

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«АСТРАХАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и транспорта

Кафедра судостроения и энергетических комплексов морской техники

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по выполнению практических, лабораторных и самостоятельных работ для студентов всех направлений и специальностей по дисциплинам: «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов», часть 1

Астрахань – 2015

Автор:

Азизова Г.У. – старший преподаватель кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники

Рецензент:

Кораблин А.В. – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой техники и технологии наземного транспорта

Методические указания содержат требования и рекомендации кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники по выполнению, оформлению и защите отчетов по практическим, лабораторным работам, а также по самостоятельной работе студентов всех направлений и специальностей, изучающих дисциплины: «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов». В методических указаниях изложены цели, приборы и оборудование, краткие теоретические сведения, порядок выполнения работ, требования к отчету, а также контрольные вопросы при защите отчетов по всем видам работ.

Методические указания по выполнению практических, лабораторных и самостоятельных работ для студентов всех направлений и специальностей по дисциплинам: «Материаловедение», «Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов», часть 1 / АГТУ. Сост. Азизова Г.У. – Астрахань, 2015 – 190 с.

Методические указания утверждены на заседании кафедры «Судостроение и энергетические комплексы морской техники» «11» декабря 2015 года, протокол № 4.

Содержание

Часть I. ПРАКТИКУМ и РГР	4
Практическая работа № 1 «Основы теории сплавов, двойные диаграммы»	4
Практическая работа № 2 «Железо и его сплавы»	22
Практическая работа № 3 «Разработка технологического процесса термической обработки»	43
Практическая работа № 4 «Разработка технологического процесса химико-термической обработки»	74
Расчетно-графическая работа № 1 «Диаграммы состояния сплавов»	107
Часть II. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	122
Лабораторная работа № 1. Испытание металлов на твердость	122
Лабораторная работа №2. Микроскопический анализ металлов и сплавов. Структура углеродистой стали в равновесном состоянии	135
Лабораторная работа №3. Диаграмма состояния железо- углерод. Структура, свойства и применение чугунов	154
Лабораторная работа №4. Закалка углеродистых сталей	167
Лабораторная работа №5. Отпуск стали	177
Лабораторная работа №6. Отжиг и нормализация стали	183

Часть I. ПРАКТИКУМ и РГР

Практическая работа № 1 «Основы теории сплавов, двойные диаграммы»

Введение

Чистые металлы из-за низкой прочности применяются, главным образом, в электро- и радиотехнике как проводниковые, электровакуумные и другие материалы. Основными конструкционными материалами являются *металлические сплавы*.

Свойства сплава зависят от многих факторов, но, в первую очередь, они определяются химическим составом фаз и их количественным соотношением. Эти сведения получают из анализа диаграмм состояния, изучению которых посвящена данная работа.

Диаграммы состояния позволяют представить полную картину формирования *равновесной* структуры любого сплава. С их помощью можно также:

- оценить оптимальный состав литейных сплавов и оптимальную температуру их заливки в литейную форму;
- определить температуру термообработки, например, температуру отжига и температуру закалки сталей;
- предсказать микроструктуру сплава в неравновесном состоянии, например, микроструктуру стали после закалки.

1. Основы теории двойных сплавов

1.1. Строение сплавов

Строение сплава, структура и окончательные свойства зависят от вида взаимодействия компонентов сплава при кристаллизации. Металлы в жидком состоянии хорошо растворяются друг в друге, а в твердом могут образовывать механические смеси, твердые растворы, химические соединения.

Механические смеси образуются, если компоненты не вступают в химические реакции и не растворяются друг в друге в твердом состоянии. Механическая смесь (рис. 1) состоит из зерен *A* и *B*, имеющих собственные кристаллические решетки. Примеры таких сплавов: Be-Al, Si-Al, Pb-Sb.

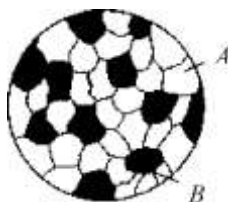


Рис. 1. Механическая смесь компонентов

Твердые растворы образуются, когда компоненты частично или полностью растворяются друг в друге (рис. 2). Первый компонент - *растворитель* (Р) образует собственную кристаллическую решетку, второй - *растворенное*

вещество (РВ) - присутствует в виде отдельных атомов, собственной решетки не имеет.

Твердые растворы внедрения (рис. 2,а) образуются, когда атомы (ионы) растворенного вещества внедряются в междоузельные позиции решетки растворителя. Растворимость ограничена размерами промежутков между атомами решетки растворителя. Растворы внедрения образуются при сплавлении металлов с неметаллами, имеющими малый атомный (ионный) радиус (С, N, В, Н).

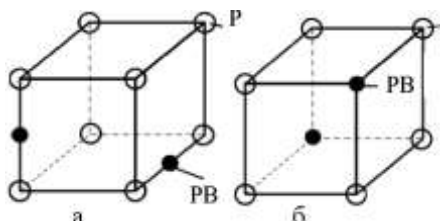


Рис. 2. Твердые растворы:
а - внедрения; б – замещения

Если размеры атомов превышают размеры межатомных промежутков, то это вызывает искажение решетки и возникновение механических напряжений. Концентрация растворов - не более 2...2,5 %.

Твердые растворы замещения (см. рис. 2,б) образуются в том случае, когда размеры атомов (ионов) компонентов отличаются не более чем на 15%. Атомы растворенного вещества замещают атомы растворителя в узлах кристаллической решетки. Если замещение осуществляется в случайных местах, то растворы называют *неупорядоченными*.

Если размеры атомов растворенного элемента больше размеров растворителя, то решетка растягивается, если меньше - сжимается. В первом приближении изменение параметров решетки пропорционально концентрации растворенного компонента и определяет изменение механических свойств твердых растворов замещения. Уменьшение параметра решетки ведет к большему упрочнению, чем увеличение. Твердые растворы замещения бывают *ограниченными* и *неограниченными*. В последнем случае, компоненты должны иметь близкие атомные радиусы и одинаковый тип решетки. Неограниченная растворимость в твердом состоянии наблюдается в сплавах: Cu-Ni, Cu-Au, Si-Ge.

Твердые растворы вычитания образуются в химических соединениях компонентов, в которых отдельные узлы кристаллической решетки не заняты атомами полностью, т. е. образуются вакансии. Появление вакансий связано, как правило, с присутствием ионов переменной валентности (Fe, Mn).

Химические соединения компонентов - сплав, в котором сохраняется определенное соотношение атомов элементов. Состав выражается формулой A_nB_m , где A и B - компоненты, n и m - целые числа. Кристаллическая решетка и свойства сплава резко отличаются от строения и свойств чистых компонентов.

Химические соединения типа металл-неметалл. К ним относятся фазы с ионным типом связи и фазы внедрения. В первом случае в структуре сплава

образуются неметаллические включения сульфидов, оксидов, фосфидов (FeS, MnO, Fe₃P и т. д.). Фазы внедрения образуются как при сплавлении металлов с неметаллами, имеющими малый атомный радиус. В этом случае образуются карбиды, нитриды, бориды.

Химические соединения металл-металл. Электронные соединения образуют одновалентные металлы (Cu, Na, Li) с металлами переходной группы (Fe, Mn, Co) и с металлами с валентностью от 2 до 5 (Al, Mg, Zn). Электронные соединения - фазы переменного состава, в которых отношение числа валентных электронов к числу атомов различно: 3/2 - β-фазы; 21/13 - γ-фазы; 7/4 - ε-фазы. Эти соединения характерны для сплавов на медной основе (латунь, бронза), где являются фазами – упрочнителями. *Фазы Лавеса* имеют формулу AB₂ и образуются при соотношении радиусов атомов компонентов от 1,1 до 1,6 (обычно 1,2).

1.2. Диаграммы состояния двойных сплавов

В процессе охлаждения (нагрева), при изменении концентрации какого-либо компонента в сплавах происходят фазовые и структурные изменения. Изменения можно проследить с помощью диаграмм состояния, представляющих графическое изображение состояния сплавов в зависимости от температуры и концентрации. Фазовые диаграммы строятся для равновесного состояния с минимумом свободной энергии системы, которое достигается при достаточно медленном охлаждении (или нагревании), что на практике трудно реализовать. При быстром охлаждении (нагреве) система может остановиться на промежуточном (метастабильном) уровне. Структура неустойчива и при соответствующих условиях может вернуться в равновесное состояние. Диаграммы состояния позволяют прогнозировать фазовые и структурные изменения в сплавах в метастабильном состоянии. Закономерности сосуществования равновесных фаз определяются *правилом фаз (законом Гиббса)*:

$$c = k - f + 2,$$

где: k - число компонентов, f - число фаз, c - число степеней свободы (вариантность системы), т.е. число внутренних и внешних факторов (температура, давление, концентрация), которые можно изменять без изменения количества фаз в системе. При $c = 1$ возможно изменение одного из факторов в некоторых пределах, без изменения числа фаз. При $c = 0$ внешние факторы нельзя изменить без изменения числа фаз. Если превращения происходят при постоянном давлении, то число переменных уменьшается (единица учитывает изменение температуры):

$$c = k - f + 1.$$

Изменяя соотношение компонентов, получают сплавы, имеющие свою структуру и свойства, температуру плавления и затвердения.

Диаграмма состояния сплавов с полной нерастворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма I рода)

Сначала получают термические кривые охлаждения сплавов. Соединив точки начала и конца кристаллизации сплавов (рис. 3), получают диаграмму состояния (рис. 4). Линия на диаграмме, выше которой сплавы находятся только в жидком состоянии, называется *ликвидус* диаграммы - геометрическое место точек температур начала кристаллизации (T_n). Линия *солидус* - геометрическое место точек температур конца кристаллизации (T_k). Ниже сплавы находятся только в твердом состоянии. Строение сплавов механической смеси компонентов показано на рис. 5.

Анализ диаграммы состояния. Количество компонентов $k = 2$ (химические элементы A, B). Число фаз $f = 3$ (кристаллы A и B , жидкая фаза $Ж$). Линия *солидус* MKN параллельна оси концентраций. Ветви *ликвидуса* OKP пересекаются в *точке эвтектики* K , состав сплава, соответствующий этой точке, называют *эвтектическим*.

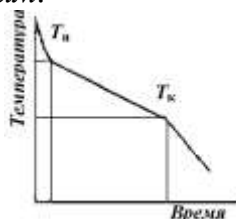


Рис. 3. Термическая кривая охлаждения сплава

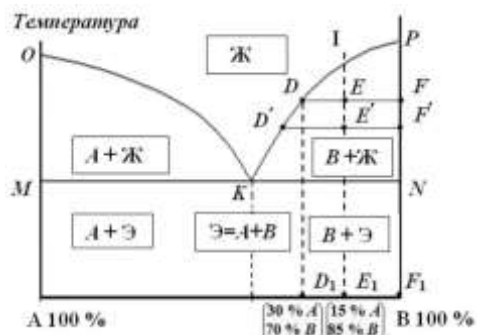


Рис. 4. Диаграмма состояния сплавов с полной нерастворимостью компонентов

Сплавы системы

Чистые компоненты и эвтектический сплав $Э$ кристаллизуются при постоянной температуре (точки O, P и K на диаграмме). Эвтектический сплав соответствует концентрации компонентов A и B в точке K . Механическая смесь двух кристаллов, одновременно кристаллизующихся из жидкости при самой низкой и постоянной температуре, называется *эвтектикой*: $Э = A + B$ (рис. 5,6). Линия, на которой в сплавах образуется эвтектика, - *линия эвтектического превращения*.

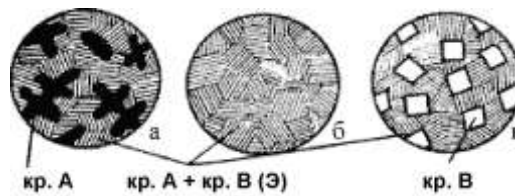


Рис. 5. Микроструктуры сплавов:

а - доэвтектического; б - эвтектического; в – заэвтектического

Кристаллизация доэвтектических сплавов начинается на линии ликвидуса с образования зародышей кристаллов *A*. По мере их роста жидкая фаза обедняется компонентом *A*. При охлаждении до температуры, соответствующей линии диаграммы *MN*, состав жидкой фазы изменяется по ветви линии ликвидуса *OK* до эвтектического. На линии *MN* - одновременная кристаллизация компонентов *A* и *B* (эвтектики). Структура сплава: кристаллы *A* + Э (рис. 5,а). Кристаллизация заэвтектических сплавов подобна кристаллизации доэвтектических. Структура: кристаллы *B* + Э (рис. 5,в).

Число фаз и их концентрацию в любой точке двухфазной области диаграммы можно определить, используя *правило отрезков*.

При охлаждении сплава *I* на линии *KP* (рис. 4) выделяются кристаллы *B*. Состав жидкости изменяется в сторону роста компонента *A*, достигая эвтектической концентрации при эвтектической температуре.

1. Чтобы определить процентное соотношение компонентов *A* и *B* в сплаве *I* в точке *E* (рис. 4), необходимо через эту точку опустить перпендикуляр на основную ось концентраций. Проекция точки *E* - точка *E₁*. Отрезок *AB* определяет все количество сплава (100%), отрезок *AE₁* - количество компонента *B* (85 %), отрезок *E₁B* - количество компонента *A* (15%). Сплав *I* в точке *E* имеет двухфазную структуру: жидкая фаза *Ж* и кристаллы компонента *B*.

2. Чтобы определить количество фаз в точке *E*, необходимо через эту точку провести изотермическую линию (*конноду*). Первые точки пересечения конноды с линиями диаграммы (*D* и *F*) определяют присутствующие фазы. Количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам проведенной конноды.

Количество всего сплава $Q = Q_{жс} + Q_{ТВ}$ определяет отрезок *DF* (принимается за 100%). Количество твердой фазы $Q_{ТВ} = \frac{DE}{DF} \cdot 100\%$ - отрезок *DE*, прилегающий к линии ликвидус (40%). Количество жидкой фазы $Q_{жс} = \frac{EF}{DF} \cdot 100\%$ - отрезок *EF*, прилегающий к оси ординат (60%).

Для проверки количественного соотношения фаз необходимо, например, понизить температуру сплава. Точка *E* опускается до точки *E'*. Соотношение отрезков изменяется. Количество всего сплава определяет отрезок *D'F'* (принимается за 100 %), количество твердой фазы - отрезок *D'E'* (55%), жидкой - отрезок *E'F* (45%). В процессе кристаллизации количество твердой фазы увеличивается, жидкой - уменьшается.

3. Для определения состава фаз при температуре, соответствующей точке E , из точек пересечения конноды с линиями диаграммы D и F опускаются перпендикуляры на основную ось концентраций.

Проекция точки D точка D_1 покажет состав жидкой фазы $Ж$. Отрезок AB - 100%, отрезок AD_1 - 70% компонента B , отрезок D_1B - 30% компонента A . Состав жидкости: $Ж = 70\% B + 30\% A$.

Проекция точки F точка F_1 покажет состав твердой фазы. Точка F_1 на диаграмме совпадает с точкой B , которая соответствует чистому компоненту B - 100%, при этом количество компонента A - 0%. Состав твердой фазы сплава: 100% $B + 0\% A$.

Для сплавов механических смесей компонентов характерна *ликвация* (химическая неоднородность). При медленном процессе кристаллизации в нижней части слитка преобладают кристаллы с большим удельным весом. Чтобы предотвратить ликвацию применяют ускоренное охлаждение слитка, механическое перемешивание, вибрацию и т. д. Примеры сплавов с полной нерастворимостью компонентов - $Al-Si$, $Pb-Sb$.

Диаграмма состояния сплавов с полной растворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма II рода)

Количество компонентов $k = 2$ (химические элементы A, B). Число фаз $f = 2$ (кристаллы α -твердого раствора, жидкая фаза). Линия AaB - ликвидус, AbB - солидус.

Сплавы системы. Чистые компоненты кристаллизуются при постоянных температурах. Кристаллизация любого сплава начинается на линии ликвидуса (рис. 6, точка a) с образования зародыша α -твердого раствора, обогащенного тугоплавким компонентом B . При понижении температуры до точки (b) количество жидкой фазы уменьшается, твердой - увеличивается. За счет процессов диффузии постоянно изменяется состав фаз. Периферийная часть растущего зерна обогащена легкоплавким компонентом A , что приводит к *внутрикристаллической ликвации*. Кристаллизация заканчивается в точке (b) на линии солидус. Строение сплавов с полной растворимостью компонентов показано на рис. 7. Примеры сплавов - система $Cu-Ni$.



Рис. 6. Диаграмма состояния сплавов с полной растворимостью компонентов

Число фаз и их соотношение. Через выбранную точку (m) проводят изотерму (конноду) до пересечения с линиями диаграммы ликвидус и солидус. Состав жидкой (твердой) фаз определяется проекциями точек пересечения изотермы с линией ликвидус (солидус) на ось концентрации. Состав жидкой фазы изменяется по линии ликвидуса, твердой - по линии солидуса. С понижением температуры состав фаз изменяется в сторону уменьшения содержания компонента B .

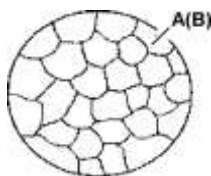


Рис. 7. Схема твердого раствора

Соотношение жидкой и твердой фаз. Количественная масса фаз обратно пропорциональна отрезкам, проведенной конноды. Количество всего сплава (Q) определяет отрезок (pq), твердой фазы ($Q_{тв}$) - отрезок (mp), прилегающий к линии ликвидус, жидкой ($Q_{ж}$) - отрезок (mq), прилегающий к линии солидус:

$$Q_{тв} = \frac{mp}{pq} \cdot 100\% ; \quad Q_{ж} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\% .$$

Неравновесная кристаллизация. Линия ($Bn'nq'b'$) на рис. 6 - линия неравновесного солидуса. При неравновесной кристаллизации, при температуре соответствующей точке n' будут выделяться кристаллы α -твердого раствора. Состав твердой фазы будет соответствовать точке n' , лежащей на линии равновесного солидуса. При температуре, соответствующей точке n , концентрация кристаллов α -твердого раствора отличается от равновесной. В сплаве содержится некоторое количество жидкой фазы: $Q'_{ж} = \frac{qn}{pn} \cdot 100\% .$

При неравновесной кристаллизации сплавы затвердевают ниже равновесной температуры затвердевания.

Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов в твердом состоянии (диаграмма III рода) характеризует систему сплавов, образующих твердые растворы в ограниченной области составов, за пределами которой образуется механическая смесь из кристаллов твердых растворов. Диаграмма состояния представляет собой комбинацию первых двух типов диаграмм.

Диаграмма состояния сплавов с эвтектическим превращением встречается в составе сложных диаграмм распространенных промышленных сплавов (Fe-C, Al-Cu).

Количество компонентов $k = 2$ (A и B). Число фаз $f = 3$: жидкая фаза и кристаллы α - и β -твердых растворов.

Линии и точки диаграммы. Линия ликвидус - GCH , солидус - $GEDH$. Точки E и N указывают предельную постоянную растворимость α -твердого раствора, точки D и F - предельную переменную растворимость β -раствора.

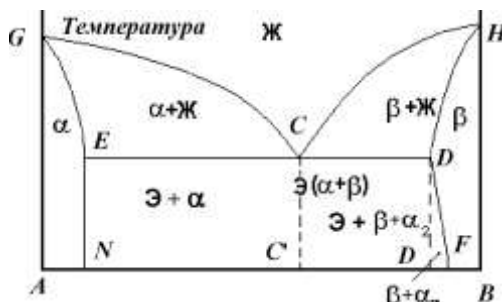


Рис. 8. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью компонентов

Сплавы системы

Компоненты A и B образуют твердые растворы слева от линии EN (α -раствор) и справа от линии DF (β -раствор). Процесс аналогичен тому, который происходит в сплавах с диаграммой состояния II рода.

Выше линии солидус в областях диаграммы GEC и CDH все сплавы имеют двухфазную структуру: ($\alpha + Ж$) и ($\beta + Ж$).

Точка C - *эвтектическая точка*. Линия ED - линия, в пределах которой протекает *эвтектическое превращение* аналогично тому, как это имеет место на диаграммах состояния I рода. Отличие заключается в том, что в данном случае эвтектика состоит не из механической смеси кристаллов A и B , а из механической смеси α - и β -твердых растворов.

Кристаллизация доэвтектических сплавов (между точками C и E) начинается с выделения кристаллов α -твердого раствора и заканчивается эвтектической реакцией: $\alpha + Ж \rightarrow \alpha + Э(\alpha + \beta)$.

Кристаллизация заэвтектических сплавов (между точками C и D) начинается с выделения β -твердого раствора. На линии CD идет эвтектическая реакция: $\beta + Ж \rightarrow \beta + Э(\alpha + \beta)$. При охлаждении сплавов от эвтектической температуры предельная растворимость атомов компонента A в решетке компонента B падает, β -твердый раствор *пересыщен* компонентом A . Чтобы система пришла в равновесие, необходимо выделить излишек атомов A из β -раствора. Чистые компоненты не могут существовать в виде отдельной фазы. Образуется α -твердый раствор, который в β -твердом растворе располагается в виде мелкодисперсных включений. Избыточные кристаллы, выделяющиеся не из жидкости, а из твердого раствора, обозначаются $\alpha_{\text{п}}$ (вторичные α -кристаллы). Выделение новой фазы - *вторичная кристаллизация*.

Диаграмма состояния сплавов с устойчивым химическим соединением компонентов (диаграмма IV рода)

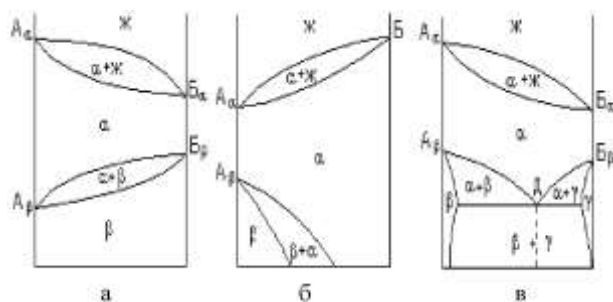


Рис. 10. Диаграммы состояния сплавов с полиморфным превращением компонентов

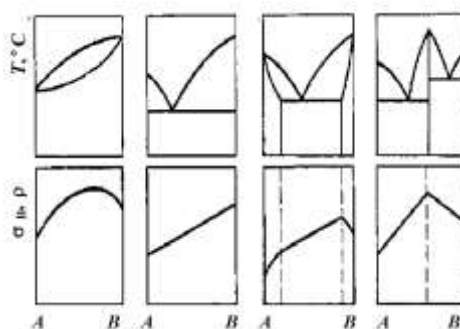


Рис. 11. Связь между свойствами сплавов и типом диаграммы состояния

1. При образовании твердых растворов с неограниченной растворимостью свойства сплавов изменяются по криволинейной зависимости. Некоторые свойства, например электросопротивление, могут значительно отличаться от свойств чистых компонентов.
2. Свойства механических смесей изменяются по линейному закону. Значения характеристик свойств каждого сплава находятся в интервале между характеристиками чистых компонентов.
3. При образовании твердых растворов с ограниченной растворимостью в интервале концентраций, отвечающих однофазным твердым растворам, свойства изменяются по криволинейному закону, в двухфазной области - по линейному закону. Крайние точки отражают свойства чистых фаз, предельно насыщенных твердых растворов, образующих данную смесь.
4. При образовании химических соединений концентрация химического соединения отвечает максимуму на кривой.

2. Задания для самостоятельной работы

А. Начертите диаграмму состояния *Pb-Sb* (рис. 12).

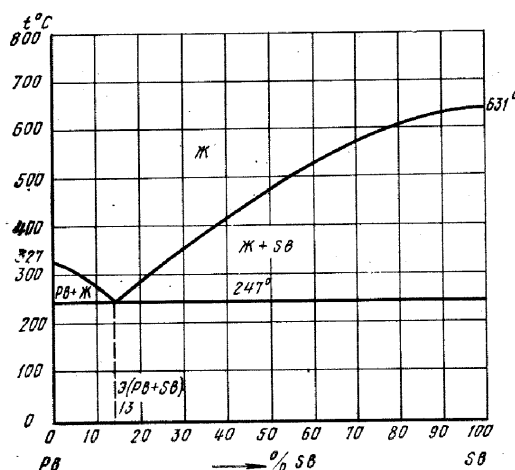


Рис. 12. Диаграмма состояния системы $Pb-Sb$.

Обозначьте точки на этой диаграмме. Охарактеризуйте, в целом, данную диаграмму и кратко ответьте на следующие вопросы:

1. Укажите компоненты и фазы в данной системе.
2. Каков физический смысл температур 327 и 631°C?
3. Укажите линии ликвидус и солидус и объясните их физический смысл.
4. К какому типу сплавов относится данный сплав?
5. Укажите состав сплава, обладающего минимальной температурой плавления. Какова эта температура? Как называется такой сплав?
6. Заполните незаполненные области диаграммы состояния. Как называются сплавы, соответствующие этим областям?
7. Для сплава, содержащего 30, 50 или 70% Sb , восстановите кривую охлаждения, начиная из жидкого состояния, и укажите фазовые превращения на каждом участке этой кривой.
8. Для сплава содержащего 30, 50 или 70% Sb , найдите концентрацию Sb в жидкой фазе при 300°C и отношение масс жидкой и твердой фаз.
9. С помощью диаграмм состав-свойства постройте и кратко объясните зависимость твердости сплава от концентрации Sb .

Б. Начертите диаграмму состояния $Sn-Zn$ (рис. 13).

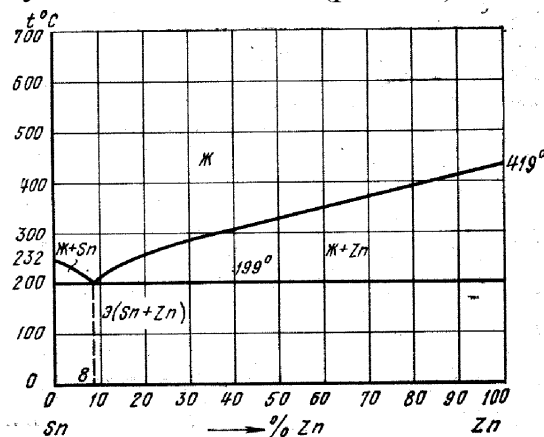


Рис. 13. Диаграмма состояния системы $Sn-Zn$.

Обозначьте точки на этой диаграмме. Охарактеризуйте, в целом, данную диаграмму состояния. Кратко ответьте на следующие вопросы:

1. Каков физический смысл температур 232 и 419°C?
2. Укажите линии ликвидус и солидус и объясните их физический смысл.
3. К какому типу сплавов относится данный сплав?
4. Укажите химический состав сплава, обладающего минимальной температурой плавления. Какова эта температура? Как называется такой сплав?
5. Заполните незаполненные области диаграммы состояния. Как называются сплавы, соответствующие этим областям?
6. Для сплава, содержащего 50, 70 или 90% *Zn*, восстановите кривую охлаждения, начиная с жидкого состояния, и укажите фазовые превращения на каждом участке этой кривой.
7. Для сплава, содержащего 50, 70 или 90% *Zn*, найдите концентрацию *Zn* в жидкой фазе при 300°C и отношение масс жидкой и твердой фаз.
8. С помощью диаграмм состав - свойства постройте и кратко объясните зависимость твердости сплава от концентрации *Zn*.

В. Начертите диаграмму состояния *Cu-Ni* (рис. 14).

Обозначьте точки на этой диаграмме. Охарактеризуйте, в целом, данную диаграмму состояния. Кратко ответьте на следующие вопросы:

1. Каков физический смысл температур 1084 и 1451°C?
2. Укажите линии ликвидус и солидус и объясните их физический смысл.
3. К какому типу сплавов относится данный сплав?
4. Как называется фаза α и каков ее физический смысл?
5. Чем отличаются неограниченные твердые растворы от ограниченных?
6. Для сплава, содержащего 40 или 70% *Ni* восстановите кривую охлаждения, начиная с жидкого состояния, и укажите фазовые превращения на каждом участке этой кривой.
7. Для сплава *Cu* - 40% *Ni* найдите концентрацию *Ni* в жидкой и твердой фазах при 1200°C и отношение масс этих фаз.
8. Постройте зависимость твердости сплава от концентрации *Ni*, используя диаграммы состав - свойства.

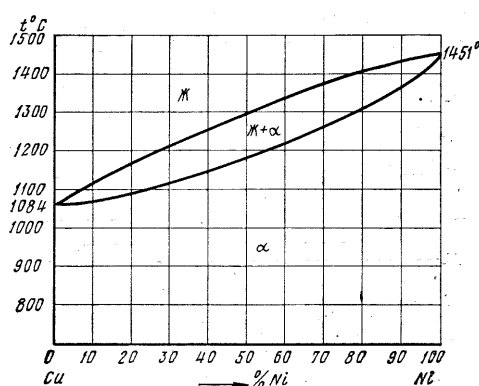


Рис. 14. Диаграмма состояния *Cu-Ni*.

Г. Начертите диаграмму состояния $Cd-Zn$ (рис. 15).

Обозначьте точки на этой диаграмме. Охарактеризуйте, в целом, данную диаграмму состояния. Кратко ответьте на следующие вопросы:

1. Каков физический смысл температур 321 и 419°C?
2. Укажите линии ликвидус и солидус и объясните их физический смысл.
3. К какому типу сплавов относится данный сплав?
4. Как называются фазы α и β . Укажите пределы растворимости второго компонента в фазах α и β . При какой температуре достигаются эти пределы растворимости?
5. Укажите химический состав сплава, обладающего минимальной температурой плавления. Какова эта температура? Как называется такой сплав.
6. Заполните незаполненные области диаграммы состояния.
7. Укажите интервал концентраций и фазовый состав доэвтектических, эвтектического и заэвтектических сплавов.
8. Что обозначают фазы α_n и β_n ? В чем их отличие от фаз α и β ?
9. Для сплава, содержащего 40, 60 или 80% Zn , восстановите кривую охлаждения, начиная с жидкого состояния, и укажите фазовые превращения на каждом участке этой кривой.
10. Для сплава, содержащего 40, 60 или 80% Zn , найдите концентрацию Zn в жидкой и твердой фазах при 300°C и отношение масс жидкой и твердой фаз.
11. С помощью диаграмм состав - свойства постройте зависимость твердости сплава от концентрации Zn .

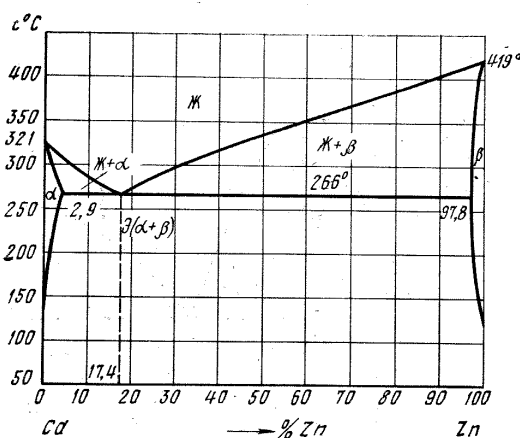


Рис. 15. Диаграмма состояния $Cd-Zn$.

Д. Начертите диаграмму состояния $Mg-Ca$ (рис. 16).

Обозначьте точки на этой диаграмме. Охарактеризуйте, в целом, данную диаграмму состояния. Кратко ответьте на следующие вопросы:

1. Каков физический смысл температур 651 и 805°C?
2. Укажите линии ликвидус и солидус и объясните их физический смысл.
3. К какому типу сплавов относится данный сплав?

4. Как называется фаза Mg_2Ca_3 . Сколько вес. % Ca содержит эта фаза? Какова ее температура плавления?
5. Укажите химический состав сплава, обладающего минимальной температурой плавления. Какова эта температура? Как называется такой сплав.
6. Заполните незаполненные области диаграммы состояния.
7. Для сплава $Mg - 40\% Ca$ восстановите кривую охлаждения, начиная с жидкого состояния, и укажите фазовые превращения на каждом участке этой кривой.
8. Для сплава $Mg - 40\% Ca$ найдите концентрацию Ca в жидкой и твердой фазах при $600^\circ C$ и отношение масс жидкой и твердой фаз.
9. С помощью диаграмм состав - свойства постройте и кратко объясните зависимость твердости сплава от концентрации Ca .

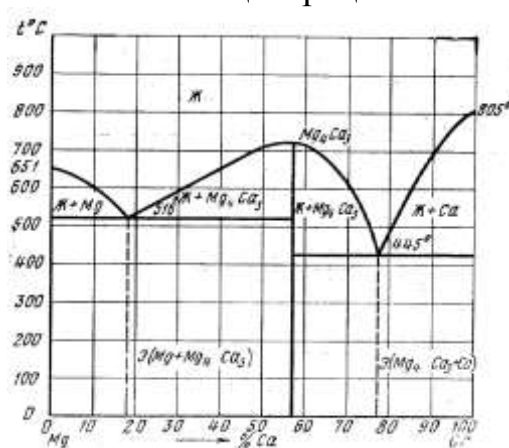


Рис. 16. Диаграмма состояния $Mg-Ca$.

3. Тестовые задания

1. Какое из следующих утверждений справедливо для точки B на диаграмме состояния $Cu-Ni$ (рис. 17)?

Ответы:

- (а) сплав состоит из Cu фазы и Ni фазы.
- (б) твердая и жидкая фазы имеют одинаковый состав.
- (в) жидкая фаза содержит больше Ni , чем твердая.
- (г) твердая фаза содержит больше Ni , чем жидкая.

2. При какой температуре начнется первичная кристаллизация жидкого сплава $Cu-Ag$, содержащего 45 вес. % Ag , если охлаждение сплава начинается от $1200^\circ C$ (см. рис. 18)?

Ответы:

- (а) $1200^\circ C$
- (б) $1100^\circ C$

- (в) 900°C
- (г) 779°C

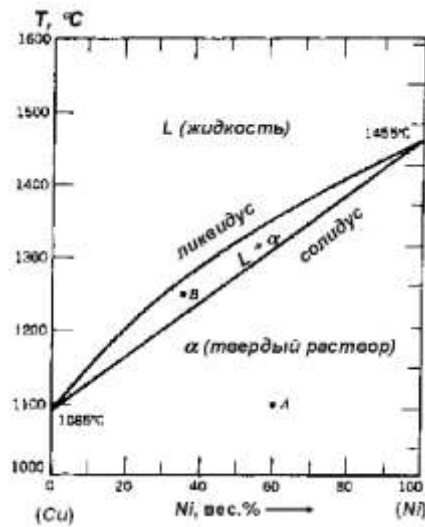


Рис. 17. Диаграмма состояния *Cu-Ni*.

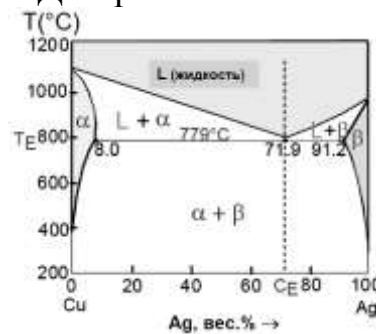


Рис. 18. Диаграмма состояния *Cu-Ag*.

3. Сплав *Cu-Ag* (см. рис. 18) содержит 25 вес.% *Ag*. Каков состав α -фазы при 600°C ?

Ответы:

- (а) 96 вес. % *Ag*
- (б) 25 вес. % *Ag*
- (в) 8 вес. % *Ag*
- (г) 3 вес. % *Ag*

4. Какова массовая доля β -фазы в сплаве *Cu* - 25 вес. % *Ag* (рис. 18) при 778°C?

Ответы:

- (а) 0,204
- (б) 0,796
- (в) 8,0 вес. % *Ag*
- (г) 91,2 вес. % *Ag*

5. Какая из следующих микроструктур (см. рис. 19) наилучшим образом характеризует финальную микроструктуру, которая формируется в сплаве $Cu - 80 \text{ вес. \% } Ag$ (см. рис. 18), медленно охлаждаемом в интервале температур от 1200 до 200°C?

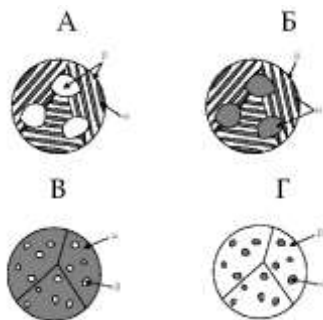


Рис. 19.

Ответы:

- (а) микроструктура А
- (б) микроструктура Б
- (в) микроструктура В
- (г) микроструктура Г

6. Какая из следующих микроструктур (см. рис. 19) наилучшим образом характеризует микроструктуру, которая формируется в сплаве $Cu - 4 \text{ вес. \% } Ag$ (см. рис. 18), медленно охлаждаемом в интервале температур от 1200 до 200°C?

Ответы:

- (а) микроструктура А
- (б) микроструктура Б
- (в) микроструктура В
- (г) микроструктура Г

7. На рис. 20 показана кривая охлаждения двойной системы. Сколько фаз существует в равновесии при температуре T_E , указанной стрелкой?

Ответы:

- (а) одна фаза
- (б) две фазы
- (в) три фазы
- (г) четыре фазы

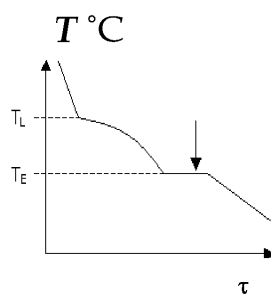


Рис. 20.

8. Количества компонентов и фаз в сплаве состава 92% Sn - 8% Zn при температуре 199°C (рис. 21) составляют, соответственно

Ответы:

- (а) 1 и 2
- (б) 2 и 2
- (в) 3 и 3
- (г) 2 и 3

9. Каким компонентом будут обогащена сердцевина зерен твердого раствора и какая периферия в сплаве 70% Cu - 30% Ni (см. рис. 17), если в нем имеется дендритная ликвация?

Ответы:

- (а) сердцевина зерен и периферия обогащены Ni
- (б) сердцевина зерен обогащена Ni, а периферия - Cu
- (в) сердцевина зерен обогащена Cu, а периферия - Ni.

10. Как влияет внутрикристаллитная ликвация на свойства сплава?

Ответы:

- (а) повышает прочность и пластичность
- (б) снижает пластичность и коррозионную стойкость
- (в) повышает пластичность, но снижает коррозионную стойкость.

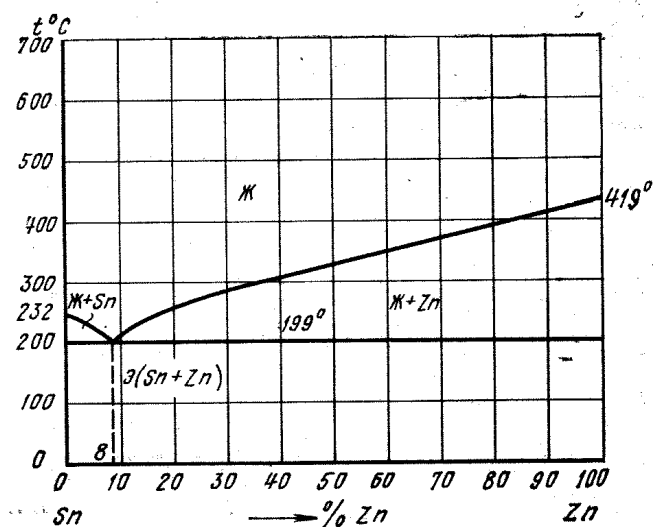


Рис. 21. Диаграмма состояния Sn-Zn.

11. Какое влияние оказывает увеличение скорости охлаждения сплава при его кристаллизации на ликвацию по плотности?

Ответы:

- а) не оказывает влияния
- б) усиливает ликвацию
- в) ослабляет ликвацию.

12. Какой из следующих сплавов системы $Cu-Ni$ (см. рис. 17) будет иметь наибольшую твердость? Ответ объяснить.

Ответы:

- (а) материал А: 100 % Cu
- (б) материал Б: 100 % Ni
- (в) материал В: 50 % Cu + 50 % Ni
- (г) все материалы будут иметь одинаковую твердость.

Литература

1. Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 2005. - 648 с. 5 экз.
2. Пейсахов А.М., Кучер А.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для студентов немашиностроительных специальностей / 3-е изд. – СПб.: Издательство Михайлова В.А., 2005. - 416 с. 40 экз.
3. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов / Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2007. – 535 с. 6 экз.
4. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1987. - 646 с. 37 экз.
5. Казаков Н.Ф., Осокин А.М., Шишкова А.П. Технология металлов и других конструкционных материалов. – М.: Металлургия, 1995. - 529 с. 45 экз.
6. Худокормова Р.Н. Материаловедение ; лаб. Практикум.; учеб. Пособие для вузов.; под. ред. Л. С. Ляховича. – Минск; Высш. шк., 1988. – 224 с. 48 экз.

Введение

Совершенствование производства, выпуск современных разнообразных машиностроительных конструкций, специальных приборов, машин и различной аппаратуры невозможны без дальнейшего развития производства и изыскания новых материалов, как металлических, так и неметаллических.

Материаловедение является одной из первых инженерных дисциплин, основы которой широко используются при курсовом и дипломном проектировании, а также в практической деятельности инженера-машиностроителя.

Прогресс в области машиностроения тесно связан с созданием и освоением новых, наиболее экономичных материалов, обладающих самыми разнообразными механическими и физико-химическими свойствами. Свойства материала определяются его внутренним строением, которое, в свою очередь, зависит от состава и характера предварительной обработки. В курсе «Материаловедение» изучаются физические основы этих связей.

Методические указания посвящены изучению железоуглеродистых сплавов (сталей и чугунов) и помогут студентам при дальнейшем изучении дисциплин профессионального цикла.

1. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Компоненты и фазы. Железо - металл серебристо-белого цвета. Температура плавления - 1539°C, плотность 7,87 г/см³. Атомный радиус - 0,127 нм, ионный Fe²⁺ - 0,078 нм, Fe³⁺ - 0,064 нм, имеет две полиморфные модификации: α-железо (Fe_α) с ОЦК решеткой до 911°C и выше 1392°C, γ-железо (Fe_γ) с ГЦК решеткой, существующее в интервале от 911 до 1392°C. Период решетки α-железа - 0,286 нм, γ-железа - 0,365 нм. До температуры 768°C (точка Кюри) железо ферромагнитное.

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

Углерод - неметалл. Атомный радиус 0,077 нм; ковалентные радиусы: 0,077; 0,067 и 0,060 нм в одинарной, двойной и тройной связях соответственно; ионный радиус C^{4+} - 0,015 нм. Имеет модификации *графита* со слоистой решеткой, кубической *алмаза* и фуллерена. Плотность графита составляет 1,5...2,2 г/см³, температура возгонки - 3500°C. У гексагонального α -*графита* атомы каждого слоя располагаются над и под центрами шестиугольника (рис. 1). Положение слоев повторяется через один. Каждый слой сдвинут относительно другого в горизонтальном направлении на 0,142 нм. У ромбоэдрического β -*графита* каждый четвертый слой повторяет первый, в чистом виде не встречается. Метод синтеза алмазов - взрыв графита со скоростью детонации 7...8 км/с, при давлении 20...30 ГПа (1 ГПа = 10⁴ атм.), температура - около 4000°C.

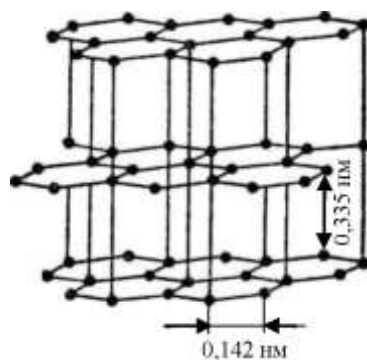


Рис. 1. Решетка графита

Феррит (Ф) - твердый раствор внедрения углерода в α -железе (рис. 2,а). Минимальная растворимость углерода при комнатной температуре - 0,006% (точка Q на рис. 3), максимальная - 0,02% при 727°C (точка P).

Выше 1392°C существует высокотемпературный феррит с растворимостью углерода 0,1% при 1499°C. Свойства феррита близки к свойствам железа. Обладает малой твердостью (130 HB), высокой пластичностью ($\delta = 30\%$), магнитен до температуры 768°C.

Аустенит (А) - твердый раствор углерода в γ -железе (рис. 2,б) имеет минимальную растворимость углерода 0,8% при 727°C (точка *S* на рис. 3), максимальную - 2,14% при 1147°C (точка *E*). Аустенит прочнее феррита (твердость 250 *HB*), парамагнитен.

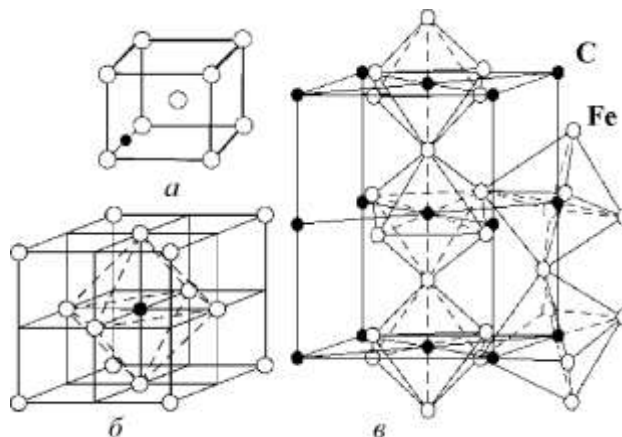


Рис. 2. Кристаллические решетки:

a - феррита; *б* - аустенита; *в* – цементита.

Цементит (Ц) - химическое соединение железа с углеродом (карбид железа Fe_3C) содержит 6,69% углерода, имеет орторомбическую решетку (рис. 2,в). Температура плавления 1252°C, точка Кюри - 210°C, плотность - 7,82 г/см³. Цементит - метастабильная фаза: при нагревании разлагается на железо и углерод. Твердость - 800 *HB*. Химические и физические свойства цементита первичного Ц_I, вторичного Ц_{II} и третичного Ц_{III} одинаковы. Ц_I выделяется из жидкой фазы в виде крупных пластинчатых кристаллов, Ц_{II} - из аустенита в виде сетки вокруг зерен аустенита (при дальнейшем охлаждении вокруг зерен перлита), Ц_{III} - из феррита в виде мелких включений.

Преобразования в сплавах системы Fe-C. Сплавы железа, содержащие более 6,69% углерода, не имеют практического применения.

Обычно рассматривается левая часть диаграммы (рис. 3). Линия *ACD* - ликвидус системы, линия *AECF* - солидус. На линии *AC* начинается, на линии *AE* заканчивается кристаллизация аустенита. На линии *CD* начинается кристаллизация цементита первичного.

На линии ECF при температуре 1147°C идет эвтектическое превращение: расплав с содержанием $4,3\%$ углерода превращается в эвтектическую смесь аустенита и цементита первичного: $Ж \rightarrow A + Ц_I$. Эвтектика называется *ледебуритом* ($Л$) и содержит $4,3\%$ углерода.

На линии GS начинается, на линии GP заканчивается превращение аустенита в феррит, обусловленное превращением $Fe_{\gamma} \rightarrow Fe_{\alpha}$.

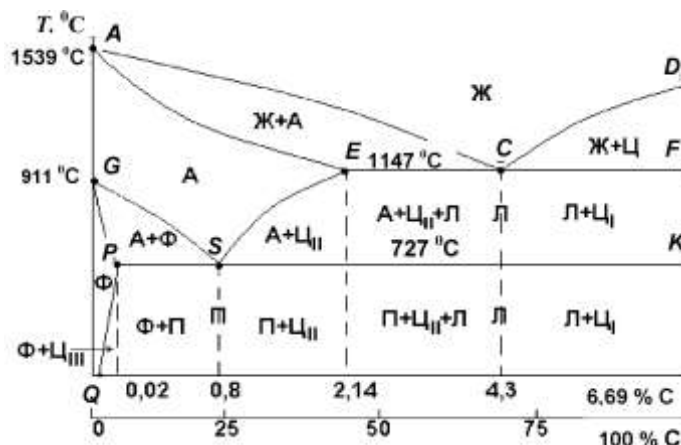


Рис. 3. Диаграмма состояния сплавов *железо-углерод*.

На линии ES начинается выделение $Ц_{II}$ из аустенита, обусловленное снижением предельной растворимости углерода.

На линии PSK при постоянной температуре 727°C идет *эвтектоидное превращение*: аустенит с $0,8\%$ углерода, превращается в эвтектоидную смесь феррита и цементита вторичного: $A_{0,8} \rightarrow \Phi + Ц_{II}$. Эвтектоид называется *перлитом* ($П$) и содержит $0,8\%$ углерода. Полированный и протравленный шлиф имеет перламутровый блеск.

На линии PQ начинается выделение $Ц_{III}$ из феррита, так как уменьшается растворимость углерода при снижении температуры.

Температуры, при которых происходят фазовые и структурные превращения в сплавах системы *железо-цементит* (критические точки), обозначают буквой A (от французского *arret* - остановка): A_1 - линия PSK (727°C) - превращение $П \leftrightarrow A$; A_2 - линия, соответствующая точке Кюри (768°C); A_3 - линия GS (переменная температура, зависящая от содержания углерода в

сплаве) - превращение $\Phi \leftrightarrow A$; A_{cm} - линия SE - переменная температура, зависящая от содержания углерода в сплаве, - начало выделения Ц_{II} (иногда обозначается A_3).

При нагреве и охлаждении превращения совершаются при различных температурах. При обозначении процесса нагревания добавляют букву (с) - A_{c1} , охлаждения букву (з) - A_{z1} .

Структуры железоуглеродистых сплавов. Сплавы системы железо-цементит по содержанию углерода делятся на стали и чугуны:

1. Железо с содержанием углерода до 0,02% называют *техническим*. Микроструктура сплава содержит зерна феррита при содержании углерода до 0,006% (рис. 4,а). При увеличении углерода до 0,02% по границам зерен феррита расположены зерна Ц_{III} .

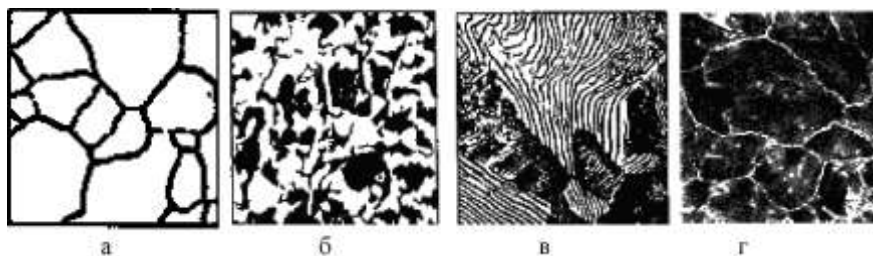


Рис. 4. Микроструктуры технического железа и сталей:

а - железо; б - доэвтектоидная; в - эвтектоидная; г - заэвтектоидная стали

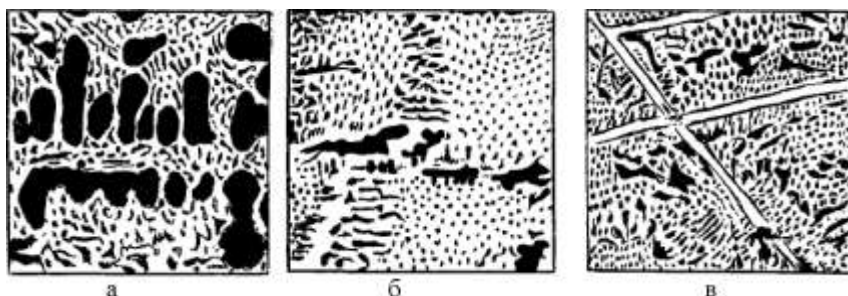


Рис. 5. Микроструктуры белых чугунов:

а - доэвтектические; б - эвтектические; в – заэвтектические

2. *Углеродистые стали* - сплавы железа с содержанием углерода 0,02...2,14%. Они кристаллизуются с образованием аустенита.

Микроструктура сталей формируется в результате перекристаллизации аустенита. По содержанию углерода и структуре стали делятся на: доэвтектоидные, структура $\Phi + \Pi$ (рис. 4,б); эвтектоидные, структура - пластинчатый перлит (рис. 4,в); заэвтектоидные, структура $\Pi + \text{Ц}_{\text{ш}}$, цементитная сетка располагается вокруг зерен перлита (рис. 4,г).

3. Сплавы с содержанием углерода от 2,14 до 6,69% кристаллизуются с образованием легкоплавкой эвтектики (ледебурита) и называются белыми чугунами. Они имеют высокую твердость и хрупкость, излом серебристо-белый. По количеству углерода и структуре белые чугуны (рис. 5) делятся на: *доэвтектические*, структура – $\Pi + \text{Л} + \text{Ц}_{\text{ш}}$; *эвтектические* - ледебурит; *заэвтектические* – $\text{Л} + \text{Ц}_{\text{г}}$. Фазовый состав сталей и чугунов при нормальных температурах одинаков: феррит и цементит. Однако свойства сталей и белых чугунов отличаются сильно.

2. Углеродистые стали

Углеродистые стали - сплавы железа с углеродом с общим содержанием остальных примесей не более 1%. Свойства стали определяются количеством углерода (рис. 6) и содержанием примесей, которые взаимодействуют с железом и углеродом. С ростом содержания углерода количество цементита увеличивается, феррита - уменьшается. Прочность стали повышается до содержания углерода около 1%, затем уменьшается, так как образуется грубая сетка цементита вторичного. Увеличение содержания углерода повышает порог хладноломкости, но снижает ударную вязкость (a_n), ухудшает литейные свойства, обрабатываемость давлением. Низкоуглеродистые стали плохо обрабатываются резанием, но хорошо свариваются.

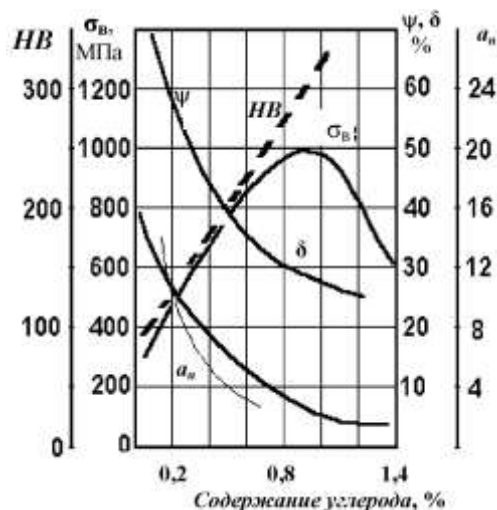


Рис. 6. Влияние углерода на свойства стали.

Влияние примесей

1. Постоянные примеси: марганец, алюминий, кремний, сера, фосфор. Марганец, кремний и алюминий добавляют в сталь для раскисления при выплавке, они являются технологическими примесями. Содержание марганца и алюминия не превышает 0,5...0,8%. Марганец повышает прочность стали, не снижая пластичности. Алюминий, дегазируя металл, повышает плотность слитка. Содержание кремния не должно превышать 0,35...0,4%. Кремний растворяется в феррите и увеличивает предел прочности и предел текучести.

Фосфор попадает в сталь при ее выплавке из чугуна. Содержание фосфора в сталях - 0,025...0,045%. Растворяясь в феррите, он искажает кристаллическую решетку и увеличивает предел прочности, но снижает пластичность и вязкость; повышает температуру перехода в хрупкое состояние (20...25°C на 0,01% Р) - явление *хладноломкости*. Стали с примесью фосфора до 0,1...0,15% хорошо обрабатываются резанием, но склонны к ликвации.

Сера также попадает в сталь при ее выплавке из чугуна. Содержание серы в сталях - 0,025...0,06%. Сера с железом образует сульфид FeS, который, в свою очередь, образует с железом (с аустенитом) легкоплавкую эвтектику с

температурой плавления 988°C . При нагреве эвтектика плавится, нарушаются связи между зернами. При деформации в местах расположения эвтектики возникают надрывы и трещины, заготовка разрушается - явление *красноломкости*. Сера снижает ударную вязкость и пластичность, ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость.

2. *Скрытые примеси* - газы (азот, кислород, водород) попадают в сталь при выплавке и находятся в раковинах и трещинах. Водород приводит к образованию *флокенов* - тонких трещин округлой формы серебристого цвета. Азот и кислород входят: в виде неметаллических включений нитридов Fe_2N и окислов FeO , SiO_2 , Al_2O_3 , которые являются концентраторами напряжений и снижают предел выносливости и вязкость; в виде твердых растворов, которые повышают порог хладноломкости и снижают сопротивление хрупкому разрушению.

3. *Случайные примеси*: хром, никель, вольфрам и др. попадают в сталь из металлического лома (скрапа) при выплавке.

Классификация и маркировка углеродистых сталей

1. По химическому составу: углеродистые и легированные.
2. По содержанию углерода: низкоуглеродистые - до 0,25%, среднеуглеродистые - 0,3-0,6% и высокоуглеродистые - выше 0,7%.
3. По структуре: доэвтектоидные, эвтектоидные, заэвтектоидные.
4. По качеству (содержанию серы и фосфора): $\text{P}, \text{S} < 0,06...0,07\%$ - стали обыкновенного качества; $\text{P}, \text{S} < 0,03...0,04\%$ - качественные стали; $\text{P}, \text{S} < 0,025\%$ - высококачественные стали.
5. По способу выплавки в: мартеновских печах; кислородных конверторах; электрических печах (электродуговых, индукционных и др.).
6. По назначению: общего назначения; конструкционные - для изготовления деталей машин и механизмов; инструментальные - для изготовления инструментов; специальные - стали с особыми свойствами.

Маркировка углеродистых сталей

Стали общего назначения обыкновенного качества. Стали маркируют буквами «Ст» и цифрой, показывающей условный номер марки стали. Изготавливают 7 марок (Ст. 0 Ст. 1, ..., Ст. 6). Индексами указывается степень раскисления стали, если она отличается от спокойной (*сп*): *кп* - кипящая, *пс* - полуспокойная. С увеличением номера марки возрастает содержание углерода (так, например в Ст. 4 - 0,2...0,3% С), т.е. увеличивается предел прочности, но снижается пластичность стали. Из сталей обыкновенного качества изготавливают горячекатаный прокат: балки, швеллеры, уголки, прутки, а также листы, трубы и поковки. С повышением содержания углерода свариваемость ухудшается. Стали с высоким содержанием углерода (Ст. 5, Ст. 6) применяют для строительных конструкций, не подвергаемых сварке.

Конструкционные качественные стали поставляют с гарантированными механическими свойствами и химическим составом. Степень раскисления - спокойная. Стали маркируются двухзначным числом, указывающим содержание углерода в сотых долях процента.

Инструментальные качественные стали маркируются буквой У и числом, указывающим содержание углерода в десятых долях процента. Сталь марки У8 содержит углерода - 0,8%.

Высококачественные углеродистые стали маркируются аналогично качественным: в конце марки ставят букву А для обозначения высокого качества стали (сталь марки У10А и марки 50А).

Конструкционные качественные стали делятся на три группы.

Низкоуглеродистые стали 05кп, 08, 07кп, 10, 10кп обладают высокой прочностью и высокой пластичностью: $\sigma_{\text{в}} = 340 \text{ МПа}$, $\delta = 30\%$. Стали без термической обработки используют для малонагруженных деталей, ответственных сварных конструкций, а также для деталей машин, упрочняемых цементацией.

Среднеуглеродистые стали 30, 35,..., 55 применяют после нормализации, улучшения и поверхностной закали для деталей во всех отраслях промышленности. Эти стали имеют более высокую прочность, но низкую пластичность: $\sigma_B = 500-600$ МПа, $\delta = 21-16\%$.

Высокоуглеродистые стали (0,6...0,85% С) 60, 65,..., 85 обладают высокой прочностью, износостойкостью и упругими свойствами. Из этих сталей изготавливают пружины и рессоры, шпиндели, замковые шайбы, прокатные валки и т. д.

3. Чугуны

Чугун отличается от стали по составу (высокое содержание углерода и примесей) и технологическим свойствам (высокие литейные свойства, низкая пластичность). В *белом чугуне* большая часть углерода находится в связанном состоянии в виде цементита, излом имеет белый цвет и металлический блеск. В *сером чугуне* большая часть углерода находится в свободном состоянии в виде графита (в связанном состоянии - до 0,8%), излом серого цвета. Наиболее распространены чугуны с содержанием 2,4...3,8% С.

Структура металлической основы (твердость)	Тип чугуна и форма графита		
	Серый с пластинчатым графитом	Ковкий с хлопьевидным графитом	Высокопрочный с шаровидным графитом
Перлит (250 НВ)			
Перлит и феррит (200 НВ)			
Феррит (150 НВ)			
$\delta, \%$	0,2-0,5	5-10	10-15

Рис. 7. Микроструктуры чугунов.

Графитизация - процесс образования графита в чугуне. Образование графита происходит непосредственно из жидкой фазы при наличии центров кристаллизации графита и очень медленном охлаждении, либо при термическом разложении цементита. Сильно влияет на графитизацию кремний. Изменяя содержание кремния от 0,5 до 5 %, можно получать чугуны, различные по структуре и свойствам (рис. 7).

Металлическая основа чугунов похожа на структуру эвтектоидной или доэвтектоидной стали. Чугун - сталь, пронизанная включениями графита. В зависимости от геометрической формы графита и условий образования различают: *серый чугун* - с пластинчатым, *ковкий* - с хлопьевидным, *высокопрочный* - с шаровидным графитом (рис. 7). Графит улучшает обрабатываемость чугуна резанием. Чугун имеет хорошие антифрикционные свойства, так как графит обеспечивает смазку поверхностей трения. Пустоты, заполненные графитом, гасят вибрации; детали не чувствительны к поверхностным концентраторам напряжений (проточки, отверстия, переходы в сечениях).

Серый чугун. Изделия получают литьем. Около графитовых включений пластинчатой формы при деформации концентрируются напряжения, значения которых тем больше, чем они острее. Включения способствуют разупрочнению чугуна. Серый чугун имеет низкие механические свойства при испытании на растяжение, но высокие - при испытании на сжатие. Из него изготавливают детали, которые подвергаются сжимающим и изгибающим нагрузкам: зубчатые колеса, блоки цилиндров, поршневые кольца, распределительные валы. Серые чугуны содержат: до 3,7% C; 2,6% Si; 0,5-0,8% Mn; 0,1-0,3% P; до 0,1% S. Обозначаются индексом СЧ и значением предела прочности при растяжении – СЧ 15($\sigma_b = 150$ МПа).

Ковкий чугун. Название условное, пластической деформации не подвергают. Получают при отжиге белых чугунов следующего состава: 2,2...3,0% C; 0,7...1,5% Si; 0,2...1,0% Mn; менее 0,18% P и 0,1% S. Отливки быстро

охлаждают и получают белый чугун. Дальнейший отжиг (до 2 суток) приводит к разложению цементита и образованию хлопьевидного графита.

Ферритный ковкий чугун. При очень медленном охлаждении (режим (а) на рис. 8) в интервале 760...720°C полностью разлагается цементит, входящий в перлит и ледебурит. Структура - зерна феррита и графита, излом темный. Мягкий материал (150 HB, $\delta = 6\%$) с удовлетворительной прочностью ($\sigma_B = 300$ МПа).

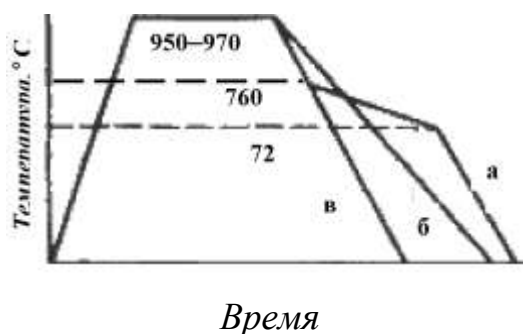


Рис. 8. Отжиг ковкого чугуна

Феррито-перлитный ковкий чугун получают при более быстром отжиге по режиму (б). Структура: зерна перлита и феррита, графит.

Перлитный ковкий чугун получают при быстром охлаждении (режим (в)). Структура: перлит, малое количество графита, излом светлый.

Ковкий чугун по механическим свойствам занимает промежуточное положение между серым чугуном и сталью. Применяется для деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках. Обозначается КЧ и значениями предела прочности ($\sigma_B = 300$ МПа) и относительного удлинения ($\delta = 6\%$): КЧ 30-6.

Высокопрочный чугун получают при модифицировании серого чугуна алюминием, щелочными или щелочноземельными металлами (обычно магнием до 0,5% от массы отливки), ферросилицием. Чугуны могут иметь ферритную, феррито-перлитную и перлитную металлическую основу. Механические свойства высокие, что вызвано отсутствием неравномерности в распределении напряжений из-за шаровидной формы графита. Из чугуна

изготавливают ответственные детали: тонкостенные отливки, шаботы молотов, коленчатые валы, поршни и др.

Чугуны содержат: 2,7...3,6% С; 1,6...2,7% Si; 0,6...0,8% Mn; 0,12% P; 0,3% S.

Высокопрочный чугун с пределом прочности 420 МПа и относительным удлинением 12% обозначается ВЧ 42-12.

Наряду с шаровидным графитом высокопрочные чугуны содержат графит *вермикулярной* (червякообразной) формы в виде изогнутых лепестков, размеры которых меньше пластинок серого чугуна. По механическим свойствам и износостойкости вермикулярный чугун занимает промежуточное положение между серым и высокопрочным чугунами.

Отбеленные и другие чугуны. *Отбеленные чугуны* - отливки, поверхностный слой которых состоит из белого чугуна, а внутри серый или высокопрочный чугун. Этот слой получают в толстостенных деталях при литье в металлические или сырые земляные формы. В поверхностном слое много твердого (950-1000 *НВ*) хрупкого цементита, который хорошо сопротивляется износу. Чугуны используются для изготовления прокатных валов, вагонных колес с отбеленным ободом, шаров для шаровых мельниц. Состав: 3...4% С; 0,6...0,9% Si; 0,4...0,6% Mn.

Легирующие элементы влияют на металлическую основу, размеры и форму графитовых включений. Легированные чугуны подвергаются термической обработке для обеспечения необходимых свойств. Для деталей, работающих в условиях абразивного износа, используются белые чугуны, легированные хромом, хромом и марганцем, хромом и никелем. Для деталей, работающих в условиях износа при высоких температурах, используют высокохромистые и хромоникелевые чугуны.

Коррозионностойкие чугуны часто легируют никелем (0,7...1,5%), хромом (0,2...0,6%), молибденом (0,3...0,6%) и медью (0,2...0,5%).

Высоколегированные чугуны содержат до 12...18% кремния (в их структуре образуются кремнистые сплавы - ферросилициды). Чугуны используются для

изготовления деталей насосов, оборудования для концентрированных азотной и серной кислот и др.

4. Контрольные вопросы и задания

1. Напишите, что показывает линия SE на диаграмме Fe-Fe₃C (рис.9)?
2. Какая структура представлена на рис.10,д?

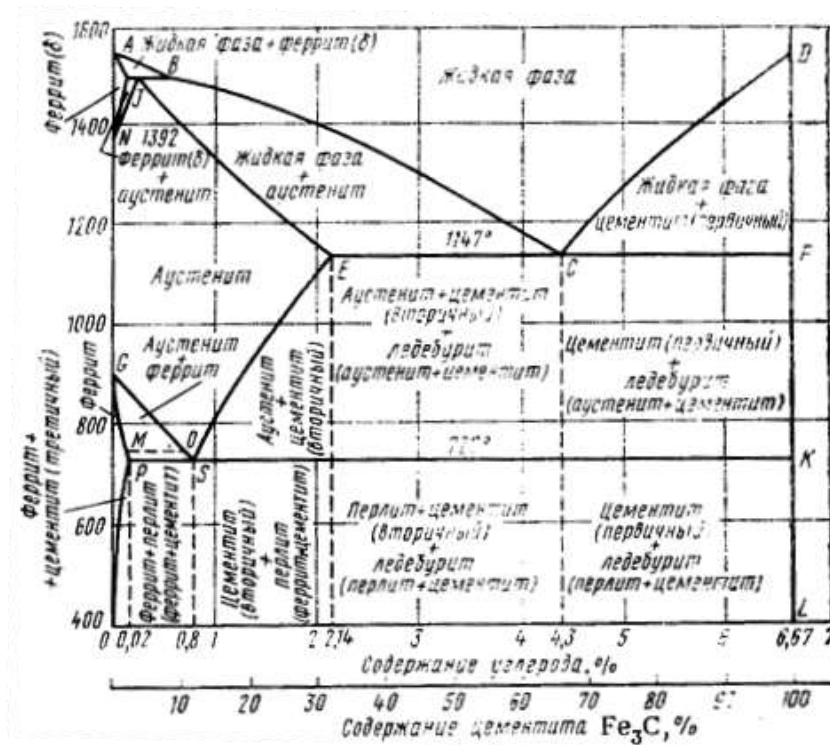


Рис. 9. Диаграмма состояния Fe-Fe₃C.

3. Что называется ферритом?
4. По диаграмме Fe-Fe₃C (рис. 9) определите максимальное содержание углерода в аустените при 800°C.
5. Микроструктура какого сплава представлена на рис. 10,ж.
6. При исследовании структуры доэвтектоидной стали установлено, что в ней примерно 30% перлита. Каков состав по углероду этой стали?
7. Из чего состоит структура заэвтектоидной стали?
8. Структура какого сплава представлена на рис. 10,а?

9. Проведите разделение сплавов, микроструктуры которых показаны на рис.24, на стали, белые и другие чугуны, отметив в ответах, к какому материалу относятся те или иные структуры.
10. Какие фазы составляют структуру сплава (рис. 10,п)?
11. Изобразите схему охлаждения сплава Fe-Fe₃C с 3% C, отметив на ней структурные состояния сплава.
12. Какая микроструктура (рис. 10) наиболее близка к структуре сплава с 3% C?
13. На рис. 10,в приведена микроструктура доэвтектоидной стали. Определите по микроструктуре примерный состав стали и структурные составляющие этой стали?
14. В каком сплаве, микроструктура которого приведена на рис.24, наибольшее количество углерода и сколько примерно?
15. Какие фазы входят в состав всех сплавов, структуры которых приведены на рис. 10, а-м?
16. С какими структурами сплавы (рис. 10) являются сталями?
17. Напишите, какие структуры (рис. 10) являются структурами белых чугунов?
18. С какой структурой сплав (рис. 10) является наиболее пластичным?
19. Какой материал имеет структуру, приведенную на рис. 10,о?
20. Если площадь, занимаемая цементитом в структуре заэвтектоидной стали 5%, то как определить количество углерода в стали?
21. Какая микроструктура представлена на рис. 10,е? Сколько в таком сплаве углерода?
22. Из какой фазы и при каких температурных условиях образуется цементитная составляющая в структуре стали с 1% углерода?
23. Какие фазы входят в структуру доэвтектоидной стали при температуре 20°C?
24. Напишите, из каких фаз состоит перлит?

25. При каком составе углерода находится условная граница между сталями и чугунами?
26. Какой характер превращений отражают линии HB, EF и PK диаграммы Fe-Fe₃C (рис. 9)?
27. Сколько выкристаллизовывается аустенита из жидкого сплава, содержащего 1% C при 1400°C (рис. 9)?
28. Структура какого сплава представлена на рис. 10,и?
29. Напишите, из чего состоит структура доэвтектического белого чугуна?
30. Что отличает ледебурит при температурах выше и ниже 727°C?
31. По относительному количеству структурных составляющих (ледебурита и цементита) в структуре сплава рис. 10,з определите примерный состав сплава по углероду.
32. Какие фазы входят в структуры сплавов железа с углеродом в соответствии с диаграммой состояния (рис. 9) при нормальной температуре?
33. В соответствии с диаграммой Fe-Fe₃C (рис. 9) эвтектика (ледебурит) получается в структуре сплавов, имеющих содержание углерода больше 2,14%. Возможно ли на практике наличие ледебурита в структуре сплавов с меньшим содержанием углерода. Если возможно, то при каких условиях и из-за какого эффекта?

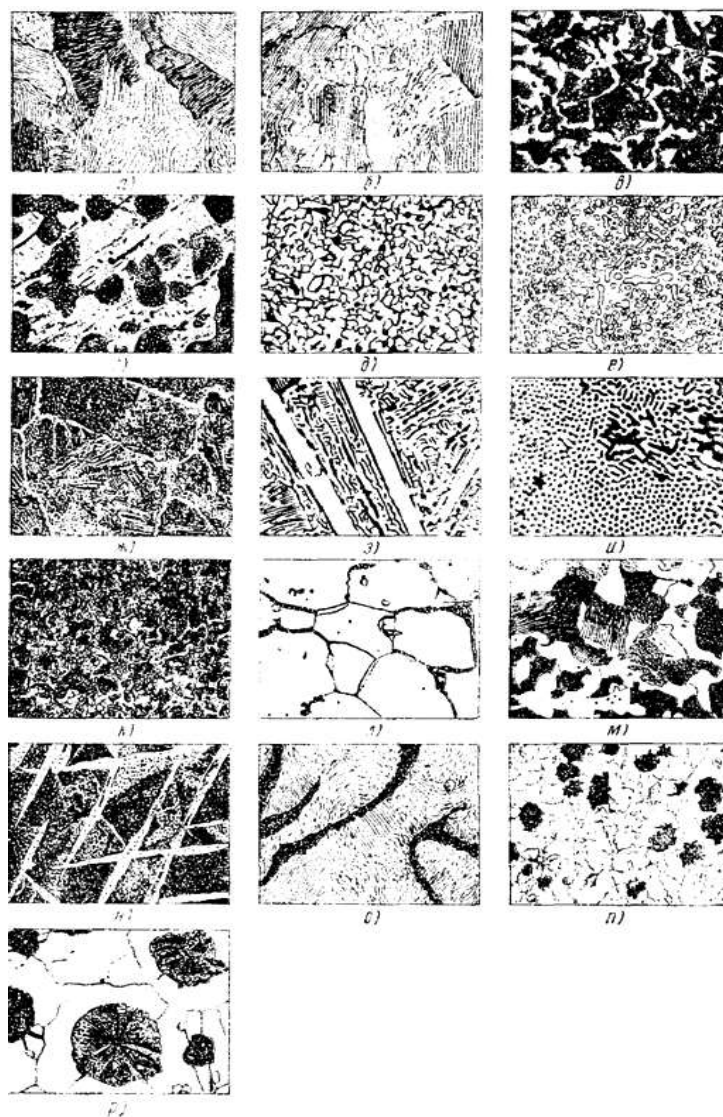


Рис. 10. Микроструктуры железоуглеродистых сплавов
в равновесном состоянии

34. Какие элементы присутствуют в составе любой стали?
35. Какие элементы являются важнейшими и определяют основные свойства стали?
36. Какие примеси в стали являются вредными и в чем заключается их вредное влияние?
37. Каким способом производится основное количество углеродистой стали?
38. Какие стали имеют более высокие прочностные свойства?
39. Какие углеродистые стали поставляются металлургическими заводами с гарантированным химическим составом?

40. Какую из нижеприводимых марок сталей следует использовать для изготовления сварных металлоконструкций, предусматриваемых для работы в условиях Севера?
41. Какую из нижеприведенных марок сталей следует выбрать для изготовления вала механической обработкой?
42. Болты изготавливаются из прутка путем механической обработки. Какую из приводимых в ответах сталь для этого следует использовать?
43. Методом глубокой вытяжки из стального листа изготавливают кузова автомашин. Какую сталь можно рекомендовать для этой цели?
44. Рекомендуйте материал для изготовления мелких винтов для крепежа электроарматуры при массовом изготовлении на станках-автоматах.
45. Какие примеси в составе стали улучшают ее обрабатываемость на металлорежущих станках?
46. Заэвтектоидные стали со структурой пластинчатого перлита и цементита плохо обрабатываются резанием. Напишите, какой обработке следует подвергнуть заготовки из этих сталей с целью улучшения обрабатываемости? Какая в результате этого образуется структура и на каком из рис.24 эта структура представлена?
47. Какими способами изготавливают стальные детали?
48. Что ограничивает производство литых стальных деталей?
49. В виде каких основных фаз находятся легирующие элементы в стали?
50. Какие из приводимых элементов образуют с железом только твердые растворы?
51. В какой фазе железа преимущественно растворяется Cr и Ni (решетки о.ц.к. и г.ц.к.) соответственно?
52. Какие фазы легирующих элементов особенно сильно упрочняют сплавы железа?
53. Каково основное назначение элементов типа Ti, Nb, V в легированных конструкционных сталях?

54. В каких фазах стали при нормальной температуре находится Si, Ni, Cr, Ti при одновременном легировании ими малоуглеродистой конструкционной стали?
55. Как влияют большинство легирующих элементов на температуру перлитного превращения и содержание углерода в перлите?
56. Расшифруйте марку стали 1X18H10T?
57. Перечислите структурные классы легированных сталей в отожженном состоянии?
58. В каком состоянии рационально использование легированных сталей?
59. Какие основные классы чугунов используются в качестве конструкционного материала?
60. Из каких фаз в железоуглеродистых сплавах может образовываться графит в структуре чугуна?
61. Какие факторы главным образом влияют на интенсивность графитообразования в чугуне?
62. Напишите, как влияет скорость охлаждения чугуна на процесс графитизации?
63. Какова форма графитовых включений в белых чугунах?
64. В одной и той же отливке участках, имеющих разную толщину, обнаружена различная структура - от белого чугуна в тонких частях до ферритного серого в массивных частях. Чем это обусловлено?
65. Какая структура металлической основы серого чугуна обеспечивает оптимальные механические свойства отливок?
66. Изменение количества каких составляющих в химическом составе обычных серых чугунов влияет на получение чугуна с требуемой структурой и с нужным комплексом механических свойств?
67. Можно ли влиять на свойства серого чугуна путем изменения величины и количества графитовых включений? Если можно, то как называется такой процесс?
68. Сколько имеется связанного углерода в перлитном сером чугуне?

69. Какие механические свойства чугуна наиболее сильно ослабляют графит?
70. Напишите, какая форма графитовых включений в наибольшей степени уменьшает прочность чугуна?
71. Можно ли по микроструктуре чугуна определить: является чугун серым, ковким или высокопрочным? По какому признаку?
72. Микроструктура какого чугуна представлена на рис. 10,о?
73. Какая структура серого чугуна обладает наиболее низкими механическими свойствами?
74. По каким показателям чугуны имеют преимущества перед сталью?
75. Какие чугуны образуются при модифицировании жидкого чугуна магнием или церием?
76. Чем объясняется высокая прочность и значительная пластичность высокопрочных чугунов?
77. Как расшифровать марку сплава ВЧ50-1,5?
78. Чем объясняется прочность и пластичность высокопрочных чугунов?
79. Приведите средний химический состав высокопрочных чугунов?
80. Каким способом получают ковкие чугуны?
81. Напишите, в чем принципиальное различие в структуре ковкого и серого чугуна?
82. Какой материал следует использовать для изготовления заднего моста автомобиля?
83. Какой материал следует использовать для изготовления блока цилиндров грузовой автомашины?
84. Рекомендуйте материал с указанием марки для изготовления корпусов и щитов электродвигателей ($\alpha_b \geq 10 \text{ кгс/мм}^2$).
85. Напишите, какова форма графитовых включений в высокопрочном чугуне и каким образом добиваются получения графита с такой формой?
86. Какие материалы обладают наилучшими литейными свойствами?
87. Микроструктура какого материала представлена на рис. 10,р.
88. Какой из литейных сплавов является наиболее дешевым?

89. Какие материалы обычно используют для изготовления коленчатых валов?

Литература

1. Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 2005. – 648 с.5 экз.
2. Пейсахов А.М., Кучер А.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для студентов немашиностроительных специальностей / 3-е изд. – СПб.: Издательство Михайлова В.А., 2005. – 416 с. 40 экз.
3. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов / Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2007. – 535 с.6 экз.
4. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия., 1987. - 646 с. 37 экз.
5. Казаков Н.Ф., Осокин А.М., Шишкова А.П. Технология металлов и других конструкционных материалов. – М.: Металлургия, 1995. - 529 с. 45 экз.
6. Худокормова Р.Н. Материаловедение ; лаб. Практикум.; учеб. Пособие для вузов.;под. ред. Л. С. Ляховича. – Минск; Высш. шк., 1988. – 224 с. 48 экз.

Практическая работа № 3 «Разработка технологического процесса термической обработки»

Введение

Термическая обработка стали – это совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твёрдых металлических сплавов с целью придания им определённых свойств за счёт изменения внутреннего строения и структуры. Цель термообработки – это придание сплавам таких свойств, которые требуются в процессе эксплуатации этих изделий. Есть упрочнение металла (например: коленчатый вал в двигателе автомобиля – к нему предъявляется повышенная прочность при эксплуатации). Но есть и такие технологические процессы, в которых термообработка не является конечной операцией, а промежуточной и её цель – снижение твёрдости стали, сплава для последующей обработки. Процесс термообработки состоит из нагревания до каких то определённых температур, выдержки детали, заготовки при этих температурах и последующем охлаждении с определённой скоростью. Термообработке подвергают заготовки (кованные, штампованные и т.д.), детали машин и различных инструмент. Для заготовок термообработка заключается в снижении твердости, улучшении их структуры, а для деталей – это придание им определённых свойств (твердости, прочности, износостойкости). Улучшение механических качеств даёт возможности использовать сплавы более простых составов, расширить область их применения. Термообработкой можно повысить допускаемые напряжения, уменьшить массу деталей и механизмов, а также существенно повысить их надёжность и долговечность, что очень важно в машиностроении. Например, упрочнению термообработкой подвергаются до 10% общей выплавки в стране, а в машиностроении до 40%. В термообработке есть следующие виды этого процесса: отжиг, закалка, отпуск, а также есть химико-термическая и термомеханическая обработка.

1. Теоретические основы процессов термической обработки

Термической обработкой называют технологический процесс, состоящий из нагрева и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств.

Основными структурами, участвующими в формировании свойств стали при термообработке, являются как равновесные - аустенит и перлит, так и неравновесные - мартенсит, сорбит, троостит, остаточный аустенит.

Аустенит (А) - твёрдый раствор углерода в γ -железе.

Мартенсит (М) - пересыщенный твёрдый раствор углерода в α -железе той же концентрации, что и у исходного аустенита; мартенсит - структура твёрдая, хрупкая, напряжённая, неустойчивая; твёрдость мартенсита возрастает с увеличением в нём содержания углерода, например: для $C = 0,1\%$ твердость HRC составляет 30 единиц, а при содержании $C = 0,7\%$, твердость – 65HRC.

По сравнению с другими структурами мартенсит имеет наибольший удельный объём, зависящий от содержания углерода (максимальный объём мартенсита у эвтектоидной стали). Увеличение удельного объёма вызывает большие внутренние напряжения, приводящие иногда к деформации и даже разрушению изделий.

Перлит (П) - эвтектоидная смесь феррита (Ф) и цементита (Ц), содержание углерода в которой постоянно и равно 0,8%.

Сорбит, троостит (С, Т) - квазиэвтектоидные (quassi-подобный) смеси феррита и цементита, содержание углерода в которых больше или меньше 0,8%.

Сорбит, троостит и перлит различаются между собой степенью дисперсности (измельчённости) включений цементита. Наиболее тонкое строение (дисперсность) у троостита, сорбит имеет среднюю дисперсность, а перлит - самая крупнодисперсная структура. Увеличение дисперсности повышает прочностные характеристики и уменьшает пластические свойства

стали, например, твёрдость троостита - 350...500HB (38...52HRC); сорбита - 250...350HB (25...38HRC); перлита - 150...250HB (25HRC и ниже).

При нагреве стали, в соответствии с диаграммой железо-углерод, происходят следующие превращения.

Перлит, содержащий 0,8% углерода при 727°C (т. A_1), превращается в аустенит: $(\Phi + \text{Ц}_{II}) \rightarrow A$. В доэвтектоидных сталях по окончании этого превращения в аустените постепенно растворяется феррит. В заэвтектоидных сталях после превращения перлита происходит растворение цементита в аустените. Во всех случаях конечной структурой будет аустенит, содержащий такой же процент углерода, какой имела сталь при комнатной температуре.

Указанные превращения носят диффузионный характер и сопровождаются значительным перемещением атомов углерода. Для полного фазового превращения необходим нагрев и выдержка стали выше точек A_3 и $A_{ст}$. При охлаждении с различной скоростью стали, нагретой до аустенитного состояния, происходят следующие изменения. Чем выше скорость охлаждения аустенита, тем больше степень его переохлаждения (распад происходит при более низких температурах). Если степень переохлаждения невелика, то он полностью распадается на механическую смесь феррита и цементита различной степени дисперсности. Этот процесс является диффузионным и называется перлитным превращением, в результате которого получаются феррито-цементитные смеси: $A \rightarrow (\Phi + \text{Ц}_{II})$. Продукты перлитного превращения имеют пластинчатое строение. Чем больше степень переохлаждения, тем тоньше получающаяся феррито-цементитная структура (оценивается величиной суммарной толщины двух пластинок - феррита и цементита) и тем выше твёрдость.

При охлаждении аустенита со скоростью, при которой диффузия атомов углерода становится невозможной, в аустените почти мгновенно возникают иглы мартенсита: $A \rightarrow M$. Образование мартенсита является бездиффузионным процессом. При этом превращении происходит только

перестройка γ -решётки в α -решетку, причём перераспределение углерода произойти не может: весь углерод, бывший в аустените, остаётся и в мартенсите, хотя максимальная равновесная растворимость углерода в α -железе при комнатной температуре менее 0,01%. Поэтому мартенсит закалки имеет не кубическую, как α -железо, а искажённую тетрагональную решётку. Превращение аустенита в мартенсит при охлаждении до комнатной температуры не протекает до конца, то есть в закалённой на мартенсит стали всегда имеется некоторое количество метастабильного остаточного аустенита (тем больше, чем выше содержание в стали углерода).

Структура мартенсита (и остаточного аустенита) является неравновесной, неустойчивой, метастабильной. Нагрев её до температуры ниже t_{A_1} (727°C), приводит к снятию внутренних напряжений и распаду на феррито-цементитные смеси различной (в зависимости от температуры нагрева) дисперсности, имеющие не пластинчатую, а округлую (зернистую) форму цементитных включений. Эти структуры называются структурами отпуска.

В зависимости от скорости охлаждения аустенит превращается в следующие структуры:

- при охлаждении в воде комнатной температуры образуется мартенсит;
- при охлаждении в масле - троостит;
- при охлаждении на воздухе - сорбит;
- при охлаждении вместе с печью - перлит.

Некоторые закономерности процесса отпуска закаленной на мартенсит стали показаны на рис. 1.

Степень распада мартенсита определяется температурой нагрева закаленной стали при отпуске. В зависимости от температуры нагрева образуются следующие структуры:

- при $t=150\ldots 250^\circ\text{C}$ мартенсит закалки превращается в мартенсит отпуска;
- при $t=250\ldots 500^\circ\text{C}$ мартенсит распадается, образуя троостит;
- при $t=500\ldots 680^\circ\text{C}$ мартенсит распадается, образуя сорбит;

при $t=680^{\circ}\text{C}$ и выше мартенсит распадается, образуя перлит.

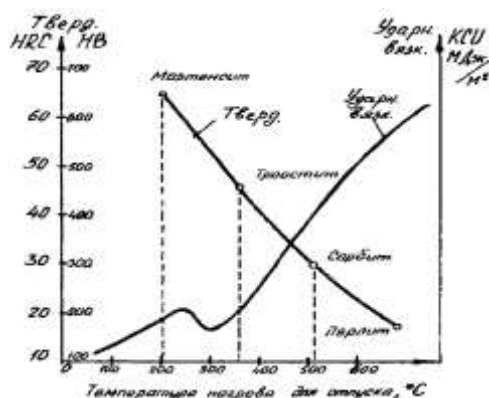


Рис. 1. Зависимость твердости и ударной вязкости стали от температуры отпуска

2. Виды термической обработки

Основными видами термической обработки являются: отжиг, закалка и отпуск. Для сталей также используется так называемая нормализация.

Отжиг - термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше линии GSE (рис. 2), выдержке при этой температуре и медленном охлаждении (обычно вместе с печью).

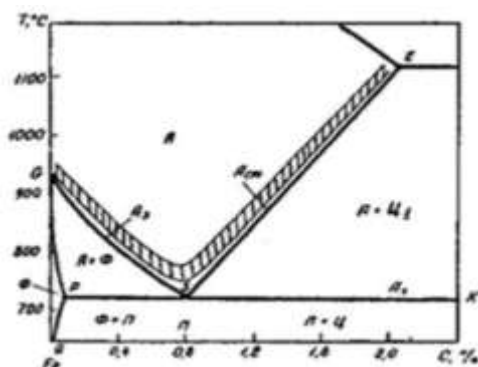


Рис. 2. Оптимальный интервал температур нормализации и полного отжига углеродистой стали

Целью отжига является получение структуры стали, близкой к равновесной. После отжига углеродистой стали получают структуры: в доэвтектоидной стали - феррит + перлит,

в эвтектоидной стали - перлит,

в заэвтектоидной стали - перлит + вторичный цементит.

Закалка - термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше линии GSK (рис. 3), выдержке при этой температуре и охлаждении со скоростью, обеспечивающей получение мартенсита (не ниже критической).

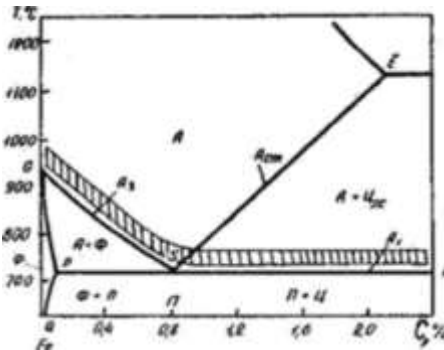


Рис. 3. Оптимальный интервал температур закалки углеродистой стали

Минимальная скорость охлаждения, при которой не успевает пройти диффузионный распад аустенита на феррито-цементитную смесь, называется критической скоростью закалки на мартенсит.

Скорость охлаждения обеспечивается определённой охлаждающей средой (вода, растворы солей, масло, для некоторых сталей - воздух). Назначение закалки - получение мартенситной структуры.

Нормализация - термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше линий GSE (рис. 2), выдержке при этой температуре и охлаждении на спокойном воздухе.

Нормализация не относится к основным видам термообработки, поскольку в зависимости от марки стали и размера заготовки нормализация может быть разновидностью либо отжига, либо закалки.

В доэвтектоидных сталях нормализация способствует получению однородной мелкозернистой структуры (в малоуглеродистых сталях

применяют иногда вместо отжига); в заэвтектоидных сталях - уничтожению вредной цементитной сетки.

Отпуск - термическая обработка, заключающаяся в нагреве закалённой стали до температуры ниже линии PSK, выдержке при этой температуре и охлаждении.

Отпуск стали способствует снятию внутренних напряжений и получению необходимых свойств стали.

Отпуск имеет важное практическое значение. Именно в процессе отпуска формируются окончательные структуры и комплекс эксплуатационных свойств сталей. Температура отпуска обуславливается требованиями к этому комплексу.

3. Проведение термической обработки углеродистых сталей

Термическая обработка подразделяется на предварительную и окончательную. Предварительная термообработка (отжиг и нормализация) применяется при подготовке структуры стали для последующей обработки.

В качестве окончательной термообработки применяют, как правило, закалку с последующим отпуском. Иногда окончательной операцией могут быть отжиг, чаще нормализация, если по условиям работы детали эти операции дают нужные механические свойства.

Режим любой термообработки состоит из нагрева, изотермической выдержки и охлаждения (рис. 4).

В общем случае для доэвтектоидных ($C < 0,8\%$) углеродистых нелегированных сталей температуру нагрева T_n под отжиг, нормализацию или закалку определяют исходя из положения критической точки A_3 (линия окончания аустенитного превращения в доэвтектоидных сталях GS) по формуле:

$$T_n = A_3 + (30^\circ \dots 50^\circ)$$

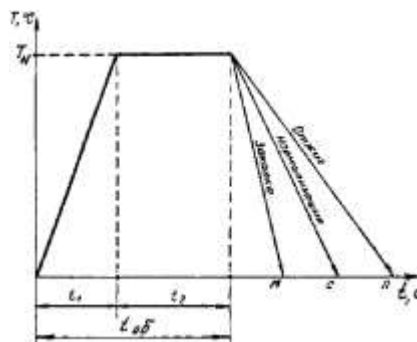


Рис. 4. Схема термической обработки

При отжиге или нормализации заэвтектоидных сталей ($C > 0,8\%$) температура нагрева выбирается точно также, однако, при нагреве под закалку, температуру определяют исходя из положения критической точки A_1 (линия начала аустенитного превращения в заэвтектоидных сталях SK) по формуле:

$$T_n = A_1 + (30^\circ \dots 50^\circ)$$

Такая закалка заэвтектоидной стали называется неполной. В результате этой закалки сталь приобретает структуру мартенсита с мелкодисперсными цементитными включениями, что придает стали повышенную твердость и износостойкость по сравнению со сталью, имеющей чисто мартенситную структуру.

Общее время $t_{об}$ складывается из продолжительности нагрева изделий до необходимой температуры t_1 и выдержки при этой температуре в течение времени t_2 (рис.4.)

Время нагрева t_1 зависит от многих факторов. Обычно для углеродистой стали это время исчисляется по наименьшему размеру максимального сечения детали из расчета: 1...1,5 минуты на 1 мм этого размера. Время выдержки t_2 составляет, как правило, 20% от времени нагрева t_1 .

В качестве закалочных сред (охладителей) обычно применяют воду, водные растворы солей, щелочей, минеральные масла, кремнийорганические

жидкости, иногда - воздух. Углеродистые (нелегированные) стали, как правило, закаливают в воде или водных растворах солей и щелочей.

Для интенсификации охлаждения рекомендуется перемещать закаливаемое изделие или обеспечивать циркуляцию охладителя. Средние скорости охлаждения, обеспечиваемые различными охлаждающими средами, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Средняя скорость охлаждения в различных охладителях.

Вид охладителя	Средняя скорость охлаждения, °/с
Воздух	5
Масло	150
Вода, 20°C	700
Вода, 80°C	140
Вода + 10%KаСl	2100
Вода + 10%NaOH	1600

После закалки детали всегда подвергаются последующему отпуску. В практике различают три разновидности отпуска. Низкотемпературный (низкий) отпуск проводят с нагревом до 250°C. Цель отпуска - снижение внутренних напряжений. Мартенсит закалки переходит в мартенсит отпуска. Высокая твёрдость, износостойкость и низкая ударная вязкость сохраняются. Данному отпуску подвергается режущий и измерительный инструмент.

Среднетемпературный (средний) отпуск проводится при температурах 350...500°C. Структура мартенсита переходит в троостит отпуска. Такой отпуск обеспечивает наиболее высокий предел упругости и несколько повышает вязкость. Применяется для рессор, пружин и других упругих элементов.

Высокотемпературный (высокий) отпуск проводят при температуре 500...680°C. Структура мартенсита закалки переходит в сорбит отпуска. После такого отпуска почти полностью снимаются внутренние напряжения,

значительно повышается ударная вязкость. Прочность и твёрдость при этом снижаются, но остаются более высокими, чем при нормализации. Высокий отпуск создаёт наилучшее сочетание прочности и вязкости стали и полностью исключает вероятность хрупкого разрушения.

Время выдержки при нагреве под отпуск (с момента прогрева детали): низкий - 2,5...8 часов; средний - 1... 2 часа; высокий - 0,5... 1 час.

Режим охлаждения при отпуске незначительно влияет на свойства стали после отпуска.

Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется улучшением.

4. Тестовые вопросы и задачи

1. Какие параметры характеризуют режим термообработки?

Ответ:

- 1) температура и скорость нагрева, время выдержки и скорость охлаждения;
- 2) температура нагрева и скорость охлаждения;
- 3) скорость нагрева, температура нагрева, длительность выдержки при температуре нагрева, скорость охлаждения;
- 4) степень перегрева.

2. Какая термическая обработка изделий применяется после предварительной холодной пластической деформации для устранения наклепа?

Ответ:

- 1) закалку;
- 2) рекристаллизационный отжиг;
- 3) отпуск.

3. Какие виды термообработки можно применить для чистой меди?

Ответ:

- 1) фазовый отжиг;

- 2) рекристаллизационный отжиг;
- 3) закалку;
- 4) отпуск.

4. Какие виды термообработки можно применить для сплава Ti-Al с 10% Al?

Ответ:

- 1) фазовый отжиг;
- 2) рекристаллизационный отжиг и химико-термическую обработку;
- 3) закалку;
- 4) закалку и отпуск;

5. Какие виды термообработки можно применить для сплава Al-Mg с 10% Mg?

Ответ:

- 1) закалку;
- 2) рекристаллизационный отжиг;
- 3) закалку и отпуск;
- 4) химико-термическую обработку.

6. Из чего состоит структура сплава Ti-Al с 20% Al после фазового отжига?

Ответ:

- 1) из α -фазы; 2) из $\alpha+\beta$ фаз; 3) из $\alpha+\gamma$ фаз.

7. Из чего состоит структура сплава Ti-Al с 2% Al после закалки?

Ответ:

- 1) из α -фазы; 2) из $\alpha+\beta$ фаз; 3) из переохлажденной β -фазы.

8. Чем принципиально отличается режим отжига и закалки сплава Cu-Be с 7% Be?

Ответ:

- 1) температурой нагрева;
- 2) скоростью охлаждения;
- 3) длительностью выдержки при температуре нагрева;
- 4) скоростью нагрева.

9. Температура нагрева эвтектоидной стали 750°C, охлаждение в воде. Какой это вид термообработки?

Ответ:

1)отжиг; 2)неполная закалка; 3)полная закалка; 4)отпуск.

10. Для чего применяется рекристаллизационный отжиг?

Ответ:

1)для устранения внутренних напряжений;

2)для восстановления исходной структуры и свойств металла;

3)для восстановления структуры металла.

11. Какие факторы влияют на размер зерна после рекристаллизационного отжига?

Ответ:

1)степень деформации;

2)температура рекристаллизационного отжига;

3)размер зерна перед деформацией;

4)длительность процесса отжига.

12. Объясните, почему горячую обработку стали проводят при температуре значительно выше температуры рекристаллизации?

13. Укажите необходимое условие для того, чтобы сплав подвергнуть рекристаллизационному отжигу?

Ответ:

1)наличие у сплава фазовых превращений в твердом состоянии;

2)изменение растворимости компонентов сплава в твердом состоянии;

3)изменение растворимости компонентов сплава в твердом состоянии с изменением температуры;

4)наличие предварительной холодной пластической деформации сплава.

14. От чего зависит температура превращения ПА железоуглеродистых сплавов в реальных условиях нагрева?

Ответ:

1)от содержания углерода и стали;

- 2)от скорости нагрева;
- 3)от структуры стали;
- 4)от величины зерна стали.

15. При какой температуре начинается интенсивный рост аустенитного зерна наследственно мелкозернистой стали?

Ответ:

- 1)при 800-850°C; 2)при 900-950°C; 3)при 950-1000°C; 4)при 750-800°C.

16. Сталь одного и того же состава раскислена различными раскислителями. В каком случае можно ожидать образования наследственно мелкозернистой структуры?

Ответ:

- 1)при раскислении Si; 2)при раскислении Mn и Si; 3)при раскислении Mn, Si, Al.

17. Какие элементы уменьшают склонность к росту аустенитного зерна стали при нагреве?

Ответ:

- 1)Mn; 2)Si и Mn; 3)Ti, V; 4)W, Mo.

18. Какие свойства в основном ухудшены у крупнозернистой стали?

Ответ:

- 1) σ_B ; 2) σ_T ; 3)HB; 4) α_n , $S_{от}$.

19. В чем технологические преимущества наследственно мелкозернистых сталей?

Ответ:

- 1)такие стали менее чувствительны к росту зерна при нагреве;
- 2)допускают осуществление технологических процессов, связанных с нагревом стали выше температур фазовых превращений при менее жестких температурных режимах;
- 3)обеспечивают получение мелкозернистой структуры стали после термообработки.

20. Какие технологические процессы при выборе режима обработки требуют учитывать склонность аустенитного зерна к росту?

Ответ:

- 1) горячая обработка давлением;
- 2) отжиг, закалка;
- 3) химико-термическая обработка;
- 4) механическая обработка;
- 5) отпуск.

21. На рис. 5 показана поверхность поковки, которая называется «крокодиловой кожей». Какова причина ее образования?



Рис.5. Дефект при ковке стальной заготовки «крокодиловая кожа»

Ответ:

- 1) очень высокий перегрев заготовки перед ковкой;
- 2) критическая степень деформации при ковке;
- 3) слишком интенсивная деформация при ковке.

22. Какие основные параметры определяют распад аустенита при охлаждении?

Ответ:

- 1) скорость перекристаллизации;
- 2) число центров и скорость роста кристаллов продуктов распада;
- 3) степень переохлаждения;
- 4) химический состав стали.

23. Какие факторы в основном влияют на скорость распада аустенита?

Ответ:

- 1) разница в свободных энергиях аустенита и продуктов его распада;

2) скорость диффузии углерода;

3) состав стали;

4) величина зерна аустенита.

24. Перечислите возможные продукты распада аустенита при охлаждении стали.

25. Из каких фаз состоит сорбит?

Ответ:

1) из Ф; 2) из Ф+Ц; 3) из Ц.

26. В чем различие в фазовом составе перлита, сорбита и троостита?

Ответ:

1) они состоят из различных фаз;

2) они имеют различное количество феррита и цементита;

3) имеют различный состав феррита и цементита;

4) различия в фазовом составе не имеют.

27. Чем объясняется уменьшение скорости распада аустенита при температурах 200-300°C?

Ответ:

1) стабилизацией аустенита;

2) уменьшением скорости диффузии углерода;

3) увеличением устойчивости аустенитной фазы.

27. Напишите, сколько содержится углерода в цементите?

28. Какая образуется структура, если сталь охлаждается со скоростью u_2 согласно схеме (рис.6)?

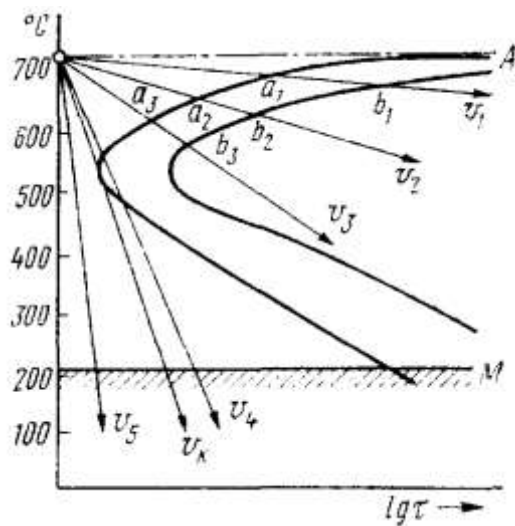


Рис.6. Схема диаграммы термического превращения аустенита при охлаждении с наложенными на нее кривыми скорости охлаждения

Ответ:

1)перлит; 2)сорбит; 3)троостит; 4)бейнит.

29. Какой должно быть скорость охлаждения стали согласно схеме (рис.26), чтобы образовалась структура троостита?

Ответ:

1) v_1 ; 2) v_3 ; 3) v_4 ; 4) v_5 .

30. Что влияет на механические свойства сталей с разными структурами распада аустенита?

Ответ:

- 1)характер продуктов распада аустенита;
- 2)степень дисперсности и состав продуктов распада аустенита;
- 3)температура образования продуктов распада аустенита.

31. Какая структура обеспечивает наибольшую твердость стали?

Ответ:

1)перлит; 2)сорбит; 3)троостит; 4)бейнит.

32. Чем отличаются этапы отпуска среднеуглеродистой стали от высокоуглеродистой?

Ответ:

1) отсутствует этап превращения остаточного аустенита в мартенсит отпуска.

- 2) распад мартенсита происходит с меньшей скоростью;
- 3) меньше углерода в мартенсите;
- 4) образуются карбиды другого состава.

33. На рис. 7 представлены микроструктуры стали 0,45% С после закалки (рис. 7, а) и отпуска при различных температурах (рис. 7, б — при 100°C, рис. 7, в — при 200°C, рис. 7, г — при 350°C, рис. 7, д — при 550°C). Напишите, как называются эти структуры?

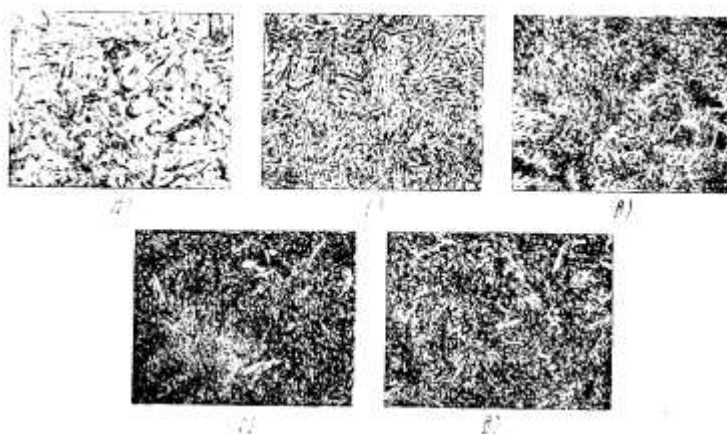


Рис.7. Микроструктуры стали с 0,45% С после различных режимов термообработки:

а – закалка от 900⁰С в воде; б - закалка от 900⁰ С в воде + нагрев 1 час при 100⁰ С; в - закалка от 900⁰ С в воде + нагрев 1 час при 200⁰ С; г- закалка от 900⁰ С в воде + нагрев 1 час при 350⁰С; д - закалка от 900⁰ С в воде + нагрев 1 час при 550⁰С по Schumann

34. В чем различие сорбита и троостита отпуска?

Ответ:

- 1) в составе фаз;
- 2) в степени дисперсности
- 3) в форме включений Ф и Ц.

35. В чем проявляется основное влияние легирующих элементов на превращение аустенита?

Ответ:

- 1) ускоряют распад аустенита;

- 2) стабилизируют аустенит;
- 3) снижают температуру M_s и M_f стали.

36. Какие технологические преимущества имеют детали из легированных сталей по сравнению с деталями из углеродистых сталей при закалке?

Ответ:

- 1) эти детали можно закалывать в масле;
- 2) они имеют меньше брака при закалке;
- 3) часто менее подвержены росту зерна аустенита при нагреве.

37. Чем объясняется понижение твердости закаленной стали по мере повышения температуры отпуска выше 450°C ?

Ответ:

- 1) снижением внутренних напряжений;
- 2) укрупнением частиц цементита и мозаичной структуры твердого раствора;
- 3) выделением углерода из кристаллической решетки мартенсита.

38. От каких факторов зависят свойства отпущенной углеродистой стали?

Ответ:

- 1) от температуры, времени отпуска и скорости охлаждения;
- 2) от температуры, времени отпуска;
- 3) от температуры отпуска и скорости охлаждения;
- 4) от температуры отпуска.

39. Какие свойства стали обуславливаются не только степенью дисперсности структуры, но и формой цементных частиц?

40. Чем отличается структура сорбита отпуска от структуры сорбита, полученного при распаде аустенита?

Ответ:

- 1) степенью дисперсности цементитных частиц;
- 2) составом фаз;
- 3) формой цементитных частиц;
- 4) ничем не отличается.

41. Чем обусловлены более высокие механические свойства стали со структурой сорбита отпуска по сравнению со сталью, имеющей структуру сорбита закалики?

Ответ:

- 1) округлой формой цементитных частиц;
- 2) степенью дисперсности цементитных частиц;
- 3) меньшими внутренними напряжениями;
- 4) составом цементитных частиц и феррита.

42. В чем заключается сущность термической обработки, именуемой улучшением?

Ответ: улучшение заключается

- 1) в закалке стали;
- 2) в закалке и отпуске стали;
- 3) в закалке и высоком отпуске стали;
- 4) в высоком отпуске стали.

44. Как влияет легирование на процесс отпуска стали?

Ответ:

- 1) замедляется распад мартенсита;
- 2) уменьшается скорость коагуляции карбидов;
- 3) повышается стойкость против отпуска.

45. Какие преимущества имеют легированные стали в состоянии низкого отпуска?

Ответ: эти стали имеют

- 1) более однородный состав мартенсита отпуска;
- 2) меньшие внутренние напряжения;
- 3) большую хрупкую прочность;
- 4) большую твердость.

46. Какова оптимальная температура закалики стали с 1,2% С?

Ответ:

- 1) 730°C; 2) 770°C; 3) 680°C; 4) 900°C.

47. Какие недостатки имеет инструмент, изготовленный из стали с содержанием углерода 1,2% после закалки от температуры 900°C?

Ответ: инструмент

- 1) недостаточно тверд, быстро изнашивается и хрупок;
- 2) слишком тверд и хрупок;
- 3) недостаточно износостоек и пластичен.

48. Инструмент из высокоуглеродистой стали нагревается для закалки в обычной электропечи при температуре 760°C и охлаждается в воде. После закалки оказывается, что твердость инструмента ниже допустимой нормы. Чем это можно объяснить?

Ответ:

- 1) наличием большого количества остаточного аустенита в структуре стали;
- 2) недостаточной скоростью охлаждения;
- 3) возможным выгоранием углерода из поверхностных слоев от окисляющего действия атмосферы печи;
- 4) недостаточной температурой закалки.

49. Перечислите защитные газовые среды, применяемые для предотвращения выгорания углерода при нагреве стали для закалки.

50. На заводе требуется проводить термообработку инструмента из высокоуглеродистой стали, однако установки для получения защитной газовой среды нет. Как необходимо проводить нагрев деталей для закалки, чтобы избежать возможного брака от обезуглероживания?

Ответ:

- 1) уменьшить температуру и длительность нагрева;
- 2) применить для нагрева соляную ванну;
- 3) проводить нагрев в периодически раскисляемых соляных ваннах.

51. Перечислите, какие закалочные среды находят наиболее частое применение при закалке деталей из углеродистых сталей.

52. Структура стали с 0,45% С после закалки состоит из мартенсита, феррита и троостита. При какой температуре была нагрета сталь и в какой среде проведено ее охлаждение?

Ответ:

- 1) при 850°C, охлаждение в масле;
- 2) при 750°C, охлаждение в масле;
- 3) при 900°C, охлаждение в воде.

53. На рис. 8 представлены различные режимы охлаждения стали при закалке. Какой из приведенных режимов был бы идеальным?

Ответ: режим

- 1) а; 2) б; 3) в; 4) г 5) д.

54. Какой вид брака при закалке наблюдается наиболее часто и на каком этапе технологического процесса он образуется?

Ответ:

- 1) выгорание углерода — при нагреве;
- 2) пониженная твердость — при охлаждении;
- 3) трещины — при нагреве;
- 4) трещины — при охлаждении.

55. Перечислите виды напряжений, которые возникают в изделии в процессе закалки при охлаждении детали?

56. Какие напряжения преимущественно обуславливают возникновение закалочных трещин?

Ответ:

- 1) фазовые напряжения;
- 2) термические напряжения;
- 3) напряжения второго и третьего рода.

57. После закалки в воде стали с 0,45% С получена структура, состоящая из мартенсита и феррита. Твердость стали после закалки HRC 30. Напишите, в чем допущено нарушение технологического режима закалки и как следует исправить дефектную деталь?

58. Какими способами закали можно уменьшить внутренние напряжения и предотвратить образование закалочных трещин?

Ответ: 1) прерывистой закалкой; 2) прерывистой, ступенчатой закалкой; 3) изотермической закалкой; 4) непрерывной закалкой.

59. Какой из режимов охлаждения (рис. 8) соответствует ступенчатой закалке?

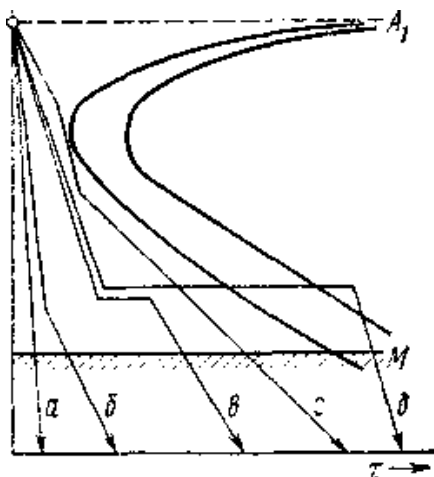


Рис. 8. Схема режимов охлаждения для различных способов закали

Ответ:

1) рис. 8, а; 2) рис. 8, б; 3) рис. 8, в; 4) рис. 8, г.

60. Как следует охлаждать детали при проведении прерывистой закали?

Ответ:

- 1) из масла в воду;
- 2) из воды в масло;
- 3) из воды на воздухе.

61. Какому способу закали соответствует режим охлаждения (рис. 8,б)?

Ответ:

- 1) ступенчатой закалке;
- 2) изотермической закалке;
- 3) прерывистой закалке;

4) ступенчатой закалке.

62. Из чего состоит структура стали после правильно выполненной изотермической закалки?

Ответ:

- 1) из мартенсита;
- 2) из бейнита;
- 3) из троостита.

63. Для каких сталей целесообразно проведение обработки холодом?

Ответ:

- 1) для низкоуглеродистых;
- 2) для среднеуглеродистых;
- 3) для высокоуглеродистых; 4) для легированных.

64. Напишите, применяется ли отпуск как самостоятельная операция термической обработки?

65. Какова основная цель проведения отпуска?

Ответ:

- 1) снижение закалочных напряжений;
- 2) уменьшение твердости после закалки;
- 3) уменьшение внутренних напряжений и повышение вязкости термически обработанной детали.

66. Как осуществляется охлаждение углеродистой стали при отпуске?

Ответ:

- 1) вместе с печью;
- 2) на воздухе;
- 3) в воде.

67. Нагруженные конструкционные детали изготавливают из среднеуглеродистой стали. Какой вид термообработки для таких деталей можно рекомендовать и какая при этом образуется структура?

Ответ:

- 1) закалку, образуется мартенсит;

- 2) закалку и низкотемпературный отпуск, образуется мартенсит отпуска;
- 3) нормализацию, образуется сорбит закалки;
- 4) закалку и высокий отпуск, образуется сорбит отпуска.

68. Отливки из малоуглеродистой стали в литом состоянии характеризуются наличием ликвации, что ухудшает механические свойства отливок. Каким способом можно существенно снизить эффект ликвации в отливках.

Ответ: подвергнуть отливки

- 1) полному отжигу;
- 2) отжигу;
- 3) рекристаллизационному отжигу;
- 4) диффузионному отжигу.

69. Рекомендуйте режим нормализации стали с 0,4% С.

70. Для каких сталей отжиг можно заменить более дешевой обработкой — нормализацией?

Ответ:

- 1) для малоуглеродистых;
- 2) для среднеуглеродистых;
- 3) для высокоуглеродистых.

71. Для чего и для каких сталей применяется сфероидизирующий отжиг и какая при этом образуется структура?

Ответ:

- 1) для улучшения обрабатываемости резанием сталей, образуется структура феррит+перлит;
- 2) для улучшения обрабатываемости стали;
- 3) для улучшения обрабатываемости резанием заэвтектоидных сталей и уменьшения склонности к росту зерна, образуется структура зернистого перлита;
- 4) для улучшения обрабатываемости стали, образуется структура зернистого перлита.

72. Что отличает структуру сорбита отпуска и структуры зернистого перлита?

Ответ:

- 1) фазовый состав;
- 2) степень дисперсности частиц цементита;
- 3) форма цементитных частиц;
- 4) различия нет.

73. Каким методом нагрева обычно пользуются при поверхностной закалке деталей приборов? Почему?

Ответ:

- 1) машинными генераторами т. в. ч.— достигается большая скорость нагрева;
- 2) кислородно-ацетиленовыми горелками — дешевы и доступны;
- 3) ламповыми генераторами т. в. ч.— достигается прогрев деталей на незначительную глубину.

74. Чем объясняется необходимость в более высокой температуре нагрева т. в. ч. для закалки по сравнению с обычной закалкой?

Ответ:

- 1) высокой скоростью нагрева при т. в. ч., что приводит к превращению $\Pi + A$ при более высоких температурах перегрева;
- 2) тем, что при нагреве т. в. ч. превращение $\Pi + A$ происходит при более высоких температурах;
- 3) различным механизмом превращения
- 4) при нагреве т. в. ч.

75. Что влияет главным образом на толщину закаленного слоя при нагреве т. в. ч.?

Ответ:

- 1) состав стали;
- 2) частота тока;
- 3) структура стали;

4) электросопротивление стали.

76. Перечислите детали, для которых можно рекомендовать поверхностную закалку.

77. На рис. 9 приведены макроструктуры двух шестерен после закалки с нагревом т. в. ч. Какая из них обработана при неправильном режиме и какие могут быть от этого последствия?

Ответ:

1) деталь (рис. 9, а) — слишком тонкий закаленный слой, шестерня будет быстро изнашиваться;

2) деталь (рис. 9, б), очень большая толщина закаленного слоя (близко от ножки зуба — сквозная), зубья могут в процессе работы ломаться.

78. Какие напряжения возникают в поверхностном слое детали при поверхностной закалке и как это влияет на предел усталости детали?



Рис. 9. Макроструктуры шестерен после упрочняющей обработки зубьев методом поверхностной закалки токами высокой частоты (т. в. ч.)

79. Какая термическая обработка требуется после поверхностной закалки?

Ответ:

1) отпуск;

2) среднетемпературный отпуск;

3) низкотемпературный (160-180° С) отпуск;

4) дополнительная термообработка не требуется.

80. Какая термическая обработка должна предшествовать закалке с нагревом т. в. ч. для деталей, работающих в тяжелых условиях нагружения?

Ответ:

- 1) обычная закалка;
- 2) отжиг;
- 3) обычная закалка и низкий отпуск;
- 4) улучшение;
- 5) нормализация.

81. Какие напряжения при термообработке приводят к деформации образца в виде куба (рис.10, а), как показано на рис. 10, б)?

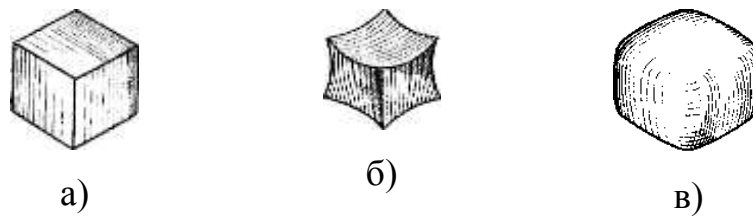


Рис. 10. Деформация кубического образца при термообработке

Ответ:

- 1) термические;
- 2) фазовые;
- 3) напряжения второго рода.

82. Какие напряжения вызовут искажение кубического образца при термообработке, согласно схеме (рис. 10, б)?

Ответ:

- 1) фазовые;
- 2) термические;
- 3) напряжения третьего рода;
- 4) напряжения первого рода.

83. На рис. 11 показаны эпюры различных по происхождению внутренних напряжений по сечению образца после термообработки. Какие напряжения соответствуют эпюрам (рис. 11,а) и (рис. 11,б).

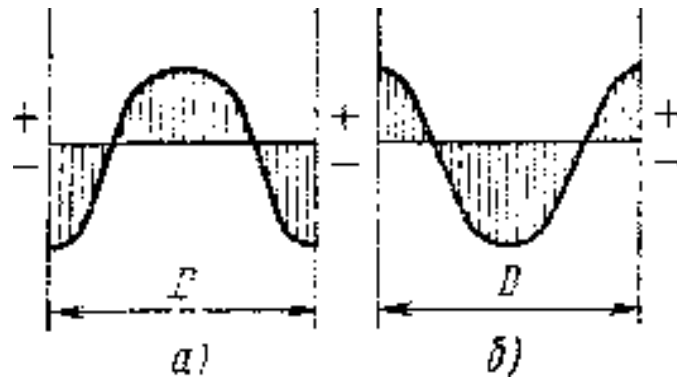


Рис.11. Эпюры напряжений, возникающих при закалке

Ответ:

- 1) а — термические, б — фазовые напряжения;
- 2) а — фазовые, б — термические напряжения;
- 3) а — напряжения второго рода, б — напряжения третьего рода.

84. Напишите, что называется прокаливаемостью.

85. Две детали, из которых одна имеет полную, другая — неполную прокаливаемость, подвергнуты отпуску так, что твердость по сечению обеих деталей одинакова. Напишите, будут ли и другие свойства этих деталей одинаковыми, и если нет, то зачем выражаются различия в свойствах?

86. Чему равно значение D_{50} стали 40 при закалке в воде (используйте рис. 12, 13,а)? (D_{50} — диаметр сечения, при котором структура состоит из 50% мартенсита и 50% троостита).

Ответ:

- 1) 32 мм; 2) 40 мм; 3) 15 мм.

87. Чему равно значение D_{50} стали 38ХА при закалке в воде (см. рис. 12, 13,б)?

Ответ:

- 1) 60 мм; 2) 40 мм; 3) 90 мм.

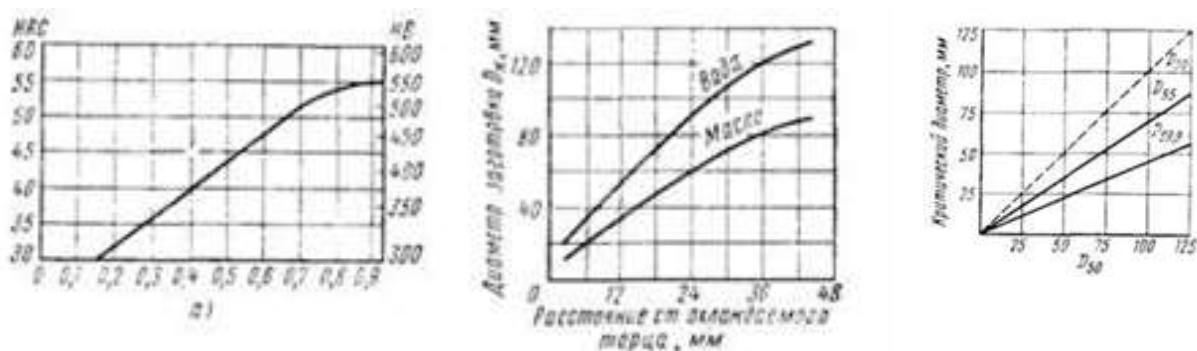


Рис. 12. Графики для определения прокаливаемости: а- зависимости твердости полумартенситной структуры от содержания углерода в стали; б – диаграмма для определения прокаливаемости D_{50} ; в – графики для определения D_{99} и $D_{99,9}$ по значению D_{50}

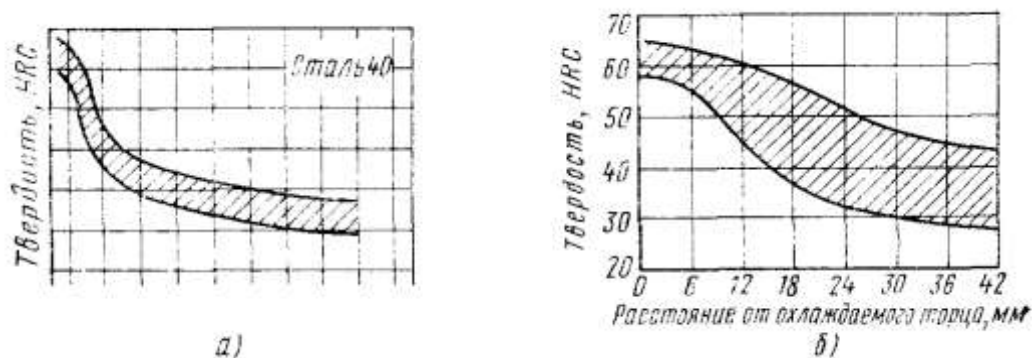


Рис. 13. Полосы прокаливаемости сталей:

а – сталь 40; б - 38 ХА

88. Чему равно значение D_m стали 38ХА при закалке в масле?

Ответ:

- 1) 25 мм;
- 2) 38 мм;
- 3) 12 мм.

89. Тяжелонагружаемая деталь диаметром 25 мм изготовлена из стали 40, закалена в воде и подвергнута высокому отпуску. Какие недостатки этой детали в работе?

90. В чем технологические недостатки стали 40 для изготовления ответственных деталей?

Ответ:

- 1) заготовки плохо обрабатываются резанием;
- 2) детали требуют охлаждения в воде при закалке;
- 3) детали имеют недостаточную конструктивную прочность (надежность) из-за низкой прокаливаемости стали.

91. Какие преимущества имеет технология изготовления и качество детали диаметром 15 мм, для изготовления которой вместо стали 40 взята сталь 40Х?

Ответ:

- 1) можно закалить деталь в масле, что уменьшает вероятность брака;
- 2) деталь имеет полную прокаливаемость, что после отпуска обеспечивает большую конструктивную прочность;
- 3) лучше обрабатывается резанием.

92. Как влияет перегрев аустенита на прокаливаемость стали?

Ответ:

- 1) прокаливаемость увеличивается;
- 2) прокаливаемость уменьшается;
- 3) перегрев не оказывает влияния на прокаливаемость.

93. Перечислите факторы, влияющие на прокаливаемость.

94. Можно ли в целях увеличения прокаливаемости рекомендовать высокие температуры нагрева для закалки? Почему?

Ответ:

- 1) можно — улучшаются свойства стали;
- 2) нельзя — возможно ухудшение свойств стали из-за увеличения размера зерна после закалки.

Литература

1. Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 2005.
- 648 с.5 экз.

2. Пейсахов А.М., Кучер А.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для студентов немашиностроительных специальностей / 3-е изд. – СПб.: Издательство Михайлова В.А., 2005. - 416 с. 40 экз.
3. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов / Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2007. – 535 с. 6 экз.
4. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1987. - 646 с. 37 экз.
5. Казаков Н.Ф., Осокин А.М., Шишкова А.П. Технология металлов и других конструкционных материалов. – М.: Металлургия, 1995. - 529 с. 45 экз.
6. Худокормова Р.Н. Материаловедение; лаб. Практикум; учеб. Пособие для вузов; под. ред. Л. С. Ляховича. – Минск; Высш. шк., 1988. – 224 с. 48 экз.

Практическая работа № 4 «Разработка технологического процесса химико-термической обработки»

Введение

Химико-термической обработкой называют поверхностное насыщение стали соответствующим элементом (например, углеродом, азотом, алюминием, хромом и др.) путем его диффузии в атомарном состоянии из внешней среды при высокой температуре.

Процесс химико-термической обработки включает три элементарные стадии:

1. Выделение диффундирующего элемента в атомарном состоянии благодаря реакциям, протекающим во внешней среде;
2. Контактное взаимодействие атомов диффундирующего элемента с поверхностью стального изделия и проникновение (растворение) их в решетку железа (адсорбция);
3. Диффузия атомов насыщающего элемента вглубь металла.

Скорость диффузии атомов насыщающего элемента в решетку железа неодинакова. При насыщении углеродом или азотом, образующим с железом твердые растворы внедрения, диффузия протекает быстрее, чем при насыщении металлами, образующими твердые растворы замещения.

Толщина проникновения (диффузия) зависит от температуры и продолжительности насыщения.

Толщина диффузионного слоя x в зависимости от продолжительности процесса τ при данной температуре обычно выражается параболической зависимостью. Следовательно, с течением времени скорость увеличения толщины слоя непрерывно уменьшается. Толщина диффузионного слоя, при прочих равных условиях, тем больше, чем выше концентрация диффундирующего элемента на поверхности металла.

Концентрация диффундирующего элемента на поверхности зависит от активности окружающей среды, обеспечивающий приток атомов этого элемента к поверхности, скорости диффузионных процессов, приводящих к

переходу этих атомов вглубь металла, состава обрабатываемого металла, состава и структуры образующихся фаз. Повышение температуры, увеличивает скорость процесса диффузии, поэтому толщина диффузионного слоя, образующегося за данный отрезок времени, сильно возрастает с повышением температуры процесса.

Природа первичных образований, фазовый состав и изменение концентрации по толщине диффузионного слоя могут быть описаны диаграммой состояния: металл растворитель – диффундирующий элемент.

Диффузионный слой по микроструктуре можно определить только из-за несколько большей или иной его травимости. Насыщение при температуре t сопровождается фазовой перекристаллизацией при температуре диффузии. Диффузия первоначально протекает в γ -фазе, а по достижении на поверхности предела растворимости происходит фазовая перекристаллизация $\gamma \rightarrow \alpha$. Зародыши α -фазы от поверхности растут по направлению диффузии, образуя характерные столбчатые кристаллиты.

1. Цементация

Цементацией называется процесс насыщения поверхностного слоя стали углеродом. Различают два основных вида цементации: с твердыми углеродсодержащими смесями (карбюризаторами) и газовую. Целью цементации является получение твердой и износостойкой поверхности, что достигается обогащение поверхностного слоя углеродом и последующей закалкой и низким отпуском. Цементация и последующая термическая обработка одновременно повышают и предел выносливости.

Для цементации обычно используют низкоуглеродистые стали (0,12-0,23% C). Выбор таких сталей необходим для того, чтобы сердцевина изделия, не насыщающаяся углеродом при цементации, сохраняла высокую вязкость после закалки.

Для цементации детали поступают после механической обработки с припуском на шлифование 0,05-0,10 мм или после окончательной обработки (например, автомобильные шестерни). Во многих случаях цементации подвергаются только части детали; тогда участки, не подлежащие упрочнению, защищают тонким слоем меди (0,02-0,05 мм), которую наносят электролитическим способом, или изолируют специальными обмазками, состоящими из смеси огнеупорной глины, песка и асбеста или окиси алюминия и талька, замешанных на жидком стекле и др.

Механизм образования и строение цементованного слоя.

Диффузия углерода в сталь возможна только в том случае, если углерод находится в атомарном состоянии, получаемом, например, диссоциацией газов, содержащих углерод (CO, CH₄ и др.). Атомарный углерод адсорбируется поверхностью стали и диффундирует вглубь металла.

Цементация, как правило, проводят при температурах выше точки A_{c1} , при которых устойчив аустенит, растворяющий в больших количествах углерод (рис. 1). При цементации стали атомы углерода диффундируют в решетку γ -железа.

При температуре цементации (выше точки A_{c1}) диффузионный слой состоит только из аустенита, а после медленного охлаждения – из продуктов его распада: феррита и цементита. Концентрация углерода при этом обычно не достигает предела насыщения (C_{max}) при данной температуре.

Цементированный слой имеет переменную концентрацию углерода по глубине, убывающую от поверхности к сердцевине детали. В связи с этим после медленного охлаждения в структуре цементованного слоя можно различить (от поверхности к сердцевине) три зоны: заэвтектоидную 1, состоящую из перлита и вторичного цементита, образующего сетку бывшему зерну аустенита; эвтектоидную 2, состоящую из одного пластичного перлита,

и доэвтектоидную δ – из перлита и феррита. Количество феррита в этой зоне непрерывно возрастает по мере приближения к сердцевине.

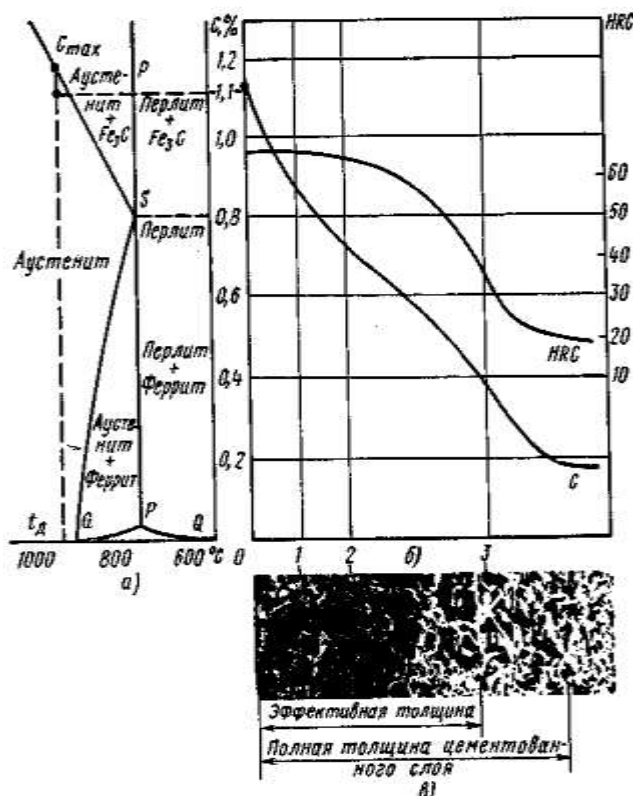


Рис. 1. Образования и строение цементованного слоя

За эффективную толщину цементированного слоя принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной (доэвтектоидной) зон или глубину распространения контрольной твердости свыше определенного значения.

В качестве контрольно твердости (после термической обработки) применяют:

- 1) твердость HRC 50, характеризующую суммарную глубину эвтектоидной зоны и половины переходной зоны (до 0,45% C);
- 2) твердость HV 540-600 (в зависимости от марки стали) при нагрузке 1-5 кг.

Толщина (эффективная) цементованного слоя обычно составляет 0,5-1,8 мм. Чем выше температура, тем больше толщина слоя, получаемая за данный отрезок времени.

Концентрация углерода в поверхностном слое должна составлять 0,8-1,0%. Для получения максимального сопротивления контактной усталости количество углерода может быть повышено до 1,1-1,2%. Более высокая концентрация углерода вызывает ухудшение механических свойств цементируемого изделия.

Легирующие элементы, присутствующие в стали, оказывают влияние на структуру цементируемого слоя, механизм его образования и скорость диффузии. В случае цементации сталей, легированных карбидообразующими элементами, при температуре диффузии возможно образование двухфазного слоя – аустенит и карбиды, имеющие глобулярную форму. В этом случае средняя суммарная концентрация углерода на поверхности может превышать растворимость углерода в аустените при данной температуре. Нередко концентрация углерода в сталях, содержащие Cr, Mn, W, Mo или V, достигает 1,8-2,0%.

Легирующие элементы в том количестве, в котором они присутствуют в цементируемых сталях, на толщину слоя практически влияния не оказывают.

Цементация твердым карбюризатором. В этом процессе насыщающей средой является древесный уголь (дубовый или березовый) в зернах поперечником 3,5-10 мм или каменноугольный полукокс и торфяной кокс, к которым добавляют активизаторы: углекислый барий (BaCO_3) и кальцинированную соду (Na_2CO_3) количестве 10-40% от массы угля.

Широко применяемый карбюризатор состоит из древесного угля, 20-35% BaCO_3 и ~3,5% CaCO_3 . Рабочую смесь, применяемую для цементации, составляют из 25-35% свежего карбюризатора и 65-75% отработанного. Содержание BaCO_3 в такой смеси 5-7%, что обеспечивает требуемую толщину слоя и исключает образование грубой цементитной сетки на поверхности.

Изделия, подлежащие цементации, после предварительной очистки укладывают в ящики: сварные стальные или, реже, литые чугунные прямоугольной формы. При упаковке изделий на дно ящика насыпают и

утрамбовывают слой карбюризатора толщиной 20-30 мм, на который укладывают первый ряд деталей, выдерживая расстояние между деталями и до боковых стенок ящика 10-15 мм. Затем засыпают и утрамбовывают другой ряд деталей и т.д. Последний (верхний) ряд деталей засыпают слоем карбюризатора толщиной 35-40 мм с тем, чтобы компенсировать возможную его усадку. Ящик накрывают крышкой, кромки которой обмазывают огнеупорной глиной или смесью глины и речного песка. После этого ящик помещают в печь.

Нагрев до температуры цементации (910-930 °С) составляет 7-9 мин. на каждый сантиметр минимального размера ящика. Продолжительность выдержки при температуре цементации для ящика с минимальным размером 150 мм составляет 5,5-6,5 ч для слоя толщиной 0,7-0,9 мм и 9-11 ч для слоя толщиной 1,2-1,5 мм. При большом размере ящика (минимальный размер 250 мм) для получения слоя толщиной 0,7-0,9 мм продолжительность выдержки равна 7,5-8,5 ч, а при толщине 1,2-1,5 мм – 11-14 ч.

После цементации ящики охлаждают на воздухе до 400-500°С и затем раскрывают.

Цементацию стали проводят атомарным углеродом. При цементации твердым карбюризатором атомарный углерод образуется следующим образом. В цементированном ящике имеется воздух, кислород которого при высокой температуре взаимодействует с углеродом карбюризатора, образуя окись углерода. Окись углерода в присутствии железа диссоциирует по уравнению $2\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}_{\text{ат.}}$

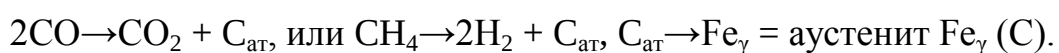
Углерод выделяющийся в результате этой реакции в момент его образования, является атомарным и диффундирует в аустенит. Добавление углекислых солей активизирует карбюризатор, обогащая атмосферу в цементационном ящике окисью углерода: $\text{BaCO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{BaO} + 2\text{CO}$.

Газовая цементация

Этот процесс осуществляют нагревом изделия в среде газов, содержащих углерод. Газовая цементация имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе, поэтому ее широко применяют на заводах, изготавливающих детали массовыми партиями.

В случае газовой цементации можно получить заданную концентрацию углерода в слое; сокращается длительность процесса, так как отпадает необходимость прогрева ящиков, наполненных малотеплопроводным карбюризатором; обеспечивается возможность полной механизации процессов и значительно упрощается последующая термическая обработка изделий, так как можно производить закалку непосредственно из цементационной печи.

Наиболее качественный цементованный слой получается при использовании в качестве карбюризатора природного газа, состоящего почти полностью из метана (CH_4) и пропанбутановых смесей, подвергнутых специальной обработке, а также жидких углеродов. Основной реакцией, обеспечивающей науглероживание при газовой цементации, является диссоциация окиси углерода и метана:



Процесс ведут при 910-930 °С, 6-12 ч (толщина слоя 1,0-1,7 мм).

В серийном производстве газовую цементацию обычно проводят в шахтных муфельных печах серии Ц (рис. 2). Шахтные печи серии Ц (Ц-35Б, Ц-60Б, Ц-75Б, Ц-105Б) имеют рабочую температуру 950°С, единовременную загрузку 185-1100 кг, диаметр рабочего пространства 300-600 мм и высоту 600-1200 мм. Изделия в печь загружают на специальных подвесках и приспособлениях, которые помещают в реторте. Необходимая для газовой цементации атмосфера создается при подаче (с помощью специальной капельницы) в камеру печи жидкостей, богатых углеродом (керосин, синтин,

спирты и т.д.). Углеводородные соединения при высокой температуре разлагаются с активного углерода и водорода.

На предприятиях с серийным масштабом производства также применяют камерные универсальные печи с герметизированной форкамерой и закалочным баком. В таких печах исключается контакт нагретых деталей с воздухом, предотвращается образование дефектов на поверхности изделий, снижается прочность.

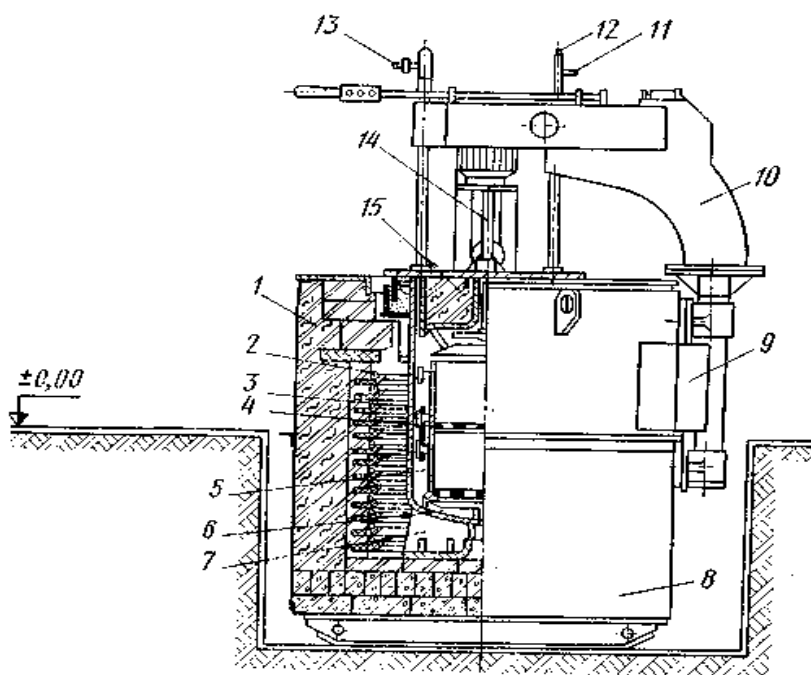


Рис. 2. Шахтная муфельная электропечь серии Ц:

1 - футеровка; 2 - нагревательные элементы; 3 - муфель; 4 - решетка; 5 - загрузочная корзина; 6 - подставка под корзину; 7 - подставка под муфель; 8 - кожух; 9 - монтаж проводов; 10 - механизм подъема и поворота крышки; 11 - патрубок для отбора газа на анализ; 12 - газовая свеча; 13 - подвод карбюризатора; 14 - вентилятор; 15 - крышка.

В крупносерийном и массовом производстве газовую цементацию производят в безмуфельных печах непрерывного действия (рис. 3). В этих установках весь цикл химико-термической обработки (цементация, закалка и низкий отпуск) полностью механизирован и автоматизирован;

производительность таких установок достигает 500-600 кг/ч и более. В этих печах обрабатываемые детали размещаются в поддонах.

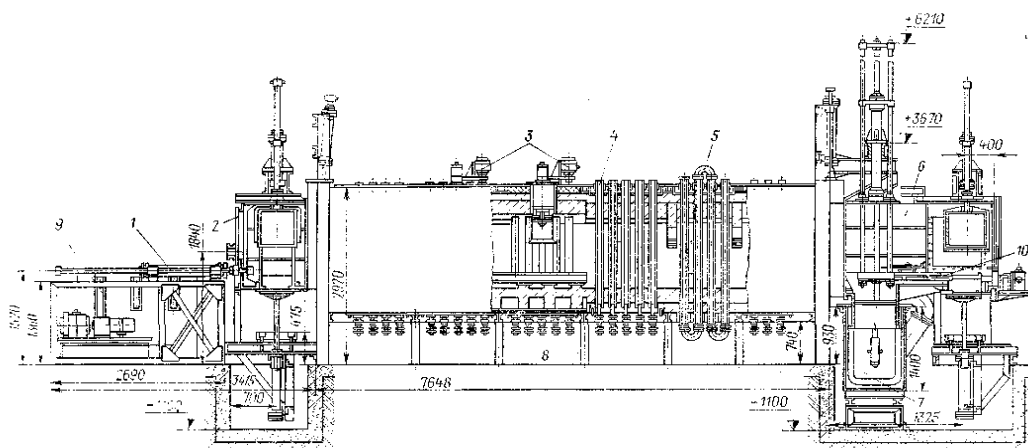


Рис. 3. Безмуфельная печь непрерывного действия для газовой цементации:

1 - гидравлический толкатель; 2 - загрузочный тамбур; 3 - вентиляторы для циркуляции атмосферы печи; 4 - радиационные трубы для нагрева; 5 - охлаждающие трубы зоны подстуживания; 6 - разгрузочный тамбур; 7 - закалочный бак; 8 - горелки; 9 - маслonaсосная установка; 10 - вытаскиватель поддона толкателями вдоль рабочей камеры.

В печах непрерывного действия предусмотрены две зоны по длине печи. В первую зону, примерно соответствующую $\frac{2}{3}$ длины печи, подают газ, состоящий из смеси природного и эндотермического газов (углеродный потенциал атмосферы 1,2-1,3% С). Во вторую зону подают только эндотермический газ, находящийся в равновесии с заданной концентрацией углерода на поверхности, обычно 0,8% С. При использовании этого метода цементации следует иметь в виду, что снижение содержания углерода в слое от 1,2-1,3% до 0,8% происходит только за счет углерода, растворенного в аустените. В случае легированной стали снижение в аустените концентрации углерода и легирующих элементов (в результате образования карбидов) приводит к уменьшению закаливаемости и прокаливаемости цементованного слоя и в итоге к ухудшению механических свойств обрабатываемого изделия. В процессе газовой цементации в сталь может диффундировать находящийся

в атмосфере кислород. Это приводит к окислению, например, Cr, Mn, Ti и других элементов поверхностного слоя стали, обладающих большим химическим сродством к кислороду по сравнению с железом. Окисление легирующих элементов («внутреннее окисление») снижает устойчивость аустенита, и при последующей закалке в цементованном слое образуются трооститная сетка и окислы, что понижает твердость и предел выносливости стали. Добавки к цементирующей атмосфере (в конце процесса) аммиака уменьшает вредное влияние внутреннего окисления.

Азот, растворяясь в аустените, повышает его устойчивость, частично восполняя потери хрома и марганца. Однако следует иметь в виду, что при высоком содержании в атмосфере аммиака в диффузионном слое может образоваться так называемая темная составляющая (видимо, поры с окисленными стенками), снижающая механические свойства стали. Для устранения внутреннего окисления рекомендуется использовать стали, дополнительно легированные никелем и молибденом.

Скорость газовой цементации при температуре 930-950°C составляет 0,12-0,15 мм/ч при толщине слоя до 1,5-1,7 мм.

Термическая обработка стали после цементации и свойства цементованных деталей

Окончательные свойства цементованных изделий достигаются в результате термической обработки, выполняемой после цементации. Этой обработкой можно исправлять структуру и измельчить зерно сердцевины и цементованного слоя, неизбежно увеличивающихся во время длительной выдержки при высокой температуре цементации, получить высокую твердость в цементованном слое и хорошие механические свойства сердцевины; устранить карбидную сетку в цементованном слое, которая может возникнуть при насыщении его углеродом до заэвтектоидной концентрации.

В большинстве случаев, особенно при обработке наследственно мелкозернистых сталей, применяют закалку выше точки A_{c1} (сердцевины) при 820-850°C.

Это обеспечивает измельчение зерна и полную закалку цементованного слоя и частичную перекристаллизацию и измельчение зерна сердцевины. После газовой цементации часто применяют закалку без повторного нагрева, а непосредственно из цементационной печи после подстуживания изделий до 840-860°C, для уменьшения коробления обрабатываемых изделий. Такая обработка не исправляет структуры цементованного слоя и сердцевины, поэтому непосредственную закалку применяют только в случае, когда изделия изготовлены из наследственно мелкозернистой стали. Для уменьшения деформации цементованных изделий выполняют также ступенчатую закалку в горячем масле (160-180°C).

После цементации термическая обработка иногда состоит из двойной закали и отпуска. Первую закалку (или нормализацию) с нагревом до 880-890°C (выше точки A_{c3} сердцевины) назначают для исправления структуры сердцевины. Кроме того, при нагреве в поверхностном слое в аустените растворяется цементитная сетка, которая уже вновь не образуется при быстром охлаждении. Вторую закалку проводят с нагревом до 760-780°C для устранения перегрева цементованного слоя и придания ему высокой твердости. Недостаток такой термической обработки заключается в сложности технологического процесса, повышенном колебании, возникающем в изделиях сложной формы, и возможности окисления и обезуглероживания.

В результате термической обработки поверхностный слой приобретает структуру мелкоигольчатого мартенсита и изолированных участков остаточного аустенита (15-20%) или мартенсита, остаточного аустенита и небольшого количества избыточных карбидов в виде глобулей.

Заключительно операцией термической обработки цементованных изделий во всех случаях является низкий отпуск при 160-180°C, переводящий

мартенсит закалки в поверхностном слое, отпущенный мартенсит, снимающий напряжения.

Твердость поверхностного слоя после термической обработки HRC 58-62. При одинарной закалке высоколегированной сталей в структуре цементованного слоя сохраняется большое количество (до 50-60% и более) остаточного аустенита, снижающего твердость. Такие стали после закалки обрабатывают холодом, что способствует переводу большей части остаточного аустенита в мартенсит, в результате чего повышается твердость. Например, твердость хромоникелевой стали после цементации и закалки составляет HRC 52, а после обработки холодом возрастает до HRC 60-62.

Для разложения остаточного аустенита после цементации чаще применяют высокий отпуск при 630-640°C, после чего следует закалка с пониженной температуры и низкий отпуск. Такая обработка также обеспечивает высокую твердость цементованного слоя. Структура сердцевины обусловлена составом обрабатываемой стали и принятым режимом закалки. Сердцевина деталей из углеродистой стали состоит из феррита и перлита (сорбита), а из легированных сталей – из феррита и мартенсита (или бейнита) при закалке с температуры ниже A_{c3} (для сердцевины), а также из бейнита или низкоуглеродистого мартенсита при закалке с температуры выше A_{c3} . Сохранение обособленных участков или сетки феррита нежелательно, так как это сопровождается значительным снижением прочности, пластичности и вязкости цементованных изделий. Твердость сердцевины для различных сталей составляет HRC 20-40.

Цементация с последующей термической обработкой повышает предел выносливости стальных изделий вследствие образования в поверхностном слое значительных остаточных напряжений сжатия (до 40-50 кгс/мм²) и резко понижает чувствительность к концентраторам напряжений при условии непрерывной протяженности упрочненного слоя по всей упрочняемой поверхности детали. Например, после цементации на глубину 1,0 мм закалки и отпуска хромоникелевой стали (0,12% C; 1,3% Cr; 3,5% Ni) предел

выносливости образцов без концентраторов напряжений увеличился от 56 до 75 кгс/мм², а при наличии надреза от 22 до 56 кгс/мм². Цементованная сталь обладает высокой износостойкостью и контактной прочностью, которая достигает 200 кгс/мм².

2. Азотирование

Азотированием называют процесс диффузионного насыщения поверхности слоя стали азотом при нагреве ее в аммиаке. Азотирование очень сильно повышает твердость поверхностного слоя, его износостойкость, предел выносливости и сопротивление коррозии в таких средах, как атмосфера, вода, пар и т.д.

Твердость азотированного слоя заметно выше, чем цементованной стали, и сохраняется при нагреве до высоких температур (500-600°C); тогда как твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до 200-225°C.

Механизм образования азотированного слоя. В сплавах железа с азотом образуются следующие фазы (рис. 4): твердый раствор азота в α -железе (α -фаза); γ -фаза – твердый раствор на основе нитрида железа Fe_3N (5,7-6,1% N); ε -фаза – твердый раствор на базе нитрида железа Fe_3N (8-11,2% N). В сплавах с 11,35% N при 450°C возможно образование ξ -фазы Fe_3N .

При температуре выше 591°C существует γ -фаза, представляет собой твердый раствор азота в γ -железе. При 591°C γ -фаза претерпевает эвтектоидный распад. Азотистый эвтектоид содержит 2,35% N и состоит из α - γ' -фаз.

Азотирование проводят в атмосфере аммиака, который при нагреве диссоциирует по уравнению $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 6\text{H}$. Образовавшийся атомарный азот диффундирует в железо. Если выполнять азотирование при температуре ниже эвтектоидной (591°C), то в начальный момент насыщения на поверхности стали образуется α -фаза. По достижении предела насыщения α -

фазы начинается образование следующей фазы, стабильной при данной температуре, а именно γ -фазы. При дальнейшем насыщении азотом образуется ε -фаза. Следовательно, в результате диффузии в азотированном слое располагаются в поверхностной зоне наиболее богатая азотом ε -фаза, несколько ниже γ - и α -фаза.

С понижением температуры ε - и α -фазы в соответствии с диаграммой состояния распадаются, выделяя избыточную γ -фазу. В связи с этим после медленного охлаждения фазы в диффузионном слое можно расположить в следующем порядке от поверхности к сердцевине: $\varepsilon + \gamma_{II} \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{II} \rightarrow \alpha \rightarrow$ сердцевина (с исходной структурой).

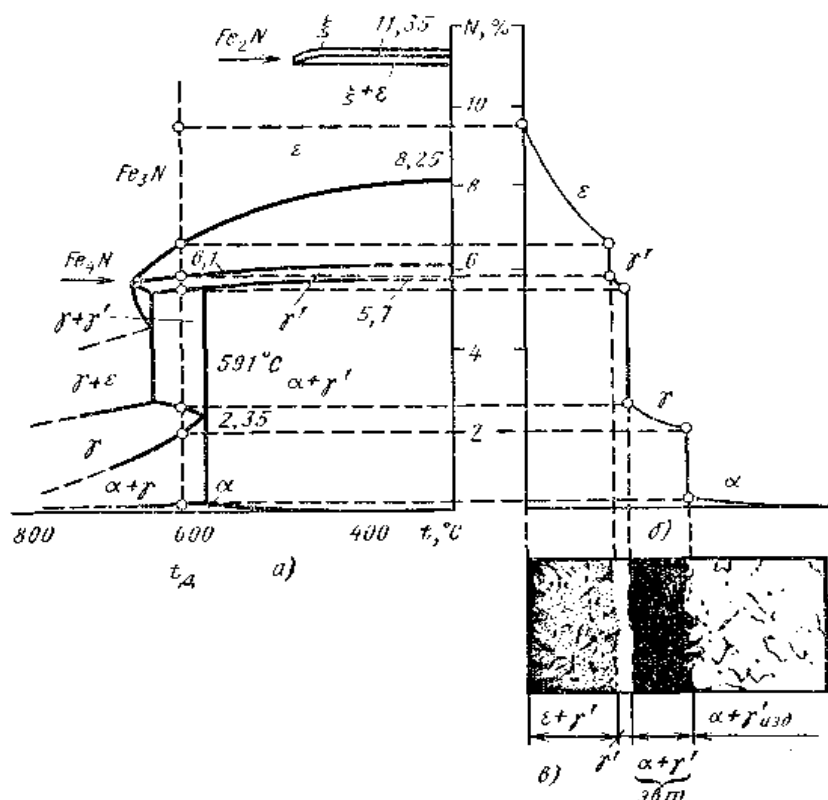


Рис. 4. Диаграмма состояния Fe – N (а) и изменение содержания азота (б) и микроструктуры (в $\times 250$) по толщине азотированного слоя, полученного при 600°C на железе

При выполнении азотирования выше эвтектоидной температуры, например t_d , сначала возникает α -фаза, затем по достижении ее предела

насыщения образуется γ -фаза, после насыщения которой на поверхности появляется γ -фаза, и, наконец, ε -фаза. Таким образом, при температуре диффузии азотированный слой состоит из следующих фаз (от поверхности к сердцевине): $\varepsilon \rightarrow \gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$. При медленном охлаждении ε - и α -фазы распадаются и выделяют избыточную γ -фазу (Fe_3N), а γ -фаза претерпевает эвтектоидное превращение, распадаясь на эвтектоидную структуру $\alpha + \gamma$. Тогда при 20°C азотированный слой будет состоять из $\varepsilon + \gamma \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha + \gamma$ (эвтектоид) $\rightarrow \alpha + \gamma_{\text{II}} \rightarrow \alpha$.

Переход от одной фазы к другой сопровождается резким перепадом концентрации азота, так как двухфазные слои ($\varepsilon + \gamma$ или $\alpha + \gamma$) при температуре насыщения железа азотом существовать не могут. При насыщении легированных сталей при температуре диффузии могут образовываться многофазные слои.

Стали для азотирования

Твердость слоя, получаемого при азотировании железа, невелика, поэтому азотированию подвергают среднеуглеродистые легированные стали, которые приобретают особо высокую твердость и износостойкость. При азотировании легированных сталей образуются нитриды специальных элементов. При низких температурах азотирования в α -твердом растворе образуются сегрегации типа зон Гинье-Престона. При высоких температурах возникают дисперсные нитриды легирующих элементов (Cr_2N , Mo_2N , VN и др.). Зоны Гинье-Престона и обособленные выделения нитридов препятствуют движению дислокаций и тем самым повышают твердость азотированного слоя. Наиболее сильно повышают твердость алюминий, хром, молибден и ванадий. Стали, легированные хромом, вольфрамом, молибденом, ванадием и не содержащие алюминия, после азотирования имеют твердость HV 600-950. Эти стали часто применяют для азотирования.

Если главным требованиям, предъявляемым к азотированному слою, являются высокие твердость и износостойкость, то применяют сталь 38Х2МЮА, содержащую 0,35-0,42% С; 1,35-1,65% Cr; 0,7-1,10%Al и 0,15-0,25% Мо. Одновременно присутствие алюминия, хрома и молибдена позволяет повысить твердость азотированного слоя до HV 1200. Молибден, кроме того, устраняет отпускную хрупкость, которая может возникнуть при медленном охлаждении от температуры азотирования. Легирующие элементы, повышая твердость, одновременно уменьшают, при прочих равных условиях, толщину слоя. Для повышения коррозионной стойкости можно азотировать и углеродистые стали.

Износостойкость азотированной стали выше, чем цементованной и закаленной. В азотированном слое возникают остаточные напряжения сжатия, величина которых на поверхности составляет 60-80 кгс/мм². Это повышает предел выносливости и переносит очаг усталостного разрушения под азотированный слой. Предел выносливости гладких образцов возрастает на 30-40%, а при наличии концентраторов напряжений более чем на 100%.

Технология процесса азотирования

Технологический процесс предусматривает несколько операций, приведенных ниже:

1. Предварительная термическая обработка заготовки. Эта операция состоит из закалки и высокого отпуска стали для получения повышенной прочности и вязкости в сердцевине изделия.

Закалку стали 38Х2МЮА выполняют с нагревом до 930-950°С с охлаждением в воде или масле. Отпуск проводят при высокой температуре 600-675°С, превышающей максимальную температуру последующего азотирования и обеспечивающей получение твердости, при которой сталь можно обрабатывать резанием. Структура стали после этого отпуска – сорбит.

2. Механическая обработка деталей, а также шлифование, которое придает окончательные размеры детали.
3. Защита участков, не подлежащих азотированию, нанесением тонкого слоя (0,01-0,015 мм) олова электролитическим методом или жидкого стекла. Олово при температуре азотирования расплавляется на поверхности стали в виде тонкой не проницаемой для азота пленки.
4. Азотирование.
5. Окончательное шлифование или доводка изделия.

Азотирование тонкостенных изделий сложной конфигурации рекомендуется выполнять 500-520°C. Длительность процесса зависит от требуемой толщины азотированного слоя. Чем выше температура азотирования, тем ниже твердость азотированного слоя и больше толщины. Снижение твердости азотированного слоя связано с коагуляцией нитридов легирующих элементов. Обычно при азотировании желательно иметь слой толщиной 0,3-0,6 мм. Процесс азотирования при 500-520°C в этом случае является продолжительным и составляет 24-60 ч.

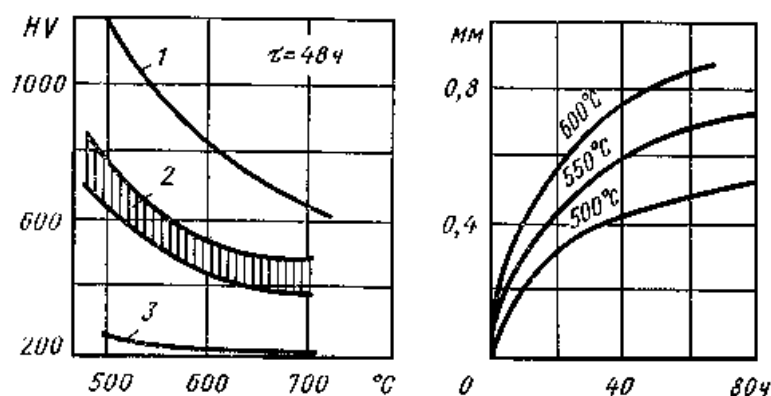


Рис. 5. Влияние температуры и продолжительности азотирования на твердость и толщину азотированного слоя: 1 - сталь 38ХМЮА; 2 - легированные конструкционные стали (40Х, 40ХНМА, 18Х2Н4ВА и др.); 3 - углеродистые стали.

В процессе насыщения азотом изменяются, но очень мало, размеры изделия в следствие увеличение объема поверхностного слоя. Деформация возрастает при повышении температуры азотирования и толщины слоя.

Для ускорения процесса азотирования нередко применяют двухступенчатый процесс: сначала азотирование проводят при 500-520°С, а затем при 540-560°С. При двухступенчатом процессе сокращается продолжительность процесса, при этом сохраняется высокая твердость азотированного слоя. Охлаждение после азотирования производят вместе с печкой в потоке аммиака (до 200°С) во избежание окисления поверхности.

Азотирование чаще ведут в шахтных печах с принудительной циркуляцией газа и максимальной рабочей температурой 600 или 700°С. Шахтные печи (США) выпускаются с двумя сменными муфелями или с одним стационарным.

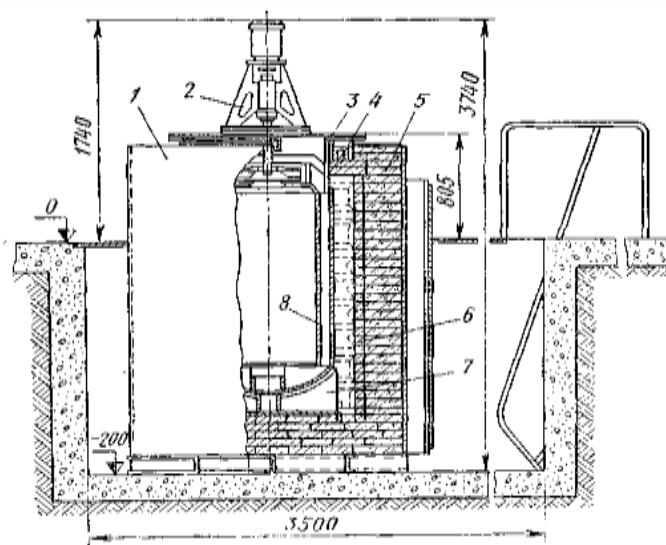


Рис.6. Шахтная муфельная печь США-8.12/6.Л1: 1 - Каркас печи; 2 - вентилятор; 3 - крышка; 4 - муфель; 5 - футеровка; 6 - нагреватели; 7 - крестовина; 8 - направляющий экран.

Первый муфель после окончания процесса азотирования вынимается из печи и охлаждается на воздухе, в печь загружается второй муфель с

детальями. При азотировании крупногабаритных изделий более экономичны печи с одним муфелем.

Значительное сокращение (в 2-3 раза) общего времени процесса достигается при азотировании в тлеющем разряде (ионное азотирование), которое проводят в разряженной азотосодержащей атмосфере (NH_3 или N_2) при подключении обрабатываемых деталей к отрицательному электроду-катоде. Анодом является контейнер установки. Между катодом (деталью) и анодом возбуждается тлеющий разряд, и ионы газа, бомбардируя поверхность катода, нагревают ее до температуры насыщения.

Процесс ионного азотирования реализуется в две стадии:

1. Очистка поверхности катодным распылением;
2. Собственно насыщение.

Катодное распыление проводят в течении 5-60 мин при напряжении 1100-1400 В и давлении 0,1-0,2 мм рт. ст. В процессе катодного распыления температура поверхности детали не превышает 250°C . Температура азотирования $470-580^\circ\text{C}$, давление 1-10 мм рт. ст., рабочее напряжение 400-1100 В, продолжительность процесса составляет от 1 до 24 ч.

В последние годы получило применение азотирование при 570°C в течении 1,5-3,0 ч в атмосфере, содержащей 50% эндогаза и 50% аммиака или 50% пропана (метана) и 50% аммиака. В результате такой обработки на поверхности стали образуется тонкий карбонитридный слой $\text{Fe}_3(\text{N},\text{C})$, обладающий меньшей хрупкостью и более высокой износостойкостью, чем чисто азотистая ϵ -фаза. Твердость карбонитридного слоя легированных сталей HV 600-1100. Такая обработка сильно повышает предел выносливости изделий.

3. Нитроцементация

Нитроцементацией называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при $840-860^\circ\text{C}$

в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4-10 ч. Основное назначение нитроцементации – повышение твердости и износостойкости стальных изделий.

Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода. Скорость роста нитроцементованного и цементованного слоев на глубину 0,5 мм практически одинакова, хотя температура нитроцементации почти на 100°С ниже. Толщина нитроцементованного слоя обычно 0,2-0,8 мм.

Толщина слоя при нитроцементации не должна превышать 1,0 мм. При большой толщине слоя в нем образуется темная составляющая и другие дефекты, снижающие механические свойства стали.

Для нитроцементации легированных сталей рекомендуется использовать контролируемую эндотермическую атмосферу, к которой добавляют 1,5-5,5% необработанного природного газа и 1,0-3,5% NH_3 . Вместо эндогаза иногда применяют экзо-эндотермическую атмосферу, содержащую 20% H_2 , 20% CO и 60% N_2 , что повышает сопротивление хрупкому разрушению и предел выносливости обрабатываемых изделий. В шахтных печах нередко применяют жидкий карбюризатор – триэтанолламин, который в виде капель вводят в рабочее пространство печи.

После нитроцементации следует закалка либо непосредственно из печи с подстуживанием до 800-825°С, либо после повторного нагрева; применяют и ступенчатую закалку. После закалки проводят отпуск при 160-180°С. При оптимальных условиях насыщения структуры нитроцементованного слоя должны состоять из мелкокристаллического мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25-30% остаточного аустенита.

Твердость слоя после закалки и низкого отпуска HRC 58-64 (HV 570-690). Высокое содержание остаточного аустенита обеспечивает хорошую прирабатываемость, например нешлифуемых автомобильных шестерен, что обеспечивает их бесшумную работу. Максимальные показатели прочности

достигаются только при оптимальном для данной стали содержании на поверхности нитроцементованного слоя углерода и азота. Азота в слое должно быть не меньше того количества, которое устраняет вредные последствия внутреннего окисления ($\geq 0,1-0,15\%$).

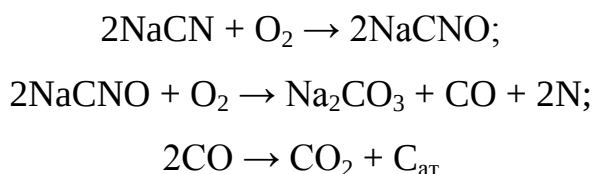
При высоком содержании азота (0,4-0,5%) в слое образуется темная составляющая. Оба дефекта микроструктуры понижают предел выносливости при изгибе и контактную прочность. Оптимальное содержание углерода в сумме C+N зависит от марки стали и колеблется в широких пределах (1,0-1,65%). При низкой концентрации углерода в структуре слоя по границам зерен мартенсита появляется троостит. При высоком содержании углерода в стали, содержащей Cr, Mn, Ti, V образуются карбонитриды, располагающиеся преимущественно по границам зерен в виде сплошной или разорванной сетки. Переход углерода в легирующих элементов в карбонитриды снижает устойчивость аустенита, что также ведет к образованию в слое троостита. Образование сетки карбонитридов и троостита снижает предел выносливости, пластичность и вязкость стали. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению. Нитроцементация имеет следующие преимущества по сравнению с газовой цементацией. Процесс происходит при более низкой температуре (840-860°C вместо 910-930°C); глубина слоя меньше; получается меньше деформации и коробление изделий; повышается сопротивление износу и коррозии.

4. Цианирование

Цианированием называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре 820-950°C в расплавленных солях, содержащие группу «CN». Среднетемпературное цианирование. В этом процессе изделия нагревают до 820-950°C в расплавленных слоях, содержащих NaCN. Для получения слоя

небольшой толщины (0,15-0,35 мм) процесс ведут при 820-860°C в ваннах (20-25%NaCN, 25-50% NaCl и 25-50% Na₂CO₃). Продолжительность процесса обусловлена требуемой толщиной слоя и составляет 30-90 мин.

Цианистый натрий в процессе цианирования окисляется кислородом воздуха, и происходят следующие реакции:

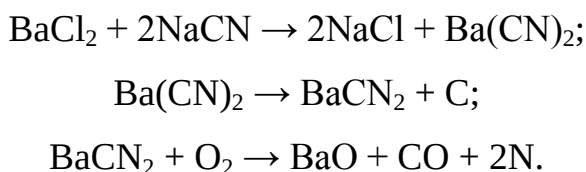


Выделяющийся атомарный углерод и азот диффундируют в сталь. Цианированный слой, полученный при 820-860°C, содержит 0,7% С и 0,8-1,2% N.

Цианирование при указанных сравнительно не высоких температурах позволяет выполнять закалку непосредственно из цианистой ванны. После закалки низкотемпературный отпуск (180-200°C). Твердость цианированного слоя после термической обработки ≈HRC 58-62. Цианированный слой по сравнению с цементованным обладает более высокой износостойкостью и эффективно повышает предел выносливости. Этот вид цианирования применяют для упрочнения мелких деталей.

Высокотемпературное цианирование. Для получения слоя большой толщины (0,5-2,0 мм) применяют высокотемпературное или глубокое цианирование при 930-950°C в ванне, содержащей 8% NaCN, 82% BaCl₂ и 10% NaCl (состав ванны до расплавления). Зеркало ванны покрывают слоем графита во избежание больших потерь теплоты и угара цианистых солей. Время выдержки изделий в ванне для получения слоев указанной толщины составляет 1,5-6 ч.

При цианировании в ванне протекают следующие реакции:



Выделяющийся атомарный углерод и азот диффундируют в железо. При указанных высоких температурах сталь с поверхности в большей степени насыщается углеродом (до 0,8-1,2%) и в меньшей – азотом (0,2-0,3%). Строение цианированного слоя аналогично цементованному. После высокотемпературного цианирования детали охлаждают на воздухе, а затем закаливают с нагревом в соляной ванне или печи и подвергают низкотемпературному отпуску.

Процесс цианирования по сравнению с процессом цементации требует меньшего времени для получения слоя заданной толщины, характеризуется значительно меньшими деформациями и короблением деталей сложной формы и более высокими сопротивлением износу и коррозии.

Недостатком цианирования является высокая стоимость, ядовитость цианистых солей и необходимость в связи принятия специальных мер по охране труда.

5. Борирование

Борированием называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали бором при нагреве в соответствующей среде. Борирование чаще выполняют при электролизе расплавленной буры. Изделие служит катодом. Температура насыщения 930-950°C при выдержке 2-6 ч. Процесс можно вести и без электролиза в ваннах с расплавленными хлористыми солями (NaCl , BaCl_2), в которые добавляют 20% ферробора или 10% карбида бора (B_2C). Хорошие результаты получены при газовом борировании. В этом случае насыщение ведут при 850-900°C в среде диборана или треххлористого бора (BCl_3) в смеси с водородом.

Диффузионный слой состоит из боридов FeB (на поверхности) и Fe_2B . Толщина слоя 0,1-0,2 мм. Борированный слой обладает высокой твердостью

(HV 1800-2000), износостойкостью (абразивной), коррозионной стойкостью, окислостойкостью (до 800°C) и теплостойкостью.

Борирование применяют для повышения износостойкости втулок грязевых нефтяных насосов, дисков пяты турбобура, вытяжных, гибочных и формовочных штампов, деталей пресс-форм и машин для литья под давлением. Стойкость указанных деталей после борирования возрастает в 2-10 раз.

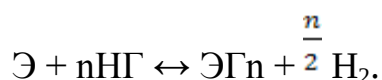
6. Диффузионная металлизация (диффузионное насыщение металлами)

Поверхностное насыщение стали алюминием, хромом, цинком и другими элементами называют диффузионным насыщением металлами. Изделие, поверхность которого обогащена этими элементами, приобретает ценные свойства, к числу которых относится высокая жаростойкость, коррозионная стойкость, повышенная износостойкость и твердость.

В зависимости от метода переноса диффузионного элемента насыщаемую поверхность различают следующие основные способы диффузионной металлизации:

1. Погружением в расплавленный металл, если диффундирующий элемент имеет низкую температуру плавления (например, алюминия, цинк);
2. Из расплавленных солей, содержащих диффундирующий элемент (с электролизом и без электролиза);
3. Из сублимированной фазы путем испарения диффундирующего элемента;
4. Из газовой фазы (контактным и неконтактным методом), состоящий из галогенных соединений диффундирующего элемента.

Галогенные соединения диффундирующего элемента получают путем воздействия галогидного или галогидоводородного газа на этот элемент или его ферросплав:



На границе раздела газовая фаза – обрабатываемая поверхность могут протекать следующие реакции:

1. Реакция обмена; $\text{ЭГn} + \text{Fe} \leftrightarrow \text{FeГn} + \text{Э}$;
2. $\text{ЭГn} \leftrightarrow \text{Э} + \text{Гn}$;
3. Реакция диспропорционирования: $\text{ЭГn} \leftrightarrow \text{Э} + \text{ЭГm}$, где Э - диффундирующий элемент; Г - соответствующий галоид (Cl, F, J, Br) и n и m – стехиометрические коэффициенты (целые числа).

Элемент Э, образующийся в результате реакций, адсорбируется обрабатываемой поверхностью и диффундирует в глубь обрабатываемого изделия. Часто применяют контактный метод насыщения из газовой фазы. Для этого обрабатываемое изделие упаковывают в порошкообразную среду, состоящую из ферросплава диффундирующего элемента (50-75%), Al_2O_3 или шамота и 0,5-5,0 NH_3Cl . При высокой температуре диссоциирует $\text{NH}_3\text{Cl} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{HCl}$. При этом полученный HCl взаимодействует с ферросплавом, образуя галоидные соединения диффундирующего элемента. Процесс ведут при 950-1150°C в течении 3-12 ч.

В последние годы насыщение металлами (например, хромом) производится путем испарения диффундирующего элемента в вакууме. Ниже дана характеристика наиболее часто применяемых процессов диффузионной металлизации.

Алитирование

Аллитированием называют насыщение поверхности стали алюминием. В результате аллитирования сталь приобретает высокую окалиностойкостью (до 850-900°C), так как в процессе нагрева на поверхности аллитированных изделий образуется плотная пленка окиси алюминия Al_2O_3 , предохраняющая металл от окисления. Аллитированный слой обладает также хорошим сопротивлением коррозии в атмосфере и морской воде.

Структура алитированного слоя представляет собой твердый раствор алюминия в α -железе. Концентрация алюминия в поверхностной части слоя составляет $\approx 30\%$. Толщина слоя 0,2-1,0 мм. Твердость алитированного слоя (на поверхности) до HV 500, износостойкость низкая.

Хромирование

Хромированием называют процесс насыщения поверхности стальных изделий хромом. Этот процесс обеспечивает повышенную устойчивость стали против газовой коррозии (окалиностойкость) – до 800°C , высокую коррозионную стойкость в таких средах, как вода, морская вода и азотная кислота. Хромирование сталей, содержащих свыше 0,3-0,4% С, повышает также твердость и износостойкость.

Диффузионный слой, получаемый при хромировании технического железа, состоит из твердого раствора хрома в α -железе. Слой, получаемый при хромировании стали, содержащий углерод, состоит из хрома. На рисунке показана структура хромированного слоя, полученного на стали 0,45% С.. Под слоем карбидов находится переходный слой с высоким содержанием углерода (0,8%). Углерод обладает большей скоростью диффузии, чем хром, поэтому для образования карбидного слоя используется не весь углерод, и под карбидным слоем находится переходный слой с высоким содержанием углерода. карбидный слой обладает высокой твердостью. Твердость слоя, полученного хромированием железа, составляет HV 250-300, а хромирование стали-HV 1200-1300.

Для деталей, работающих в агрессивных средах, хромированный слой должен состоять из α -фазы и иметь толщину 0,1-0,15 мм. Для деталей, работающих в условиях сильного износа и коррозии, рекомендуется карбидный слой глубиной 0,025-0,03 мм.

Хромирование используют для деталей паросилового оборудования, пароводяной арматуры, клапанов, вентилей, патрубков, а также деталей, работающих на износ в агрессивных средах.

Силицирование

Насыщение поверхности стали кремнием называют силицированием. Силицирование придает стали высокую коррозионную стойкость морской воде, в азотной, серной и соляной кислотах и несколько увеличивает устойчивость против износа.

Силицированный слой является твердым раствором кремния в α -железе. Под диффузионным слоем часто наблюдается слой перлита. Это объясняется оттеснением углерода из диффузионного слоя в следствие пониженной растворимости его в кремнистом феррите. Силицированный слой отличается повышенной пористостью, толщина его 0,3-1,0 мм. Несмотря на низкую твердость (HV 200-300), силицированный слой обладает высокой износостойкостью после предварительной пропитки маслом при 170-200°C.

Силицированию подвергают детали, используемые в оборудовании химической, бумажной и нефтяной промышленности (валики насосов, трубопроводы, арматура, гайки, боты и т.д.).

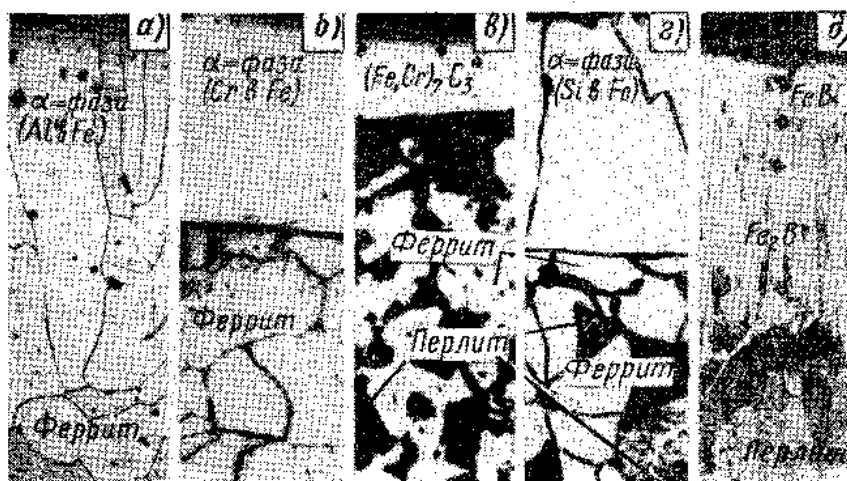


Рис. 7. Микроструктура диффузионных слоев (x250):

а - алитированный слой на железе (α -фаза); б - хромированный слой на железе (α -фаза); в - хромированный слой на стали, содержащей 0,45% С, состоящий из карбида; г - силицированный слой на стали, содержащей 0,4% С (α -фаза); д - борированный слой на стали, содержащей 0,8% С (FeB и Fe_3B).

7. Тестовые задания

1. Какие процессы происходят при химико-термической обработке стали?

Ответ:

- 1) диффузия;
- 2) диссоциация;
- 3) абсорбция;
- 4) распад химических соединений.

2. Чем определяются интенсивность процесса диффузионного насыщения при химико-термической обработке?

Ответ:

- 1) температурой, при которой проводится процесс;
- 2) теплотой активации процесса диффузии;
- 3) скоростью нагрева.

3. Проводится цементация и диффузионное хромирование стали. В каком случае процесс протекает более интенсивно? Чем это можно объяснить?

Ответ:

- 1) интенсивней протекает цементация, так как энергия активации при образовании твердых растворов внедрения меньше, чем при образовании твердых растворов замещения, образуемых у железа с хромом;
- 2) интенсивней протекает хромирование, так как кристаллическое строение хрома и железа более близки, чем у железа и углерода;
- 3) интенсивность процесса не зависит от характера насыщающего элемента и определяется только температурой, при которой проводится процесс.

4. Закалка с цементационного нагрева является наиболее дешевой термической обработкой цементованных изделий. Однако не во всех случаях после такой обработки получают оптимальные свойства из-за образования глубонокристаллической структуры. В каких случаях применяют такую термообработку?

Ответ:

- 1) если проводится цементация в твердом карбюризаторе;
- 2) если проводится газовая цементация;
- 3) если производится газовая цементация и используются наследственно мелкозернистые стали;
- 4) если производится нитроцементация.

5. Какой термической обработке подвергаются детали после цементации?

Ответ:

- 1) закалке;
- 2) закалке и отпуску;
- 3) закалке и низкотемпературному отпуску;
- 4) дополнительная термообработка не требуется.

6. На рис. 8 представлена макроструктура поршневого пальца (масштаб 1:1). Какой обработке предположительно подвергнута эта деталь? При разборе

вопроса учитывайте, в каких условиях работает деталь и какие свойства от нее требуются.

Ответ:

- 1) поверхностной закалке;
- 2) цементации;
- 3) цементации, закалке и низкому

7. Опишите, из чего состоит и как образовалась микроструктура, приведенная на рис. 9?

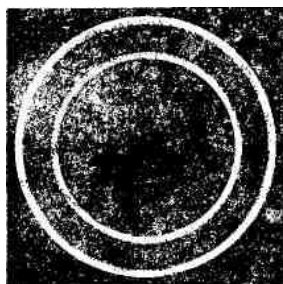


Рис. 8. Макроструктура по сечению поршневого пальца

8. Учитывая высокую стоимость процесса цементации деталей, укажите, какой более высокопроизводительной операцией можно заменить цементацию и какие стали в этом случае следует выбрать для изготовления деталей?

Ответ:

- 1) поверхностной закалкой—используются стали с повышенной прокаливаемостью;
- 2) поверхностной закалкой — используются обычные низкоуглеродистые стали;
- 3) поверхностной закалкой — используются высокоуглеродистые стали;
- 4) поверхностной закалкой — используются стали с 0,55—0,6% С с пониженной прокаливаемостью.

9. Что является активным углеродом при цементации в твердом карбюризаторе?

Ответ:

1) древесный уголь; 2) сажа; 3) углекислые соли; 4) углерод, получаемый при разложении СО.

10. Какова структура цементованного слоя?

Ответ:

1) Л; 2) Л + Ц_{II}; 3) Ц_{II} + Л + Ф; 4) П + Ф.



Рис. 9. Макроструктура стали после химико-термической обработки.

11. Какие стали рекомендуется использовать для изготовления азотируемых деталей, от которых требуется максимальная твердость?

Ответ:

1) Ст5; 2) сталь 15; 3) сталь 38ХМЮА; 4) сталь 40Х.

12. Какие свойства повышает азотирование?

Ответ:

- 1) износостойкость, предел выносливости, коррозионную стойкость;
- 2) относительное удлинение;
- 3) ударную вязкость.

13. Какая термообработка требуется после азотирования стали?

Ответ:

- 1) закалка; 2) закалка + отпуск; 3) закалка + низкий отпуск; 4) дополнительная термообработка не требуется.

14. Что представляет собой процесс цианирования?

Ответ:

- 1) насыщение поверхностных слоев стальной детали цианом;
- 2) насыщение поверхностных слоев стальной детали азотом;
- 3) насыщение поверхностных слоев стальной детали азотом и углеродом.

15. На рис. 10, а приведена диаграмма состояния Fe—N; на рис. 10, б — микроструктура азотированного слоя. При какой температуре проводилось азотирование, в результате чего образовалась такая структура?

Ответ:

1) при 550° C; 2) при 650° C; 3) при 700° C; 4) при 800° C.

16. Из чего состоит структура азотированного слоя по сравнению со структурой (рис. 10,б), когда азотирование проводится при температуре ниже 600°С?

Ответ:

1) структура слоя состоит из ϵ - γ - α -фаз;

2) структура слоя не имеет α - + γ -фаз;

3) структура слоя состоит из β -фазы.

17. Каким способом помимо поверхностной закалки и ХТО можно повысить усталостную прочность деталей машин?

Ответ:

1) увеличением чистоты поверхности деталей;

2) дробеструйным наклепом;

3) закалкой от более высокой температуры.

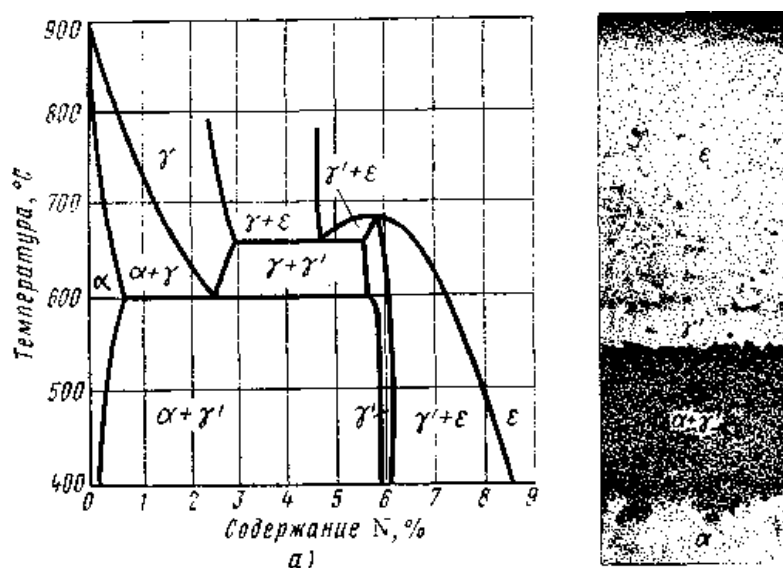


Рис. 10. Диаграмма состояния Fe—N (а). Микроструктура азотированного слоя (б)

Литература

7. Арзамасов Б.Н. и др. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 2005. – 648 с.5 экз.
8. Пейсахов А.М., Кучер А.М. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для студентов немашиностроительных специальностей / 3-е изд. – СПб.: Издательство Михайлова В.А., 2005. – 416 с. 40 экз.
9. Колесов С.Н., Колесов И.С. Материаловедение и технология конструкционных материалов / Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2007. – 535 с.6 экз.
10. Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия., 1987. – 646 с. 37 экз.
11. Казаков Н.Ф., Осокин А.М., Шишкова А.П. Технология металлов и других конструкционных материалов. – М.: Металлургия, 1995. – 529 с. 45 экз.
12. Худокормова Р.Н. Материаловедение ; лаб. Практикум.; учеб. Пособие для вузов.; под. ред. Л. С. Ляховича. – Минск; Высш. шк., 1988. – 224 с. 48 экз.

Расчетно-графическая работа № 1 «**Диаграммы состояния сплавов**»

Задание № 1

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰C, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

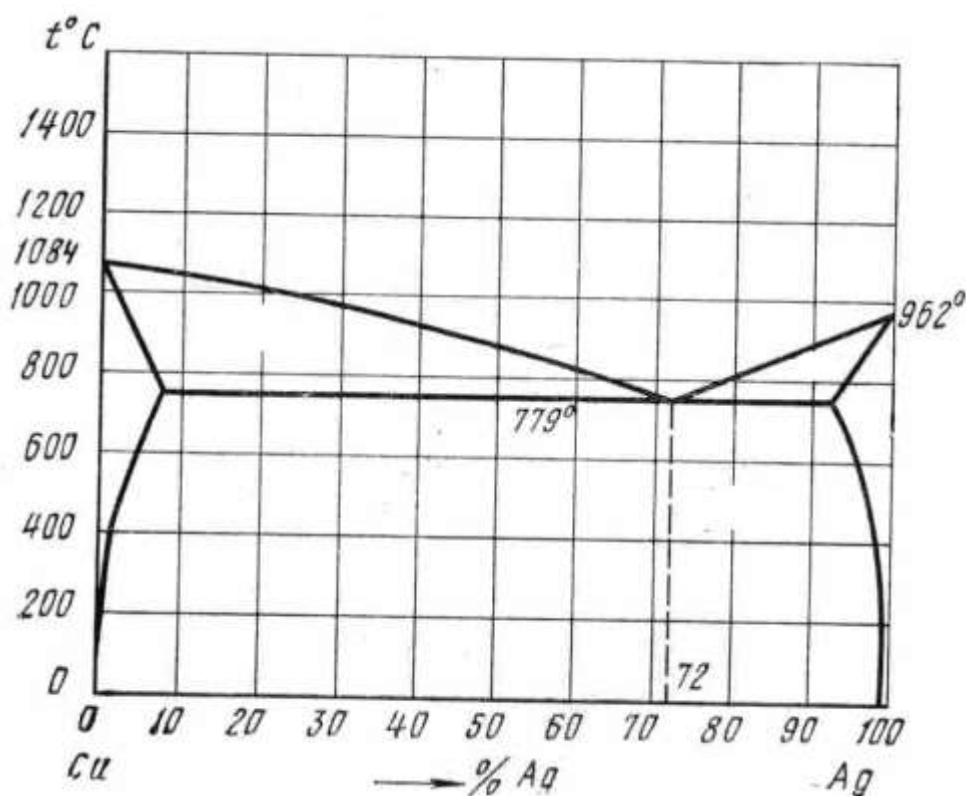


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

«_____» _____ 20 _____ г.

Задание № 2

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰С, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

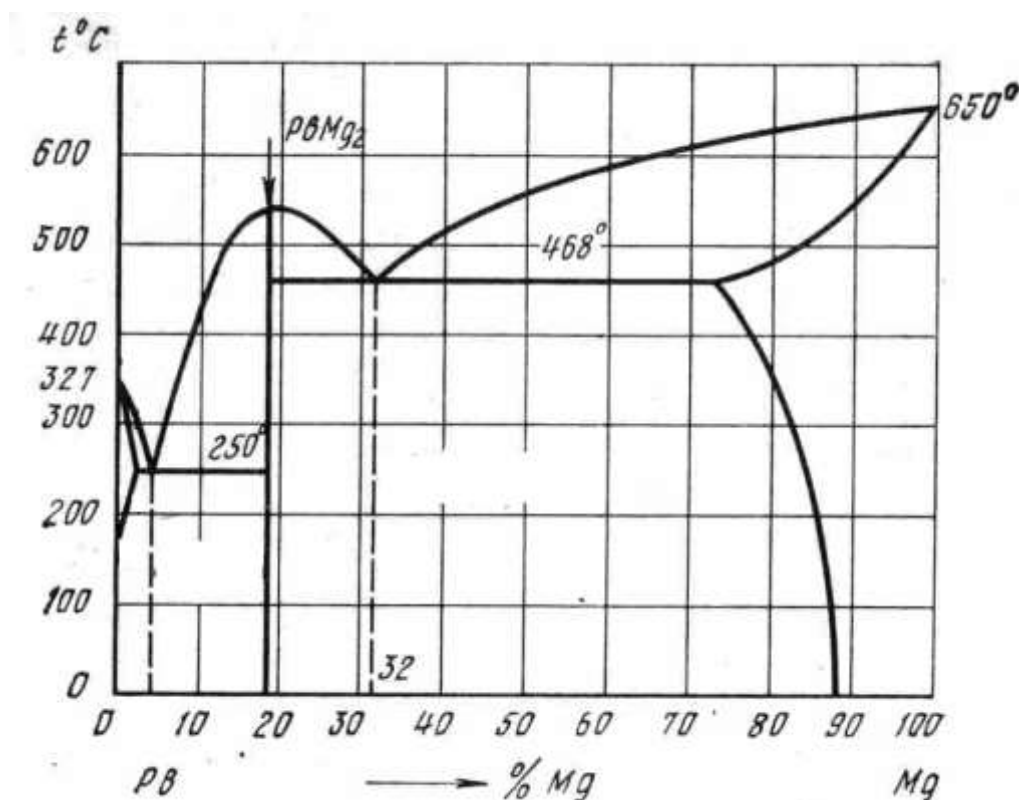


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 3

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰C, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

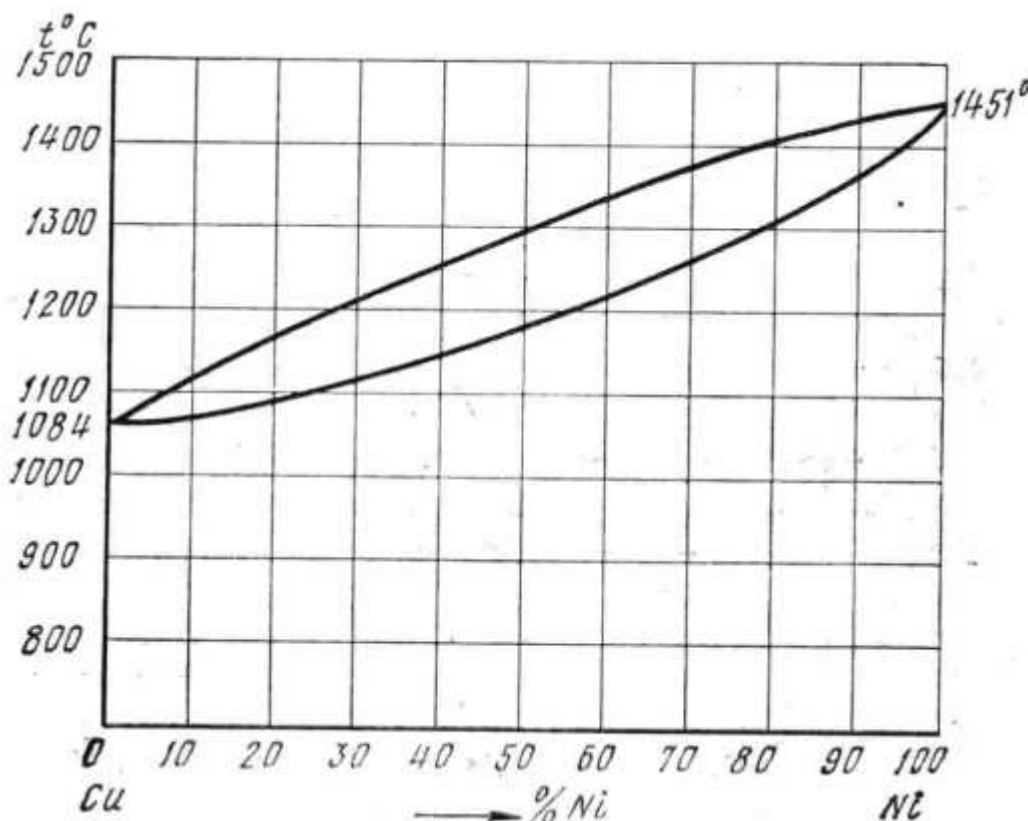


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

«_____» _____ 20 _____ г.

Задание № 4

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰C, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

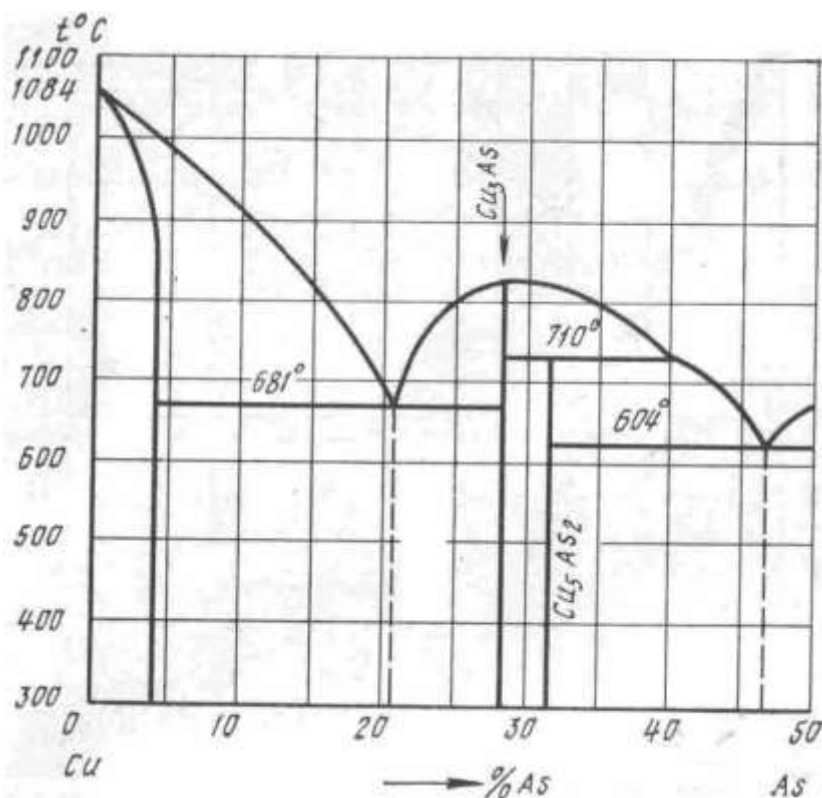


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

«_____» _____ 20 _____ г.

Задание № 5

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰С, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

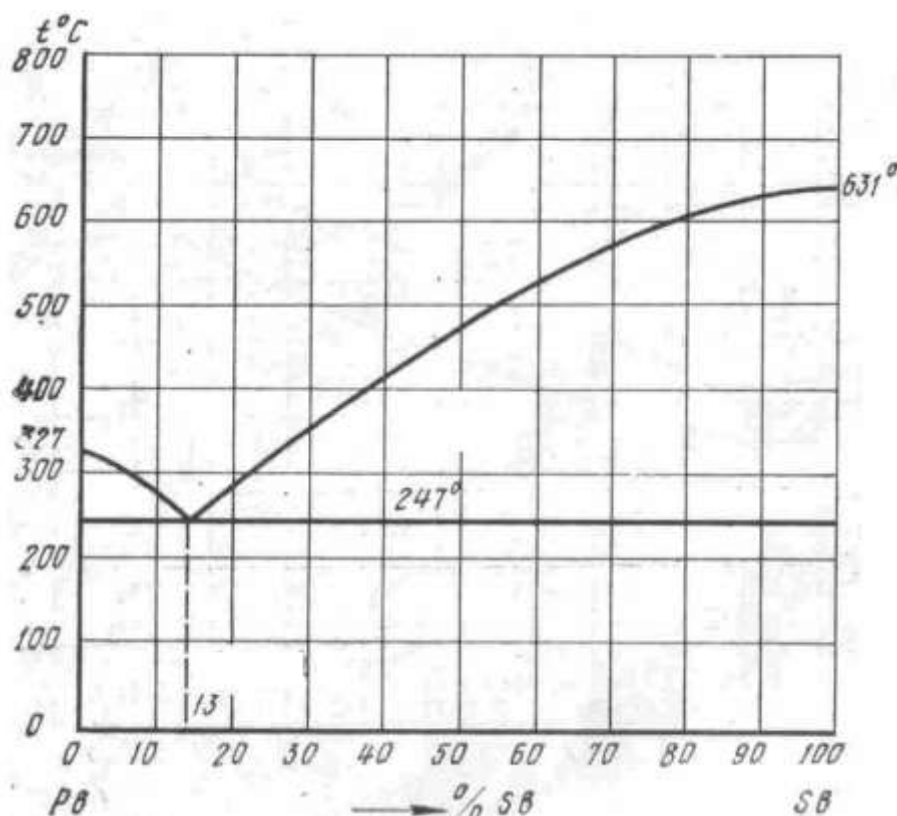


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 6

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰С, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

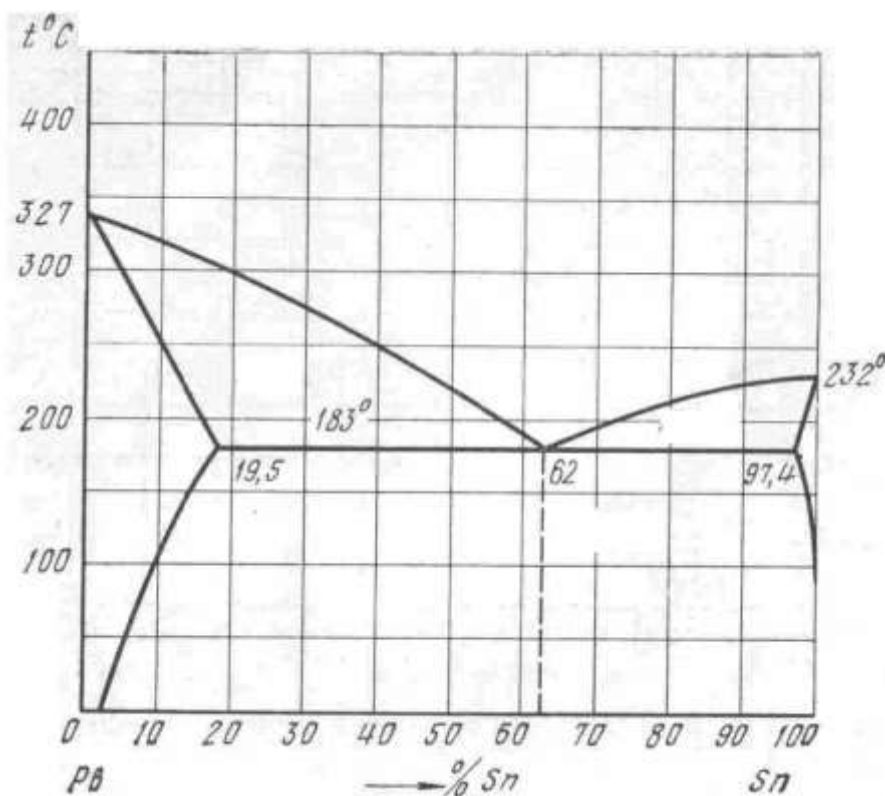


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 7

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰С, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

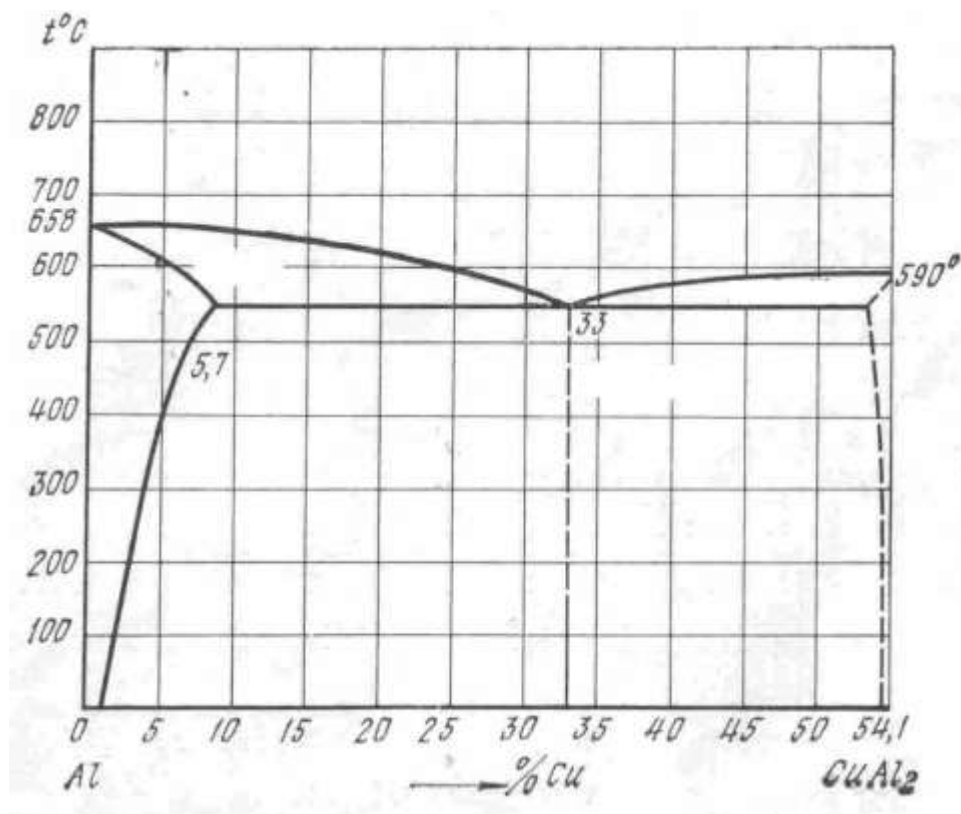


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 8

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰C, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

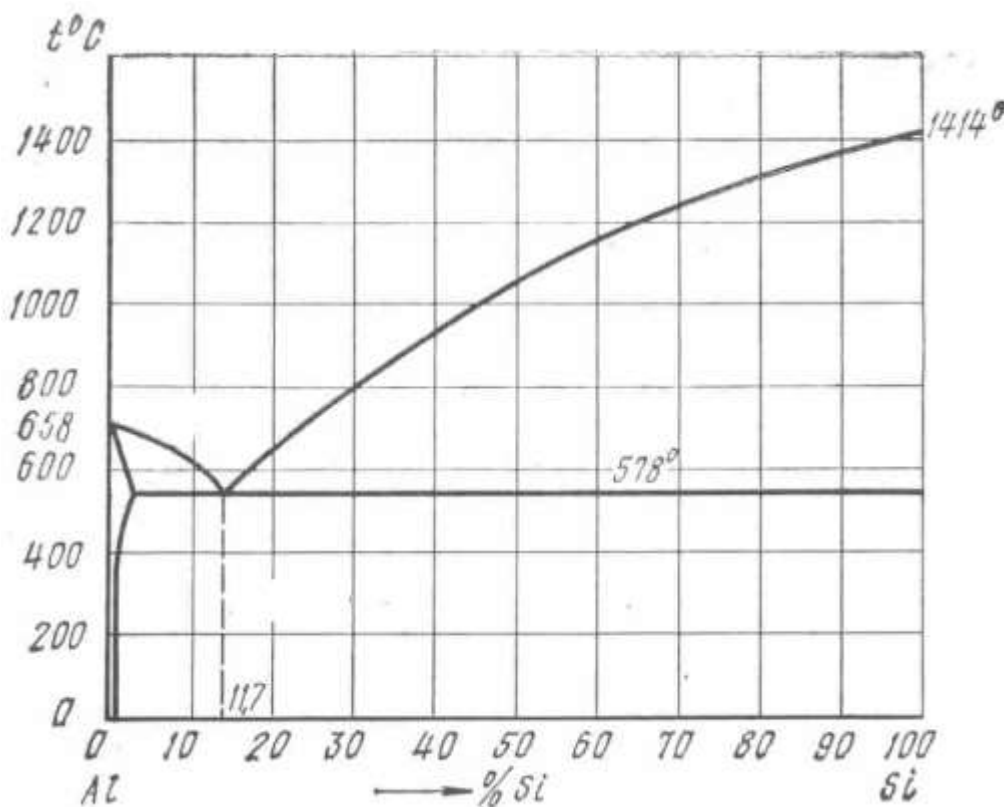


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

«_____» _____ 20 _____ г.

Задание № 9

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____ $^{\circ}\text{C}$, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

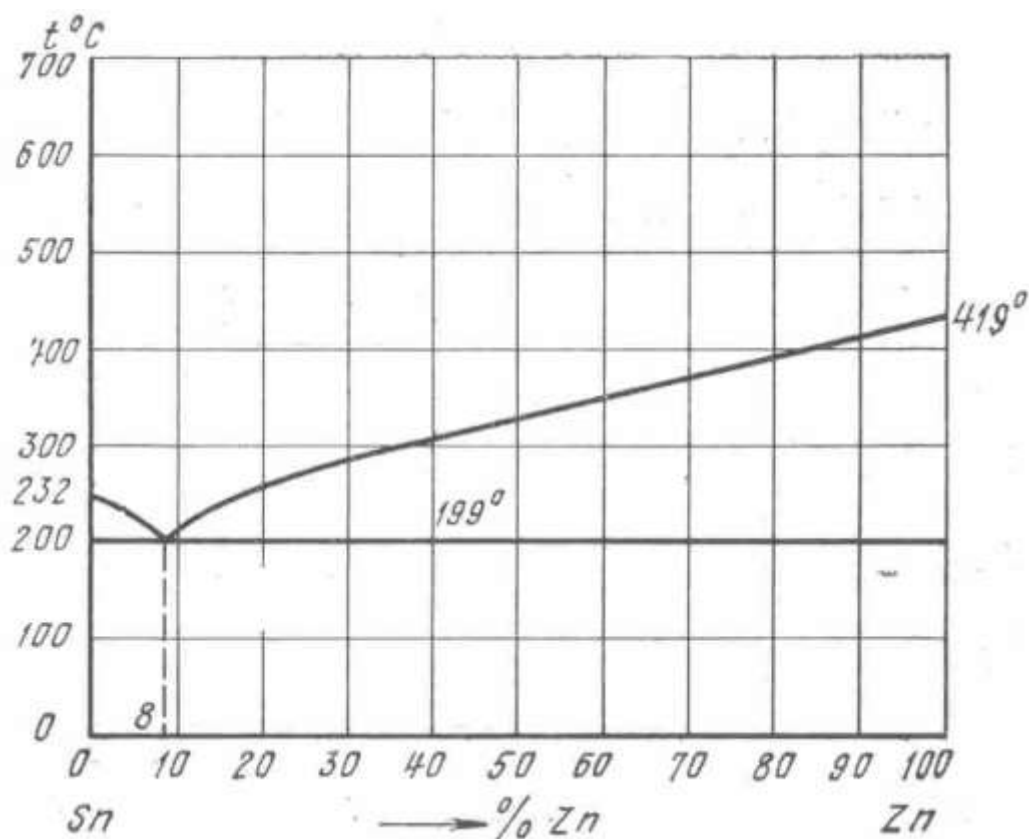


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 10

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰С, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

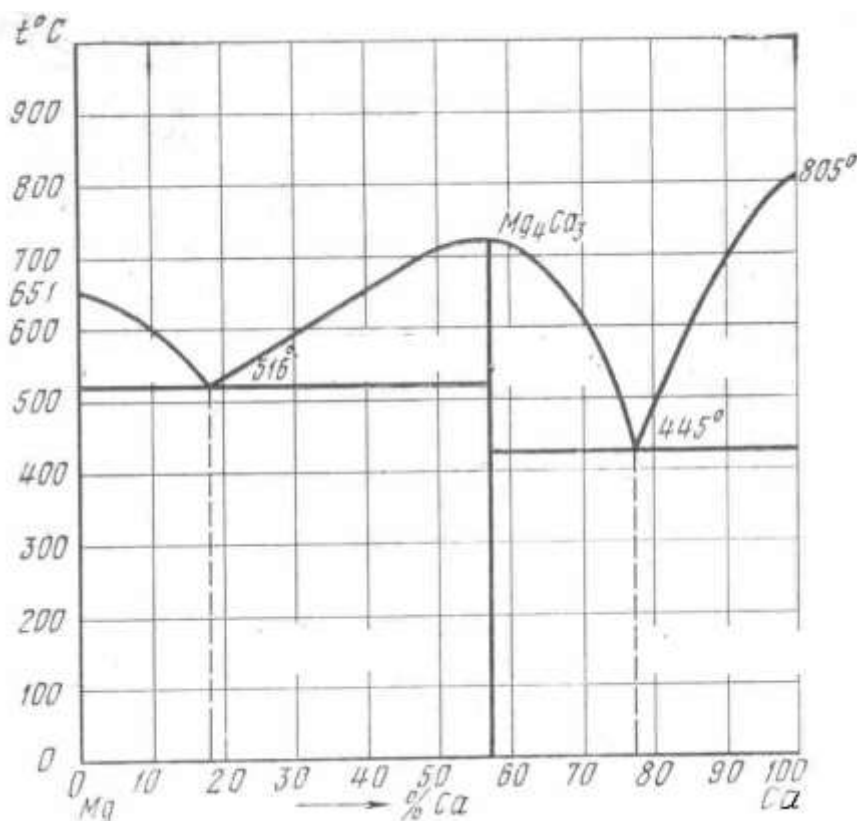


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 11

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰C, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

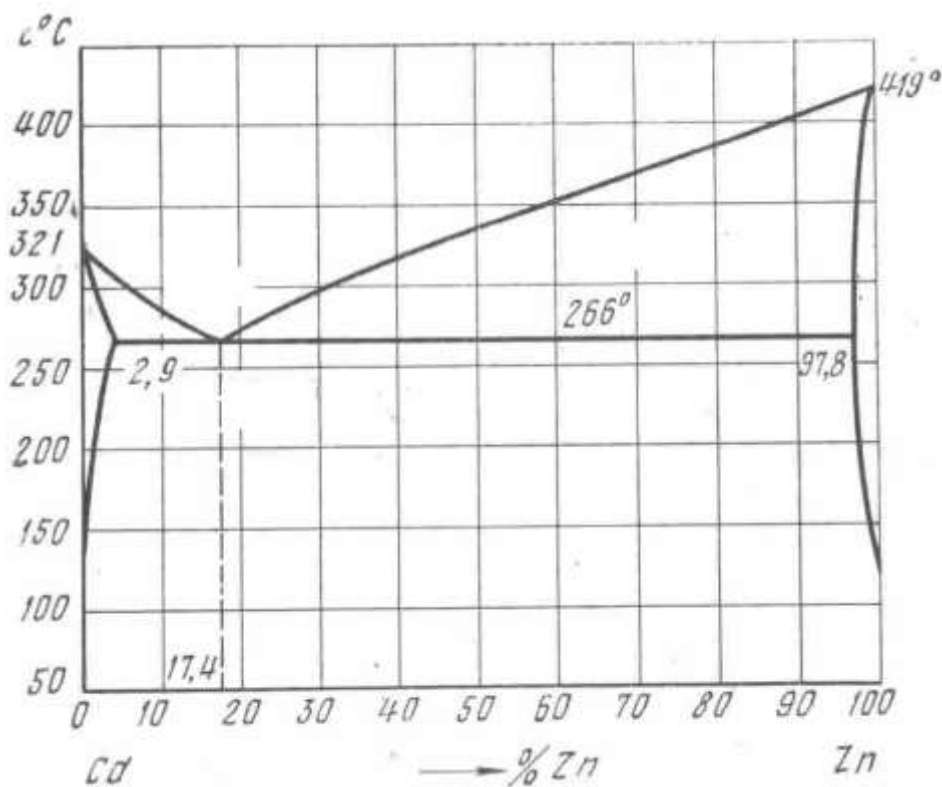


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 12

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰C, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

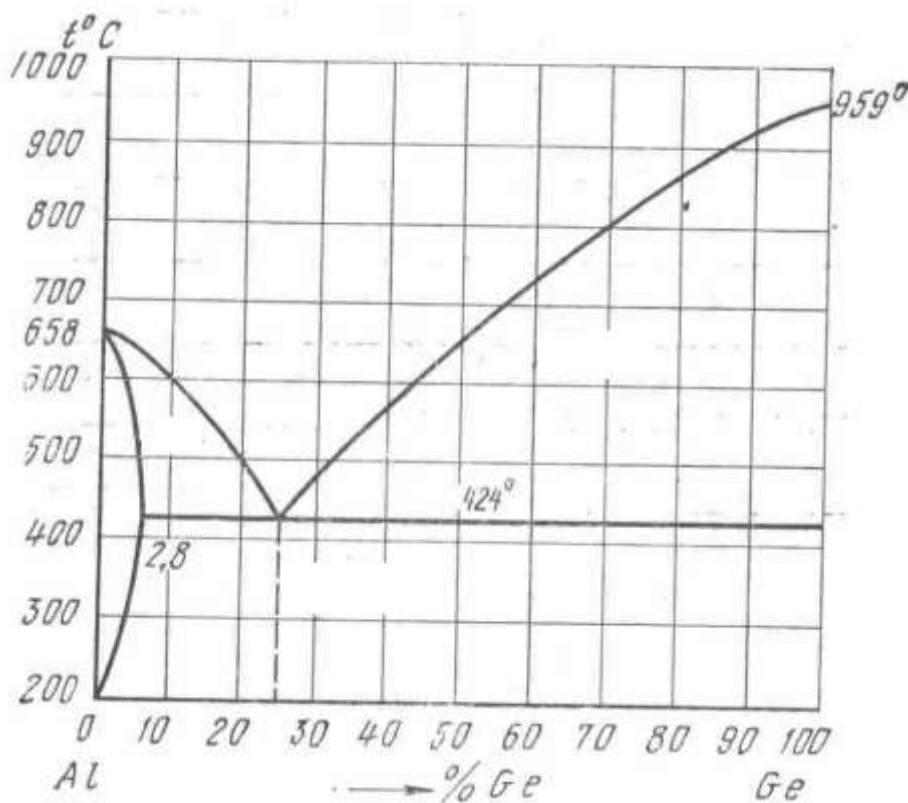


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 13

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰С, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

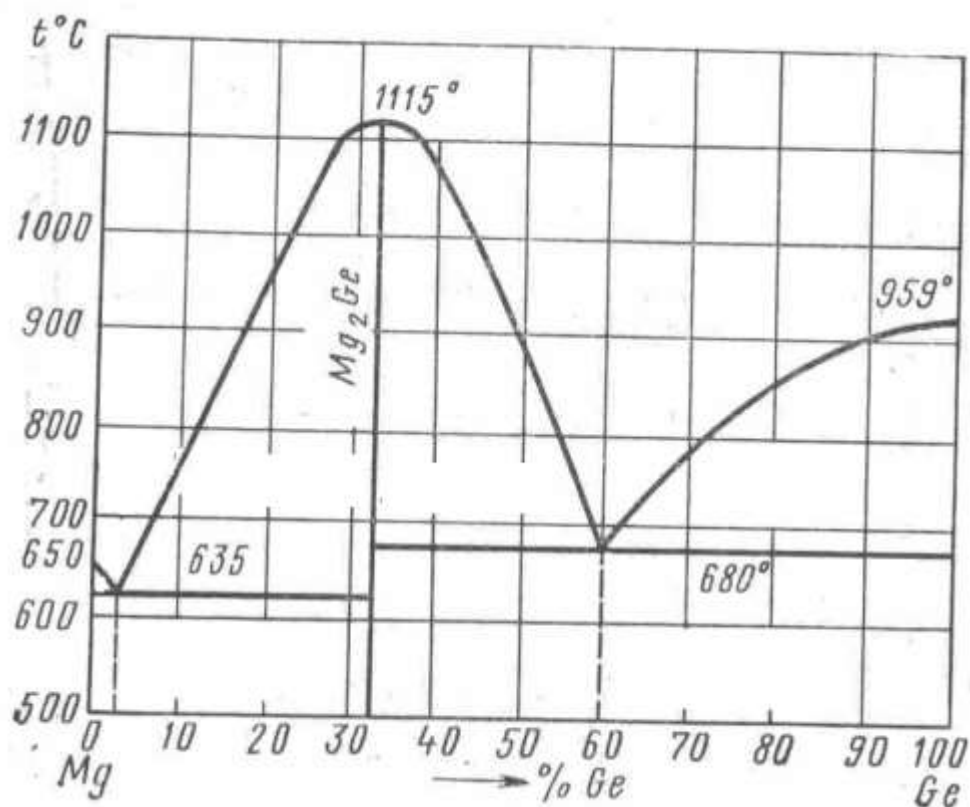


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 14

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰C, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

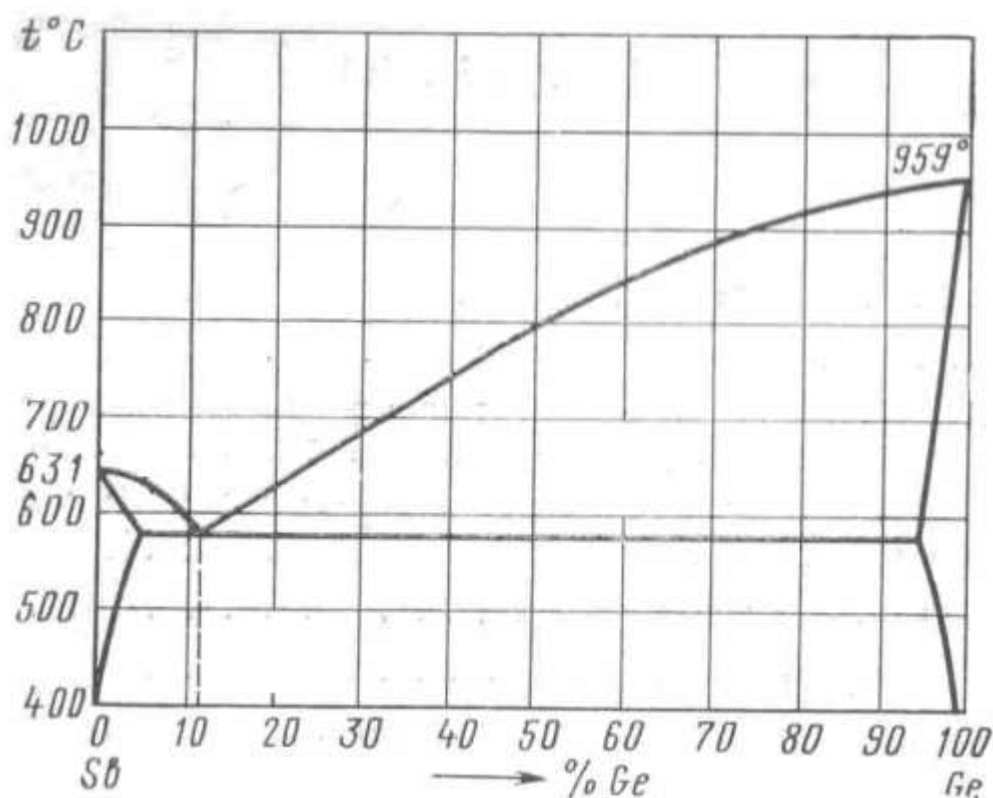


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Задание № 15

ФИО студента: _____

Группа: _____

Задание

1. Начертите диаграмму состояния сплавов.
2. Определите характер (вид) взаимодействия компонентов в жидком и твердом состояниях.
3. Заполните все структурные области диаграммы.
4. Для сплава, содержащего _____% _____ постройте кривую охлаждения и нагревания. Опишите все превращения, происходящие при этом.
5. Для заданного сплава при температуре _____⁰С, пользуясь правилом отрезков, определите состав фаз и их соотношение.

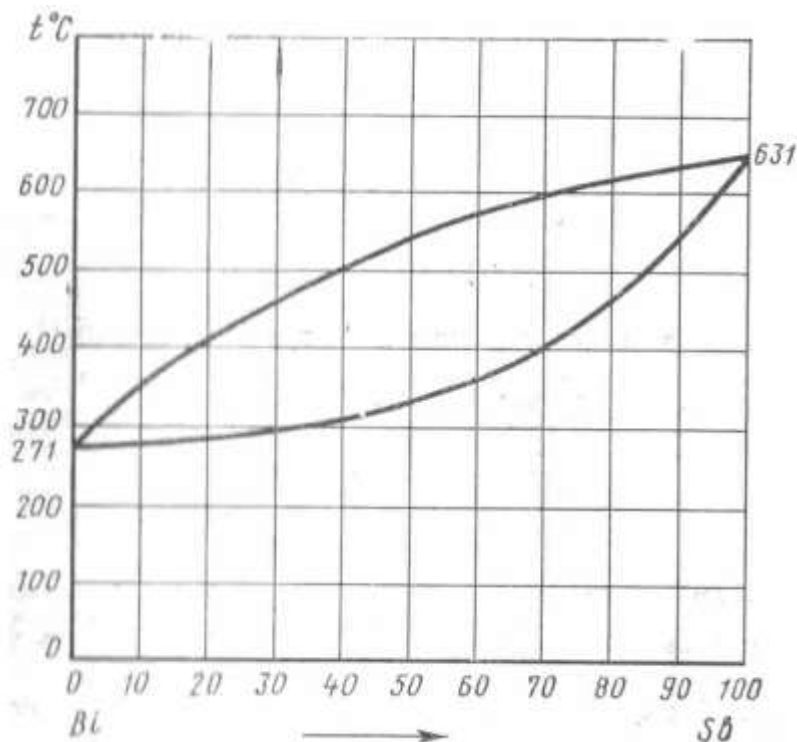


Диаграмма состояния

Задание выдал: _____ / _____ /.

« _____ » _____ 20 _____ г.

Часть II. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № 1. Испытание металлов на твёрдость

1.1 Цель работы

1. Изучить методику испытаний материалов на твёрдость методами Бринелля, Роквелла и Виккерса.

1.2 Приборы, материалы, учебные пособия

1. твердомеры Бренеля, Роквелла, Виккерса
2. Комплект образцов для испытания
3. Луппа
4. Таблица твёрдости

1.3 Краткие сведения о твёрдости.

Под **твёрдостью** понимается свойство материала сопротивляться упругой и пластической деформации или разрушению при внедрении в него другого, более твердого и не получающего остаточной деформации тела индентора.

Применение методов механических испытаний на твердость в настоящее время получило чрезвычайно широкое распространение. Они позволяют:

- легко и быстро испытывать ограниченно малые объемы металла;
- проводить механические испытания тогда, когда практически никакие другие способы по тем или иным причинам использовать нельзя;
- испытывать материалы практически без повреждаемости (другие методы механических испытаний сопровождаются безвозвратным повреждением испытуемого образца материала);
- использовать образцы с предварительной обработкой только малого участка поверхности материала;
- определять твердость в микросечениях и микрообъемах, например в структурных составляющих, отдельных фазах или слоях материала;
- использовать компактные приборы, измерять твердость не-

посредственно на работающем оборудовании, с применением автоматизации и интеграции с цифровой вычислительной техникой;

- легко устанавливать эмпирическую или аналитическую связь получаемых результатов с данными других испытаний.

Способы определения твердости в зависимости от временного характера приложения нагрузки и измерения сопротивления вдавливанию индентора подразделяют на **статические, динамические и кинетические**. Наиболее распространенными являются **статические методы**, при которых нагрузку к индентору прикладывают плавно и постепенно, а время выдержки под нагрузкой регламентируется стандартами на соответствующие методы.

При **динамических методах** определения твердости испытательный индентор воздействует на образец с определенной кинетической энергией, затрачиваемой на упругую отдачу и/или формирование отпечатка, а также на различные потери (вибрация, тепловыделение, трение и т.п.). Твердость при этом определяется, по существу, на основе оценки расходования кинетической энергии индентора. Динамическую твердость часто называют также твердостью материала при ударе. Твердость при ударе характеризует сопротивление внедрению не только на поверхности образца, но и в некотором объеме материала. К динамическим методам можно также условно отнести метод царапания.

Кинетические методы определения твердости основываются на непрерывной регистрации процесса вдавливания индентора с записью диаграммы «нагрузка на индентор – глубина внедрения индентора». Перспективность такого подхода заключается в регистрации всей кинетики процесса упругопластического деформирования материала при вдавливании индентора, а не только конечного результата испытаний, как при других методах.

По принципу приложения нагрузки способы определения твердости можно подразделить на способы **вдавливания, отскока, царапания и резания**.

Способы **вдавливания** являются наиболее распространенными. Твердость в этом случае определяется как сопротивление, которое оказывает испытываемое тело внедрению более твердого индентора и отражает преимущественно сопротивление материала пластической деформации. Способы **отскока** основаны на измерении твердости по высоте отскока бойка, падающего на испытываемую поверхность. Твердость при этом отражает преимущественно сопротивление упругой деформации. Измерение твердости способом отскока широко применяют для контроля больших изделий и конструкций с использованием переносных приборов ввиду оперативности, удобства и легкости автоматизации и компьютеризации.

При способах **царапания** и **резания** твердость определяется соответственно как сопротивление материала царапанию или резанию.

При всех методах испытания на твердость очень важно правильно подготовить поверхность образца. Чем меньше глубина вдавливания индентора, тем выше требуется чистота поверхности и тем более внимательно надо следить, чтобы свойства поверхностного слоя не изменились вследствие нагрева или наклепа при шлифовании и полировке.

1.3.1 Твердость по Бринеллю

Сущность метода

При определении твердости этим методом стальной шарик определенного диаметра D (мм) вдавливают в тестируемый образец (полуфабрикат или готовое изделие) под действием нагрузки P , приложенной перпендикулярно поверхности образца, в течение определенного времени (рис. 1.1). После снятия нагрузки измеряют диаметр отпечатка d (мм). Число твердости по Бринеллю обозначается буквами HB, и его определяют путем деления нагрузки P (кгс) на площадь поверхности сферического отпечатка F (мм²). При этом используют следующую формулу:

$$HB = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \left[\frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2} \right]$$

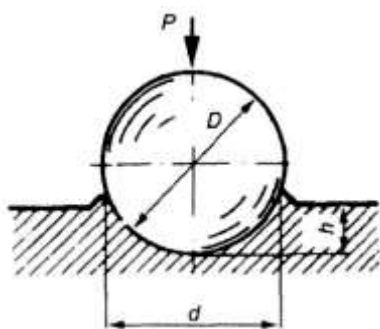


Рис. 1.1 Схема измерения твердости по Бринеллю

Для удобства имеются таблицы чисел твердости по Бринеллю в зависимости от диаметра шарика D , диаметра отпечатка d и нагрузки P .

Индентор

При испытании используют полированные ($Ra \leq 0,040$ мкм) шарики из стали ШХ15 с номинальными диаметрами $D = 1; 2; 2,5; 5$ и 10 мм, последние считаются более предпочтительными, как обеспечивающие большую точность измерения твердости (особенно при измерении твердости чугуна или крупнозернистых материалов). Отклонения диаметров шариков должны быть не более $0,0025$ мм при $D = 1; 2; 2,5$ мм и $0,004$ мм при $D = 5$ и 10 мм.

Требования, предъявляемые к образцам для испытаний

1. Минимально допустимая толщина образца 5 (мм) для корректного измерения твердости НВ должна быть не менее десятикратной глубины отпечатка h (мм) и определяется по формуле (нагрузка P определяется в кгс):

$$s \geq 10 \cdot \frac{P}{\pi \cdot D \cdot HB}.$$

2. Не допускается наличия следов деформации на противоположной стороне образцов.

3. Поверхность образца должна быть ровной, свободной от оксидов и обработанной шлифовкой или мелким напильником, а для $D = 1$ мм должна быть отполированной.

Особенности проведения испытаний

Испытания проводят при температурах около 20 °С (от 10 до 35 °С) в

отсутствие вибраций и ударов. При испытаниях нагрузка считается выбранной правильно, если выдерживается соотношение:

$$0,2D < d < 0,6D$$

Следовательно, диаметр отпечатка при испытании шариком 10 мм должен быть не менее 2 мм и не более 6 мм.

Соотношение между толщиной материала, диаметром шарика и нагрузкой принимается в соответствии с данными таблицы 1.

Таблица 1

Условия определения твёрдости на приборе Бринелля (ТШ)

Материал	Твёрдость HB	Толщина образца, мм	Диаметр шарика, мм	Нагрузка, кгс	Время выдержки, с
Чёрные металлы	140 – 450	>6	10	3000	10
		6 – 3	5	750	
		<3	2,5	187,5	
	до 140	>6	10	3000	30
		6 – 3	5	750	
		<3	2,5	187,5	
Твёрдые цветные металлы (медь, латунь, магний)	31,8 – 130	>6	10	1000	30
		6 – 3	5	250	
		<3	2,5	62,5	
Мягкие цветные металлы (алюминий, баббиты)	8 - 35	>6	10	250	60
		6 – 3	5	62,5	
		<3	2,5	15,6	

Для некоторых материалов между твёрдостью по Бринелю HB и пределом прочности σ_b существует пропорциональная зависимость. Это позволяет рассчитать предел прочности по данным определения твёрдости. Между этими величинами установлена следующая эмпирическая зависимость:

СТАЛИ	= 0,35 НВ
ЛАТУНИ	= 0,53 НВ
ДЮРАЛЮМИНИЙ	= 0,37 НВ
МЕДЬ	= 0,8 НВ

Обозначения

При диаметре шарика $D = 10$ мм нагрузка должна быть 3000 кгс, а время выдержки под нагрузкой 10–15 с. Число твердости в этом случае обозначается цифрами со стоящим после них символом НВ (например, 250 НВ). При других условиях испытаний после букв НВ указываются условия испытаний НВ $D/P/\tau$, например: 250 НВ 5/750/25 – твердость по Бринеллю 250, полученная при диаметре шарика $D = 5$ мм, нагрузке $P = 750$ кгс и времени выдержки под нагрузкой $\tau = 25$ с).

Определение твердости по методу Бринелля допускается только для материалов, твердость которых не более 450 кгс/мм^2 , так как при большей твердости деформация стального закаленного шарика будет вносить в показания значительные погрешности.

1.4 Испытания твердости по Роквеллу

Сущность метода

При определении твердости этим методом в тестируемый образец (изделие) под действием двух последовательно прикладываемых нагрузок предварительной P_0 (обычно $P_0 = 10$ кгс) и общей P вдавливают индентор (алмазный конус или стальной шарик). При этом общая нагрузка равна сумме предварительной P_0 и основной P_1 нагрузок:

$$P = P_0 + P_1.$$

После выдержки под приложенной общей нагрузкой P в течение 3–5 с основную нагрузку P_1 снимают и измеряют глубину проникновения индентора в материал h под действием общей нагрузки P ; затем снимают

оставшуюся предварительную нагрузку P_0 . Твердость по Роквеллу измеряют в условных единицах. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению индентора на 0,002 мм. Число твердости определяется по шкале индикатора (как правило, часового типа). Индикатор показывает результат вычитания разности глубин $h-h_0$, на которые вдавливался индентор под действием двух последовательно приложенных нагрузок, из некоторой константы. Все размеры и константа измеряются в миллиметрах, h_0 глубина внедрения индентора в испытуемый образец под действием предварительной нагрузки P_0 (рис. 1.2).

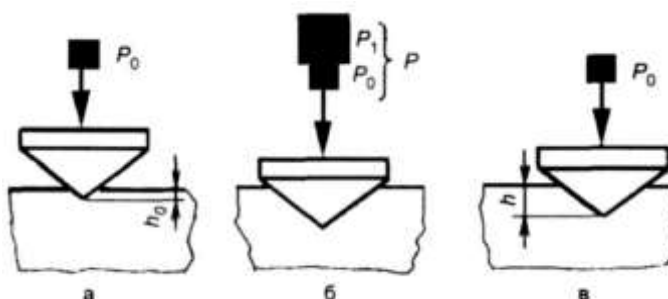


Рис. 1.2 Схема измерения твердости по Роквеллу

В зависимости от формы индентора и прилагаемой нагрузки введены три измерительные шкалы (табл. 2): А, В, С (наиболее часто используемыми шкалами являются А и С).

Таблица 2

Шкалы, использующиеся при измерении твёрдости по Роквеллу

Обозначение твёрдости по Роквеллу	Общая нагрузка, кгс	Примерная твёрдость по Бринеллю	Допускаемые пределы измерения по Роквеллу
Шкала А HRA (чёрная шкала на циферблате индикатора)	60	Свыше 700	Свыше 70
Шкала В HRB (красная шкала на циферблате индикатора)	100	60 – 230	25 – 100
Шкала С HRC (чёрная шкала на циферблате индикатора)	150	230 – 700	20 – 67

Число твердости по Роквеллу при измерении по шкалам А и С определяют по формуле:

$$\text{HRA} = \text{HRC} = 100 - (h - h_0)/0,002,$$

где h_0 – глубина внедрения индентора в испытуемый образец под действием предварительной нагрузки P_0 ; h – глубина внедрения индентора в испытуемый образец под действием общей нагрузки (измеряется после снятия основной нагрузки P_1 , но при оставленной приложенной нагрузке P_0).

Число твердости при измерении по шкале В вычисляется по формуле:

$$\text{HRB} = 130 - (h - h_0)/0,002.$$

Индентор

Используют инденторы двух типов:

- а) стальной закаленный шарик диаметром $D = 1,588$ мм;
- б) алмазный конус с углом при вершине 120° и радиусом закругления при вершине $0,2$ мм.

Требования, предъявляемые к образцам для испытаний

1. Шероховатость образцов или изделий в месте испытания должна быть $Ra \leq 2,5$ мкм.
2. Образец или изделие при проведении испытаний не должны смещаться и прогибаться.
3. Минимальная толщина образца или изделия должна быть не менее 8-кратной глубины отпечатка.

Особенности проведения испытаний

Испытания обычно проводят при температурах от 10 до 35 °С и плавном возрастании нагрузки до необходимого значения. Продолжительность времени выдержки под общей нагрузкой P составляет 3 – 5 с; расстояние от центра отпечатка до края образца или до центра соседнего отпечатка ≥ 3 мм.

Измерение твердости по Роквеллу производится достаточно быстро и просто, поскольку фиксация числа твердости осуществляется

непосредственно на шкале испытательного прибора, а размер отпечатка на образце (изделии) достаточно мал. В связи с этим, несмотря на условный характер чисел твердости, данный метод получил достаточно широкое распространение как метод контроля штучных деталей в массовом и крупносерийном производстве.

Обозначения

Число твердости по Роквеллу обозначается цифрами, характеризующими величину твердости, со стоящим после них символом HRA, HRB или HRC (в зависимости от используемой шкалы измерения), например: 45 HRC.

1.5 Испытание твердости по Виккерсу

Сущность метода

При данном методе твердость измеряют путем вдавливания в образец (изделие) алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды под действием нагрузки P в течение времени выдержки τ (рис. 1.3). После снятия нагрузки измеряют диагонали оставшегося на поверхности материала отпечатка d_1 , d_2 и вычисляют среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей d , мм.

Твердость определяется по формулу:

$$HV = \frac{2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2}$$

где α — угол между противоположными гранями пирамиды при вершине, равный 136° .

Значения твердости по Виккерсу при стандартных значениях нагрузки в зависимости от длины диагонали d , мм, приводятся в таблицах.

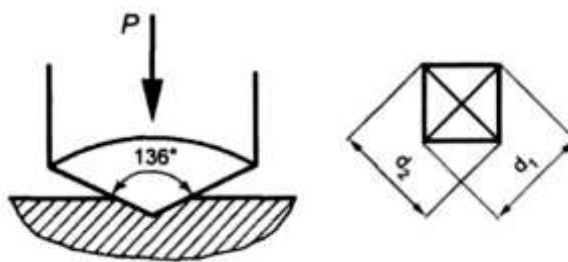


Рис.1.3 Схема измерения твердости по Виккерсу

Индентор

При испытании используют алмазный наконечник в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом между противоположными гранями пирамиды при вершине 136° , который должен соответствовать требованиям ГОСТ 9377—81.

Требования, предъявляемые к образцам для испытаний

1. Шероховатость образцов или изделий в месте испытания должна соответствовать $Ra \leq 0,16$ мкм, поверхность должна быть свободной от оксидной пленки.
2. Изделие или образец должны быть жестко закреплены для устойчивости.
3. Минимальная толщина изделия (образца) должна быть больше диагонали отпечатка: для черных металлов в 1,2 раза, для цветных металлов в 1,5 раза.

При измерении твердости на криволинейных поверхностях радиус кривизны поверхности должен быть не менее 5 мм. В этом случае для чисел твердости используют поправочные коэффициенты, имеющиеся в ГОСТ 2999—75.

Особенности проведения испытаний

При испытаниях применяют следующие нагрузки P , кгс (Н): 1 (9,807); 2 (19,61); 2,5 (24,52); 3 (29,42); 5 (49,03); 10 (98,07); 20 (196,1); 30 (294,2); 50 (490,3); 100 (980,7). Испытания обычно производят при температурах от 10 до 35°C и плавном возрастании нагрузки до необходимого значения. Если

имеются разногласия в определении твердости, то в зоне умеренного климата испытания проводят в интервале 18 – 22 °С. Продолжительность времени выдержки под нагрузкой составляет 10 – 15 с. Расстояние от центра отпечатка до края образца или до края соседнего отпечатка должно быть $\leq 2,5d$ (d – длина диагонали отпечатка). Если определяют твердость слоя материала неизвестной толщины, то проводят несколько последовательных измерений с уменьшающейся величиной нагрузки. При изменении твердости нагрузку следует уменьшать до тех пор, пока при двух смежных нагрузках значения твердости будут близки или совпадать. Диагонали отпечатка измеряют с погрешностью не более: $\pm 0,001$ мм (если $d \leq 0,2$ мм) и $\pm 0,5$ % (если $d > 0,2$ мм). Разность диагоналей одного отпечатка не должна превышать 2 % от меньшей из них. Для анизотропных материалов различие в величине диагоналей допускается устанавливать в соответствии со стандартами на конкретный материал.

Обозначения

Число твердости по Виккерсу при нагрузке $P = 294$ Н (30 кгс) и времени выдержки под нагрузкой $\tau = 10 – 15$ с обозначают цифрами, характеризующими величину твердости со стоящим после них символом HV (например, 400 HV). При других условиях испытаний после символа HV указывается нагрузка и время выдержки, например: 330 HV 10/40 — твердость по Виккерсу, полученная при нагрузке $P = 98,07$ Н (10 кгс) и времени выдержки под нагрузкой $\tau = 40$ с.

В ГОСТе указывается, что точного перевода чисел твердости по Виккерсу на числа твердости, полученные другими методами, или на механические свойства при растяжении не существует и таких переводов (за исключением особенных частных случаев) следует избегать.

1.6 Содержание работы

Студенты получают от преподавателя или лаборанта 4 образца, имеющих вид пластин 10 x 50 x 50 мм, и разную твёрдость. Одна из пластин

имеет поверхностное упрочнение на глубину 0,15 – 0,20 мм при мягкой сердцевине. Вторая пластина закалена, третья – отожжена.

Студентами производится испытания на твёрдость методами Бринелля, Роквелла и Виккерса, результаты оформляются в отчёте в виде таблиц.

После окончания работы полученные результаты анализируются при консультации преподавателя, студенты самостоятельно формулируют выводы.

Результаты работы оформляются в виде протокола – отчёта по лабораторной работе. Отчёт по работе принимается преподавателем.

1.7 Содержание отчёта

1. Цель работы: изучить методику испытаний материалов на твёрдость методами Бринелля, Роквелла и Виккерса.
2. Описание сущности и методика испытаний твёрдости методами Бринелля, Роквелла и Виккерса. Описание произвести ориентируясь на контрольные вопросы после изучения по методическому указанию к работе и литературным источникам.
3. Результаты испытаний по методу Бринелля.

Материал образца	Условия испытания			Диаметры отпечатков				Твёрдость НВ	
	P , кгс	$D_{ш}$, мм	Время	1	2	3	Сред.	Расч.	Табл.

4. Результаты испытаний по методу Роквелла.

Материал образца	Условия испытания			Твёрдость				Твёрдость НВ (по табл.)
	Нагрузка, кгс	Наконеч- ник	шкала	1	2	3	Сред.	

5. Результаты испытаний по методу Виккерса.

Материал образца	Условия испытания			Диагонали отпечатков			Твёрдость НВ	
	P , кгс	$D_{ш}$, мм	Время	d_1	d_2	Сред.	Расч.	Табл.

6. Анализ результатов испытаний и выводы.

1.8 Контрольные вопросы:

1. Что является мерой твёрдости при испытании по методу Бринелля?
2. Каковы условия испытаний по методу Бринелля и как они выбираются?
3. Как вычисляется твёрдость по Бринеллю?
4. Преимущества и недостатки испытаний на твёрдость по методу Бринелля?
5. Что является мерой твёрдости при испытании по методу Роквелла?
6. Каковы условия испытаний по методу Роквелла и как они выбираются?
7. Как пользоваться таблицей для перевода измеренной по методу Роквелла твёрдости в единицы твёрдости по Бринеллю?
8. Что является мерой твёрдости при испытании по методу Виккерса?
9. Каковы условия испытаний по методу Виккерса и как они выбираются?

Лабораторная работа №2. Микроскопический анализ металлов и сплавов. Структура углеродистой стали в равновесном состоянии

2.1 Цель работы

1. Ознакомиться с микроанализом, устройством и работой металлографического микроскопа.
2. Приобрести навыки анализа структуры и свойств железоуглеродистых сплавов в равновесном состоянии.

2.2 Приборы, материалы, учебные пособия

1. Металлографический микроскоп МИМ – 7 с набором объективов и окуляров.
2. Комплект микрошлифов различных марок стали.
3. Таблицы, ГОСТы по определению балла зерна и неметаллических включений.
4. Альбом микроструктур.
5. Справочное пособие.

2.3 Микроанализ и диаграмма состояния сплавов

Металлы, применяемые в технике, имеют, как правило, поликристаллическое строение, т.е. состоят из множества мелких, различно ориентированных кристаллических зерен.

Размеры кристаллических зерен очень малы и обычно измеряются сотыми долями миллиметра. Поэтому увидеть их можно только с помощью микроскопа, т.е. системы оптических линз, увеличивающих изображение предметов во много раз. В современных металлографических микроскопах, подбирая соответствующие объективы и окуляры, можно получать различное увеличение, вплоть до 2000 раз.

Строение металлов видимое в микроскопах называется микроструктурой, а изучение микроструктуры металла называется микроанализом.

Между микроструктурой и многими свойствами металла существует определенная связь.

Поэтому микроанализ металлов имеет большое значение при изучении свойств металлов.

При помощи микроанализа определяют:

1. Форму и размер кристаллических зерен, из которых состоит металл или сплав.
2. Изменение структуры сплава, происходящее под влиянием различных режимов термической и химико-термической обработки, а также после внешнего механического воздействия на сплав.
3. Микropороки металла - микротрещины, раковины и т.д.
4. Неметаллические включения - сульфиды, оксиды и т.д.
5. Химический состав некоторых структурных составляющих по их характерной форме и характерному окрашиванию специальными реактивами.

Для микроанализа из испытываемого материала вырезают образец и путем ряда операций (шлифования, полирования, травления) доводят его поверхность до такого состояния, что становится возможным исследовать микроструктуру.

Подготовленная для исследования под микроскопом поверхность образца называется микрошлифом.

Таким образом микроскопический анализ состоит: из приготовления микрошлифа и исследования микрошлифа с помощью металлографического микроскопа.

Приготовление микрошлифов

ВЫРЕЗКА. Вырезка образца из детали обычно производится механическим способом в необходимом для исследования месте, не допуская разогрева и пластической деформации, которые могут изменить структуру металла.

ШЛИФОВАНИЕ. Исследуемая плоскость образца шлифуется сначала на шлифовальном круге, затем шлифовальной бумагой разных номеров с последовательно уменьшающимися размером абразивных зерен вручную или на вращающихся плоских дисках. При переходе на более мелкозернистую бумагу шлиф каждый раз поворачивают 90° вокруг оси и шлифуют до исчезновения поперечных рисок. От остатков абразива шлиф очищают промывкой водой.

ПОЛИРОВКА. До зеркального блеска шлиф полируется на бархате или сукне, на которые наносят окись хрома или алюминия, поддерживая достаточную влажность. После полировки шлиф промывают в воде, а затем в этиловом спирте, чтобы предупредить окисление поверхности. Более совершенным методом является электролитическое полирование. Под действием электрического тока выступы на шлифуемой поверхности растворяются, и она постепенно становится зеркальной.

ТРАВЛЕНИЕ. Травление шлифов производится для выявления структуры, т.к. на нетравленном шлифе видны только поры, трещины и неметаллические включения.

Для травления стали и чугуна наиболее часто применяется 3...5%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Продолжительность травления 10...20 с. Затем шлиф тщательно промывается спиртом и сушится фильтровальной бумагой.

При травлении границы зерен и сами зерна, имеющие различную кристаллографическую ориентировку или фазовый состав, растворяются под действием реактива неодинаково.

Сильнее протравившиеся зерна имеют шероховатую поверхность и при отражении в большей степени рассеивают световые лучи. Поэтому под микроскопом одни зерна выглядят более темными, другие - более светлыми. Границы зерен обладают повышенной энергией, так

как являются дефектами кристалла с неправильной упаковкой атомов, растравливаются сильнее самих зерен, и поэтому под микроскопом кажутся темными линиями.

После травления поверхность шлифа имеет сложный микрорельеф, который характеризует строение металла.

Металлографический микроскоп

Металлографический микроскоп (рис. 2.1) состоит из оптической системы, осветительного устройства с осветительной камерой и механической системы. Объект рассматривается в металлографическом микроскопе в отраженном свете.

Качество микроскопа характеризуется его разрешающей способностью. Разрешающая способность оптической системы обратно пропорциональна наименьшему расстоянию d между двумя точками, изображение которых в микроскопе получается раздельно:

$$d = \frac{\lambda}{2A}$$

Где λ - длина волны применяемого света;

A – числовая апертура объектива;

$A = n \cdot \sin \phi$, ϕ - отворсный угол линзы

Таким образом, разрешающая способность тем больше, чем меньше длина волны λ и чем больше апертура.

Применение видимых лучей света позволяет получить разрешение не более 0,2мкм и полезное увеличение не более чем в 2000 раз. Поэтому для больших увеличений применяются лучи с очень малой длиной волны. Например, в электронном микроскопе – электронный луч, дающий полезное увеличение в сотни тысяч раз.

Полезным считается увеличение микроскопа, превышение которого не приводит к получению дополнительной деформации. Увеличение металлографического микроскопа определяется как произведение увеличения объектива и окуляра

Конструкция микроскопа МИМ – 7

Микроскоп МИМ - 7 (рис. 2.1) состоит из трех основных частей: осветителя, корпуса и верхней части

Осветитель имеет фонарь I, внутри кожуха которого находится лампа. Центрировочные винты 2 служат для совмещения центра нити лампы с оптической осью коллектора.

Корпус II микроскопа. В корпусе микроскопа находятся: диск 3 с набором светофильтров; рукоятка 4 переключения фотоокуляров; посадочное устройство для рамки 5 с матовым стеклом или кассеты с фотопластинкой 9 x 12 мм; узел апертурной диафрагмы, укрепленной под оправой осветительной линзы 6; кольцо с накаткой 7, служащее для изменения диаметра диафрагмы; винт 8, вращением которого смещается диафрагма для создания косого освещения; винт 9 для фиксации поворота апертурной диафрагмы.

Верхняя часть III микроскопа имеет следующие детали: иллюминаторный тубус 10, в верхней части которого расположено посадочное отверстие под объектив. На патрубке иллюминаторного тубуса расположена рамка с линзами 11 для работы в светлом и темном поле и рукоятка 12 для включения диафрагмы 24 при работе в темном поле; под кожухом 13 - пентапризма. В нижней части кожуха 13 расположены центрировочные винты 4 полевой диафрагмы, диаметр которой изменяют при помощи поводка 15. Под конусом полевой диафрагмы находится фотозатвор 16.

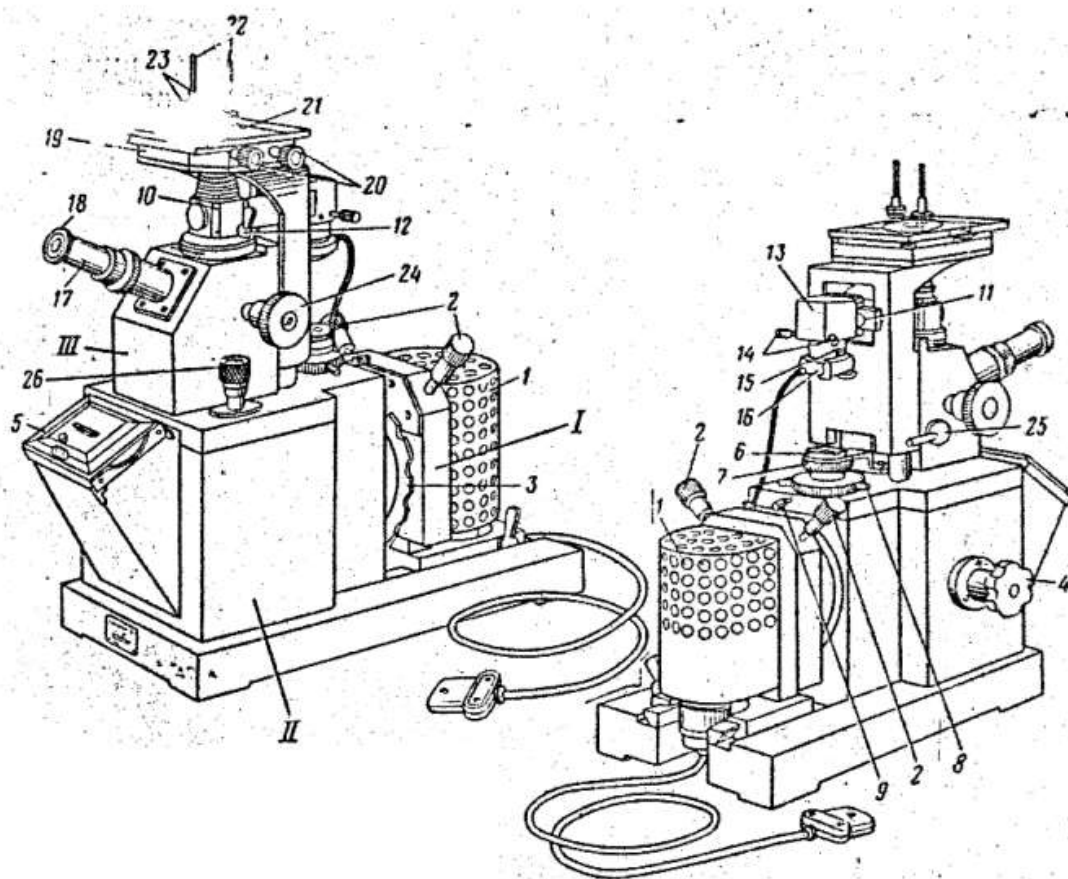


Рис. 2.1 Общий вид микроскопа МИМ – 7.

Определение величины зерна

Размер кристаллических зерен определяется на протравленном микрошлифе. Величина зерна – один из факторов, влияющих на свойство сплавов. С укрупнением зерна понижаются ударная вязкость и прочность металлов и сплавов.

Величина зерен под микроскопом определяется двумя методами: визуальной оценкой и непосредственным подсчетом числа зерен на единице площади шлифа. Размер зерна оценивается соответствующим номером при общем увеличении микроскопа $\times 100$, (ГОСТ 5630- 69).

Определение балла неметаллических включений

Неметаллические включения изучают на зеркальной непротравленной поверхности при увеличении $\times 100$. Тип неметаллических включений, их балл, площадь, занимаемая включениями, определяется по шкале ГОСТ 1778-57.

2.4 Система железо-углерод. Диаграмма состояния железо-углерод

Система железо-углерод имеет следующие фазы: жидкость, феррит, аустенит, цементит, графит.

В жидком состоянии железо и углерод имеют неограниченную растворимость в друг друга.

Феррит. Существуют две разновидности феррита – низкотемпературный α -феррит и высокотемпературный δ -феррит

Низкотемпературный α -феррит (феррит) – твердый раствор внедрения углерода в α -железо, которое имеет объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК решетка). Предельная растворимость углерода в феррите равна 0,02% при 723 ° С (точка Р на диаграмме Fe-C). При понижении температуры растворимость углерода в феррите уменьшается и при 20 ° С равна 0,01% (точка Q).

Феррит мягок (твердость по Бринелю 70-80 ед.), обладает большим относительным удлинением (до 40%). Под микроскопом феррит выглядит в виде светлых однородных зерен.

Высокотемпературный δ -феррит - твердый раствор внедрения углерода в δ -железо которое имеет ОЦК решетку. Максимальная растворимость углерода в δ -феррите равна 0,01% при 1492 ° С (Точка Н).

Аустенит – твердый раствор внедрения углерода в γ -железо которое имеет гранецентрированную кубическую решетку (ГЦК решетка). Максимальная растворимость углерода в аустените равна 2% при 1130 ° С (Точка Е). При температуре 723 ° С аустенит содержит 0,8% углерода (точка S).

Цементит – химическое соединение углерода с железом - карбид железа Fe_3C содержащий 6,67% С имеет сложную ромбоэдрическую решетку с плотной упаковкой атомов.

Цементит обладает высокой твердостью (твердость по Бринелю ≈ 800 ед.) и хрупкостью.

Цементит является метастабильной фазой, т.е. при нагревании до высокой температуры он становится нестабильным и распадается на стабильные фазы аустенит и графит.

По структуре цементит различают:

1 . Первичный Ц - кристаллизуется из жидкости при температуре, соответствующей линии СД. Под микроскопом наблюдается в виде светлых пластин

2. Вторичный Ц - образуется при выделении углерода из аустенита при понижении температуры, от 1130 до 723 0 С (линия ES). Под микроскопом в сталях с содержанием более 0,8% 0 С цементит вторичный наблюдается в виде сетки по границам зёрен

3. Третичный Ц - образуется при выделении углерода из феррита при температурах ниже 723° С. Хорошо наблюдается в сталях с содержанием 0,01...0,02% С в виде отдельных островков по границам зерен феррита (рис.4б).

Графит – углерод в свободном состоянии, является стабильной фазой.

Двухфазные составляющие

В системе железо - углерода имеются две двухфазных структурных составляющих: перлит и ледебурит.

Перлит - эвтектоидная смесь феррита и цементита пластинчатого строения с содержанием углерода 0,8%, образуется из аустенита при постоянной температуре на линии эвтектоидного превращения PSK по реакции $A_s \rightarrow \Phi_r + \text{Ц}_k$ и находится при этой температуре в равновесии с аустенином состава точки S.

Ледебурит - эвтектическая смесь образуется из жидкости при постоянной температуре на линии эвтектического превращения ECF по реакции $Ж_c \rightarrow A_E + \text{Ц}_F$, содержит 4,3% С и состоит в интервале температур от линии ECF до линии PSK из смеси аустенита и цементита, а при температуре ниже линии PSK из перлита и цементита. На линии ECF ледебурит находится в равновесии с жидкостью состава точки С. При комнатной температуре ледебурит состоит из пластин цементита, в которых расположены столбики перлита.

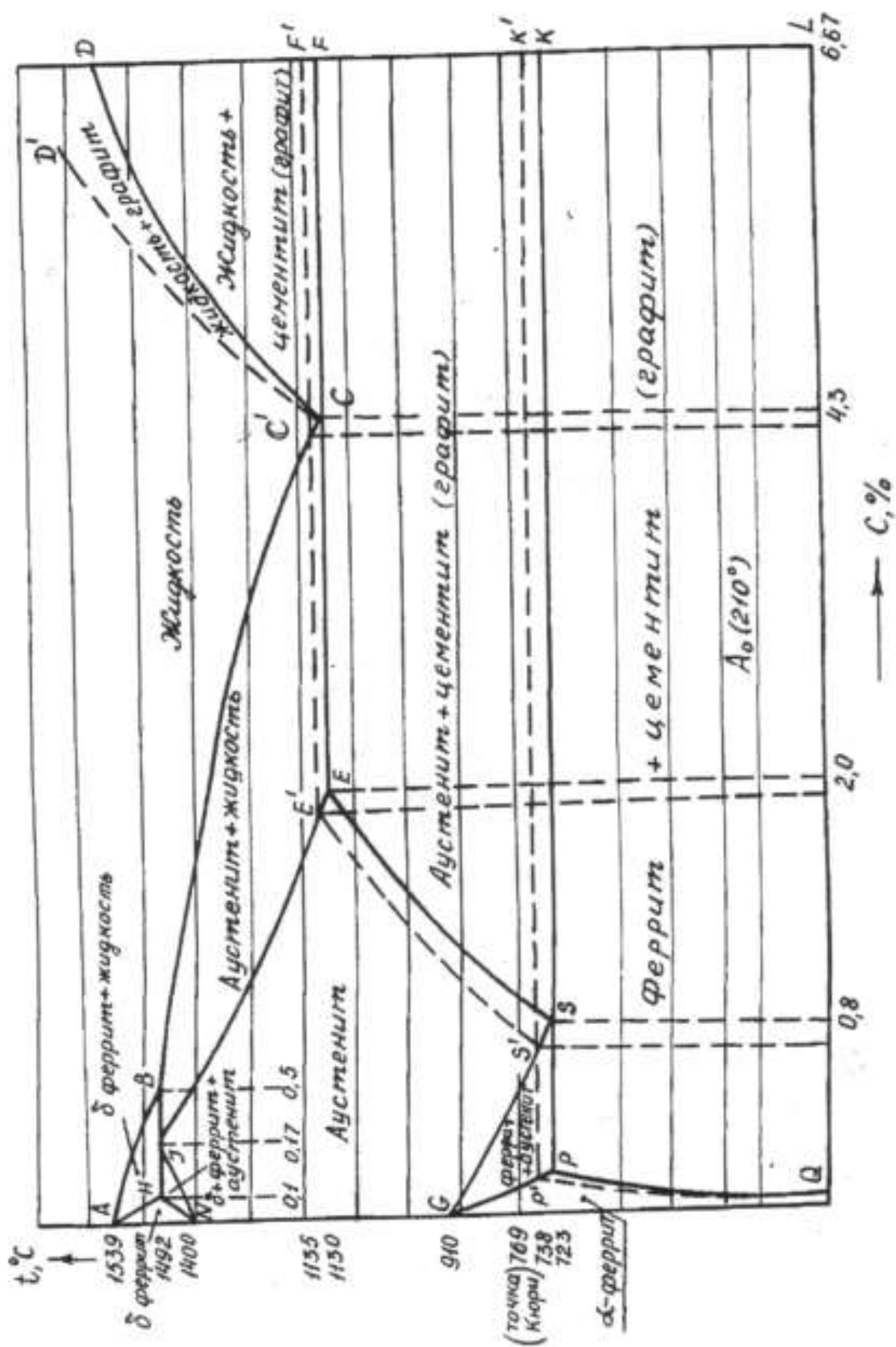


Рис. 2.2 Диаграмма состояния сплавов Fe-C.

Диаграмма железо – углерод

Диаграмма железо – углерод, изображаемая сплошными линиями, является метастабильной диаграммой железо - цементит, а диаграмма, изображаемая пунктирными линиями, является стабильной диаграммой - железо - графит.

АВСД (АВС' Д') - линия ликвидус в метастабильной (стабильной) диаграмме.

АНJЕСF (АНJЕ' С' F') - линия солидус в метастабильной (стабильной) диаграмме.

АВ и АН - линии начала и конца кристаллизации δ -феррита.

ВС (BC') и JE (JE') - линии начала и конца кристаллизации аустенита в метастабильной (стабильной) диаграмме.

HJB - линия перитектического превращения. Точка J является перитектической точкой.

ECF (E' C' F') - линия эвтектического превращения в метастабильной (стабильной) диаграмме.

NH и NJ - линии начала и конца полиморфного превращения δ - феррита в аустенит.

GS и GP – линии начала и конца полиморфного превращения аустенита в α -феррит

CD (C' Д') - линии начала кристаллизации цементита (графита) в метастабильной (стабильной) диаграмме.

C (C') - эвтектическая точка в метастабильной (стабильной) диаграмме.

ES (E' S') - линии ограниченной растворимости углерода в аустените в метастабильной (стабильной) диаграмме.

PQ (P' Q') - линия ограниченной растворимости углерода в феррите в метастабильной (стабильной) диаграмме.

2.5 Структура углеродистой стали в равновесном состоянии

Сталью называется сплав железа с углеродом и другими элементами с содержанием углерода до 2% (точка E).

Равновесным состоянием называется такое состояние, при котором все фазовые превращения, присущие сплаву, полностью завершились и сплав получил минимум свободной энергии. Равновесное состояние наступает при очень медленном охлаждении.

Структура стали зависит от содержания в ней углерода и по структуре и содержанию углерода стали подразделяется: сплавы с содержанием углерода менее 0,02% (левее точки P) называется техническим железом, сплавы с содержанием углерода до 0,8% (левее точки S) – доэвтектоидной сталью, сплавы с содержанием углерода 0,8% (точка S) – эвтектоидной сталью, сплавы с содержанием углерода более 0,8% (правее точки S) – заэвтектоидной сталью.

В результате кристаллизации стали получается одинаковая зернистая структура аустенита, не зависящая от содержания углерода. Конечная структура стали и ее свойства зависят от процессов перекристаллизации

стали, описываемых подсистемой диаграммы Fe-C, изображаемой на

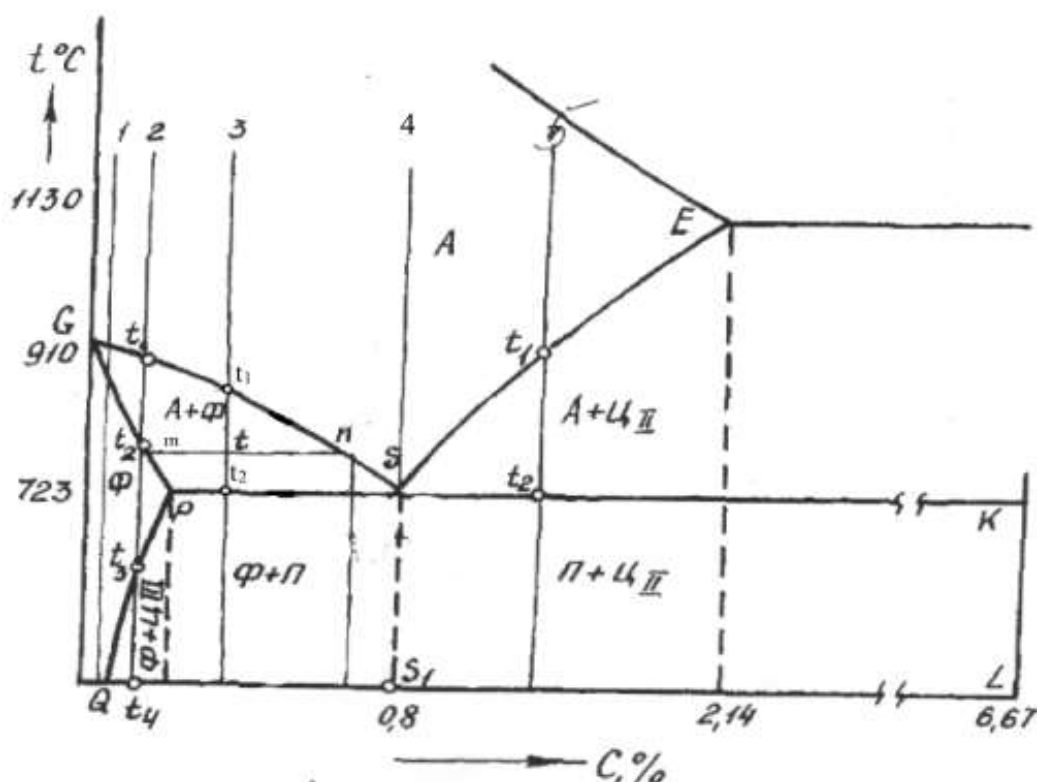


рис.2.3.

Рис. 2.3 Часть диаграммы состояния сплавов Fe-C, описывающая перекристаллизацию стали

Сплавы I и II. Ниже линии GS начинается процесс полиморфного превращения аустенита в феррит. В процессе полиморфного превращения содержание углерода в аустените изменяется по линии GS, а в феррите - по линии GP. На линии GP полиморфное превращение заканчивается, и структура сплавов I и II состоит из зерен феррита. При дальнейшем охлаждении сплава I в нем никаких структурных превращений не происходит, в сплаве II происходит физическое охлаждение сплава без структурных превращений до линии PQ. При температуре сплава ниже линии PQ феррит пересыщается углеродом и на поверхности зерен феррита образуется третичный цементит, при этом количестве образовавшегося цементита третичного будет равно

$$Q = \frac{Qt_4}{QL} \times 100\%$$

Структура сплава I изображена на рис. 1.4, а, сплава II - на рис. 2.4, б.

Сплав IV. Эвтектоидная сталь. Из диаграммы Fe-C (рис 2.3.) видно, что выше точки S сплав состоит из аустенита, а ниже точки S из феррита состава точки P и цементита состава точки K. Это значит, что в точке S при постоянной температуре происходит распад аустенита по реакции $A_s \rightarrow \Phi_p + \text{Ц}_k$. Образующаяся смесь феррита и цементита имеет пластинчатое строение и называется перлитом, а превращение аустенита в перлит называется эвтектоидным или перлитным превращением. После окончания перлитного превращения сплав будет охлаждаться далее, содержание углерода в пластинках феррита будет уменьшаться по линии PQ. При температуре 20 ° С перлит будет состоять из пластинок феррита с содержанием углерода 0,01% (точка Q) и пластинок цементита с содержанием углерода 6,67% (точка L).

Зерна перлита под микроскопом имеют темный цвет. Полученная структура перлита изображена на рис. 1.4, г

Сплав III. Доэвтектоидная сталь. Ниже линии GS начинается полиморфное превращение аустенита в феррит. При этом содержание углерода в аустените изменяется по линии GS, то есть при температуре сплава t содержание углерода в феррите и в аустените определяется соответственно точками m и n, а их количество:

$$Q_{\Phi} = \frac{tn}{mn} \cdot 100\%; \quad Q_A = \frac{mt_3}{mn} \cdot 100\%.$$

При охлаждении до линии PSK количество выделившегося феррита состава точки P

$$Q_{\Phi} = \frac{t_2 S}{PS} \cdot 100\%, \text{ а оставшийся в количестве } Q_A = \frac{Pt_2}{PS} \cdot 100\% \text{ аустенит}$$

будет иметь эвтектоидный состав точки S и на линии PSK превратится в перлит. Пренебрегая углеродом, содержащимся в зернах феррита, в виду его малости по сравнению с содержанием в зернах перлита получим, что содержание углерода в доэвтектоидной стали приближенной можно

определить по формуле $\%C = \frac{0,8 \%П}{100}$, где $\%П$ – процент перлита в структуре стали. Пример структуры доэвтектоидной стали изображен на рис. 2.4, в.

Сплав V. Заэвтектоидная сталь. Ниже линии SE предельной растворимости углерода в аустените, лишний углерод из зерен аустенита уходит на их поверхность, имеющую повышенную плотность дефектов, и образует по границам зерен аустенита сетку цементита вторичного. Содержание углерода в аустените уменьшается по линии SE, и, когда сплав охладится до линии эвтектоидного превращения PSK, зерна аустенита будут иметь эвтектоидный состав точки S и превратятся в зерна перлита. Количество выделившегося вторичного цементита $Q_{ц} = \frac{St_2}{SK} \cdot 100\%$, откуда видно, что с увеличением содержания углерода в сплаве возрастает количество образовавшегося вторичного цементита. Структура заэвтектоидной стали изображена на рис. 2.4, д.

Зависимость механических свойств стали от содержания углерода

Структура углеродистой стали после охлаждения состоит из двух фаз – феррита и цементита. Количество цементита в структуре стали, например в сплаве V (рис 2.3), определяется соотношением $Q_{ц} = \frac{Qt_2}{QL} \cdot 100\%$.

Из этого соотношения видно, что с увеличением содержания углерода в стали будет возрастать количество цементита в структуре стали.

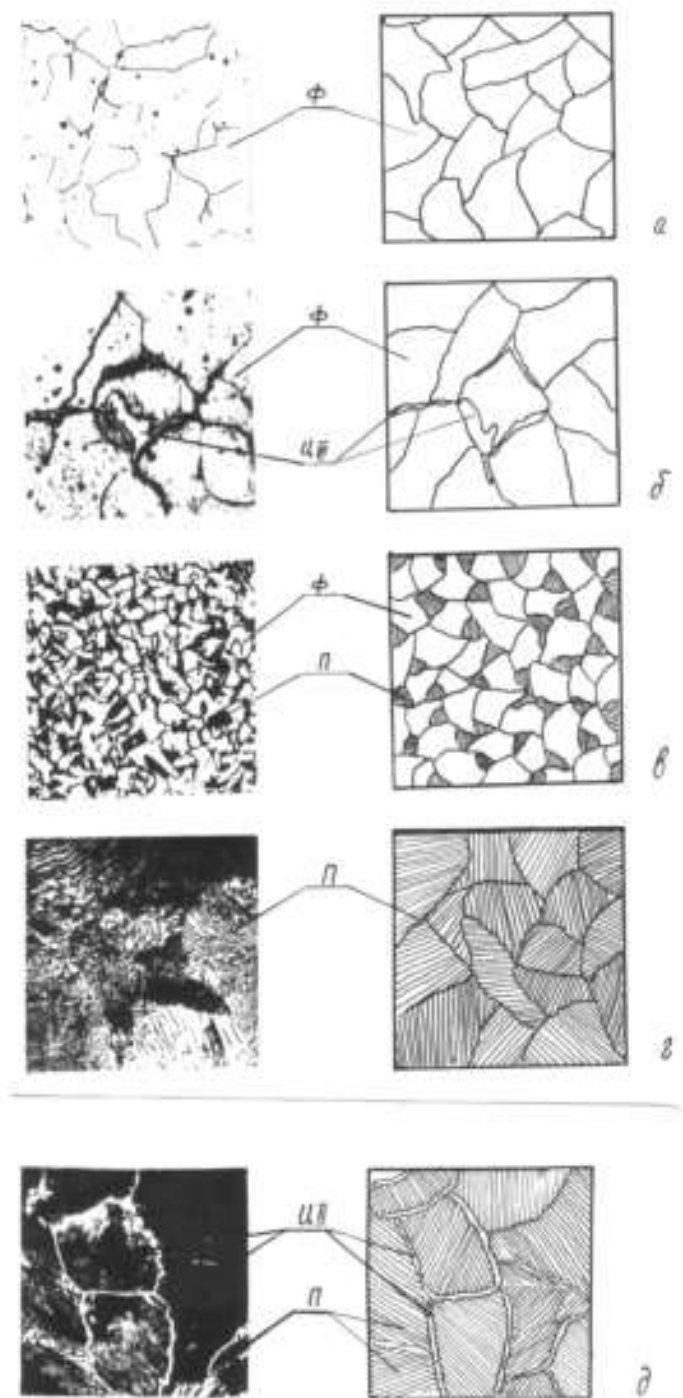


Рис. 2.4 Структура железоуглеродистых сплавов в равновесном состоянии: а, б, в) доэвтектоидные сплавы; г) эвтектоидный сплав; д) заэвтектоидный сплав

Твердость цементита на порядок выше твердости феррита и значит с увеличением содержания углерода возрастает твердость стали. Частицы цементита в стали препятствуют движению дислокаций и, следовательно, повышают прочность тем сильнее, чем больше цементита находится в структуре стали. При содержании углерода в стали более 0,9 – 1 % прочность стали уменьшается, как видно из рис. 2.5.

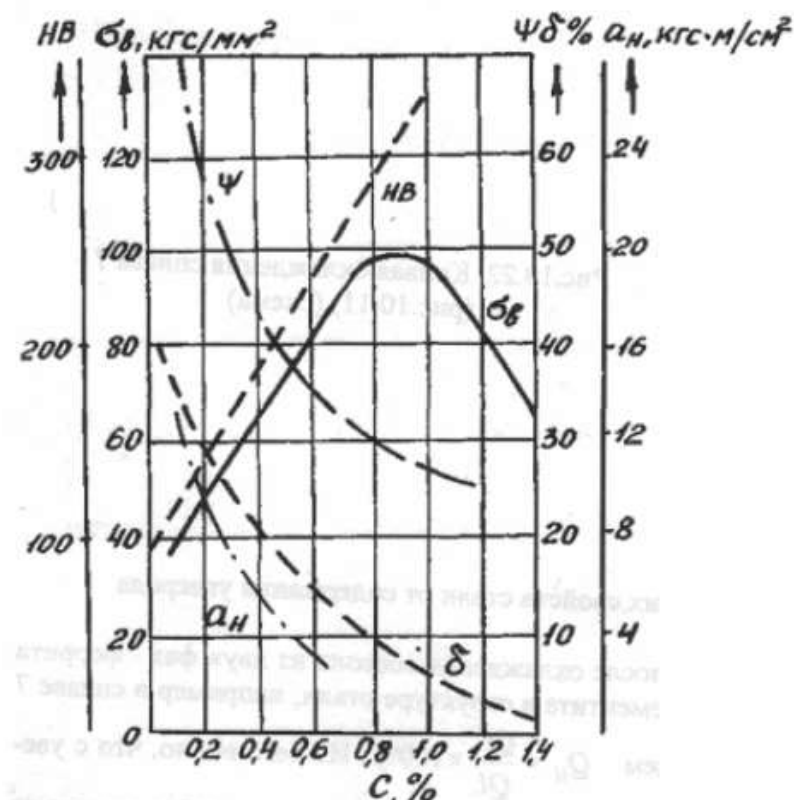


Рис.2.5 Зависимость механических свойств стали от содержания углерода

2.6 Порядок выполнения работы

1. Изучить учебное пособие.
2. Ознакомиться с устройством микроскопа и установить увеличение x80 или x130
3. Определить величину зерна в образце I методом визуального сравнения (ГОСТ 5630-65) и зарисовать его в квадратах 25x25 мм.
4. Определить тип неметаллических включений на образце 4 (альбом, ГОСТ 1778-57, с.47-49) и зарисовать.

5. Вычертить диаграмму состояния железо-углерод на развернутом листе бумаги.
6. Зарисовать условно структуру доэвтектоидных сплавов с различным количеством углерода (3 шт.), эвтектоидного и заэвтектоидного сплавов.
7. Определить количество углерода в образцах доэвтектоидной стали (альбом, ГОСТ 1050-74, с. 17).
8. Установить взаимосвязь между углеродом и свойствами сплавов, построить графики по данным табл. 1 (справочные материалы).
9. Выполнить индивидуальное задание.

2.7 Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Диаграмма железо-углерод.
3. Схематическая зарисовка изучаемых структур.
4. Графики зависимости прочности, твердости, пластичности от количества углерода.
5. Выполнение индивидуального задания. Образец выполнения приведен в приложении.

2.8 Контрольные вопросы

1. Что изучается с помощью микроанализа?
2. Как определяется увеличение микроскопа МИМ-7.
3. Перечислить основные операции при подготовке микрошлифа.
4. Для чего используются протравленные и непротравленные шлифы?
5. Что понимается под равновесным состоянием сплава?
6. Перечислить и дать характеристику твердых растворов системы железо-углерод.
7. Дать характеристику эвтектоидной и эвтектической смесей в системе железо-углерод.
8. Что такое перлит и ледебурит? При каких условиях они образуются?

9. Какие фазы наблюдаются при температуре, соответствующей линиям PSK, ECF, PQ, ES?
10. Сколько углерода содержит каждая из фаз, присутствующая при температуре 723 ° C (линии PSK) и 1130 ° C (линия ECF)?
11. Применить правило отрезков в двухфазных областях диаграммы железо-углерод и построить кривую охлаждения для одного сплава.
12. Применить правило фаз Гиббса в критических точках диаграммы железо-углерод.
13. Зарисовать структуру стали 40, У10, У8 и технически чистого железа.
14. Как определить марку доэвтектоидной стали по структуре?
15. Как зависит твердость, прочность и пластичность стали от содержания углерода?

Лабораторная работа №3. Диаграмма состояния железо- углерод. Структура, свойства и применение чугунов

3.1 Цель работы

1. Изучить превращения в области чугунов диаграммы железо-углерод.
2. Приобрести навыки изучения микроструктур белых и серых чугунов.
3. Изучить зависимость свойств чугунов от их структуры.

3.2 Приборы, материалы, учебные пособия

1. Металлографический микроскоп.
2. Набор микрошлифов.
3. Альбом микроструктур, справочные материалы.

3.3 Структура, свойства и применение чугунов

Чугуны – сплавы железа с углеродом и с другими элементами с содержанием углерода более 2%.

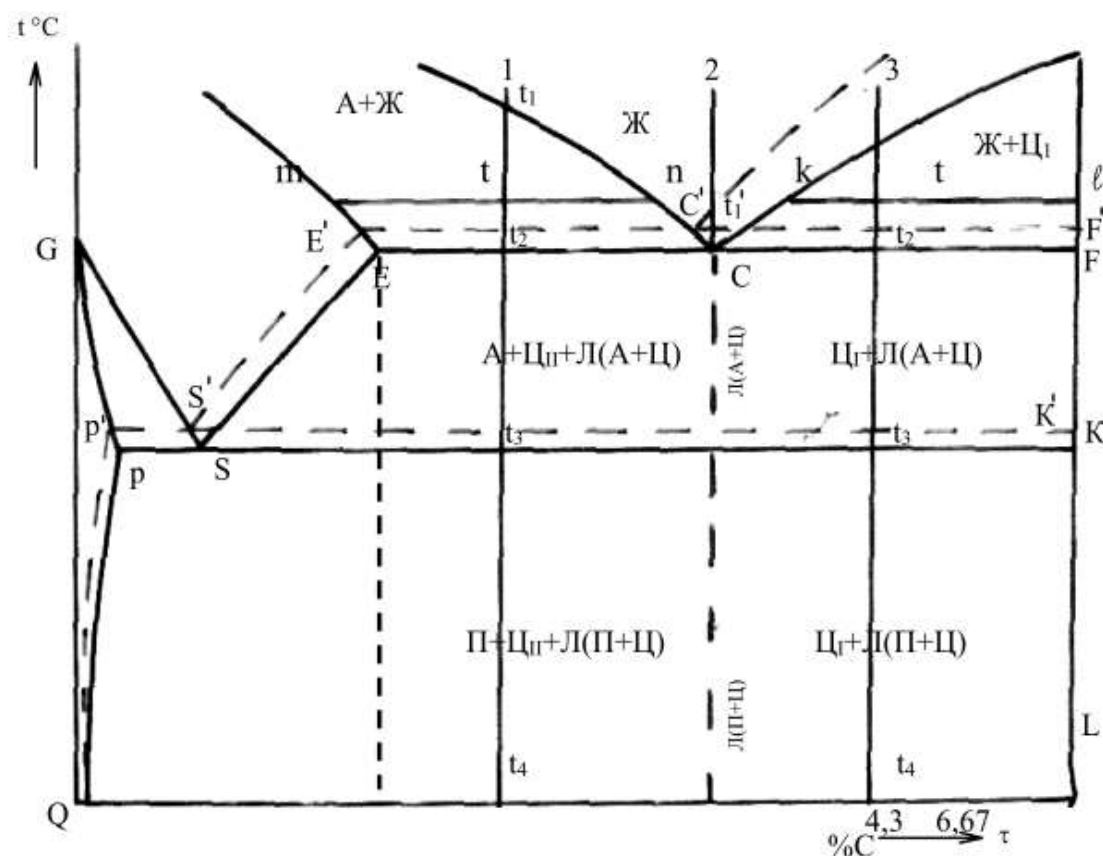


Рис.3.1 Часть диаграммы железо-углерод, отображающая структуры чугунов. Сплошные линии – метастабильная диаграмма, пунктирные – стабильная.

Процессы кристаллизации и структурообразования в чугунах отражает подсистема диаграммы железо-углерод, которая изображена на рис. 3.1.

Белые чугуны

Белые чугуны образуются при быстром охлаждении и их структура описывается метастабильной диаграммой.

Структура белых чугунов зависит от содержания углерода и они классифицируются по структуре и содержанию углерода следующим образом: чугуны с содержанием углерода до 4,3% (левее точки С) называются доэвтектическими, с содержанием углерода 4,3% (точка С) – эвтектическими, с содержанием углерода более 4,3% (правее точки С) – заэвтектическими.

Эвтектический белый чугун. Сплав 2.

В точке С при постоянной температуре 1130 ° С происходит кристаллизация жидкости по реакции $Jc \rightarrow A E + \text{Ц} F$. Образующаяся смесь аустенита и цементита называется ледебуритом и представляет собою пластины цементита со столбиками аустенита в них. После окончания кристаллизации сплав будет охлаждаться далее. Содержание углерода в столбиках аустенита при охлаждении будет уменьшаться по линии SE. На линии PSK аустенит будет содержать 0,8% (т.С) и распадается на перлит.

Ниже линии PSK ледебурит будет состоять из пластин цементита и столбиков перлита в них. Пример структуры ледебурита изображен на рис. 3.2.

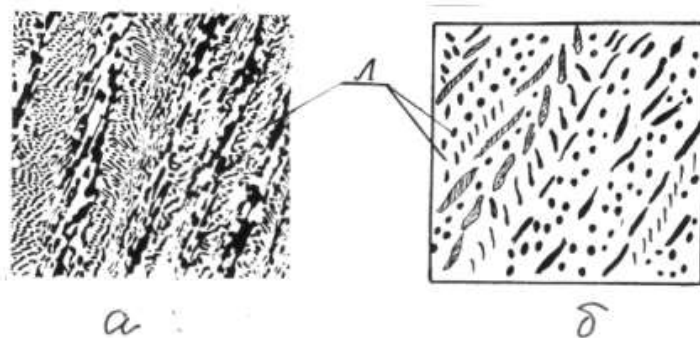


Рис.3.2 Микроструктура ледебурита (а) и ее схематическое изображение (б)

Дозвтектический белый чугун (сплав 1).

Чуть ниже линии АС (рис.3.2) в жидкости возникают и растут зародыши аустенита. При произвольной температуре t состав аустенита определяется проекцией точки m , а жидкости – точки n на ось концентраций, то есть состав аустенита в процессе кристаллизации изменяется по линии солидус АЕ, а состав жидкости – по линии ликвидус АС. Количество аустенита и жидкости при температуре t определяется, как

$$Q = \frac{tn}{mn} \cdot 100\% \text{ и } Q = \frac{mt}{mn} \cdot 100\%.$$

На линии ЕСF происходит кристаллизация ледебурита также как в сплаве 2. После окончания кристаллизации ледебурита сплав 1 состоит из зерен аустенита состава точки Е и ледебурита. При дальнейшем охлаждении сплава содержание углерода в зернах аустенита уменьшается по линии SE и углерод, выходящий на поверхность его зерен образует слой вторичного цементита. На линии PSK в аустените останется 0,8% С и аустенит распадется на перлит. Превращения в ледебурите при охлаждении сплава 1 полностью совпадают с превращениями в сплаве 2. После окончания перлитного превращения сплав 2 охлаждается до комнатной температуры и структура доэвтектического сплава 1 состоит из перлита +цементита вторичного +ледебурита и имеет вид, изображенный на рис.3.3.

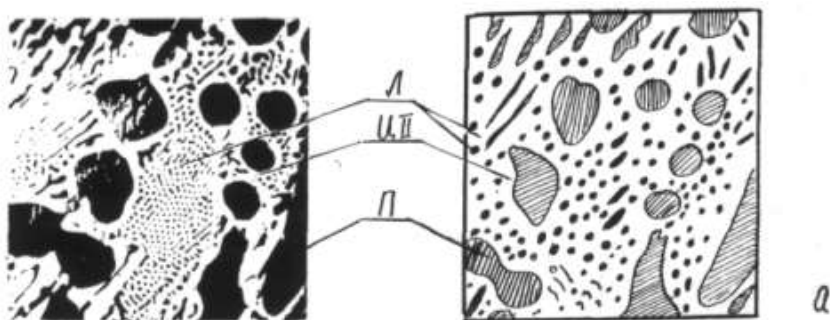


Рис.3.3 Микроструктура белого доэвтектического чугуна и ее схематическое изображение

Заэвтектический белый чугун. Сплав 3.

Ниже линии СД (рис.2.1) в сплаве будет происходить кристаллизация цементита первичного в виде пластин. При произвольной температуре t

состав жидкости определяется проекцией точки k на ось концентрации, то есть состав жидкости изменяется по линии ликвидус СД.

Количество жидкости и цементита первичного при температуре $Q_{ж} = \frac{tl}{kl} \cdot 100\%$ и $Q = \frac{kt}{kl} \cdot 100\%$.

На линии ЕСF происходит кристаллизация ледебурита как и в эвтектическом сплаве 2. Все дальнейшие превращения в ледебурите будут аналогичны превращениям в эвтектическом сплаве 2 и конечная структура заэвтектического сплава 3 состоит из цементита первичного и ледебурита и изображена на рис.3.4.

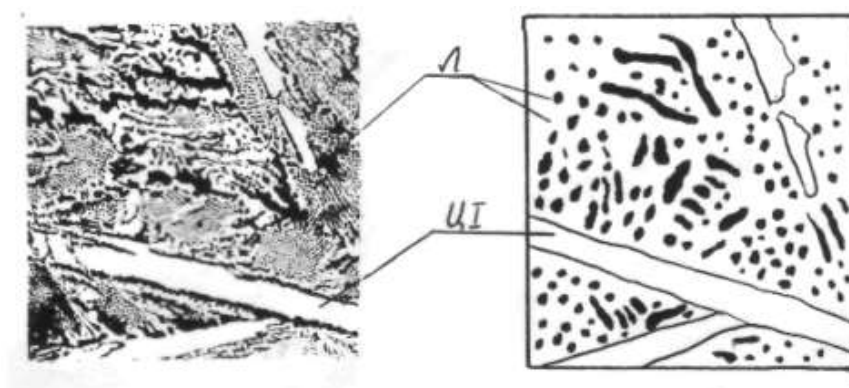


Рис.3.4 Микроструктура белого заэвтектического чугуна и ее схематическое изображение

Применение белых чугунов

В своей структуре белые чугуны содержат большое количество цементита, обладающего высокой твердостью, прочностью, хрупкостью и имеющего белый цвет, чем и обусловлен цвет и название белых чугунов. Так, например, в сплаве 3 при комнатной температуре количество цементита в структуре равно $Q_{ц} = \frac{Q_{t_3}}{Q_L} \cdot 100\%$. Из-за большого количества цементита в своей структуре белые чугуны обладают высокой твердостью, износостойкостью, хрупкостью и поддаются обработке резанием только сверхтвердыми сплавами. Белые чугуны применяют в основном в виде слоя отбеленного чугуна на поверхности изделия, внутри которых

кристаллизуется серый чугун вследствие замедления охлаждения, например, прокатные валки.

Такие изделия имеют твердую износостойкую поверхность и более пластичную, вязкую сердцевину.

Белый доэвтектический чугун также используется в виде заготовок среднего литья, отжигаемых впоследствии на ковкий чугун.

Серые чугуны

В серых чугунах часть углерода находится в свободном состоянии в виде стабильной фазы-графита и поэтому в серых чугунах кристаллизация и структурообразование происходят при медленном охлаждении по стабильной диаграмме железо-углерод. (рис. 3.5).

Ниже линии AC' в жидкости происходит кристаллизация аустенита, причем содержание углерода в жидкости изменяется по линии AC' , а в аустените - по линии AE' . И когда сплав 1 охладится до линии $E'C'F'$ оставшаяся жидкость будет иметь состав C' .

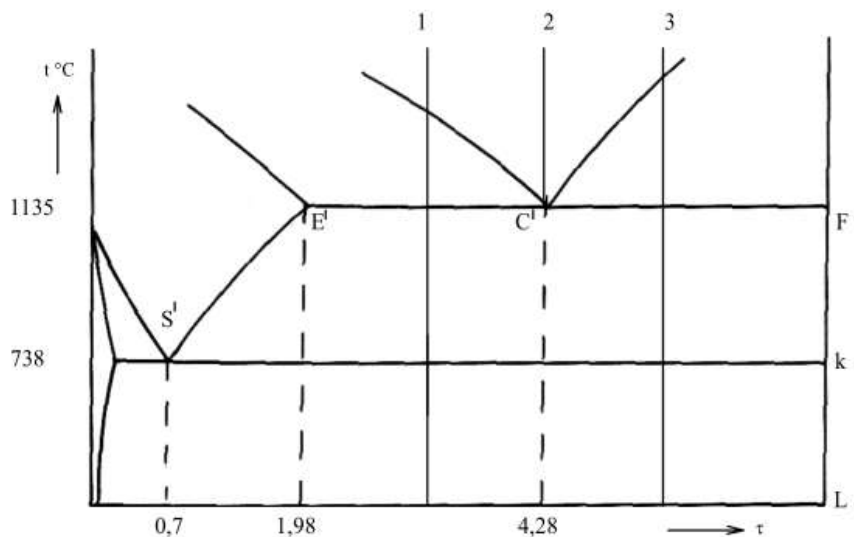


Рис 3.5 Часть стабильной диаграммы сплавов Fe – C, отражающая процессы кристаллизации и структурообразования в серых чугунах.

В сплаве 3 при медленном охлаждении ниже линии $C'D'$ в жидкости будет происходить кристаллизация графита в виде столбиков. Из-за

различной плотности графита и жидкости столбики графита будут всплывать в верхнюю часть отливки и поэтому в структуре не наблюдается. Содержание углерода в жидкости будет изменяться по линии $C'D'$ и когда сплав 3 охладится до линии $E'S'F'$ жидкость будет иметь состав точки C' .

Таким образом, независимо от содержания углерода, жидкость на линии $E'S'F'$ будет иметь состав точки C' .

При медленном охлаждении, немного ниже линии $E'S'F'$ при постоянной температуре в жидкости происходит совместная кристаллизация аустенита и графита по реакции $\xrightarrow{Ж_{C'}} A_{E'} + Г$.

Графитовые включения кристаллизуются в виде розеток с тремя, четырьмя искривленными лепестками.

После окончания процесса кристаллизации $A_{E'}$ и $Г$ сплав будет охлаждаться далее, растворимость углерода в аустените уменьшается по линии $E'S'$, лишний углерод уходит из аустенита на ранее образовавшиеся графитные включения, наслаиваясь на них и увеличивая их размеры. При охлаждении сплава до линии $P'S'K'$ содержание углерода уменьшится до 0,7% (т. S')

При очень малой скорости охлаждения или даже выдержки в интервале температур 738...723 °С произойдет полное превращение аустенита в феррит и получится ферритная металлическая основа с графитными включениями, то есть структура феррит+графит (рис. 2.6а) – серый чугун на ферритной основе, имеющий низкие механические свойства – малую выносливость и хрупкость.

При большей, промежуточной, скорости охлаждения часть аустенита, находящегося около графитных включений при охлаждении в интервале температур между линиями $P'S'K'$ и PSK , превратится в феррит, а оставшаяся часть аустенита, находящаяся дальше от графитовых включений, переохладится ниже линии PSK и распадется на перлит.

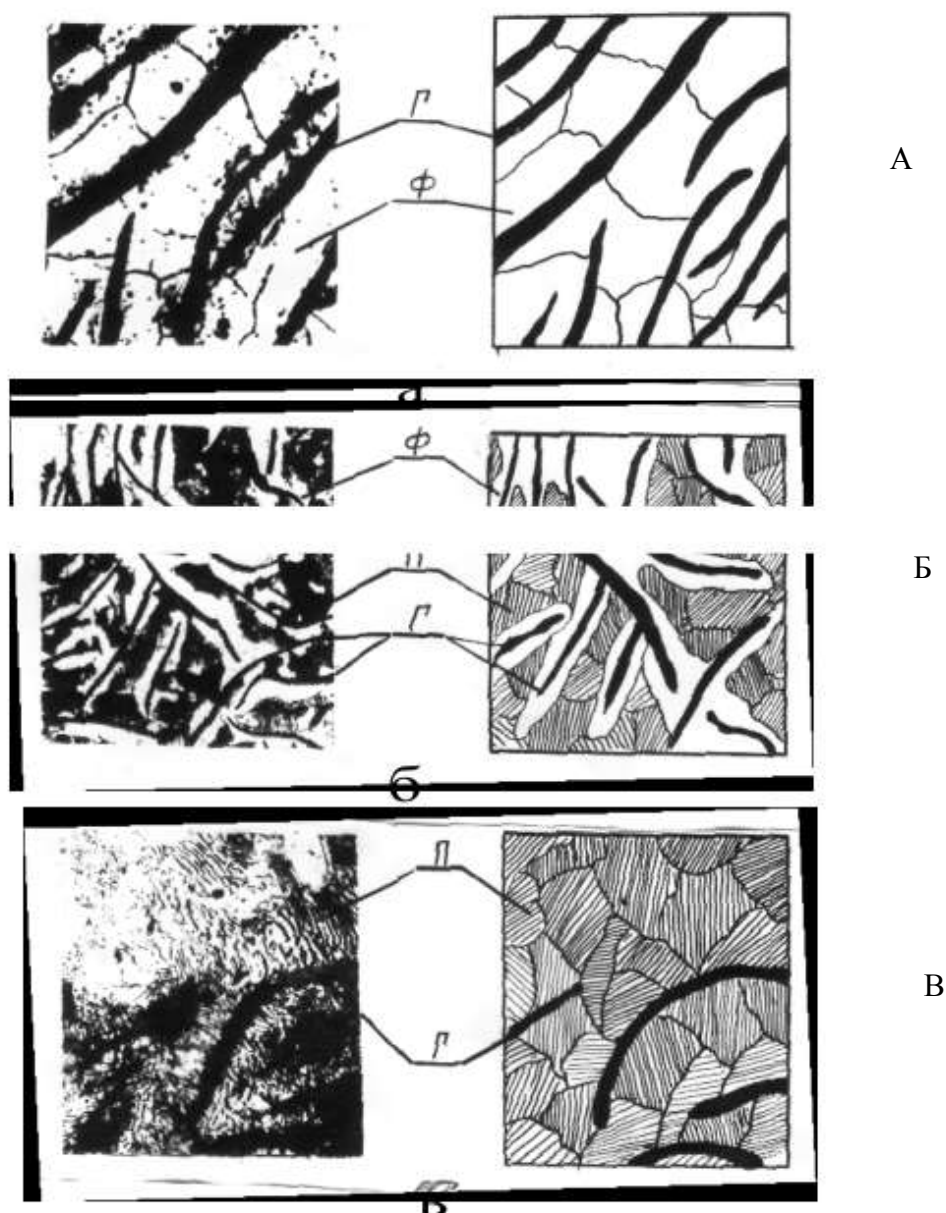


Рис.3.6. Микроструктура серого чугуна с крупнопластинчатым графитом и ее условная зарисовка: а – на ферритной основе, б – на феррито-перлитной основе, в – на перлитной основе.

Получится серый чугун на феррито-перлитной основе с графитовыми включениями (рис.3.6б), имеющий небольшие, но более высокие, чем предыдущий сплав, механические свойства.

При большой скорости охлаждения превращение аустенита в феррит в интервале температур между линиями $P' S' K'$ и PSK произойти не успеет, аустенит переохладится ниже линии PSK , распадется на перлит и получится перлитная металлическая основа с графитными включениями, то есть структура перлит+графит (рис.3.6в). Это наилучший вид литейного серого чугуна, который может быть использован также как антифрикционный сплав

для подшипников скольжения. Таким образом, при кристаллизации и структурообразовании серых чугунов независимо от содержания углерода в сером чугуне получаются структуры, изображенные на рис. 3.6, из анализа которых можно сделать вывод о том, что металлическая основа серых чугунов похожа на структуру технического железа, доэвтектоидной и эвтектоидной стали и, следовательно, серые чугуны можно рассматривать, как стали с графитными включениями.

Серые чугуны классифицируются по типу металлической основы: на ферритные, феррито- перлитные, перлитные и по форме графитовых включений: серые чугуны с крупнопластинчатым графитом, серые чугуны с мелкопластинчатым графитом, высокопрочные чугуны с шаровидным графитом и ковкие чугуны с хлопьевидным графитом.

Влияние примесей на кристаллизацию и структурообразование чугунов

Кремний обязательно присутствует в чугунах и оказывает большое влияние на структуру и свойства чугунов. Кремний приводит к уменьшению растворимости углерода в аустените и смещению точек E' и C' на диаграмме влево тем сильнее, чем больше его содержание.

Смещение эвтектической точки C' влево при наличии кремния приводит к тому, что доэвтектический чугун становится заэвтектическим и при охлаждении жидкости в нем начнется кристаллизация не аустенита, а графита. Если проводить модифицирование серого чугуна мелко раздробленным ферросилицием, его частицы, растворяясь локально обогащают расплав кремнием. Это приводит к появлению большого числа более мелких графитных включений в структуре чугуна, то есть получается его структура с мелкопластинчатым графитом. Такой чугун обладает прочностью в 1,5...2 раза выше прочности чугуна с крупнопластинчатым графитом. Обычно содержание кремния в чугунах колеблется в пределах 1,2...3,5%. Серые чугуны с крупнопластинчатым графитом и с мелкопластинчатым графитом называют собственно серыми и маркируют буквами СЧ, затем следует число, которое показывает среднее значение

временного сопротивления σ в при растяжении (кгс/мм²). Например СЧ18 – серый чугун $\sigma_{в} = 18$ кгс/мм².

Высокопрочный чугун.

Для повышения прочности чугуна в него вводят небольшие добавки щелочных или щелочноземельных металлов, чаще всего магния, при концентрации 0,03...0,07%. Пары магния, обрабатывая расплав, способствуют кристаллизации графита в виде шариков, и получается чугун с шаровидным графитом. Шаровидные графитные включения имеют минимальную поверхность раздела с металлической матрицей и не являются такими сильными концентраторами напряжений, как графитные включения в виде крупных и мелких пластин.

Это обстоятельство, а так же то, что магний, растворяясь в зернах и на их границах, изменяет металл как легирующий элемент, приводит к повышению прочности чугуна, благодаря чему он и получил свое название высокопрочный чугун (рис. 3.7).

Высокопрочные чугуны маркируют буквами ВЧ, затем следуют числа. Первые числа показывают среднее значение временного сопротивления σ в при растяжении (кгс/мм²), второе – относительное удлинение δ (%), например, ВЧ 100-4 – высокопрочный чугун, $\sigma_{в} = 100$ кгс/мм², $\delta = 4\%$.

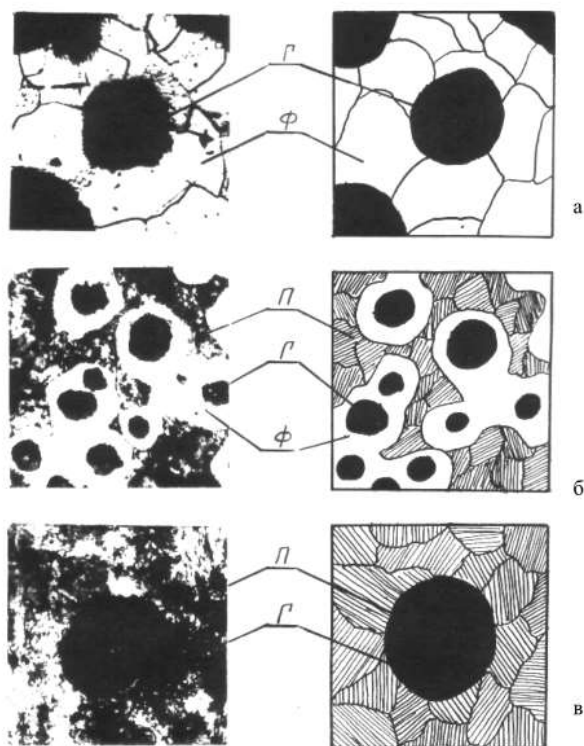


Рис.3.7 Микроструктура высокопрочного чугуна с шаровидным графитом и ее условная зарисовка. а – на ферритной основе, б – на феррито-перлитной основе, в – на перлитной основе.

Ковкий чугун

Ковкий чугун получают из белого доэвтектического чугуна с содержанием углерода 2,5...3% и кремния 0,8...1,6% путем длительного (около 100 часов) графитизирующего отжига при температуре около 900-1000 °

Цементит является метастабильной фазой и при высокой температуре, в процессе выдержки, распадается на стабильные фазы аустенит и графит, который выделяется в виде комков и под микроскопом имеет хлопьевидную форму, т.е. получается ковкий чугун с хлопьевидным графитом (рис.3.8).

По прочности ковкие чугуны занимают промежуточное положение между чугунами с мелкопластинчатым графитом и высокопрочными чугунами.

Структура ковкого чугуна и его схематическое изображение приведена на рис. 3.8

Ковкий чугун маркируют буквами КЧ, затем следуют числа. Первое число показывает среднее значение временного сопротивление σ в при

растяжении (кгс/мм^2), второе – относительное удлинение δ (%), например, КЧ 50-4 – ковкий чугун, $\sigma_{\text{в}} = 50 \text{ кгс/мм}^2$, $\delta = 4\%$.

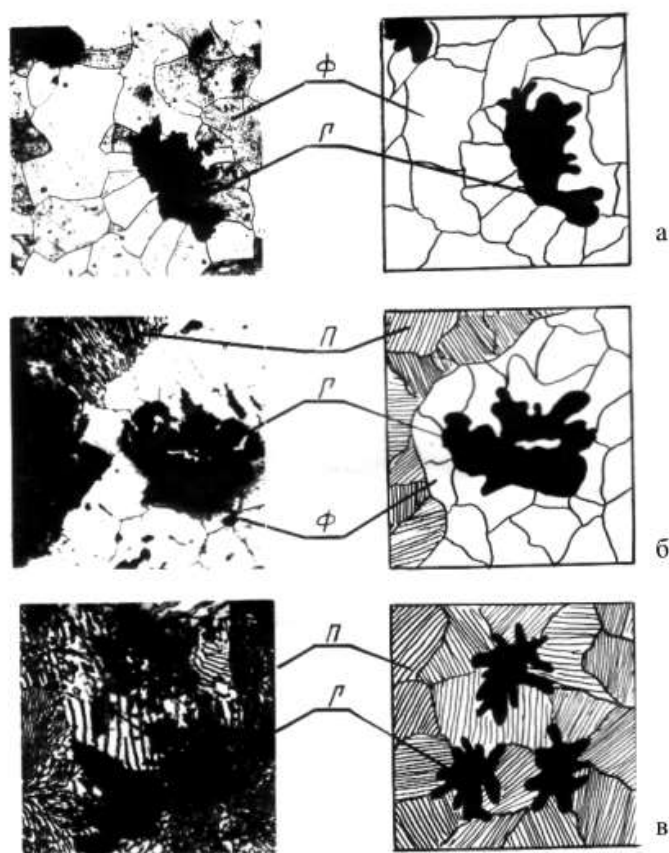


Рис.3.8. Микроструктура ковкого чугуна с хлопьевидным графитом и ее условная зарисовка. а – на ферритной основе, б – на феррито-перлитной основе, в – на перлитной основе.

Применение серых чугунов

Наличие графитных включений ослабляет металлическую основу серых чугунов и снижает их прочность, как из-за уменьшения работающего сечения металлической основы, так и из-за того, что края графитных включений являются концентраторами напряжений, способствуя разрушению чугуна. Сопротивление при растяжении, изгибе и кручении в основном определяется формой, размером и количеством графитных включений.

При сжатии серых чугунов форма, количество и размеры графитных включений практически не оказывает влияния на предел прочности, который оказывается близким к пределу прочности стали и зависит главным образом от типа металлической основы. Прочность серых чугунов при сжатии в 3-5

раз больше, чем при растяжении. Поэтому серые чугуны рекомендуется использовать для изделий, работающих в основном на сжатие. Графитные включения, нарушающие сплошность металлической основы, делают чугуны малочувствительными к различным внешним концентраторам напряжений (дефекты поверхности, надрезы, выточки и т.д.), то есть делают детали из серых чугунов неподверженными усталостным разрушениям.

Графитные включения улучшают обрабатываемость чугунов резанием.

При работе чугуна в парах трения чугун, изнашиваясь, создает полости, заполняемые смазочным маслом, что повышает антифрикционные свойства чугуна.

Графитные включения в серых чугунах увеличивают демпфирующую способность изделий из них, то есть их внутреннее трение, или, иначе говоря, способность чугунов рассеивать подводимую к нему энергию механических колебаний, что снижает шумы при работе машины с такими деталями.

Высокопрочный чугун широко используют в автостроении и дизелестроении для коленчатых валов, крышек цилиндров и других деталей, в тяжелом машиностроении – для деталей прокатных станов, в кузнечно-прессовом оборудовании, в химической и нефтяной промышленности. Ковкий чугун применяется для изготовления деталей, работающих при ударных и вибрационных нагрузках.

3.4. Порядок выполнения работы

1. Изучить под микроскопом при увеличении $\times 500$ имеющийся набор микрошлифов.
2. Зарисовать схематично микроструктуру.
3. Дать характеристику чугуна по следующей схеме: класс чугуна; подкласс, форма графита (для серых чугунов) или процент углерода (для белых); способ получения; характеристика металлической основы.
4. Выполнить индивидуальное задание по 2-3 фотографиям микроструктуры чугунов.

3.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Метастабильная и стабильная (отдельно) диаграммы с указанием на них структурных составляющих.
3. Схематические зарисовки изученных структур чугунов по микрошлифам и индивидуальному заданию с полной характеристикой сплава (п. 3) и указанием структурных составляющих и их наименований.
4. Графики кривых охлаждения двух сплавов (по заданию преподавателя) с описанием процессов, происходящих в каждой критической точке и между ними. Эвтектическая и эвтектоидная реакции.

3.6. Контрольные вопросы

1. Чем отличается чугун от стали?
2. Чем отличаются белые и серые чугуны и как они получаются?
3. Как классифицируются белые чугуны?
4. Что такое ледебурит и как изменяются его структурные составляющие в зависимости от температуры?
5. Назовите структуры доэвтектического, эвтектического и заэвтектического белого чугуна.
6. Назовите области применения белых чугунов.
7. Как классифицируются серые чугуны?
8. Как получить чугуны с мелкопластинчатым графитом, высокопрочные и ковкие чугуны?
9. Как влияет форма графитовых включений на свойства чугунов?
10. От каких факторов зависит тип металлической основы серых чугунов?
11. Каково соотношение прочности серых чугунов при растяжении, изгибе и сжатии?
12. Назовите области применения серых чугунов.

Лабораторная работа №4. Закалка углеродистых сталей

4.1. Цель работы

1. Освоить методику выбора режимов и технологии проведения закалки углеродистых сталей различного состава.
2. Изучить диаграмму изотермического превращения аустенита.
3. Изучить структуру закаленной стали и объяснить ее получение по диаграммам железо-углерод и изотермического превращения.
4. Изучить влияние количества углерода и скорости охлаждения на твердость закаленной стали.

4.2. Приборы, материалы, учебные пособия

1. Муфельная печь.
2. Закалочный бак с водой.
3. Закалочный бак с маслом.
4. Твердомер Роквелла.
5. Образцы углеродистой стали:
 - Сталь 20 – 1 шт.
 - Сталь 45 – 2 шт.
 - Сталь У10 – 1 шт.
6. Набор инструмента и вспомогательных материалов.
7. Альбом микроструктур, справочные материалы.
8. Комплект шлифов закаленных сталей.
9. Металлографический микроскоп.

4.3. Краткие теоретические сведения

Закалка стали - это термическая обработка стали, которая применяется для получения максимально возможной твердости и прочности стали.

В зависимости от температуры нагрева закалку называют полной и неполной. При полной закалке происходит полное фазовое превращение т.е. сталь при нагреве переводят в однофазное аустенитное состояние. Полной закалкой подвергают доэвтектоидные стали, нагревая их выше критической температуры $G_S (A_{с3})$ на $30-50^{\circ}C$ (рис.4.1) При неполной закалке

происходит неполная фазовая перекристаллизация, т.е. сталь нагревают до межкритических температур - между PSK (A_{c1}) и GS (A_{c3}) или между PSK (A_{c1}) и SE (A_{cm}). Заэвтектоидные стали подвергают неполной закалке, нагревая их выше линии PSK (A_{c1}) на 30-50° C (рис.4.1).

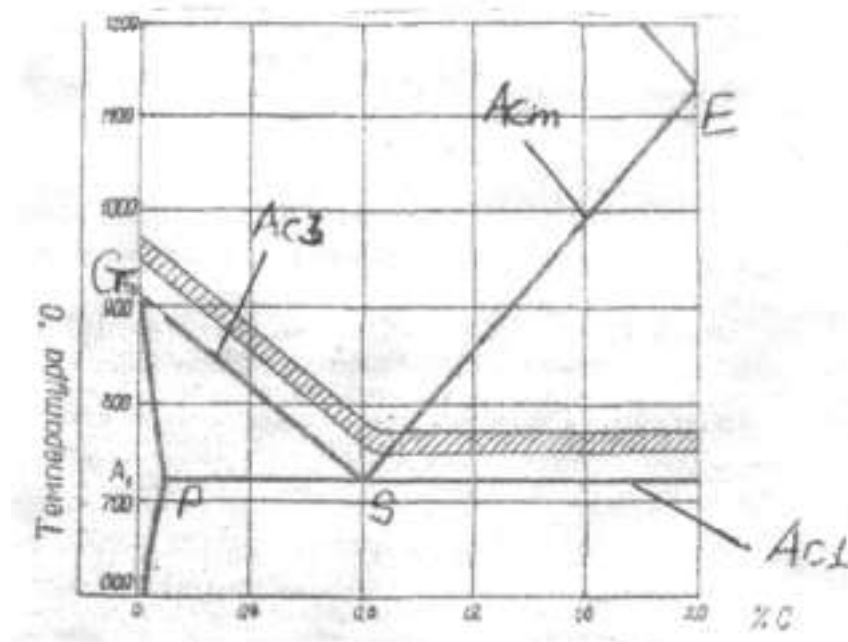


Рис. 4.1. Левая часть диаграммы железо-углерод. Оптимальный интервал температур для нагрева стали под закалку.

Время нагрева и выдержки детали в печи при закалке зависит от температуры нагрева, формы и размеров детали. (табл.4.1).

Таблица 4.1

Температура нагрева, С°	Круг	Квадрат	Пластина
	Продолжительность нагрева, мин.		
	На 1 мм диаметра, на 1 мм толщины		
600	2	3	4
700	1,5	2,2	3
800	1	1,5	2
900	0,8	1,2	1,6
1000	0,4	0,6	0,8

Охлаждение стали при закалке производят с большой скоростью (несколько сотен градусов в секунду). При такой высокой скорости охлаждения диффузия углерода в кристаллической решетке железа произойти не успеет, а кристаллическая решетка γ - железа, путем сдвига атомов железа друг относительно друга на расстоянии меньше межатомных, перестраивается в α - железо. Так как диффузия атомов углерода и железа отсутствует, т.е. процесса является бездиффузионным, то содержание углерода в решетке α -железа будет равно содержанию углерода в решетке γ - железа аустенита в результате чего решетка α -железа оказывается пересыщенной углеродом, деформируется и становится тетрагональной (рис.4.2).

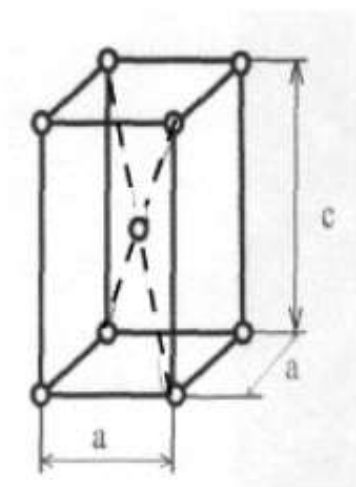


Рис. 4.2 Схема тетрагональной решетки мартенсита.

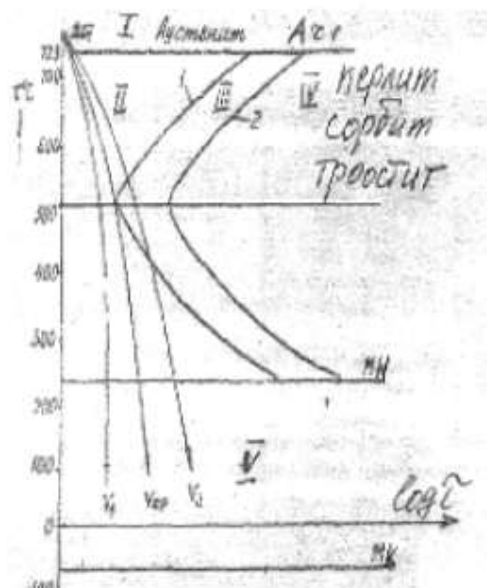


Рис. 4.3 Диаграмма изотермического превращения аустенита стали У8 (t - время)

Эта новая фаза с тетрагональной кристаллической решеткой железа называется мартенситом.

Мартенсит - это пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -железо. Мартенсит имеет высокую твердость, в основном, из-за пересыщения решетки α -железа углеродом и его твердость возрастает с увеличением содержания углерода. Так как целью закалки является

получение максимально возможной твердости и прочности стали, то охлаждение стали при закалке необходимо проводить с такой скоростью, чтобы получить мартенситную структуру.

Скорость охлаждения зависит, в основном, от содержания в стали легирующих элементов и определяется диаграммой изотермического превращения аустенита (рис.4.3).

Диаграмма изотермического превращения стали У8 состоит из следующих областей.

I - область устойчивого аустенита.

II - область неустойчивого переохлажденного аустенита.

III - область распада аустенита на феррито-цементитную смесь.

IV - область продуктов распада аустенита на феррито-цементитную смесь.

V - область бездиффузионного превращения аустенита в мартенсит.

Две С-образные кривые 1 и 2 на диаграмме указывают, соответственно, время начала и конца распада аустенита на феррито-цементитную смесь.

Две горизонтальные линии М_н и М_к на диаграмме указывают, соответственно, температуру начала и конца бездиффузионного превращения аустенита в мартенсит.

Наименьшей устойчивостью переохлаждаемый аустенит обладает при ~ 550 ° С.

Превращения в интервале температур А_{г1} - 550 ° С называют перлитным, а в интервале 550 ° С - М_н промежуточным или бейнитным.

В области перлитного превращения аустенит, в зависимости от степени переохлаждения превращается в феррито-цементитную смесь пластинчатого строения различной степени дисперсности, под которой понимается суммарная толщина расположенных рядом пластин феррита и цементита.

Перлит - крупнодисперсная смесь пластинок феррита и цементита с суммарной толщиной пластинок 8-10 микрон.

Сорбит - среднедисперсная смесь пластинок феррита и цементита с суммарной толщиной пластинок 6-8 микрон.

Тростит - мелкодисперсная смесь пластинок феррита и цементита (смесь высокой степени дисперсности) с суммарной толщиной пластинок 2-4 микрона.

С увеличением скорости охлаждения возрастает дисперсность феррито-цементитной смеси, что приводит к увеличению прочности и твердости стали и уменьшению ее пластичности.

При скоростях охлаждения больше критической скорости охлаждения $V_{кр}$, аустенит переохлаждается до температуры начала мартенситного превращения M_n и начинается мартенситное превращение.

Критическая скорость охлаждения или критическая скорость заковки $V_{кр}$ - это минимальная скорость охлаждения при которой происходит бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит.

Мартенсит зарождается на границе зерна аустенита и в виде линзообразной пластины прорастает через все зерно аустенита. Затем образуются следующие пластины мартенсита,

которые расположены под определенным углом к ранее образовавшимся пластинам мартенсита, т.е. образование мартенсита происходит не за счет роста ранее образовавшихся пластин мартенсита, а за счет образования новых пластин мартенсита. Пластины мартенсита выглядят под микроскопом в виде иголок (рис.4.4а) и поэтому говорят, что мартенсит имеет игольчатую структуру, причем размер игл мартенсита тем больше, чем больше исходное зерно аустенита.

При перегреве стали вырастает зерно аустенита и при закалке получится крупноигльчатый мартенсит (рис.4.4в).

Образование мартенсита происходит с увеличением объема и поэтому аустенит остаточный будет находится в напряженном состоянии.

Если охлаждение стали в области V мартенситного превращения прекратить и дать выдержку, то структура стабилизируется и при

дальнейшем охлаждении мартенситное превращение либо вообще не происходит, либо происходит с задержкой и не в полном объеме.

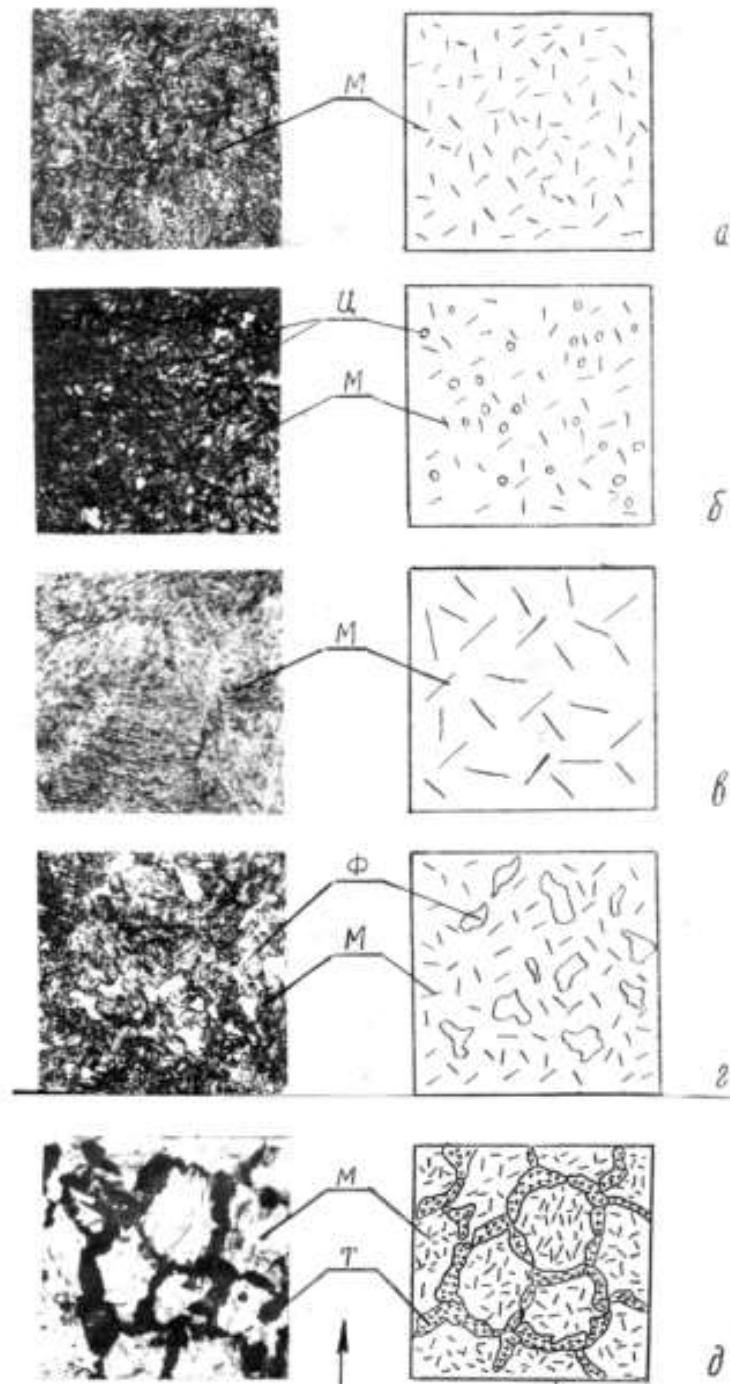


Рис.4.4 Микроструктура закаленной стали и ее условная зарисовка:

- а) мартенсит мелкоигльчатый;
- б) мартенсит + цементит;
- в) мартенсит крупноигльчатый (перегрев стали);
- г) мартенсит + феррит (недогрев стали);
- д) мартенсит + тростит (замедленное охлаждение)

Для того, чтобы мартенситное превращение прошло наиболее полно, сталь необходимо непрерывно охлаждать до линии конца мартенситного превращения (закалка холодом).

Микроструктура закаленной стали зависит от температуры нагрева и скорости охлаждения.

Нагрев до рекомендуемых температур $A_{c3} + (30...50)^\circ \text{C}$ доэвтектоидных сталей при полной и $A_1 + (30...50)^\circ \text{C}$ заэвтектоидных сталей при неполной закалке позволяет получить структуру мелкоигольчатого мартенсита (рис.4.4а) и мартенсита и вторичного цементита (рис.4.4б).

Охлаждение при закалке со скоростью меньше критической вызывает образование наряду с мартенситом, троостита (рис.4.4д), что приводит к уменьшению твердости стали.

Углеродистые стали имеют высокую критическую скорость закалки $V_{кр}$ и поэтому их закаливают в воде или водных растворах солей со скоростью охлаждения 600°C/сек. и выше.

Легирующие элементы в легированных сталях, за исключением кобальта, повышают устойчивость аустенита, что приводит к смещению вправо линии начала превращения аустенита в феррито-цементитную смесь на диаграмме изотермического превращения аустенита легированных сталей, что, в свою очередь, приводит к уменьшению критической скорости закалки легированных сталей. Поэтому легированные стали закаливают в масле со скоростью охлаждения $\sim 150^\circ \text{C/сек.}$

4.4. Порядок выполнения работы

1. Получить у лаборанта образцы для проведения закалки.
2. Определить твердость образцов до закалки на приборе Роквелла по шкале В.
3. Определить температуру закалки полученных образцов в соответствии с содержанием углерода.
4. Измерить образцы.

5. Определить по табл. 4.2. продолжительность нагрева образцов в печи.

Таблица 4.2

№ Образцов	Марка стали	Вид закалки	Температура закалки	Размеры образца, мм	Время нагрева и выдержки при закалке.	Охлаждающая среда	Твердость до закалки, HRB	Твёрдость после закалки, HRC	Твёрдость по Бренелю (по переводной таблице) кгс/мм ²	
									До закалки	После закалки

6. Заложить образцы в печь.

7. Произвести по истечении времени нагрева закалку образцов в соответствующих закалочных средах.

8. Зачистить торцы образцов от следов закалочной среды и окисных пленок на шлифовальной шкурке.

9. Замерить твердость образцов на приборе Роквелла по шкале С.

10. По полученным данным построить зависимости после закалки

$$HRC = f(C\%), HRC = f(V_{\text{охл.}}).$$

11. Изучить, схематически зарисовать и описать микроструктуру комплекта закаленных образцов при увеличении x500.

4.5. Содержание отчета

1. Основные теоретические положения, определение и назначение процесса закалки:

- Нижний левый угол диаграммы железо-углерод, структурный состав и температурные интервалы нагрева всех марок углеродистой стали;
- Диаграмма изотермического превращения аустенита с обозначением всех областей и температур для стали У8;
- Механизм мартенситного превращения в стали и особенности этого процесса;

г) Методика определения основных параметров процесса закалки: температуры нагрева, продолжительности нагрева и скорости охлаждения.

2. Рабочий протокол (табл. 3.2).

3. Графики зависимостей $HRC = f(C\%), HRC = f(V_{\text{охл.}})$. Анализ полученных зависимостей.

4. Структуры закаленных образцов, их описание, оценка температуры и скорости

охлаждения по микроструктуре образцов.

4.6. Контрольные вопросы

1. Что называется закалкой стали?

2. Какая скорость называется критической скоростью закалки?

3. Какую структуру имеет доэвтектоидная сталь после закалки при $V_{\text{охл.}} > V_{\text{кр.}}$?

4. Как определить температуру закалки доэвтектоидной, эвтектоидной и заэвтектоидной сталей?

5. Как влияет на твердость закаленной стали, увеличение количества углерода в стали?

6. Какое строение имеет мартенсит под микроскопом?

7. Сталь У12, температура нагрева A_{c1} - $(30...50)^\circ \text{C}$. Какая сформируется структура при закалке?

8. Что такое мартенсит?

9. Какие стали требуют полной, неполной закалки ?

10. Сталь 50, температура нагрева $A_{c1} - A_{c3}$, $V_{\text{охл.}} > V_{\text{кр.}}$. Какая формируется структура?

11. Какую структуру имеет сталь У12 после неполной закалки при $V_{\text{охл.}} \geq V_{\text{кр.}}$. Какая формируется структура?

12. В какой среде охлаждаются углеродистые и легированные стали на мартенсит?

13. Что называется сорбитом, троститом?

14. Что называется ферритом, аустенитом, цементитом, мартенситом?
15. Каков механизм эвтектоидного, мартенситного превращений?
16. Чем отличаются структуры перлита, сорбита и тростита?
17. Назовите особенности мартенситного превращения?
18. Какова природа высокой твердости мартенсита?
19. Зависит ли твердость мартенсита от скорости охлаждения?
20. Почему в закаленной стали присутствует аустенит остаточный?
21. Для чего проводится обработка холодом закаленной стали?
22. Влияет ли время изотермической выдержки на количество и твердость мартенсита?

Лабораторная работа №5. Отпуск стали

5.1 Цель работы

1. Освоить технологический процесс отпуска стали.
2. Изучить превращения, происходящие в стали при отпуске, влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства стали.

5.2 Приборы, материалы, учебные пособия

1. Муфельные печи.
2. Твердомер.
3. Закаленные образцы углеродистой стали: сталь 45 – 3 шт., сталь У10 – 1 шт.
4. Штангенциркуль.
5. Шлифовальная бумага.
6. Альбом микроструктур, справочные материалы.

5.3 Превращения при отпуске сталей

Сталь, закаленная на мартенсит, обладает сложным полем остаточных напряжений, имеет высокую твердость и склонность к хрупкому разрушению. Поэтому непосредственно после закалки стали не могут быть использованы для эксплуатации и подвергаются окончательной операции термической обработки - отпуску.

Процесс нагрева закаленной стали до температур ниже критической точки A_{c1} , выдержки при выбранных температурах и последующего охлаждения, как правило на воздухе, называется отпуском стали.

Структура закаленной стали состоит из двух неустойчивых фаз: мартенсита и остаточного аустенита. Поэтому при длительном вылеживании при комнатной температуре и особенно нагреве неустойчивая структура закаленной стали стремится перейти в более устойчивое состояние, т.е. в структуру, состоящую из ферритоцементитной смеси.

При нагреве закаленной стали происходят процессы диффузии углерода из пересыщенной решетки мартенсита, что приводит к уменьшению степени ее тетрагональности, снижению остаточных внутренних напряжений

в стали и образованию карбидных частиц. Скорость процесса распада мартенсита и количество углерода в нем зависят от температуры нагрева. Чем выше температура нагрева мартенсита, тем больше скорость распада и тем меньше углерода будет оставаться в нем.

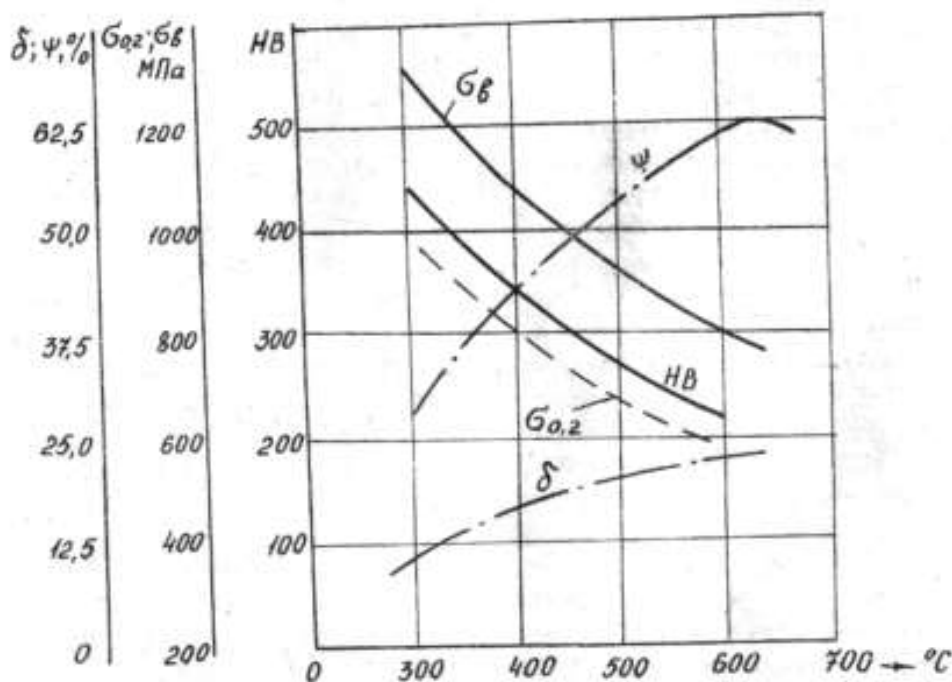


Рис 5.1. Влияние температуры отпуска на механические свойства стали

В зависимости от температуры нагрева существует три вида отпуска.

Низкий отпуск - нагрев закаленной стали до температур 170...220°C. Низкий отпуск предназначается для частичного снятия внутренних напряжений и повышения вязкости и пластичности стали без заметного снижения ее твердости (рис.5.1).

Этому виду отпуска подвергают мерительный и режущий инструмент, работающий в условиях безударной нагрузки: метчики, плашки, резцы чистовой обработки и т.д.; детали, прошедшие химико-термическую обработку: цементацию, азотирование, цианирование и т.д.

При низком отпуске углерод частично удаляется - диффундирует из пересыщенной решетки мартенсита с образованием включений промежуточных карбидов типа Fe_xC . При этом уменьшается степень

тетрагональности решетки и, как следствие, снижаются остаточные напряжения. Мартенсит закалки переходит в мартенсит отпуска. Значительных изменений в микроструктуре не происходит. Мартенситные иглы теряют свои ранее резкие очертания.

Средний отпуск - нагрев закаленной стали до температур 270...350 (400)°С. Средний отпуск предназначается для почти полного снятия внутренних напряжений, повышения упругих и пластических свойств стали. Этому виду отпуска подвергаются инструмент, работающий в условиях ударной нагрузки: долбяки, строгальные резцы, резцы для черновой обработки дерева, слесарный инструмент и т.д. (максимальный нагрев до 350 ° С), детали машин, к которым предъявляются требования высоких упругих свойств: рессоры, пружины и др. (температура нагрева 400°С).

При среднем отпуске, особенно при максимальных температурах, избыточный углерод покидает кристаллическую решетку Fe- α , в результате почти полностью устраняются тетрагональность решетки и остаточные напряжения, мартенсит превращается в феррит, а выделившийся из мартенсита углерод образует устойчивый карбид железа Fe₃C. Остаточный аустенит превращается в мартенсит отпуска, который затем распадается на ферритоцементитную смесь - тростит отпуска.

При среднем отпуске происходит качественное изменение структуры закаленной стали: из мартенсита закалки и остаточного аустенита образуется тростит отпуска – ферритоцементитная смесь с высокой степенью дисперсности.

Применимость среднего отпуска для упругих элементов конструкций объясняется достижением оптимального комплекса свойств: модуль упругости еще достаточно велик, а хрупкость, за счет распада мартенсита, устранена. При среднем отпуске значительное (до 30%) падение твердости и незначительное увеличение пластичности (рис.5.1) происходят в основном за счет устранения тетрагональности, дефектов кристаллической решетки и остаточных напряжений.

Высокий отпуск - нагрев закаленной стали до температур 500...700°C. Высокий отпуск предназначен для получения однородной мелкозернистой структуры стали и обеспечения наилучшего сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости (до 600°C). Двойная термическая обработка, состоящая из закалки и последующего высокого отпуска (до 600°C), существенно улучшает общий комплекс механических свойств, является основным видом термической обработки конструкционных сталей и называется улучшением стали. Улучшению подвергаются такие детали, как шестерни, валы, траверсы, плунжеры, и т.д.

При высоком отпуске, наряду с процессами распада закалочных структур (мартенсита и остаточного аустенита) в ферритоцементитной смеси наблюдаются процессы коалесценции (укрупнения) и сфероидизации (округления) частиц цементитной фазы. Уменьшается количество цементитных включений в ферритной матрице и увеличиваются их размеры, т.е. снижается степень дисперсности структуры. Такая смесь феррита и цементита средней дисперсности зернистого строения называется сорбитом отпуска, в отличие от сорбита закалки, имеющего пластинчатое строение. При высоком отпуске происходит падение твердости (до 50%) закаленной стали при значительном увеличении пластичности и ударной вязкости (рис.5.1.), максимальные значения которых достигаются при температуре отпуска 700°C.

Перед обработкой резанием применяют высокий отпуск (до 700°C), резко снижающий твердость предварительно закаленной стали и износ режущего инструмента. Частицы карбидов оказываются укрупненными. Такая структура именуется перлитом отпуска в отличие от пластинчатого перлита, получающегося при непрерывном охлаждении стали из области аустенита.

Снижение прочности и увеличение пластичности происходит в основном за счет увеличения количества плоскостей скольжения в феррите,

свободных от цементитных включений, т.е. устранения препятствий для перемещения дислокаций.

Таким образом, на свойства отпущенной стали влияют температура отпуска и время выдержки при той или иной температуре, способствующие протеканию диффузионных процессов. Время выдержки определяется из расчета 2...3 мин на 1 мм толщины обрабатываемого изделия или образца.

5.4 Порядок выполнения работы

1. Определить температуру заданного преподавателем вида отпуска и занести ее значение в табл. 1.

Таблица 1

№ образца	Марка стали	Вид отпуска	Температура нагреть	Время выдержки в печи, мин	Твёрдость по HRC		Структура после отпуска
					До отпуска	После отпуска	

2. Определить время выдержки образца при выбранной температуре.
3. Провести отпуск образцов.
4. Зачистить шлифовальной шкуркой торцы отпущенных образцов.
5. Определить на твердомере по шкале С твердость отпущенных образцов и полученные результаты занести в табл. 1.
6. Занести в таблицу результаты замера твердости, полученные студентами других звеньев.
7. Построить зависимости $HRC = f(T_{отп.})$ для стали 45 и объяснить причины падения твердости.
8. Схематически зарисовать структуру после всех видов отпуска и описать процессы, протекающие в углеродистой стали при низком, среднем и высоком отпуске.

5.5 Содержание отчета

1. Цель работы.

2. Таблица 1.

3. График зависимости $HRC = f(T_{\text{отп.}})$

4. Схематически зарисованные структуры после низкого, среднего и высокого отпуска с описанием процессов, протекающих в углеродистой стали при каждом отпуске, и указанием области применения этих видов отпуска.

5.6 Контрольные вопросы

1. После какой термической обработки проводится отпуск?
2. В чем заключается распад мартенсита и при каком виде отпуска он заканчивается?
3. От каких факторов зависят свойства отпущенной стали?
4. При какой температуре отпуска обеспечивается максимальная твердость?
5. Какова разница в строении троостита и сорбита после закалки и после отпуска?
6. При каком виде отпуска идет коалесценция и сфероидизация цементитных частиц?
7. Какая структура формируется при низком, среднем и высоком отпуске?
8. Что такое улучшение стали?
9. На какие фазы распадается мартенсит при отпуске?
10. Чем отличается тростит отпуска от сорбита отпуска?
11. Чем отличается мартенсит закалки от мартенсита отпуска?
12. Какому виду отпуска подвергаются инструментальные стали, работающие в условиях ударной и безударной нагрузок?
13. Какому виду отпуска подвергаются рессоры и пружины?

Лабораторная работа №6. Отжиг и нормализация стали

6.1 Цель работы

1. Научиться определять температуру отжига и нормализации стали по диаграмме железо-углерод, освоить технологию их проведения.
2. Изучить влияние отжига и нормализации на формирование структуры и свойств углеродистой стали.

6.2 Приборы, материалы, учебные пособия

1. Термические печи, гальванометры, термопары.
2. Твердомер типа Роквелл.
3. Закалочный бак с водой, клещи.
4. Набор образцов.
5. Альбом микроструктур.

6.3 Превращение при отжиге

Цель любого процесса термической обработки состоит в том, чтобы нагревом до определенной температуры и последующим охлаждением вызвать требуемое изменение строения металла и получить заданные свойства. Если охлаждение ведется медленно, то превращение аустенита в смесь перлита и феррита пройдет достаточно полно вследствие развития диффузионных процессов, и фазовый состав будет соответствовать равновесному состоянию. Например, структура, состоящая из крупных зерен феррита и перлита, какая часто бывает после литья иковки, в результате термической обработки будет состоять из мелких зерен феррита и перлита. Основой для изучения термической обработки стали является диаграмма железо-углерод (рис.6.1).

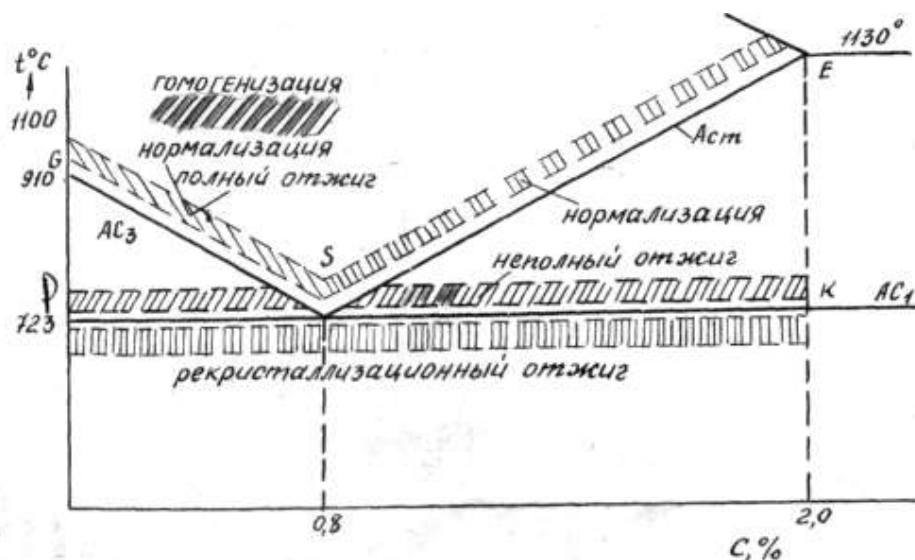


Рис. 6.1 Левая часть диаграммы железо-углерод. Указана температура нагрева при разных видах термической обработки

Общепринятые обозначения критических точек:

AC_1 - соответствует линии PSK,

AC_3 -соответствует линии GS,

A_{cm} - соответствует линии ES.

Отжиг заключается в нагреве стали до определенной температуры, выдержке и последующем медленном охлаждении с печью со скоростью 20-30 град/ч.

Вследствие медленного охлаждения сталь приобретает структуру, близкую к равновесию. Следовательно, после отжига углеродистой стали получают структуры, указанные на диаграмме железо-углерод: доэвтектоидная сталь - феррит + перлит; эвтектоидная сталь – перлит; заэвтектоидная сталь - перлит + цементит. Различают следующие виды отжига.

Полный отжиг заключается в нагреве доэвтектоидной стали на 30...50°C выше линии (GS), выдержке при этой температуре для полного прогрева металла и завершения фазовых превращений и последующем медленном охлаждении. Сопровождается полной фазовой перекристаллизацией ($\Phi \leftrightarrow A$).

Скорость нагрева при термической обработке зависит от химического состава, формы и размеров изделий. Чем сложнее форма, больше размер изделия, выше содержание углерода и легирующих элементов, уменьшающих теплопроводность, тем медленнее следует нагревать сталь, чтобы избежать возникновения трещин за счет термических напряжений, образующихся вследствие разности температур внутренних и наружных слоев детали или заготовки.

Полный отжиг применяется для смягчения стали перед обработкой резанием, для снятия напряжений и устранения пороков структуры. Например, при литье и сварке образуется крупнозернистая структура с игольчатым ферритом и пониженными механическими свойствами, которая получила название видманштеттовой, при горячей пластической деформации наблюдается неоднородное распределение феррита вокруг зерен перлита, что резко снижает прочность стали; при большой степени холодной пластической деформации образуется строчечная структура, которая ведет к анизотропии, т.е. различию свойств металла вдоль и поперек волокон.

Неполный отжиг отличается от полного тем, что сталь нагревается до температуры выше A_{c1} , но ниже A_{c3} . Полной фазовой перекристаллизации не происходит, следовательно, устранить дефекты структуры, связанные с нежелательным размером и формой зерна, невозможно.

Неполный отжиг для доэвтектоидной стали применяется для снятия напряжений и улучшения обрабатываемости и позволяет экономить тепловую энергию.

Заэвтектоидная сталь не отжигается по режиму полного отжига с нагревом выше A_{cm} , так как при медленном охлаждении выделяется грубая сетка вторичного цементита, которая ухудшает механические свойства стали. Для заэвтектоидной стали применяется неполный отжиг. При нагреве до $A_{c1} + (30...50)^\circ\text{C}$ в аустените остается большое число нерастворившихся включений цементита перлита, которые способствуют образованию

зернистого перлита при охлаждении. Инструментальная сталь со структурой зернистого перлита обладает наименьшей твердостью, наилучшей обрабатываемостью резанием и менее склонна к перегреву при закалке.

Изотермический отжиг заключается в нагреве стали до $A_{с3} + (30...50)^\circ\text{C}$ и выдержке при этой температуре. Затем деталь быстро переносится в печь или ванну с жидкой разогретой солью или расплавленным свинцом с температурой $690...700^\circ\text{C}$ (ниже $A_{с1}$) и выдерживается до полного распада аустенита. Последующее охлаждение производится на воздухе.

Так как аустенит распадается в печи или в ванне при постоянной температуре, то получается более однородная структура. Механические свойства при изотермическом отжиге получаются почти такими же, как и при полном отжиге. Преимущество изотермического отжига – в сокращении продолжительности отжига почти вдвое за счет этапа охлаждения и получении более однородной структуры и свойств по сечению изделия.

Изотермическое превращение аустенита доэвтектоидной стали описывается диаграммой (рис.6.2,в).

Линия 1 - начало превращения переохлажденного аустенита с образованием феррита.

Линии 2,3- начало и конец превращения переохлажденного аустенита с образованием

ферритоцементитной смеси (перлита).

Линии M_n и M_k –начало и конец мартенситного превращения ($A \rightarrow M$).

На диаграмме показаны скорости охлаждения V , соответствующие различным видам термической обработки. Критическая скорость заковки $V_{кр.}$ является граничной скоростью охлаждения между диффузионным и бездиффузионным превращениями переохлажденного аустенита.

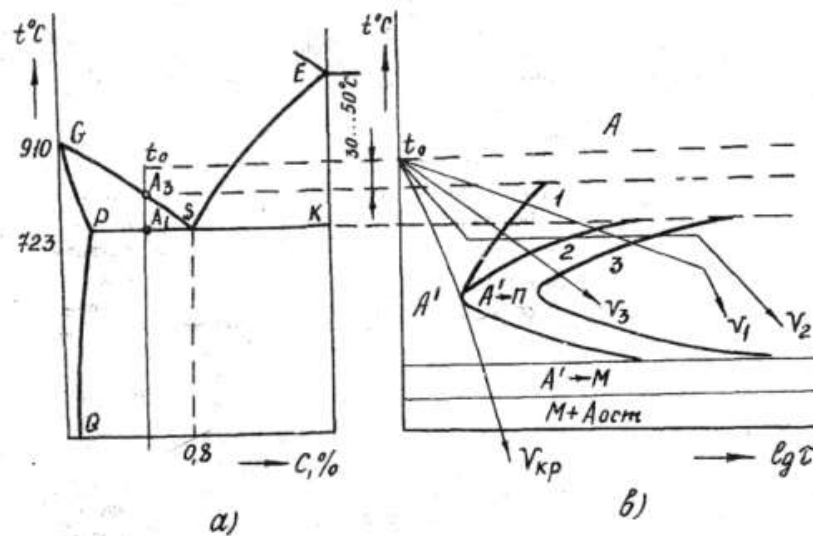


Рис. 6.2 Схема термообработки доэвтектоидной стали:

- а) левая часть диаграммы железо-углерод;
- в) диаграмма изотермического превращения аустенита;
- V 1 - отжиг при непрерывном охлаждении;
- V 2 -охлаждение при изотермическом отжиге;
- V 3 - охлаждение при нормализации.

Рекристаллизационный отжиг применяется для снятия наклепа и восстановления пластичности металла после холодной деформации.

Нагрев производится до температуры, равной $(0,4...0,45) T_{пл}$, т.е. $450...650^{\circ}\text{C}$ (ниже A_{c1}), затем следует выдержка и медленное охлаждение с печью. В результате рекристаллизационного отжига вместо деформированных образуются новые равноосные зерна, остаточные напряжения снимаются, твердость понижается, а пластичность увеличивается.

Гомогенизирующий (диффузионный) отжиг заключается в нагреве стали до $1100...1200^{\circ}\text{C}$ (рис. 6.2.), длительной выдержке при указанной температуре и последующем медленном охлаждении. Применяется для устранения дендритной и зональной неоднородностей по химическому составу (ликвации) в литых заготовках.

При длительной выдержке в области высоких температур наблюдается интенсивный рост зерна, приводящий к снижению механических свойств. Для исправления структуры и улучшения свойств требуется дополнительная термическая обработка (обычно нормализация или полный отжиг).

Нормализация заключается в нагреве доэвтектоидной стали до $A_{c3} + (40...50)^{\circ}C$, заэвтектоидной - до $A_{c1} + (50...60)^{\circ}C$ (рис.6.2). После выдержки охлаждение производится на воздухе.

Ускоренное охлаждение на воздухе приводит к распаду аустенита при более низких температурах по сравнению с отжигом, что определяет различные свойства отожженной и нормализованной стали. Чем выше степень переохлаждения аустенита, т.е. ниже его температура распада, тем мельче получается зерно в металле и дисперснее пластинки ферритоцементитной смеси, выше твердость, прочность, но ниже пластичность стали.

Нормализация вызывает фазовую перекристаллизацию, поэтому способствует устранению пороков структуры, измельчению зерна. В заэвтектоидной стали нормализация устраняет грубую сетку вторичного цементита, так как при ускоренном охлаждении он не успевает образоваться по границам зерен.

6.4. Порядок выполнения работы

1. Получить опытные образцы, записать марку стали, испытать твердость образцов по Роквеллу (шкала В).
2. Закалить образцы от температуры $A_{c3} + (30...50)^{\circ}C$ с выдержкой их при указанной температуре 15 мин и охлаждением в воде.
3. Зачистить закаленные образцы наждачной бумагой и испытать на твердость по Роквеллу (шкала С).
4. Нагреть закаленные образцы до температуры $A_{c3} + (30...50)^{\circ}C$ и выдержать их в печи 15 мин.
5. Охладить образец №1, подлежащий нормализации, на спокойном воздухе.

6. Перенести образец № 2, подлежащий изотермическую отжигу, в печь с температурой 690...700°C, выдержать 30 мин и охладить на спокойном воздухе.

7. Зачистить термически обработанные образцы наждачной бумагой и испытать на твердость по Роквеллу (шкала В).

6.5. Содержание отчета

1. Заполненная табл. 1.

Таблица 1

№ образца	Марка стали	Твёрдость до закладки		Предполагаемая микроструктура	Твердость после закали		Предполагаемая микроструктура	Окончательная твердость образцов по Бринеллю, НВ		Предполагаемая микроструктура

2. Левая часть диаграммы железо-углерод с указанными на ней температурами различных видов термической обработки.

3. Диаграмма изотермического превращения аустенита с показанными линиями диаграммы и структурными областями.

4. Схематически зарисованные микроструктуры после закали, изотермического отжига, нормализации с описанием режимов термической обработки и указанием сущности структурных превращений.

6.6. Контрольные вопросы

1. Каково назначение рекристаллизационного отжига, полного, неполного, нормализации?

2. Как проводится изотермический отжиг?

3. Почему не проводится полный отжиг для заэвтектоидной стали?
4. В какой среде охлаждаются стали при нормализации?
5. До каких температур нагревается доэвтектоидная сталь перед полной закалкой, полным, изотермическим отжигом, нормализацией?
6. Можно ли при изотермическом отжиге устранить пороки структуры после литья иковки?
7. Каково назначение гомогенизирующего отжига?
8. Какая структура сформируется у стали 45 после полного, неполного, изотермического отжига и нормализации?
9. Какова структура стали У10 после полного и неполного отжига?