкого разрушения), а никель и кремний снижают степень науглероживания и, следовательно, хрупкость слоя. После закалки детали цементованный слой должен иметь мартенситно-аустенитную структуру без продуктов перлитного и промежуточного превращений аустенита, наличие которых резко снижает предел выносливости. Работоспособность цементованных деталей при одинаковых свойствах поверхностных слоев зависит от свойств сердцевины: при высокой твердости ее в подкорковой зоне возможна пластическая деформация, которая вызовет перенапряжение поверхностного слоя и его преждевременное разрушение; повышение прочности сердцевины способствует увеличению контактной прочности, особенно при циклических нагрузках. Степень упрочнения сердцевины увеличивается с повышением содержания в стали углерода и легирующих элементов. Поэтому цементуемые легированные стали в зависимости от структуры, получаемой в сердцевине (при охлаждении в масле), подразделяются на следующие группы:

— а) среднепрочные низколегированные (15X, 20X, 15XФ, 15XP, 20XН) с упрочняемой сердцевиной, структура которой после закалки - троостит или бейнит. При цементации этих сталей возможно образование цементитной сетки в поверхностном слое, что повышает его чувствительность к надрезам.

Стали этой группы применяют для небольших деталей (поршневые пальцы и колен, распределительных валиков, толкателей, коширов и т.п.), работающих при средних нагрузках, так как их прокаливаемость невелика (до 25 мм);

б) высокопрочные комплекснолегированные (20ХНР, 18ХГТ, 12ХНЗ, 12Х2НЗ, 18Х2Н4В) и экономнолегированные с содержанием углерода до 0,25-0,30% (30ХГТ, 25ХГМ) с сильно упрочняемой сердцевиной вследствие образования в ней при закалке мартенсита. Наиболее ответственные детали, эксплуатируемые с динамическими нагрузками, изготовляют из высокопрочных цементуемых сталей: зубчатые колеса авиадвигателей и судовых редукторов - из 18Х2Н4АА; зубчатые колеса и валы автомобилей - из 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 25ХГМ; зубчатые колеса, червяки, кулачковые муфты - из 20ХР, 20ХНР.

Улучшаемые среднеуглеродистые (0,3-0,5% С) низколегированные (до 5% легирующих элементов) стали, подвергаемые термическому улучшению, - закалке и высокому отпуску на сорбит - предназначены для ответственных деталей (валов, штоков, шатунов и т.п.), работающих при циклических и ударных нагрузках, а иногда при пониженных температурах. Эти стали должны иметь высокий предел текучести в сочетании с высокой пластичностью, вязкостью и малой чувствительностью к надрезу в любом сечении детали, что достигается улучшением при сквозной прокаливаемости, которая является важнейшей их характеристикой и определяется присутствием легирующих элементов. В деталях небольшого сечения при одинаковом содержании углерода и разном количестве легирующих элементов улучшенные стали имеют близкие прочностные свойства, которые значительно отличаются в деталях крупных сечений. Следовательно, не механические свойства, а прокаливаемость является критерием при выборе состава стали: чем больше сечение детали, тем более легированной должна быть сталь для ее изготовления. Сложные по конфигурации детали, особенно подвергающиеся ударным нагрузкам, изготовляют из сталей, содержащих никель. Улучшаемые легированные стали условно делят по прокаливаемости на группы, с увеличением номеров которых повышается степень легирования и размер сечения сквозной прокаливаемости: а) хромистые стали прокаливаемость до 25 мм (30Х, 40Х, 40ХР); б) хромистые стали с

марганцем, молибденом, кремнием, титаном прокаливаемостью до 40 мм (30ХМ, 30ХГТ, 30ХГС, 40ХГТР); в) хромоникелевые (I, 0-I, 5% Ni) стали с бором, марганцем прокаливаемостью до 40-70 мм (40ХН, 40ХНР, 40ХНМ, 42ХМФ); г) хромоникельмолибденовые (2-3% Ni) стали с ванадием прокаливаемостью свыше 70 мм (30ХНЗ, 30ХНЗВФ, 38ХНЗМФ).

I.2.3. Рессорно-пружинные стали

Рессорно-пружинные стали составляют особую группу конструкционных сталей, у которых используются только упругие свойства из-за специфических требований, предъявляемых к изделиям из них. Эти стали должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и пределом выносливости при достаточных пластичности и вязкости, иметь повышенную релаксационную стойкость, хорошую закаливаемость и сквозную прокаливаемость. Указанные свойства рессорно-пружинных сталей достигаются повышенным содержанием в них углерода (чаще всего 0,5-0,7%), определенной степени легированности и соответствующей термической обработкой (закалкой со средним отпуском). Рессоры, пружины, упругие элементы механизмов работают при различных нагрузках, температурах и в разных средах (на воздухе и в коррозионно-активных), поэтому пружинные стали подразделяют на стали общего (с высокими механическими свойствами) и специального назначения с дополнительными химическими и физическими свойствами (немагнитные, коррозионно-стойкие, с высокой электропроводностью и др.), т.е. с особыми свойствами. К первым относят углеродистые (65, 70, 75, 85) и легированные (65Г, 60С2, 70С3, 50ХГ, 55ХГР, 50ХФА, 55ХГСФ, 60С2ХФА, 65С2ВА, 70С2ХА) стали, а ко вторым - мартенситные и аустенитные коррозионно-стойкие (30Х13, 40Х13, 12Х18Н9Т) и мартенситно-старящийся стали (Н18Х2М5Т).

I.3. Стали и режимы упрочняющей обработки типовых деталей

Какой выбрать материал для изготовления детали, как ее изготовить и упрочнить - зависит прежде всего от условий работы детали, величины и характера нагружения при эксплуатации, ее размеров, массы и формы.

В справочной литературе приведены многосторонние све-

дения о сталях: марки, состав, механические и технологические свойства, режимы термообработки и получаемые после нее свойства, примерные области применения. Мнение, что справочник дает ответы на все вопросы, связанные с правильным выбором материала, ошибочно. Есть большое количество сталей, рекомендуемых для одних и тех же целей и имеющих близкие свойства, установленные стандартными испытаниями. Однако в конкретных условиях работы каждая сталь проявляет себя по-разному, обнаруживая различную конструктивную прочность, и поэтому должна рассматриваться возможность применения нескольких марок сталей. Единого правила выбора оптимального состава материала для различных деталей нет, но всегда необходимо максимальное выполнение требований, предъявляемых к детали, способу ее производства и упрочнения, а именно: а) эксплуатационное требование - материал должен обеспечить заданную (расчетную) конструктивную прочность (прочность с учетом конструкционных, металлургических, технологических и эксплуатационных факторов, определяющих надежность, долговечность и экономичность конструкции); б) технологическое требование - трудоемкость изготовления (резанием и давлением) детали должна быть минимальной; в) экономическое требование - все затраты (стоимость стали, изготовления и упрочнения детали) должны быть минимальны, а эксплуатационная стойкость детали в машине максимальна, т.е. нужно выбирать недорогие углеродистые и низколегированные стали, а дорогие (с Ni, Mo, V, W) применять, если дешевле не обеспечивают заданных требований. Так как требования к материалу деталей противоречивы (более прочные стали менее технологичны, труднее обрабатываются резанием, холодной объемной штамповкой, хуже свариваются), то выбор стали обычно компромиссен: при массовом производстве стремятся к упрощению технологии и снижению трудоемкости изготовления, а в специальных отраслях машиностроения (когда более важна прочность) выбор материала и технологии изготовления и упрочнения диктует только необходимость обеспечить максимальные эксплуатационные свойства.

Обычно рассматривают возможность применения нескольких марок сталей и способов упрочнения, что позволяет выбрать рациональный вариант, обеспечивающий высокие эксплуатацион-

ные свойства детали и хорошую технологичность при наименьших затратах. Но самое важное условие правильного выбора материала - обеспечение необходимого комплекса механических свойств и распределение их по сечению детали, исходя из условий ее эксплуатации. При этом необходимо руководствоваться следующими положениями:

а) механические свойства стали (H_B , σ_B , σ_T , δ , ψ , α_H) зависят от ее химического состава и структуры, которую можно существенно улучшить термообработкой;

б) легирование повышает σ_B и σ_T , но, упрочняя металл, способствует ее хрупкому разрушению (кроме Ni и Mo), поэтому степень легированности выбираемой стали определяется нужной глубиной прокаливаемости: сквозная необходима деталям, работающим на растяжение (шатуны, болты) и о высокими упругими свойствами (рессоры, пружины, торсионные валы), но не нужна работающим на изгиб и кручение, так как напряжения в середине их сечения равны нулю;

в) легирование цементуемых сталей должно обеспечивать торможение роста зерна аустенита при нагреве и требуемую прокаливаемость поверхностного слоя и сердцевины, так как работоспособность цементованных деталей зависит от свойств и поверхности, и сердцевины;

г) легированные стали применяют только термообработанными, кроме некоторых строительных, легированных небольшим количеством дешевых элементов (Mn и Si).

1.4. Стали и упрочняющая обработка для типовых деталей машин

Валы

В зависимости от условий эксплуатации стойкость валов определяется усталостной прочностью при кручении и изгибе, контактной прочностью или износостойкостью.

Малонагруженные медленно вращающиеся валы изготавливают из сталей 35, 40, 45 и Ст.3, Ст.4, Ст.5 без термической обработки. Если работоспособность валов зависит от прочности на изгиб и кручение (не зависит от контактной выносливости и износостойкости), то средненагруженные валы (ϕ до 80-100 мм) изготавливают из сталей 45, 40X, 50X с улучшением ($\sigma_B \approx 800-1000$ МПа; $H_B 217-285$); высоконагруженные (ϕ 100-130 мм) - из хромоникелевых и хромомolibденовых глубокопрокаливающихся,

Для сталей 50ХН, 40ХНМА, 34ХНЗМА с улучшением ($\sigma_s > 1000 \text{ МПа}$) и особо ответственные (в турбо- и компрессоростроении) - из еще более легированных 30ХН2ВФА, 36ХН1МФА, 38ХН3МФА, 30ХН2ВФА с улучшением.

Валы небольших размеров (гладкие, ступенчатые, шлицевые), работоспособность которых зависит от контактной выносливости и износостойкости (о поверхностной твердости HRC 48-50) изготавливают из сталей 45, 50 с поверхностной закалкой ТВЧ или с улучшением и поверхностной закалкой и самоотпуском; покрупнее - из более прокаливающихся сталей 40Х, 40ХГТ с улучшением и поверхностной закалкой ТВЧ с самоотпуском; а быстроходные и более износостойкие (HRC 56-58) - из 20Х, 18ХГТ, 12ХНЗА (иногда 35Х2ГНТА) с цементацией, закалкой и низким отпуском. Особо высоким сопротивлением изнашиванию обладают валы из стали 38ХМЮА после улучшения и азотирования.

Зубчатые колеса (шестерни)

Зубчатые колеса наиболее часто выходят из строя из-за контактного усталостного разрушения, торцового износа, заедания зубьев и их поломки при кратковременных перегрузках. Поэтому материал для них должен обеспечивать высокую поверхностную износостойкость, достаточную статистическую усталостную прочность при изгибе и контактом нагружении и подбираться, исходя из габаритов и конструкции шестерни, а также условий эксплуатации. Указанным требованиям наиболее соответствуют цементуемые (нитроцементуемые) легированные стали, у которых после термообработки структура поверхностного слоя - мартенсит отпуска, а сердцевина - ферритно-цементитные смеси различной дисперсности, бейнит или низкоуглеродистый отпущенный мартенсит. Выбор марки стали и метода ее упрочнения для шестерен производят в зависимости от степени их нагруженности: мало- и средненагруженные зубчатые колеса (коробки передач, редукторов, задних мостов) изготавливают из безникелевых 20Х, 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 20ХП и малоникелевых 20ХНМ, 19ХН, 20ХНМ, 20ХНР, 20ХНР сталей, а тяжелонагруженные (например, большегрузных автомобилей) - из более легированных - 12ХНЗА, 20ХНЗА, 15ХН2ТА, 15Х2ГНТА, 20ХН2ТА, 25Х2ГНТА.

Упрочняющая обработка шестерен включает цементацию (нитроцементацию) при 900-930°C, закалку от 800-850°C в масле и низкий отпуск при 170-200°C. Толщина упрочненного слоя обычно принимается равной 0,15 толщины зуба по начальной окружности (0,18-0,27r, r - модуль колеса, но не более 1,8мм), а твердость HRC 59-63 (для высокой контактной выносливости и износостойкости без хрупкого разрушения). Твердость сердцевины зубьев обычно HRC 30-42, а с ее повышением возрастает предел прочности и выносливости при изгибе и контактная выносливость зубчатых колес (твердость более HRC 42-45 увеличивает опасность хрупкого разрушения, а пониженная способствует развитию пластической деформации в теле зуба и, следовательно, разрушению упрочненного слоя). Мало- и средненагруженные шестерни (в единичном и мелкосерийном производстве) можно изготовить из улучшаемых сталей 40, 45, 50Г, 40Х, 30ХГС, 50Х, 50ХН с закалкой ТВЧ по контуру зубчатого венца, а больших диаметров - литыми из 35Л-50Л, 40ХЛ, 30ХГЛ с нормализацией и высоким отпуском (для легированных сталей).

Гильзы, втулки

Этим деталям необходимы высокая износостойкость, стабильность формы и размеров. Их изготавливают из улучшаемых сталей 40ХФА, 30ХЗВА, 38Х2МЮА с азотированием, обеспечивающим высокую износостойкость без существенных деформаций. Возможно изготовление их из цементуемых сталей 20Х, 18ХГТ, 12ХНЗА с закалкой и низким отпуском. Детали этого типа легко деформируются при механической и термической обработке, поэтому между операциями механической обработки производят стабилизирующий отпуск (разновидность низкого отпуска).

Нормали

Изготавливают нормали (болты, винты, гайки, шпильки) из улучшаемых углеродистых и легированных сталей. Разрушение их в конструкциях бывает вязким (из-за низкой прочности в нетермообработанном состоянии или при недостаточной твердости) и хрупким, наиболее опасным (из-за высокой твердости или поверхностного наклепа, не снятого рекристаллизационным отжигом). Установлено, что максимальной хрупкой прочности соответствует твердость HRC 30-35. Поэтому детали крепежа, работающие без высоких напряжений, изготавливают

из сталей 40, 40Х, 30ХГС нормализованными (HRC 25-30), а испытывающие высокие и сложные напряжения - из 40Х, 40ХН, 40ХНМА улучшенными или нормализованными (HRC 30-35). Крепежные детали, получаемые холодной высадкой, нормализуют (880-900°C) для снятия наклепа.

Пружины, рессоры

Рессоры и пружины должны обладать высоким пределом упругости и сопротивлением усталости, в них не допустима пластическая деформация и, следовательно, не нужна высокая ударная вязкость и пластичность. Поэтому их изготавливают из специальных рессорно-пружинных сталей, главное свойство которых - высокий предел упругости (текучести) для углеродистых ≥ 800 МПа, а для легированных - ≥ 1000 МПа при пластичности $\delta = 5\%$, $\psi = 20-25\%$. Повышенные значения предела упругости этих сталей достигаются закалкой и средним отпуском (400-500°C) на троостит.

Для изготовления рессор и пружин необходимо выбирать сталь, состав которой обеспечивает сквозную прокаливаемость изделия и структуру троостита по всему сечению. Поэтому пружины небольших сечений, испытывающие невысокие напряжения, изготавливают из углеродистых сталей 65, 70, 75, 85 с закалкой в масле, а больших сечений (до 5-8 мм) - с закалкой в воде и средним отпуском. Крупные и высоконагруженные пружины и рессоры (пружины валов, автомобильные рессоры, торсионные валы) изготавливают из кремнистых сталей 55С2, 60С2А, 70С3А и более легированных - 50ХГА, 50ХГФА, 60С2ХФА, 65С2ВА, 60С2Н2А, термическая обработка которых состоит из закалки (800-650°C) в масле или воде и отпуска (400-500°C) на троостит (HRC 35-45, $\sigma_b = 1300-1600$ МПа).

Нередко пружины изготавливают из патентованной холодной проволоки и ленты из сталей 65, 65Г, 70, высокие механические свойства которых достигаются патентованием и последующим протягиванием (степень деформации $\geq 70\%$). Патентование - нагрев выше A_{c3} на 150-200°C и быстрое охлаждение при 450-550°C - относится к отжигу 2-го рода и является разновидностью изотермической обработки. Структура по выходе из ванны - дисперсная феррито-цементитная смесь, называемая сорбитом патентования или трооститом.

Кроме патентованных сталей, используют также углеродистые инструментальные У7, У8, У9, У10 в виде холоднотянутой проволоки (серебрянки). Наклеп (нагартовка) их холодным протягиванием создает высокую твердость и упругость. Патентуют и протягивают ленту и проволоку на металлургических заводах, а на машиностроительных производят только навивку пружин и их отпуск ($250-350^{\circ}\text{C}$) для снятия напряжений.

В заключение необходимо отметить, что какими бы точными ни были предварительные расчеты конструктивной прочности, обеспечить которую должен выбираемый материал, нельзя судить только по ним о надежности работы детали, а в ряде случаев вообще не удается выбрать материал для конкретных условий работы, пользуясь данными справочников или лабораторных испытаний стандартных образцов. Поэтому зачастую необходимы натурные испытания деталей на специальных стендах и непосредственно в эксплуатации. Это, конечно, очень трудоемко и дорого, но необходимо, особенно для ответственных деталей, так как по информации об их стойкости можно установить комплекс параметров, которые находятся в наибольшей корреляции с эксплуатационными свойствами деталей машин. (Корреляция - зависимость без явно выраженной закономерности изменения из-за невозможности точно учесть влияния многих одновременно меняющихся факторов.) При установлении этих параметров, кроме стандартных механических свойств (σ_B , $\sigma_{0.2}$, δ , ψ , a_n) с учетом прокаливаемости стали, должны учитываться работа распространения трещины, предел выносливости, контактная усталостная прочность, сопротивление износу и т.д.

2. Порядок выполнения работы

Изучить классификацию сталей и уяснить область их применения.

Выбрать сталь для изготовления указанной детали, исходя из заданных условий, и дать подробное обоснование выбора.

Привести химический состав и указать марку выбранной стали.

Определить и обосновать способ упрочняющей обработки и его режимы.

Указать структуру и твердость стали после каждой опе-

рации термической (химико-термической) обработки, а также механические свойства в готовом изделии.

Сравнить полученные свойства выбранной стали с заданными техническими условиями.

Составить отчет в соответствии с указанными пунктами.

Содержание отчета

При составлении отчета необходимо привести краткую классификацию сталей по назначению, химическому составу, качеству, способу производства и структуре. Начертить участок диаграммы состояния $Fe-Fe_3C$ и указать на нем выбранную сталь. Составить технологию и изобразить схему термической (химико-термической) обработки, обосновав режимы с помощью диаграммы состояния.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Почему важен правильный выбор материала и упрочняющей обработки деталей машин? 2. Объясните существующую классификацию металлических сплавов и сталей? 3. По каким признакам классифицируют стали и какой из них наиболее показателен? 4. Как маркируют стали? 5. Какие требования предъявляют к конструкционным сталям? 6. Как классифицируют конструкционные углеродистые стали? Их применение. 7. Назовите преимущества и недостатки легированных конструкционных сталей по сравнению с углеродистыми. 8. Как классифицируют конструкционные легированные стали? Их применение. 9. Что представляют собой натурные испытания и для чего их проводят?

Лабораторная работа №3

МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ЧУГУНОВ

Цель работы: изучение строения и свойств передельных и машиностроительных чугунов; их классификация и применение.

Материалы и оборудование: коллекция нетравленных микрошлифов чугунов различных марок; металлографический микроскоп ММУ-3; травитель (4%-ный раствор HNO_3 в спирте).

1. Теоретическая часть

Чугунами называют железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14% углерода и постоянные примеси - кремний,

марганец, серу и фосфор.

Чугуны имеют более низкие механические свойства, чем стали, так как повышенное содержание углерода в них приводит либо к образованию твердой и хрупкой эвтектики, либо к появлению свободного углерода в виде графитных включений различной конфигурации, нарушающих сплошность металлической структуры. Поэтому чугуны применяются для изготовления деталей, не испытывающих значительных растягивающих и ударных нагрузок. Однако наличие графита дает и ряд преимуществ чугунам перед сталью: они легче обрабатываются резанием (образуется ломкая стружка), обладают лучшими антифрикционными свойствами (графит обеспечивает дополнительную смазку поверхностей трения) и высокой износоустойчивостью (низкий коэффициент трения), не чувствительны к внешним концентрациям напряжений (выточкам, отверстиям, дефектам поверхности). Чугуны обладают высокой жидкотекучестью, хорошо заполняют литейную форму, имеют малую усадку и широко применяются для изготовления отливок. Детали, полученные из чугунных отливок, значительно дешевле, чем изготовленные обработкой резанием из горячекатаных стальных профилей или из поковок и штамповок.

Классификация чугунов по структуре и применению

Свойства чугуна, как и стали, определяет его структура (свойства, форма, размеры и характер взаимного расположения фазовых составляющих).

Как указывалось, углерод в железоуглеродистых сплавах может находиться в виде цементита и графита. Образование графита возможно в высокоуглеродистых сплавах — чугунах — как при очень медленном охлаждении (непосредственно из жидкого и твердого растворов), так и при выдержке при повышенной температуре (вследствие распада цементита). Следовательно, химический состав и, в частности, содержание углерода не характеризует достаточно надежно свойства чугунов: их структура зависит не только от химического состава, но и от процесса релаксации, условий охлаждения отливок и режима термической обработки. В зависимости от того, в каком виде углерод присутствует в чугунах, их делят на содержащие свободный углерод в связанном состоянии (в виде цементита или

других карбидов) и содержащие весь углерод или его часть в свободном состоянии (в виде графита). К первым относят белые чугуны, ко вторым - серые, высокопрочные и ковкие. По назначению чугуны подразделяют на передельные и машиностроительные. Передельные в основном используются для получения стали и ковкого чугуна, а машиностроительные - для изготовления отливок деталей в различных отраслях промышленности: автотракторостроении, станкостроении, сельскохозяйственном машиностроении и т.д.

а) Белые чугуны (передельные)

В белых чугунах весь углерод находится в химически связанном состоянии (в виде цементита), т.е. кристаллизуются они, как и углеродистые стали, по метастабильной диаграмме $Fe-Fe_3C$ (рис.1), а название получили по специфическому матово-белому излому, обусловленному наличием в структуре цементита. Образуются белые чугуны при ускоренном охлаждении расплава, и по содержанию углерода их делят на: а) доэвтектические, содержащие от 2,14 до 4,3%; б) эвтектические - 4,3%; в) заэвтектические, содержащие от 4,3 до 6,67% углерода.

Структура белых чугунов при любой температуре зависит от содержания углерода и соответствует диаграмме состояния $Fe-Fe_3C$, отражающей все фазовые превращения в этих чугунах при нагреве и охлаждении.

Кристаллизация белых доэвтектических чугунов начинается выделением из жидкого раствора кристаллов аустенита, а заэвтектических - первичного цементита. При температуре $1147^{\circ}C$ (линия EF) белые чугуны претерпевают эвтектическое превращение - образование из жидкого раствора (содержащего 4,3% углерода) эвтектической смеси кристаллов аустенита (с концентрацией углерода 2,14%) и цементита, называемой ледебуритом: $L_{4,3\%C} \rightarrow A_{2,14\%C} + Fe_3C$. При дальнейшем понижении температуры уменьшается растворимость углерода в аустените (линия ES), и он выделяется в виде вторичного цементита (как из структурно свободного аустенита, так и из входящего в состав эвтектики). Цементит, выделяющийся из структурно свободного аустенита (в доэвтектических чугунах), образует самостоятельную структурную составляющую

шур, а выделяющийся из аустенита эвтектики - наслаивается на цементитные частицы ледебурита. При температуре 727°C концентрация углерода в аустените достигает 0,8%, и он претерпевает, как и в углеродистых сталях, эвтектоидное превращение, т.е. распадается с образованием эвтектоидной смеси-перлита: $A_{0,8\%C} \rightarrow P(\Phi_{0,02\%C} + Fe_3C)$. Аустенит ледебурита также превращается в перлит, поэтому ледебурит выше 727°C является смесью аустенита с цементитом, а ниже - перлита с цементитом и называется видоизмененным или перлитным (в отличие от аустенитного). Таким образом, структура белых доэвтектических чугунов при обычной температуре состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита. Под микроскопом после травления (3-5%-ным раствором HNO_3 в спирте) ледебурит представляет собой светлые цементитные поля с равномерно расположенными темными перлитными участками: перлит - темные зерна, вторичный цементит - светлые выделения по границам перлитных зерен или частично слившиеся с цементитом ледебурита. Относительное количество перлита и ледебурита зависит от содержания в чугуне углерода: чем его больше, тем меньше доля структурно свободного перлита и больше ледебурита.

Эвтектический белый чугун состоит из одной структурной составляющей - ледебурита, представляющего собой при температурах ниже 727°C равномерную механическую смесь перлита с цементитом.

Структура белых заэвтектических чугунов состоит из ледебурита и крупных светлых продолговатых кристаллов первичного цементита, выделившегося из жидкого раствора, количество которых возрастает с увеличением содержания углерода в чугуне. Таким образом, в структуре белых чугунов, независимо от содержания углерода, при обычной температуре присутствует эвтектика - ледебурит (перлит + цементит), которой свойственна повышенная хрупкость. Поэтому чугуны, в отличие от сталей, не подвергают прокатке, ковке, штамповке. Помимо этого, из-за присутствия большого количества цементита белые чугуны очень тверды, практически не поддаются обработке резанием и в машиностроении используются редко. Обычно чисто белые чугуны идут на передел в сталь (заэвтектические) или используются для полу-

ная ковкого чугуна (доэвтектические) и поэтому называются пердевальными.

б) Машиностроительные чугуны

К ним относят серые, высокопрочные и ковкие чугуны с изломом серого матового цвета из-за наличия в структуре графитных включений, количество, форма и размеры которых изменяются в широких пределах. В микроструктуре этих чугунов различают металлическую основу (собственно структуру) и включения графита.

По строению металлической основы чугуны разделяют на: а) перлитные со структурой перлита и графита (количество связанного углерода 0,8%); б) феррито-перлитные со структурой феррита, перлита и графита (количество связанного углерода меньше 0,8%); в) ферритные со структурой феррита и графита (практически весь углерод находится в свободном состоянии в виде графита). Отсюда можно заключить, что металлическая основа машиностроительных чугунов похожа на структуру эвтектоидной и доэвтектоидной стали и железа и отличается только наличием графитных включений (углерода в свободном состоянии), предопределяющих специфические свойства чугунов.

Включения графита бывают пластинчатыми, шаровидными и хлопьевидными (рис.8) и рассматриваются как соответ-

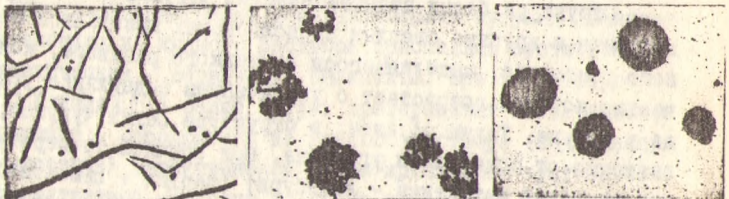


Рис.8. Форма графитных включений в чугунах: а - пластинчатая в сером; б - хлопьевидная в ковком; в - шаровидная в высокопрочном. Шлифы не травлены.

вущей формы пустоты (надрезы) в структуре чугуна. Такие дефекты при нагружении концентрируют напряжения, величина которых возрастает с остротой дефекта. Следовательно, наиболее разрушают металл графитные включения пластинчатой

той формы, более благоприятна хлопьевидная, но оптимальной является шаровидная. По форме графитных включений чугуны подразделяют на серые (рис. 8а), высокопрочные (рис. 8в) и ковкие (рис. 8б).

Для определения наличия графита и формы его включений исследуют нетравленный микрошлиф с помощью металлографического микроскопа. Графит выглядит темной фазой на светлом фоне полированной металлической основы и по его форме устанавливают вид чугуна (рис. 8), а затем микрошлиф травят (3-5%-ым раствором HNO_3 в спирте) и определяют структуру металлической основы.

Металлическая основа	Форма графитных включений		
	Пластинчатая	Хлопьевидная	Шаровидная
Феррит			
Феррит-перлит			
Перлит			

Обобщенная классификация чугунов по строению металлической основы и форме графитных включений представлена схематическими структурами (рис. 9). Зная основные положения теории кристаллизации, можно регулировать процесс структурообразования чугунов и получать сплавы с заданными свойствами.

Рис. 9. Классификация чугуна по структуре металлической основы и форме графитных включений (схемы структур).

в) Серые чугуны

В структуре серых чугунов большая часть или весь углерод находится в виде графита, включения которого имеют в плоскости шлифа форму пластинок. Получают серый чугун, как и белый, непосредственно при кристаллизации из жидкого расплава. Так как образование графита из жидкости — медленный процесс (работа образования зародыша велика: требуется значительная диффузия атомов углерода и отвод атомов железа от фронта кристаллизации графита), то он возможен только в узком интервале температур (в условиях малых переохлаждений) при очень малых скоростях охлаждения. Если

при медленном охлаждении и выделяется цементит, то как неустойчивое химическое соединение, особенно при высоких температурах, он распадается с образованием графита: $Fe_3C \rightarrow Fe_{\alpha}(C) + \Gamma p$ выше $727^{\circ}C$ и $Fe_3C \rightarrow Fe_{\alpha}(C) + \Gamma p$ ниже $727^{\circ}C$. С ускорением охлаждения чугуна вероятность образования в нем графита уменьшается и при определенной скорости охлаждения часть сплава может закристаллизоваться в соответствии со стабильной, а часть, например поверхностный слой, - с метастабильной диаграммами. Чугунные отливки, у которых поверхностные слои имеют структуру белого чугуна, а сердцевина - серого, называют отбеленными. Отбел их на некоторую глубину - следствие более быстрого охлаждения поверхности. Следовательно, обязательным условием для получения серого чугуна является очень малая скорость охлаждения расплава.

Серые чугуны - сложные сплавы, содержащие, кроме железа и углерода, те же примеси, что и углеродистые стали - кремний, марганец, серу и фосфор, но в большем количестве. Поэтому характер их кристаллизации определяет не только скорость охлаждения, но и химический состав: концентрация углерода, состав и количество примесей и легирующих элементов. Все элементы в составе чугунов делят на способствующие а) графитизации (выделению углерода в виде графита) и б) выделению углерода в связанном состоянии в виде цемента и других карбидов (препятствуют образованию графита и распаду цемента). Элементами, способствующими графитизации, являются $C, Si, Ni, Cu; Al$, а отбеливающими - Mn, Cr, W, Mo, S, O .

Наиболее широко применяют чугуны, содержащие 2,4-3,8% углерода: чем выше его количество, тем больше образуется графита и тем ниже механические свойства чугуна. Поэтому углерода в чугуне обычно не более 3,8% (но не менее 2,4% для сохранения высоких литейных свойств (жидкотекучести)).

Кремний очень сильно влияет на структуру чугуна: способствует графитизации, повышая вероятность образования графита при эвтектическом превращении $L \rightarrow A + \Gamma p$. Если при кристаллизации и образуется цементит ($L \rightarrow A + \Gamma p + Fe_3C$), то в присутствии кремния он неустойчив и быстро распадается на аустенит и графит ($Fe_3C \rightarrow Fe_{\alpha}(C) + \Gamma p$). Изменяя количество кремния в чугунах от 0,3-0,5 до 3-5%, получают

Совершенно разные по структуре и свойствам чугуны. Для определения ожидаемой структуры в зависимости от скорости охлаждения (толщина отливки) и состава чугуна (суммарного содержания углерода и кремния) используют структурные диаграммы (рис. 10). Следовательно, чтобы избежать отбела чугуна в

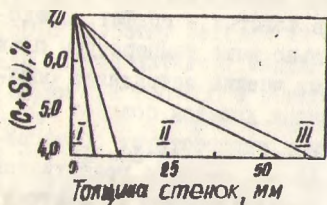


Рис. 10. Влияние скорости охлаждения и суммарного содержания углерода и кремния на структуру чугуна: I - белый, II - серый перлитный, III - ферритный чугуны.

отливках малых сечений (охлаждающихся ускоренно) или с небольшим содержанием углерода, надо увеличить в нем содержание кремния. В отливках больших сечений (охлаждающихся медленно) графитизация протекает полнее и содержание кремния может быть меньше.

Марганец в чугуне содержится не более 1,25-1,4%, так как он препятствует графитизации (способствует отбеливанию, особенно в поверхностных слоях отливок).

Сера способствует отбеливанию чугуна и одновременно ухудшает его литейные свойства (жидкотекучесть). Максимальное содержание ее ограничено: для мелких отливок - 0,08%, для крупных (допустима худшая жидкотекучесть) - 0,1-0,12%.

Фосфор практически не влияет на процесс графитизации, но улучшает жидкотекучесть. Содержание его в сером чугуне - до 0,2%, иногда 0,4-0,5% (в художественном литье - до 1%).

Таким образом, изменяя химический состав чугуна (особенно содержание углерода и кремния) и регулируя скорость его охлаждения, управляют процессом графитизации и получают различную структуру металлической основы.

Кроме указанных факторов, процесс графитизации (количество, размер и форма графитных включений) значительно зависит от наличия центров кристаллизации. Так как реальный высокуглеродистый расплав - чугун - не является практически совершенно чистым, то после расплавления он "замутнен", т.е. содержит мельчайшие частицы различных включений и примесей (например, окислов Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , MgO), а иногда и графита. Именно на этих частицах - готовых центрах кристаллизации - начинается оседание атомов углерода

(процесс кристаллизации графита). В этом случае работа образования зародыша графита не больше, чем цементита, и кинетически возможно образование графита непосредственно при кристаллизации. Этому способствует и медленное охлаждение, что подтверждает структура разностенных отливок: в тонких сечениях кристаллизуется цементит, а в толстых - графит. Следовательно, перегрев чугуна значительно выше температуры плавления и растворение этих взвешенных частиц затрудняет образование графита, а введение различных добавок создает дополнительные центры кристаллизации и способствует образованию графита из расплава. Воздействие на процесс графитизации введением дополнительных центров кристаллизации называется модифицированием, вводимые добавки - модификаторами, а чугун - модифицированным. Модифицированный серый чугун получают введением в расплав перед разливкой алюминия, графита, 75%-ного ферросилиция или силикокальция в количестве 0,3-0,8%.

Механические свойства серых чугунов определяет их структура, но главным образом - графитная составляющая, потому что чугун можно рассматривать как сталь с включениями графита, которые, как надрезы, ослабляют металлическую основу. Следовательно, механические свойства зависят от количества, величины и характера распределения включений графита: чем меньше графитных включений, чем они мельче и больше их степень изолированности, тем выше прочность чугуна. Графитные включения значительно влияют на прочность и особенно на пластичность чугуна при растяжении, но сравнительно мало - при сжатии (разрушающая нагрузка при сжатии в 3-5 раз больше, чем при растяжении), поэтому чугун рекомендуют для изделий, работающих на сжатие. В сером чугуне наибольшую прочность и износостойкость имеет металлическая основа с перлитной структурой; присутствие же в ней феррита, не увеличивая пластичность и вязкость, снижает прочность и износостойкость чугуна; наименьшая прочность - у ферритного серого чугуна. Таким образом: а) прочность чугуна определяют строение металлической основы и форма графитных включений; б) пластичность чугуна мало зависит от строения металлической основы, а в основном - от формы графитных включений; в) твердость, определяемая структурой металлической основы, мало зависит от формы графита и составляет

№В 143-255 (1430-2550 МПа).

Известно, что термообработкой можно получить более прочные структуры металлической основы чугуна, чем феррит и перлит, но так как свойства (пластичность и прочность) серого чугуна определяет форма графита, которую при этом существенно изменить нельзя, то, следовательно, термообработка для этих чугунов неэффективна и практически не применяется. Термообработку отливок из серых чугунов производят обычно для снятия литейных напряжений и стабилизации их размеров (отжиг при 500-600°C с выдержкой 2-10 ч и охлаждением в печи, после которой механические свойства изменяются мало, а внутренние напряжения снижаются на 80-90%. Иногда с этой же целью применяют естественное старение (выдержка 6-10 ч), снижающее напряжения на 40-50%.

Серый чугун маркируют буквами СЧ (ГОСТ 1412-79) и цифрами, указывающими среднюю величину временного сопротивления (предел прочности) при растяжении (кгс/мм²).

По свойствам и применению серые чугуны бывают: а) ферритные и ферритно-перлитные СЧ10, СЧ15 ($\sigma_b = 100-150$ МПа, $\sigma_{изг} = 280-320$ МПа) со структурой перлита, феррита и графита грубого или средней величины; применимы для малоответственных деталей с небольшими нагрузками (строительные колонны, фундаментные плиты, кожах, шквы, крштейны, маховики, зубчатые колеса); б) перлитные СЧ18, СЧ21, СЧ24, СЧ25, СЧ30, СЧ35, СЧ40 со структурой мелкопластинчатого перлита (сорбита) с мелкими завихренными графитными включениями; применяют для ответственных деталей, работающих на износ при больших давлениях (стенны станков, поршны, цилиндры, детали компрессорного, турбинного и металлургического оборудования); в) антифрикционные АЧС-1, АЧС-2, АЧС-3 для изготовления подшипников скольжения, втулок и других деталей, работающих в парах трения со смазкой; обеспечивают малый коэффициент трения (т.е. антифрикционность) соотношением перлита и феррита в основе, количеством и формой графита (АЧС-1 и АЧС-2 - перлитные серые чугуны, АЧС-3 - перлитно-ферритный).

г) Высокопрочные чугуны

В высокопрочном чугуне включения графита имеют шаровидную форму. Получают его модифицированием расплава до-

авками магния или церия (0,1-0,2% к весу металла). По содержанию остальных компонентов высокопрочный чугун не отличается от обычного серого (2,7-3,7% C; 1,6-2,7% Si; 0,5-0,6% Mn; \leq 0,10% S и \leq 0,1% P).

Шаровидный графит с минимальной поверхностью при данном объеме значительно меньше ослабляет металлическую основу чугуна, чем пластинчатый. Поэтому чугуны с шаровидным графитом имеют механические свойства выше (прочность при растяжении и изгибе), чем с пластинчатым (отсюда и название - высокопрочный), и не уступают свойствам литой углеродистой стали, сохраняя хорошие литейные свойства и обрабатываемость резанием, способность гасить вибрации, высокую износостойкость и т.д. В них нет острых надрезов (графитные включения шаровидные), и изменение структуры металлической основы в результате термообработки заметно отражается на свойствах. Поэтому для этих чугунов возможны все виды термической обработки для улучшения свойств, применяемые для стали.

Маркируют высокопрочный чугун буквами ВЧ и цифрами: первые указывают среднее значение временного сопротивления при растяжении (предел прочности в кгс/мм²), вторые - относительное удлинение (%). Чугуны ВЧ50-2, ВЧ60-2, ВЧ70-3, ВЧ80-3, ВЧ100-4, ВЧ120-4 имеют перлитную металлическую основу; ВЧ45-5 - перлитно-ферритную и ВЧ38-17, ВЧ42-12 - ферритную. Отливки из этих чугунов используют вместо стали и ковкого чугуна: в авто- и дизелестроении для коленвалов, крышек цилиндров; в тяжелом машиностроении - для деталей прокатных станков; в кузнечно-прессовом оборудовании - для траверс прессов, прокатных валков; в химической и нефтяной промышленности - для корпусов насосов, вентилялей и т.д. Их применяют и для деталей, работающих в подшипниках и других узлах трения при повышенных и высоких давлениях (до 1200 МПа). Антифрикционные высокопрочных чугунов - две марки: АЧВ-1 (2,8-3,5% C, 1,8-2,7% Si, 0,5-1,2% Mn, \leq 0,7% Cu) с перлитной структурой и АЧВ-2 с повышенным содержанием кремния (2,2-2,7% Si) и ферритно-перлитной структурой (~50% перлита). Карвый предназначен для деталей узлов трения с повышенными окружными скоростями и в контакте с упрочненным материалом, а второй - в паре с "сырым" (неупрочненным) материалом.

д) ковкие чугуны

В ковком чугуне включения графита имеют хлопьевидную форму. Получают его из белого чугуна специальным графитизирующим отжигом (томлением). При этом очень важно иметь чисто белый исходный чугун: даже частичная графитизация при кристаллизации (образование пластинчатого графита) вызовет при графитизирующем отжиге отложение графита на уже имеющихся пластинчатых выделениях. Такой чугун будет иметь низкие механические свойства, близкие к свойствам серого чугуна. Следовательно, белый чугун для отжига на ковкий должен иметь пониженное содержание углерода и кремния и несколько повышенное - марганца, чтобы полностью исключить возможность появления пластинчатого графита в структуре при охлаждении. Кроме того, низкое содержание углерода повысит пластичность: уменьшится количество графита, выделяющегося при отжиге. Так как чрезмерное повышение содержания марганца затруднит графитизацию при отжиге, то состав белого чугуна для отжига на ковкий ограничивается сравнительно узкими пределами: 2,5-2,8% C, 0,7-1,5% Si, 0,3-1,0% Mn,

≤ 0,12% S и ≤ 0,18% P (в зависимости от требуемой структуры металлической основы) с исходной структурой из перлита и ледебурита ($P+L(P+U)+U_{II}$). Отжиг проводят в две стадии по графику, приведенному на рис. II.

В процессе нагрева белого чугуна при эвтектоидной температуре протекает перлитно-аустенитное превращение ($P \rightarrow A$).

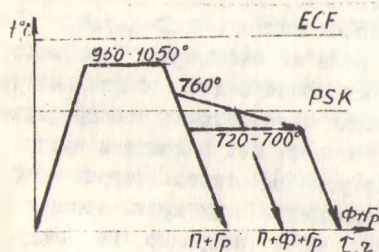


Рис. II. График отжига белого чугуна на ковкий.

Дальнейший нагрев вызывает растворение U_2 в аустените. При температуре первой стадии отжига (950-1050°C) структура чугуна представляет собой $A+L(A+U)$ с небольшим количеством U_2 , т.е. состоит из двух фаз - A и U . Во время длительной выдер-

... (10-15 ч) при этой температуре (первая стадия графити-
... помечит как метастабильная фаза распадается с обра-

образованием аустенита и свободного углерода, т.е. графита:
 $Fe_3C \rightarrow Fe_{\alpha}(C) + Gr$.

В результате распада цементита диффузионным путем образуется хлопьевидный графит (углерод отжига), и белый доэвтектический чугун превращается в ковкий - графитизированный.

При охлаждении от 950-1050°C до температуры начала эвтектоидного превращения из аустенита выделяется часть углерода (согласно линии $E S$), который кристаллизуется в графит на уже имеющихся хлопьях этой фазы при достаточно медленном охлаждении.

В процессе эвтектоидного превращения из аустенита формируется металлическая основа чугуна, которая может быть перлитной, ферритно-перлитной или ферритной. Для получения ферритной основы ковкий чугун следует охлаждать очень медленно (3-5°C в час) в температурном интервале эвтектоидного превращения (700-760°C), т.е. так, чтобы аустенит распался на феррит и графит без образования перлита: $A_{0,8\%C} \rightarrow F_{0,02\%C} + Gr$. Эвтектоидный графит в этом случае также будет наслаиваться на имеющиеся уже хлопья графита. Такой же результат можно получить, если медленное охлаждение заменить изотермической выдержкой ниже эвтектоидной температуры (700-720°C), в процессе которой произойдет графитизация цементита перлита: $Fe_3C \rightarrow Fe_{\alpha}(C) + Gr$. Эту выдержку (или период медленного охлаждения) называют второй стадией графитизации. Следовательно, получить ковкий чугун с ферритной металлической основой можно только двухстадийным графитизирующим отжигом. Если же охлаждение (особенно немного ниже линии PSK) недостаточно медленное или выдержка на второй стадии графитизации недостаточна, то графитизация перлитного цементита протекает не до конца и чугун имеет структуру перлит+феррит+углерод отжига (феррито-перлитный ковкий чугун). Если охлаждение ниже критического интервала температур было ускоренным (например, на воздухе), то процесс графитизации не охватывает цементит перлита; в это случае чугун будет иметь структуру перлит+углерод отжига (перлитный ковкий чугун).

Существенный недостаток процесса получения ковкого чугуна - длительность отжига, составляющая 70-80ч. Для

Его упрочения применяют различные меры (модифицирование алюминием (реже бором, висмутом), повышение температуры первой стадии (но не выше 1080°C), закалка отливок белого чугуна перед графитизирующим отжигом), с помощью которых длительность отжига снижается до 30-60ч.

Ковкий чугун - условное название. По механическим и технологическим свойствам он занимает промежуточное место между сталью и серым чугуном. Его нельзя ковать, но благодаря хлопьевидной (компактной, почти равноосной) форме и изолированности графитных включений ковкий чугун имеет достаточно высокие механические свойства. Ферритный ковкий чугун обладает наибольшей пластичностью, значительной прочностью, хорошей обрабатываемостью (HB 160-170), перлитный - менее пластичен, более тверд (HB 241-269), износостоек. Для повышения твердости, износостойкости и прочности ковкий чугун иногда нормализуют ($800-850^{\circ}\text{C}$), чаще закалывают ($850-900^{\circ}\text{C}$) и подвергают отпуску ($450-700^{\circ}\text{C}$) с получением структуры зернистого перлита.

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ и цифрами: первые две указывают временное сопротивление (предел прочности) при растяжении ($\text{кгс}/\text{мм}^2$), остальные - относительное удлинение. Чугуны КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-2 - с ферритной металлической основой; КЧ50-4, КЧ56-4, КЧ60-3, КЧ63-2 - с перлитной, а антифрикционные АКЧ-1, АКЧ-2 - с феррито-перлитной.

Ковкий чугун - более дешевый материал по сравнению со сталью и используется в автомобильной, тракторной промышленности, сельском хозяйстве, машиностроении, вагоно-, станкостроении для деталей высокой прочности, воспринимающих знакопеременные и ударные нагрузки, работающих в условиях повышенного износа. Широкое его применение обусловлено прежде всего хорошими литейными свойствами исходного белого чугуна, что позволяет получать тонкостенные отливки сложной формы. Ферритные ковкие чугуны идут на изготовление деталей, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы) и для менее ответственных (гайки, глушители, фланцы, муфты). Из перлитного ковкого чугуна изготавливают эмпи карданных валов, шестни и ролики цепей конвейера, ступицы, муфты, тормозные барабаны и детали цепи конвейера, ступицы, муфты, тормозные барабаны и детали цепи конвейера.

• мзные колодки и т.д.

2. Порядок выполнения работы

Изучать классификацию чугунов, их строение и способы получения.

Исследовать под микроскопом микрошлифы, зарисовать их.

Определить к какому виду чугунов относится каждый микрошлиф.

Протравить микрошлифы и изучить микроструктуру под микроскопом, зарисовать, указать структурные и фазовые составляющие.

Указать влияние каждой структурной составляющей на свойства чугуна и различие в свойствах изученных структур.

Составить отчет в соответствии с указанными пунктами.

Содержание отчета

При составлении отчета необходимо привести краткую классификацию чугунов. Начертить часть диаграммы $Fe-Fe_3C$, относящуюся к области чугунов. Дать определение белым, серым, высокопрочным и ковким чугунам. Изучить и зарисовать их микроструктуру до и после травления, объяснить ее. Указать химический состав белых чугунов и их положение на диаграмме. Описать способы получения, свойства и область применения каждого вида чугунов. Указать маркировку.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируют чугуны? 2. Получение, свойства и применение белых чугунов. 3. Маркировка и получение серых, высокопрочных и ковких чугунов. 4. Как влияет форма графита на свойства чугунов? 5. Что такое модифицирование и с какой целью его применяют? 6. Что представляет собой графитизирующий отжиг и для чего его применяют?

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А.П. Металловедение.-М., 1977.-646с.
2. Мозберг Р.К. Материаловедение.-Т., 1976.-550с.
3. Геллер И.А., Рахштадт А.Г. Материаловедение.-М., 1975.-447с.
4. Лахтин Ю.М. Металловедение " термическая обработка сталей.-М., 1981.-359с.

5. Сидорин И.И. Основы материаловедения.-М., 1976,-421с

6. Ляхтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение.-М., 1980.-484с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Лабораторная работа №1. Влияние углерода на структуру и свойства стали в равновесном состоянии.....	3
Лабораторная работа №2. Структура, свойства, термическая обработка и применение сталей	19
Лабораторная работа №3. Микроструктура, свойства и применение чугунов.....	40

Составители: Николай Александрович Свидунович,
Жанна Михайловна Урбанек, Александр Иванович Гарост
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО КУРСУ "МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ"

Редактор И.В.Старовойтова. Корректор О.Ю.Ромаева.

Издано в печать 1.11.85 . АТ 17849 . Формат 6Сл84¹/16.
Печать офсетная. Усл.печ.л.3,7.Усл.кр.-отт.3,7.Уч.-изд.л.3,2.

Тираж 300 экз. Заказ 643 .Цена 10 к.

Отпечатано на ротапринте Белорусского ордена Трудового
Красного Знамени технологического института им. С.М.Кирова.

220630. Минск,Свердлова,13.