



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КЕМЕРОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Б.С. Троицкий, А.Л. Майтаков

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум

Для студентов вузов

Кемерово 2013

УДК 669:620.22(075)

ББК 34.2:30.3я7

Т 70

Рецензенты:

А.Н. Смирнов, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева;

В.Н. Агафонов, доктор технических наук, доцент кафедры «Технология металлов и ремонт машин» Кемеровского государственного сельскохозяйственного института

*Рекомендовано Редакционно-издательским советом
Кемеровского технологического института пищевой
промышленности*

Троицкий, Б.С.

Т70 Материаловедение: лабораторный практикум: / Б.С. Троицкий, А.Л. Майтаков; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2013. – 242 с.
ISBN 978-5-89289-733-4

В лабораторном практикуме представлены лабораторные работы по проведению макро- и микроанализа металлов и сплавов, определению твердости, исследованию структур и свойств сталей и чугунов, цветных сплавов и пластмасс и др., рассмотрены теоретические и практические вопросы термической и химико-термической обработки металлов. Особое внимание уделено проблемам обоснования и выбора материалов и способов упрочнения деталей машин пищевого, холодильного и общего машиностроения. Предложены ситуационные задачи для самостоятельной работы студентов. Все лабораторные работы содержат краткое изложение теоретического материала, порядок их проведения и требования к содержанию отчета.

Предназначено для студентов механических специальностей.

УДК 69:620.22(075)

ББК 34.2:30.3я7

*Охраняется законом об авторском
праве, не может быть использовано
любым незаконным способом
без письменного договора*

© КемТИПП 2013

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедением называют область знаний, в которой излагаются закономерности, связывающие состав и структуру материалов с их служебными характеристиками, а также с изменениями свойств материалов в условиях их эксплуатации.

Научные основы материаловедения заложили выдающиеся русские ученые П.П. Аносов, Д.К. Чернов, Н.С. Курнаков, А.М. Бутлеров, Г.В. Курдюмов, А.А. Бочвар, А.А. Байков, В.И. Данилов, Н.А. Минкевич. В теорию и практику разработки органических материалов значительный вклад внесен работами С.В. Лебедева и А.А. Баландина.

Из зарубежных ученых следует отметить металлургов М. Коэна, Р. Мейла, Э. Бейна, а также создателей методов изучения структуры М. Лауэ, П. Дебая, У.Г. и У.Л. Бреггов и химиков К. Циглера и Д. Натта.

В конце XIX – начале XX века основными конструкционными материалами являлись металлические материалы (стали, чугуны, сплавы на основе меди и алюминия).

В последние десятилетия материаловедческая наука была связана не только с совершенствованием традиционных металлических материалов, но и с созданием принципиально новых классов конструкционных материалов – полупроводников и пластических масс, композиционных материалов и металлокерамики, аморфных сплавов и сверхпроводящих керамик. Задачами материаловедения стало не только изучение строения и свойств каждого из указанных классов материалов, но и их совместного поведения в конструкциях и изделиях.

На протяжении всей истории своего развития материаловедение как инженерная дисциплина тесным образом связано с достижениями фундаментальных наук (физики, химии, механики). Поэтому в курсе «Материаловедение» для объяснения изучаемых вопросов привлекаются основы термодинамики, кристаллографии, атомно-кристаллического строения твердых тел и их дефектной структуры, физические основы деформации и разрушения материалов.

Лабораторная работа № 1

МАКРОАНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: ознакомление с методикой проведения макроструктурного анализа; получение практических навыков изготовления макрошлифов, изучения поверхностей деталей, изломов, макрошлифов, выявления макродефектов, неоднородности, причин разрушения металла; приобретение навыков зарисовки макроструктур.

Теоретические сведения

Макроскопический анализ (макроанализ) металлов и сплавов заключается в исследовании их строения невооруженным глазом или при помощи небольших увеличений (до 30 раз). Макроанализ позволяет оценить качество материала, выявить наличие в нем макродефектов, характер его предшествующей обработки (литье, обработка давлением, резание, сварка, наплавка, термическая и химико-термическая обработка и др.), структурную и химическую неоднородность, волокнистость, причины и характер разрушения. Структура материалов, наблюдаемая невооруженным глазом или при небольших увеличениях, называется *макроструктурой*.

С помощью макроанализа можно дать общую оценку состояния больших поверхностей материала или детали в целом и выбрать небольшие наиболее важные и типичные участки для дальнейшего углубленного изучения. Макроанализ проводят путем изучения изломов, макрошлифов или внешних поверхностей заготовок и деталей.

Наружные, или поверхностные, макродефекты, расположенные непосредственно на поверхности изделий, выявляют путем исследования поверхностей этих изделий. Если изделия литые, т. е. получены методом литья, то на их поверхности наиболее часто встречаются следующие дефекты:

1) *пригар*, представляющий собой трудноотделимую корку, состоящую из смеси металла, формовочного песка и шлака;

2) **усадочные пустоты** (раковины, рыхлости, пористость), образующиеся в результате усадки металла (уменьшение объема) при его затвердевании (рис. 1.1);

3) **газовые раковины** (пузыри), возникающие в кристаллизующемся металле чаще всего из-за его большой газонасыщенности;

4) **ужимины**, возникающие вследствие частичного отслоения внутренних поверхностных слоев песчаной формы, что приводит к образованию в твердом металле полостей, заполненных формовочным материалом;

5) **трещины**, появляющиеся как результат высоких напряжений в отливках из-за сопротивления формы их усадке, а также неодинаковых скоростей охлаждения различных частей литой заготовки;

6) **неметаллические включения**, которые по происхождению разделяются на эндогенные и экзогенные. Эндогенные образуются в результате взаимодействия компонентов сплава, например, железа, с растворенными в нем кислородом, серой, азотом; экзогенные – шлаковые включения и засоры от разрушающихся стенок формы.

В пластически деформированных изделиях остается часть дефектов литого металла. Оставшиеся дефекты при пластическом деформировании металла видоизменяются. Усадочные пустоты превращаются в **расслоения**. Некоторые неметаллические включения (а также газовые пузыри), окисленные и потому не заварившиеся в процессе горячей обработки давлением, вытягиваются и образуют прямые тонкие штрихи-трещинки глубиной не более 1,5 мм и длиной от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Такие трещинки, расположенные в направлении деформирования, называются **волосовинами**. В некоторых легированных сталях выявляются **флокены** – тонкие трещины, которые в поперечном сечении представляют собой овальные пятна серебристо-белого цвета. Они особенно хорошо наблюдаются на изломах и протравленных макрошлифах. Происхождение флокенов связано с поглощением водорода жидкой сталью, его скоплением в местах больших искажений кристаллической решетки затвердевшей стали. Это приводит к появлению значительных напряжений и, как следствие, трещин при пласти-

ческой деформации стали, а также при ее неравномерном охлаждении или фазовых превращениях.

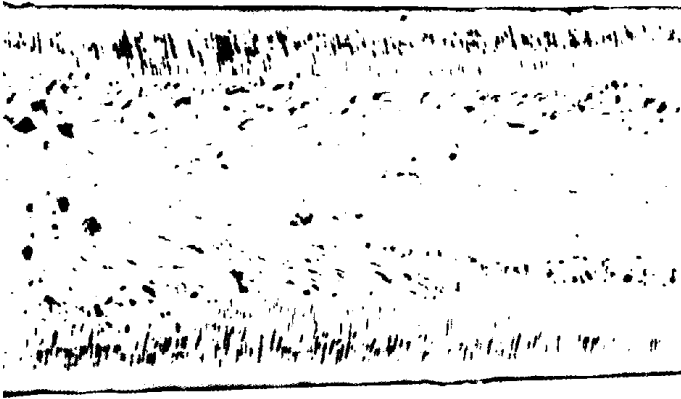


Рис. 1.1. Газовые пузыри в слитке кипящей стали 08кп.

К дефектам пластически деформированного металла относятся также сильно разветвленные, проникающие в глубь металла трещины и раковины, вызванные пережогом (т. е. окислением металла по границам зерен); *надрывы*, обусловленные чрезмерно большой степенью деформации; *окалина* – слои окисленного металла (если она вдавлена в металл, на его поверхности образуется *рябизна*).

В термически обработанном металле чаще всего обнаруживаются *обезуглероживание* и *закалочные трещины*. Обезуглероживание поверхностных слоев стальных изделий является результатом окислительного действия атмосферы печей для термообработки. На поверхности изделий возникают участки с пониженной твердостью – мягкие пятна. Закалочные трещины имеют зигзагообразный характер, часто образуют сетку. Края закалочных трещин, в отличие от трещин горячедеформированного металла, не обезуглероживаются, поскольку такие трещины образуются в процессе закалки при охлаждении изделий до температуры ниже 100°C или после полного охлаждения.

В сварных изделиях основными дефектами являются трещины, как результат внутренних напряжений, и *непровар*. Не-

провар – местное отсутствие соединения основного металла и наплавленного. Этот дефект возникает при загрязнении свариваемых поверхностей или недостаточном разогреве основного металла. Возможен также *пережог* из-за высокой температуры нагрева металла в процессе сварки. Он образуется при нарушении режима тепловой обработки (высокая температура нагрева в кислородсодержащей среде), вызывающем интенсивное окисление металла вдоль границ зерен. Это сильно охрупчивает металл. Дефект неисправим.

По результатам исследования поверхностей изделий делается мотивированное заключение о возможности их дальнейшей эксплуатации.

Внутренние дефекты, которые могут привести к разрушению изделия, выявляются при изучении изломов.

Изломом называется поверхность, образующаяся вследствие разрушения металла. Изломы металлов могут существенно отличаться по цвету. Так, стали и белые чугуны, в которых весь углерод связан в цементите, имеют излом светло-серого цвета. У графитизированных сталей и чугунов, в которых углерод находится преимущественно в виде графита, – излом черного цвета.

На поверхности изломов можно видеть дефекты, которые способствовали разрушению. В зависимости от состава, строения металла, наличия дефектов, условий обработки и эксплуатации изделий изломы могут иметь вязкий, хрупкий или усталостный характер.

Вязкий (волоknистый) излом имеет бугристо-сглаженный рельеф и свидетельствует о значительной пластической деформации, предшествующей разрушению. По виду вязкого излома нельзя судить о форме и размерах зерен металла.

Хрупкий (кристаллический) излом характеризуется наличием на поверхности плоских блестящих участков (фасеток). Так как разрушение протекает без заметной пластической деформации и форма зерна не искажается, то на хрупком изломе видны исходные форма и размер зерен металла. При этом разрушение может происходить через зерна (**транскристаллический излом**) либо по границам зерен (**интеркристаллический**, или **межкристаллический излом**). Разрушение по границам

зерен имеет место при наличии на границах неметаллических включений (фосфиды, сульфиды, оксиды) или других выделений, ослабляющих прочность границ зерна.

Хрупкое разрушение наиболее опасно, так как происходит чаще всего при напряжениях ниже предела текучести материала. Его возникновению способствует наличие поверхностных дефектов, конструктивные просчеты (резкое изменение сечения, толстостенность деталей), низкая температура и ударные нагрузки при работе, крупнозернистость металла, выделения по границам зерен хрупких фаз, межзеренная коррозия. Разновидностями хрупкого излома являются нафталинистый, камневидный, фарфоровидный и др.

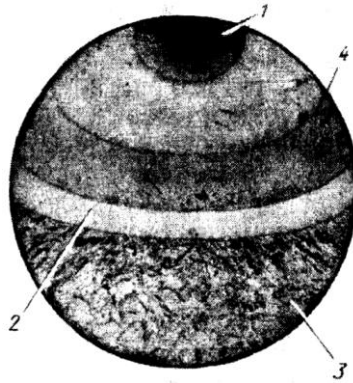
Нафталинистый излом – транскристаллический с крупным зерном и избирательным блеском, подобным блеску кристаллов нафталина. Он свидетельствует о повышенной хрупкости стали и наблюдается в легированных, преимущественно быстрорежущих сталях. Причиной возникновения такого излома является перегрев стали, вызывающий укрупнение зерен и образование определенной ориентации структурных составляющих (текстура). Внешне в изломе текстура проявляется как одно крупное зерно. Нафталинистый излом устраняется путем многократных повторных фазовых перекристаллизаций металла.

Камневидный излом возникает, если металл имеет крупнозернистое строение, а разрушение носит преимущественно межкристаллический характер. Причина образования такого излома – перераспределение примесей при перегреве металла с выделением их в приграничных участках зерен. Камневидный излом можно устранить путем гомогенизирующего отжига.

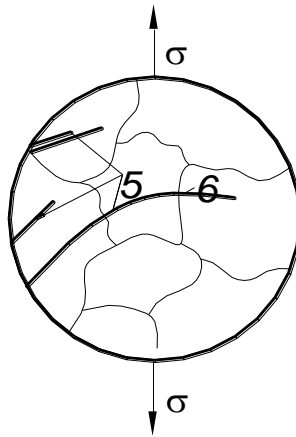
Обычно изломы бывают смешанными. При смешанном изломе на его поверхности наблюдаются участки вязкого и хрупкого разрушения.

Фарфоровидный излом характерен для правильно закаленной стали, вид излома матовый, мелкозернистый.

Усталостный излом (рис. 1.2) образуется в результате длительного воздействия на металл циклических напряжений. Излом состоит из трех зон: зарождения трещины, собственно усталостного распространения трещины и долома.



a



б

Рис. 1.2. Усталостный излом (а) и схема развития трещины усталости (б):

1 – очаг разрушения; 2 – зона стабильного развития трещины;
 3 – зона долома; 4 – усталостные бороздки; 5 – начальная стадия образования трещины; 6 – магистральная трещина

Усталостная трещина возникает в местах, где имеются концентраторы напряжений или дефекты. Первая зона плоская и гладкая. Увеличиваясь при работе детали, трещина образует зону собственного усталостного распространения с характерными

концентрическими бороздками или дугами и мелкозернистым, фарфоровидным изломом. Зачастую она имеет отдельные участки гладкой притертой поверхности. Долгом происходит внезапно, когда ослабленное трещиной сечение детали не способно выдержать приложенной нагрузки. Долгом может быть вязким, хрупким или смешанным.

В практике широко применяют такой метод макроанализа, как исследование макрошлифов. *Макрошлиф* – это образец с плоской шлифованной и протравленной поверхностью, вырезанный из исследуемого участка детали или заготовки. Его получают следующим образом. На металлорежущем станке или ножовкой вырезают образец, одну из плоских поверхностей которого ровняют напильником или на плоскошлифовальном станке. Затем образец шлифуют вручную или на шлифовально-полировальном станке шлифовальной шкуркой различной зернистости. Шлифование одной шкуркой нужно проводить в одном направлении, после чего следует смыть остатки абразива водой. Переходя на более мелкую шкурку, поворачивают образец на 90° и проводят обработку до полного исчезновения рисок, образованных предыдущей шкуркой. Образец промывают водой, просушивают и подвергают поверхностному травлению.

Состав некоторых реактивов для травления приведен в табл. 1.1.

Перед травлением образец обезжиривают и очищают, как правило, этиловым спиртом. Травление большинством реактивов, указанных в табл. 1.1, осуществляют, погружая в них образец. При этом следует строго соблюдать правила техники безопасности.

Реактив, активно взаимодействуя с участками, где имеются дефекты и неметаллические включения, протравливает их более сильно и глубоко. Поверхность макрошлифа получается рельефной. С помощью реактивов для глубокого травления выявляются даже внутренние дефекты (поры, раковины, ликвация, волосовины, трещины, флокены и др.), не выходящие непосредственно на поверхность детали.

Таблица 1.1

Реактивы для травления макрошлифов

Сплавы	Реактив и режим травления	Назначение
1	2	3
Реактивы для глубокого травления		
Углеродистые и малолегированные стали и чугуны	10–20 мл серной кислоты, 90–80 мл воды, $t = 20\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$, продолжительность – несколько часов	Выявление ликвации, дендритной структуры, неоднородности, волокнистости
	50 мл соляной кислоты, 50 мл воды, $t = 20\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$, продолжительность – 1–60 мин	Выявление ликвации, волокнистости, дефектов сварных соединений
	7,5 мл серной кислоты, 10 г хромового ангидрида, 80 мл воды, $t = 50\text{--}70\text{ }^{\circ}\text{C}$, продолжительность – не менее 10 мин	Выявление общей макроструктуры, дефектов
Высоколегированные и коррозионно-стойкие стали	10 мл серной кислоты, 50 мл соляной кислоты, 40 мл воды, кипящий раствор, длительность – 10–60 мин	Выявление общей макроструктуры, дефектов, ликвации, волокнистости, дендритной структуры
Коррозионно-стойкие хромоникелевые стали	10 мл серной кислоты, 3 г сернокислой меди, 87 мл воды, погружение предварительно нагретой до $625\text{ }^{\circ}\text{C}$ стали в кипящий реактив, длительность – 72 ч	Оценка склонности к межкристаллитной коррозии
Медные сплавы	50 мл азотной кислоты, 50 мл воды, температура – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, длительность – несколько минут	Выявление общей микроструктуры
Реактивы для поверхностного травления		
Различные стали и чугуны	8 г хлористого аммиаката меди, 100 мл воды (реактив Гейна), температура – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, длительность – 0,5...5 мин	Выявление ликвации серы, фосфора, углерода, полосчатости деформированной стали, грубой зернистости, поверхностных дефектов

1	2	3
	5 мл серной кислоты, 100 мл воды (реактив Баумана). Нефиксированную фотобумагу смачивают реактивом, прижимают эмульсией к макрошлифу на 1–10 мин, промывают, фиксируют, промывают, высушивают	Выявление ликвации серы
	3 мл соляной кислоты, 0,2 г хлористой меди, 3 г хлорного железа, 0,1 хлористого олова, 100 г этилового спирта, 100 г воды (реактив Обергоффера). Температура – 20 °С, образец полированный	Выявление ликвации фосфора
Медные и никелевые сплавы	5 г хлорного железа, 30 мл соляной кислоты, 100 мл воды. Температура – 20 °С, длительность – 1–5 мин	Выявление общей макроструктуры
Алюминий и его сплавы	10 мл соляной кислоты, 10 мл азотной кислоты, 1 мл плавиковой кислоты, 10 мл воды. Температура – 20 °С, длительность – 1–5 мин	Выявление общей макроструктуры и макроструктуры сварных соединений

Поверхностное травление, проводимое менее агрессивными реактивами, позволяет выявить в сталях, чугунах и цветных сплавах ликвацию, макроструктуру литого или деформированного металла, дефекты сварных соединений, структурную неоднородность материала, подвергнутого термической или химико-термической обработке.

Протравленный макрошлиф промывают водой для удаления травителя, обрабатывают спиртом, высушивают с целью предотвращения коррозии.

Макроанализ макрошлифов позволяет выявить *структурную* (например, в стали, закаленной токами высокой частоты) или *химическую* (например, в стали, науглероженной или

наплавленной износо- и коррозионно-стойким сплавом) **неоднородность**, возникшую при обработке готовых изделий.

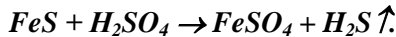
Химическая неоднородность сплава, возникающая при его производстве, называется **ликвацией**. Особенно склонны к ликвации в стали углерод, сера и фосфор. Важно знать распределение в стали вредных примесей серы и фосфора, оказывающее существенное влияние на строение металла и его свойства.

Сера вызывает **красноломкость** стали, т. е. охрупчивание при высоких температурах, а фосфор – **хладноломкость**, т. е. охрупчивание при низких температурах. Содержание серы и фосфора в сталях строго регламентируется. Характер распределения названных элементов зависит от процесса кристаллизации металла в отливке или в сварном соединении и от вида обработки давлением.

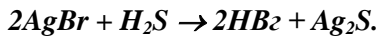
Общую ликвацию углерода, фосфора и серы позволяет оценить обработка макрошлифа реактивом Гейна (см. табл. 1.1). При взаимодействии шлифа и реактива железо из поверхностного слоя стали переходит в реактив, а на его место осаждается медь, которая защищает сталь от дальнейшего воздействия реактива.

Места скоплений углерода, серы и фосфора оказываются в меньшей степени защищенными медью и протравливаются сильнее. После удаления под струей воды слоя меди эти участки выглядят темнее (рис. 1.3).

Ликвацию серы в стали или чугуна можно оценить методом Баумана (см. табл. 1.1). Сера находится в стали в составе сульфидов (FeS и MnS). При взаимодействии их с серной кислотой, оставшейся на фотобумаге, образуется сероводород:



Сероводород взаимодействует с бромистым серебром фотэмульсии:



Образующиеся на фотобумаге темные участки Ag_2S выявляют форму и характер распределения серы в исследуемом металле. На рис. 1.4 показан макроснимок (отпечаток по методу Баумана), на котором отчетливо видна ликвация серы по сечению рельса.

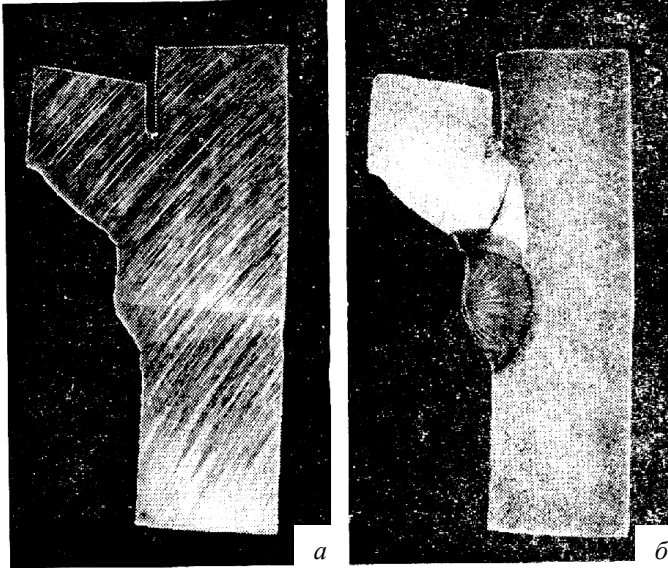


Рис. 1.3. Сварное соединение:
а – до травления; б – после травления реактивом Гейна

Для выявления ликвации фосфора целесообразно проводить травление реактивом Обергоффера (см. табл. 1.1.).

С ликвацией химических элементов также тесно связаны *дендритность* строения литых сплавов и *волоконность* строения деформированных металлов. Дендритами называют кристаллы (зерна) литого металла, имеющие древовидную форму. Вредные примеси в виде неметаллических включений (сульфидов, фосфидов, оксидов) и некоторые легирующие элементы скапливаются чаще всего в междендритных пространствах (рис. 1.5).

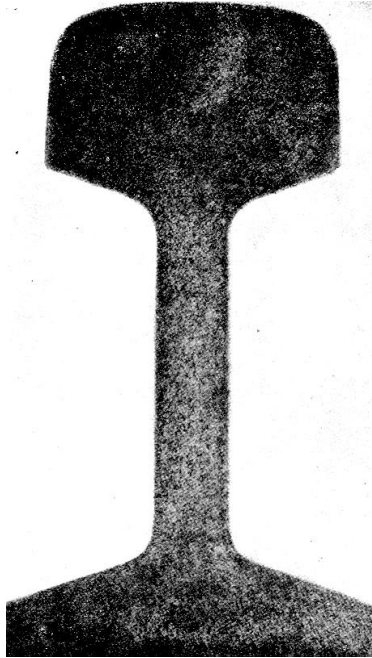


Рис. 1.4. Ликвация серы по сечению стального рельса (по Бауману)

Продукцией металлургических предприятий, как правило, является металл, претерпевший горячую обработку давлением – ковку или прокатку. При деформировании дендриты, вначале разориентированные относительно друг друга, постепенно поворачиваются и вытягиваются вдоль направления деформации. Вытягиваются и неметаллические включения.

В результате этого формируется типичная для прокатанного металла полосчатая, волокнистая структура. Такое волокнистое строение металла называют первичной полосчатостью.

Вторичная полосчатость образуется в доэвтектоидной стали (и в некоторых легированных при их охлаждении от высоких температур) в результате выделения избыточного феррита из аустенита на вытянутых неметаллических включениях. Макроанализ позволяет установить и способ изготовления деталей – обработка давлением или резанием (рис. 1.6).

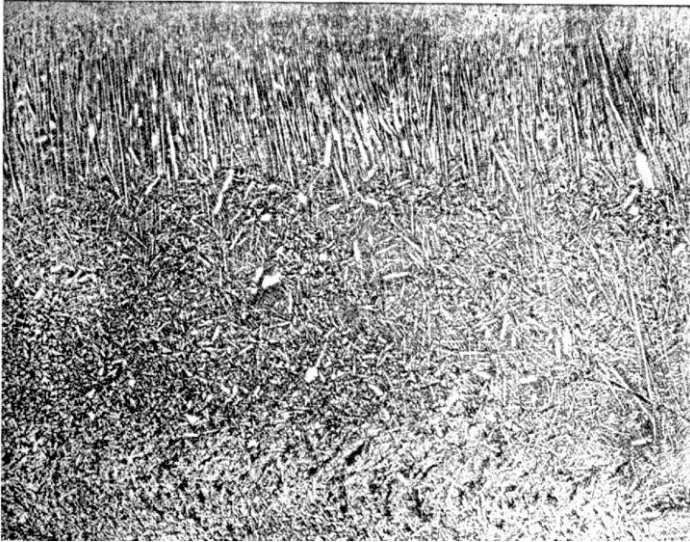


Рис. 1.5. Дендритная структура стальной отливки

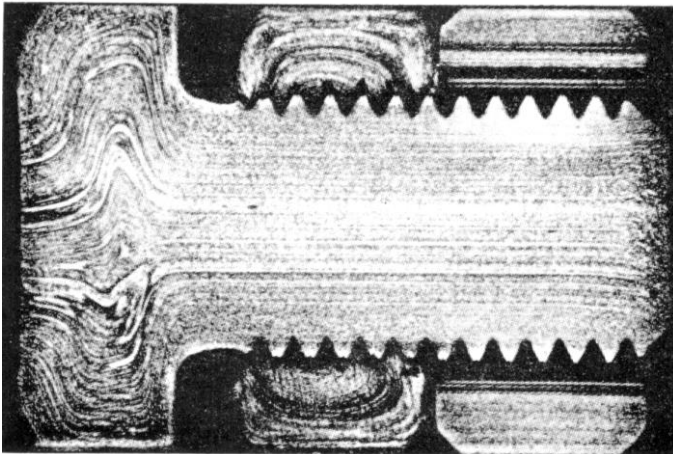


Рис. 1.6. Макроструктура деталей, полученных ковкой и резанием (головка болта получена осадкой, а остальная часть – вытяжкой в холодном состоянии; резьба была нарезана; одна из гаек была откована, другая – выточена из пруткового проката)

Волокнистое строение металла обуславливает резко выраженную анизотропию его свойств (различие их показателей вдоль и поперек волокна).

Пластичность, ударная вязкость и прочность образцов, вырезанных вдоль волокон, выше. Поэтому ответственные детали, особенно работающие при высоких динамических нагрузках (коленчатые валы, шестерни, шатуны, молотовые штампы, клапаны, крюки), изготавливают так, чтобы волокна в них не перерезались, а соответствовали конфигурации изделия (рис. 1.7). При обработке резанием детали из деформированной стали ее волокна перерезаются, что резко снижает прочность детали.

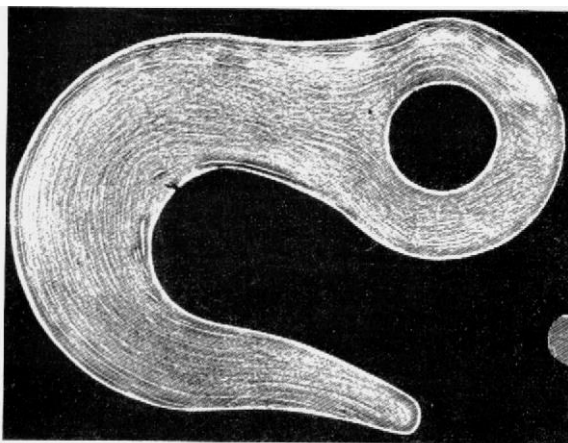


Рис. 1.7. Макроструктура соединительного крюка железнодорожного вагона

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.
2. Ознакомиться с методикой приготовления макрошлифов.
3. Изучить коллекцию образцов с основными дефектами, наблюдаемыми на их поверхности. Зарисовать эти дефекты.

4. Исследовать и зарисовать макроструктуру макрошлифов с химической неоднородностью (сварные соединения, детали, упрочненные термической, химико-термической обработкой или наплавкой), деталей, изготовленных резанием и обработкой давлением.

5. Оценить ликвацию на макрошлифе по методу Баумана.

6. Изучить и зарисовать основные виды изломов (вязкий, хрупкий, усталостный).

7. Сделать выводы и составить отчет в соответствии с заданиями. В отчете обязательно должны быть указаны тема, цель работы, пояснение к каждой рассмотренной макроструктуре.

Контрольные вопросы

1. Что называется макроанализом?
2. Что изучают при макроанализе?
3. Как приготовить макрошлиф?
4. Дефекты литого металла.
5. Дефекты термообработанного металла.
6. Дефекты сварных соединений.
7. Виды изломов.
8. Что называется ликвацией?
9. Как определить ликвацию углерода, серы, фосфора?
10. Метод серного отпечатка по Бауману.
11. Структура деформированного металла.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Рисунки изученных макрошлифов и изломов.
4. Пояснения к каждой рассмотренной макроструктуре и излому.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 2

МИКРОАНАЛИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: ознакомление с процессом приготовления микрошлифов; изучение устройства металлографического микроскопа и приобретение практических навыков работы на нем; проведение микроанализа сплавов и приобретение навыков зарисовки простейших микроструктур.

Теоретические сведения

Микроскопический анализ (микроанализ) металлов и сплавов заключается в исследовании строения (структуры) металла с помощью оптического или электронного микроскопа. Строение металлов и сплавов, наблюдаемое при помощи микроскопа, называется *микроструктурой*.

Между микроструктурой металлов и их свойствами существует четкая связь. Микроанализ позволяет определить форму и размеры отдельных зерен и фаз, а также их содержание, относительное расположение, выявить наличие имеющихся в металле включений, микродефектов и судить о свойствах металлов и сплавов, о предшествующей обработке этих материалов (литье, деформирование, термическая обработка). Микроанализу подвергают специально подготовленные образцы, называемые *микрошлифами*.

Микрошлифы готовят следующим образом. Место вырезки образца выбирают в зависимости от задач исследования (в ряде случаев порядок и место вырезки строго регламентируются ГОСТами). В случае выяснения причин разрушения деталей во время эксплуатации образцы вырезают вблизи места разрушения ножовкой, фрезой, резцом, алмазными, вулканитовыми кругами или электроискровым способом. При вырезании и последующем шлифовании образца зачастую необходимо охлаждение. Значительный нагрев недопустим, так как он может вызвать существенные структурные изменения металла.

Обычно образцы имеют форму цилиндра или четырехгранника с линейными размерами 10–20 мм. В случае, когда размеры микрошлифов малы (проволока, тонкий лист, мелкие

детали), последние закрепляют в специальных зажимах (струбцинах) или заливают в оправках легкоплавкими материалами (сплав Вуда, эпоксидные или акриловые смолы, сера, пластмассы).

Поверхность образца делают плоской и шлифуют вручную либо на станках наждачными шкурками. При этом необходимо соблюдать последовательность и плавность перехода от грубозернистых к мелкозернистым шкуркам. Для сухого шлифования применяют шкурку, выпускаемую промышленностью по ГОСТ 6456–82, для мокрого – водостойкую бумажную шкурку (ГОСТ 10054–82). Если шлифование ведут вручную, шлифовальную бумагу кладут на ровную плоскую поверхность (например, на стекло). После шлифования остатки абразива смывают водой с поверхности шлифа. Затем для удаления мелких рисок образец полируют.

Существующие способы полирования основаны или на механическом, или электрохимическом способе удаления материала, или на их комбинации. Механическое полирование ведут на полировальном станке, диск которого обтянут тканью (фетром, бархатом, тонким сукном). На ткань наносят пасту ГОИ или периодически поливают ее суспензией, содержащей мелкие абразивные частицы (окиси алюминия, хрома, железа и т. д.). Хорошим полирующим материалом являются алмазные пасты, содержащие алмазные микропорошки АСМ или АМ. Пасту наносят на бумажный лист, закрепленный на вращающемся диске, или на ткань. Когда поверхность приобретает зеркальный блеск, полирование прекращают. На качественно отполированном микрошлифе при наблюдении под микроскопом отсутствуют риски, царапины, вырывы (хвосты).

Микрошлиф промывают водой или спиртом, просушивают сжатым воздухом или фильтровальной бумагой. Весьма эффективно электрохимическое полирование, основанное на анодном растворении выступов шлифованной поверхности в гальванической ванне. Образец (анод) и в большинстве случаев аустенитную коррозионностойкую сталь (катод) опускают в ванну с электролитом. При пропускании тока выступы шлифованной поверхности растворяются, поверхность становится зеркальной.

После полирования под микроскопом сначала изучают нетравленный шлиф, затем – протравленный.

При изучении нетравленного шлифа можно обнаружить различные микродефекты. Наблюдаемые на шлифе различного цвета участки небольших размеров представляют собой неметаллические включения (оксиды, сульфиды, силикаты), которые ухудшают механические свойства сплавов. Выявленные при микроанализе размеры включений, их форму, содержание и характер распределения их в стали оценивают по шкале баллов по ГОСТ 1778–70 и делают вывод о пригодности стали для изготовления тех или иных деталей.

Черные включения больших размеров пластинчатой, хлопьевидной или шаровидной формы, обнаруживаемые в чугунах, представляют собой выделения графита. Чем больше дисперсность и изолированность графитных включений, чем совершеннее их геометрическая форма, тем выше механические свойства чугунов (см. работу 6).

После просмотра нетравленного микрошлифа его подвергают травлению, которое проводят в большинстве случаев погружением шлифа в соответствующий реактив (табл. 2.1). Продолжительность травления может составлять от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от его целей. Затем шлиф промывают водой, просушивают фильтровальной бумагой и изучают с помощью металлографического микроскопа. Последний, в отличие от биологического, позволяет рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете. Если структура шлифа выявлена нечетко, его травят дополнительно, если слишком затемнена – снова полируют и травят.

В силу различной интенсивности взаимодействия реактива с различными фазами создается микрорельеф поверхности. Наиболее протравившиеся (растворившиеся при протравливании) фазы, граничные зоны зерен при рассмотрении под микроскопом выглядят темными в отличие от светлых непротравившихся.

Устройство металлографического микроскопа и правила работы с ним. По расположению основных узлов различают вертикальные (МИМ-7, ММР-2Р, ММР-4, ММУ-3) и горизон-

тальные (МИМ-8М, МИМ-9, Neophot-21) металлографические микроскопы.

Таблица 2.1

Реактивы для травления микрошлифов

Реактив	Назначение
1–5 мл азотной кислоты, 100 мл этилового спирта (реактив Ржешотарского)	Выявление структуры сталей, в том числе после термической или химико-термической обработки, чугунов, магния
0,5–6 г пикриновой кислоты, 100 мл этилового спирта	Выявление структуры различных сталей, чугунов, ферросплавов
30 мл азотной кислоты, 20 мл уксусного альдегида	Выявление структуры коррозионно-стойких сталей с высоким содержанием никеля и кобальта, а также структуры сплавов никеля
3 мл азотной кислоты, 10 мл соляной кислоты, 100 мл этилового спирта	Выявление структуры коррозионно-стойких высокохромистых сталей
10 г калиевой соли гексациано-железной кислоты (красная кровяная соль), 10 г едкого калия, 100 мл дистиллированной воды (реактив Мураками)	Выявление карбидов, вольфрамитов в сталях и структуры высоколегированных хромоникелевых сталей
20 г сернокислой меди, 100 мл соляной кислоты, 100 мл дистиллированной воды (реактив Марбле)	Выявление структуры никелевых и кобальтовых сплавов, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей
5 мл хлорного железа, 10 мл соляной кислоты, 100 мл дистиллированной воды	Выявление структуры меди и ее сплавов
5 мл плавиковой кислоты (48%-я), 100 мл дистиллированной воды	Выявление структуры титановых сплавов
0,5 мл плавиковой кислоты (48%-я), 100 мл дистиллированной воды	Выявление структуры алюминиевых сплавов

Общее увеличение микроскопа при визуальном рассмотрении равно произведению увеличения объектива и окуляра:

$$V_0 = V_{об} \cdot V_{ок} = 250L / (F_{ок} \cdot F_{об}),$$

где L – оптическая длина тубуса, м;

$F_{ок}, F_{об}$ – фокусные расстояния объектива и окуляра, м.

Важная характеристика микроскопа – **разрешающая способность** (PC , m^{-1}) его оптической системы. Под разрешающей способностью понимают величину, обратную минимальному расстоянию d_{min} между двумя точками, когда они еще видны раздельно:

$$PC = 1 / d_{min} = 2n \sin \alpha / \lambda = 2A / \lambda,$$

где n – коэффициент преломления для среды между объектом и фронтальной линзой объектива;

α – половина отверстиеного угла фронтальной линзы объектива;

λ – длина волны света, м;

A – числовая апертура.

Чем меньше абсолютное значение α , тем выше PC системы, достигающая максимума при $A = 1,5$ и $\lambda = 6 \cdot 10^{-7}$ м:

$$PC_{max} = 2 \cdot 1,5 / (6 \cdot 10^{-7}) = 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-1}.$$

Микрошлифы обычно просматривают в воздушной среде ($n = 1$). Поместив между объектом и фронтальной линзой объектива среду с большим показателем преломления (например, каплю кедрового масла, $n = 1,52$), можно достичь максимального увеличения и разрешающей способности.

Максимальное полезное увеличение микроскопа, т. е. увеличение, при котором выявляются детали структуры, определяется по формуле:

$$V_n = PC_{max} / PC_2,$$

где $PC_2 = 1/d_2$, – максимальная разрешающая способность человеческого глаза, m^{-1} .

В рассматриваемом случае

$$V_n = 5 \cdot 10^8 / (3 \cdot 10^4).$$

Качественное изображение микроструктуры обеспечивается, когда общее увеличение оптической системы не превышает ее полезного увеличения. Последнее для видимого света в данной системе принимают равным 500–1000 апертур взятого объектива. Качество изображения зависит также и от степени коррекции ошибок изображений (геометрической или хроматической аберрации).

В настоящее время наиболее часто в лабораториях вузов используется металлографический микроскоп МИМ-7 (рис. 2.1, табл. 2.2). Он состоит из следующих основных систем: оптической, осветительной с фотографической аппаратурой и механической.

Таблица 2.2

Увеличение микроскопа МИМ-7

Характеристики объективов		Увеличение						
		При визуальном наблюдении				При фотографировании		
F, мм	A	7*	10*	15*	20*	7*	10*	15*
23,17	0,17	60	90	130	170	70	120	160
13,89	0,30	100	140	200	300	115	200	270
8,16	0,37	170	240	360	500	200	340	450
6,16	0,65	–	320	500	650	–	440	600
2,77	1,25	500	720	1080	1440	575	1000	1350

*A – числовая апертура; F – фокусное расстояние; * – кратность увеличения окуляра.

Оптическая система микроскопа включает объектив и окуляр, от которых зависит увеличение микроскопа, и ряд вспомогательных элементов (призмы, зеркала, линзы и др.). Объектив, представляющий собой сложное сочетание линз, дает действительное увеличенное обратное изображение микроструктуры микрошлифа.

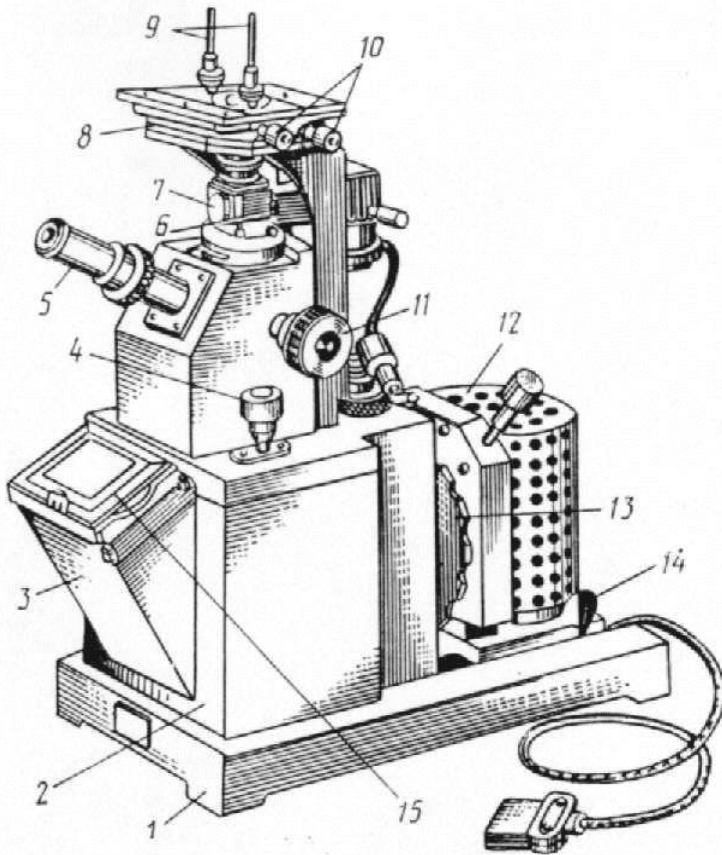


Рис. 2.1. Общий вид микроскопа МИМ-7:

- 1 – основание; 2 – корпус; 3 – фотокамера; 4 – микрометрический винт;
 5 – визуальный тубус с окуляром; 6 – рукоятка иллюминатора; 7 – иллюмина-
 тор; 8 – предметный столик; 9 – клеммы; 10 – винты перемещения столика;
 11 – макрометрический винт; 12 – осветитель; 13 – рукоятка светофильтров;
 14 – стопорное устройство осветителя; 15 – рамка с матовым стеклом

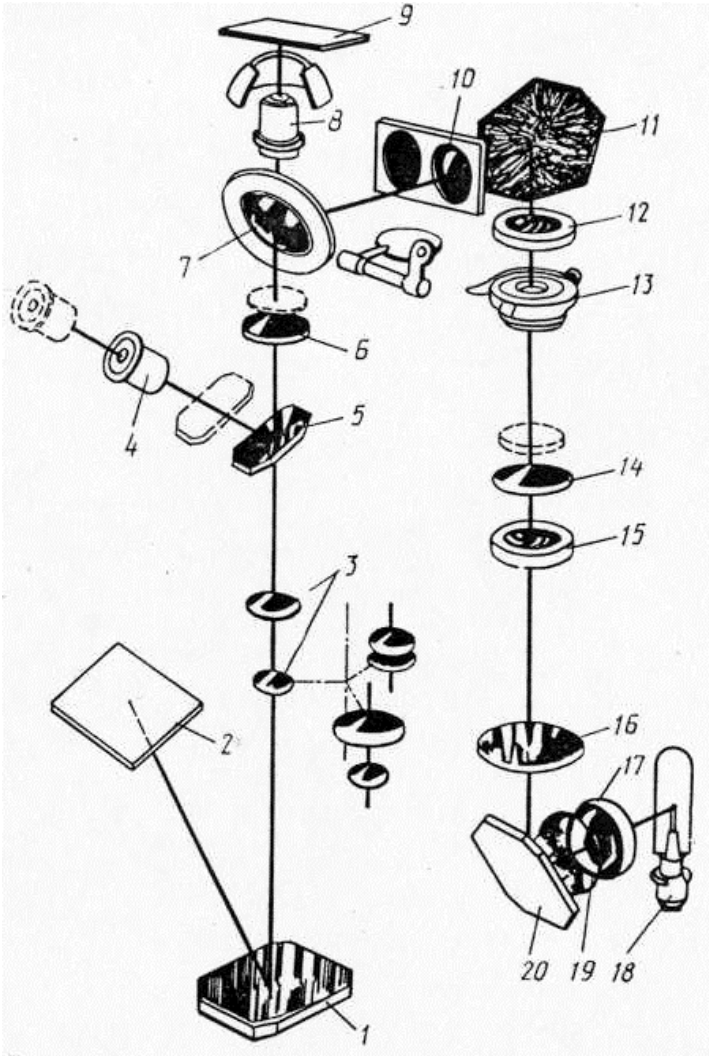


Рис. 2.2. Оптическая система микроскопа МИМ-7:

- 1 – зеркало; 2 – фотопластинка; 3 – фотоокуляр; 4 – окуляр; 5 – зеркало;
 6 – ахроматическая линза; 7 – полупрозрачная пластинка; 8 – объектив;
 9 – микрошлиф; 10 – линза; 11 – пентапризма; 12 – полевая диафрагма;
 13 – фотозатвор; 14 – линза; 15 – апертурная диафрагма; 16 – линза; 17 – кол-
 лектор; 18 – осветительная лампа; 19 – светофильтр; 20 – зеркало

Окуляр состоит из нескольких линз и предназначен для увеличения изображения, полученного объективом, и преобразования его из обратного в прямое. В табл. 2.2 содержатся характеристики объективов и окуляров для микроскопа МИМ-7 и создаваемые им увеличения.

В осветительную систему микроскопа входит источник света, серия линз, светофильтров и диафрагм. Источником света является электрическая лампа (17 В), включаемая в сеть через понижающий трансформатор.

Часть света, излучаемого лампой **18** (рис. 2.2), проходит через коллектор **17**, светофильтр **19** на зеркало **20** и далее через линзу **16**, апертурную диафрагму **15**, линзу **14**, полевую диафрагму **12**, пентапризму **11**, линзу **10** поступает на плоскопараллельную отражательную пластинку **7**. Пластинка **7** полупрозрачная, пропускает около $2/3$ светового потока и лишь около $1/3$ его отражает на объектив **8**, который фокусирует лучи на поверхности микрошлифа **9**. Отраженные от объекта лучи проходят через объектив **8**, плоскопараллельную пластинку **7**, ахроматическую линзу **6**, зеркало **5**, окуляр **4** и попадают в глаз наблюдателя. Для фотографирования тубус с окуляром **4** и зеркалом **5** выдвигают, и лучи проходят через один из трех фотоокуляров **3** на зеркало **1** и фотопластинку или матовые стекла **2**. Экспонирование осуществляют с помощью фотозатвора **13**.

Механическая система микроскопа включает макровинт, стопорное устройство для него (стопор), микровинт, предметный столик с двумя винтами, корпус, штатив и ряд других элементов.

Работу на микроскопе рекомендуется проводить таким образом. На предметный столик **8** (см. рис. 2.1) над прорезью помещают образец, обращенный полированной поверхностью к объективу. Затем включают микроскоп в электросеть, устанавливая при этом необходимый накал лампы освещения. Затем, опустив рукоятку стопора, плавным вращением макровинта **11** поднимают или опускают предметный столик, чем обеспечивают приблизительное фокусирование. При этом непрерывно ведут наблюдение в окуляр. Приближение поверхности микрошлифа к фокальной плоскости характеризуется значительным ростом освещенности поля зрения и появлением изображения микроструктуры. Затем, придерживая правой рукой макровинт,

левой – стопорят его. Точное фокусирование проводят вращением микровинта **4**. Перемещая предметный столик с помощью винтов **10** в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях, можно изучить различные участки микрошлифа. Регулируя диафрагму и светофильтры, устанавливают такие интенсивность и контрастность света, которые обеспечивают необходимое качество изображения при наименьшей утомляемости глаза.

Изучение протравленного шлифа позволяет решать ряд задач при анализе микроструктурного строения металла или сплава. Сначала остановимся на определении размера зерна.

Измерить размер какого-либо микроскопического объекта, например, зерна металла, можно с помощью окуляра-микрометра, т. е. окуляра, в который вставлена пластинка с линейкой. Прежде чем начать измерение, необходимо определить цену деления окуляра-микрометра при выбранном объективе (рис. 2.3).

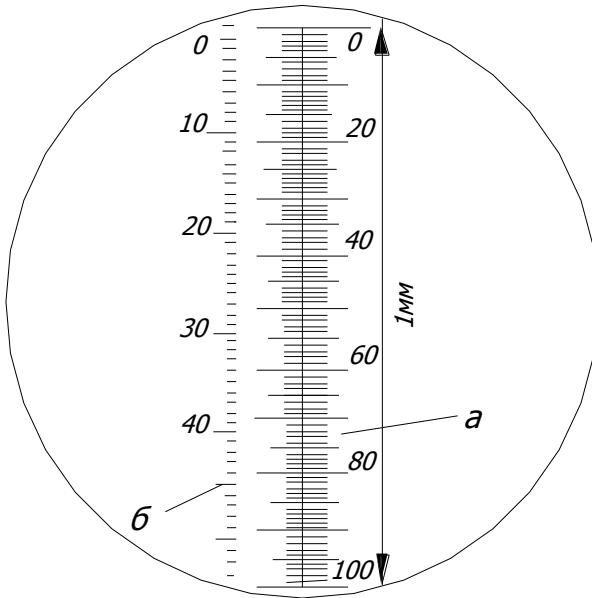


Рис. 2.3. Схема определения цены деления окуляра:
а – шкала объекта-микрометра; б – шкала окуляра-микрометра

На предметный столик кладут объект-микрометр (эталонная пластинка, каждое из 100 делений шкалы которой соответствует 10^{-5} м). После фокусирования совмещают обе шкалы в положении, показанном на рис. 2.3 (поворачивая окуляр и вращая винты предметного столика). Затем определяют, сколько делений шкалы объекта-микрометра совпадает с делениями шкалы окуляра-микрометра. При этом необходимо принимать во внимание всю окулярную шкалу.

Например, при данном объективе 100 делений объекта-микрометра совпадает с 61 делением окуляра-микрометра. Цена деления шкалы окуляра-микрометра (м) определяется по формуле:

$$C_{ок} = C_{об}A/B,$$

где $C_{об}$ – цена деления шкалы объекта-микрометра (0,01 мм);

A – число совмещенных делений объекта-микрометра;

B – число совмещенных делений окуляра-микрометра.

Подставив числовые значения, получаем:

$$C_{ок} = 0,01 \cdot 10^{-3} \cdot 100/61 = 1,64 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Теперь, зная цену деления и длину всей линейки окуляра-микрометра, при данном увеличении можно измерить размер любого микрообъекта (зерна, диффузионного слоя, длины графитного включения и т. д.). Размер зерна – средний размер случайных сечений зерен в плоскости микрошлифа – определяют в соответствии с ГОСТ 6539–82 (СТ СЭВ 1959–79) следующими методами:

визуального сравнения с эталонными шкалами;

подсчета числа пересечений границ зерен отрезками шкалы;

подсчета количества зерен, приходящихся на единицу площади поверхности;

измерения длин хорд.

Рассмотрим сущность первых двух наиболее простых методов. Изображения нескольких типичных мест, наблюдаемые в окуляре, на матовом стекле или зафиксированные на фотоснимке при 100-кратном увеличении микроскопа, сравнивают с эталонами и, отыскав аналог, определяют номер зерна. Если по-

следний выходит за пределы 2–10 номеров, используют другие увеличения и данные табл. 2.3.

Сущность второго метода состоит в подсчете числа зерен, пересеченных серией отрезков шкалы равной длины, и в нахождении среднего условного диаметра, т. е. частного от деления суммы длин всех отрезков на число пересеченных зерен. Размер зерна этим методом определяют, например, следующим образом. Подобрать такое увеличение, чтобы на исследуемой поверхности было не менее 50 зерен, а линейка окуляра-микрометра пересекала не менее 10 зерен (зерна на концах линейки, не пересеченные целиком, принимают за одно), подсчитывают число пересеченных линейкой зерен. Проведя расчет для двух взаимно перпендикулярных отрезков, повторяют его не менее чем для пяти характерных мест шлифа. Затем, разделив суммарную длину всех отрезков на число пересечений (зерен), получают средний условный диаметр зерна и по ГОСТ 5639–82 определяют номер зерна.

Таблица 2.3

Пересчет номера зерна на стандартное увеличение (Γ 100)

Увеличение	Номер зерна при увеличении в 100 раз								
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
25	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50			1	2	3	4	5	6	7
200							1	2	5
400									1
Увеличение	Номер зерна при увеличении в 100 раз								
	6	7	8	9	10	11	12	13	14
25	10								
50	8	9	10						
200	4	5	6	7	8	9	10		
400	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800		1	2	3	4	5	6	7	8

Можно определять размер зерна с использованием номограммы (рис. 2.4), по которой можно установить зависимость

между средним размером зерна (мкм), числом зерен на 1 мм^2 площади шлифа и номером зерна. Например, при среднем диаметре зерна 45 мкм на площади 1 мм^2 находится 500 зерен, соответствующих номеру 6.

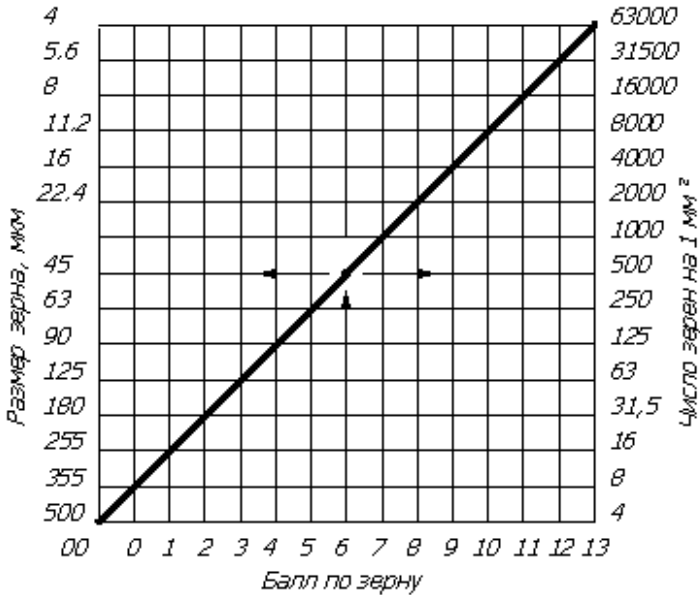


Рис. 2.4. Номограмма для определения размера зерна

Размер зерна можно определить также методом площадей, когда подсчитывают число зерен, приходящихся на единицу площади поверхности шлифа. Весьма эффективно для получения количественных характеристик структуры (размер зерен, число фаз и их распределение в металле по величине и форме) использование автоматических анализаторов структуры типа «Квантимет».

От размера зерна в значительной степени зависят свойства металла. Так, мелкозернистый металл обладает более высоким комплексом механических свойств, чем крупнозернистый.

Микроанализ позволяет также определять микроструктуру сплавов. Сплавы, медленно охлаждаемые при затвердевании или отжиге, имеют равновесные микроструктуры, соответствующие их диаграммам состояния. Так, в структуру чистых металлов и твердых растворов входят сравнительно одинаковые по форме зерна с четкими границами (рис. 6.1). Стали с содержанием углерода до 0,8 % состоят из белых зерен феррита и темных перлита (рис. 6.3). Проведение микроанализа данных сталей при больших увеличениях (например, более чем в 200 раз) позволяет выяснить, что перлит представляет собой смесь двух фаз (рис. 6.4). В эвтектоидных сталях (рис. 6.5, 6.6) цементит может иметь форму сетки по границам зерен или быть зернистым (выделение хрупкого цементита в виде сетки в большой степени снижает пластичность стали). Сплав может иметь многофазное строение и содержать кристаллы однородной фазы, эвтектики, мелких выделений избыточных фаз.

Правильная расшифровка микроструктуры, фазового состава, оценка формы и количественного соотношения фаз сплава позволяют довольно точно судить о его свойствах.

Микроанализ сталей дает возможность определить, какие из них не подвергались холодному пластическому деформированию, а какие имеют типичные для деформированного состояния структуры. Различие структур указывает и на различие механических свойств сталей. Деформированная сталь более прочна и менее пластична, ее свойства неодинаковы во взаимно перпендикулярных направлениях.

Сравнивая две микроструктуры стали одной и той же марки, нагретой до различных температур, легко выявить перегретую сталь. Она имеет более крупные зерна, а значит, худшие механические свойства. Микроанализ позволяет выявить наличие диффузионных слоев в металле (химико-термическая обработка), оценить их толщину и примерное содержание насыщающего элемента (рис. 10.2, 10.3, 10.4).

Поскольку разрешающая способность оптических микроскопов не превышает $5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^{-1}$, то изучение более тонких деталей структуры материала проводят методами электронной микроскопии, основанными на взаимодействии электронов с твердым телом. Наиболее широко применяют просвечивающие

(ПЭМ) и растровые электронные микроскопы (РЭМ). ПЭМ формирует изображение благодаря неодинаковому рассеиванию потока электронов при их прохождении через объект – тонкую пленку металла или слепок (реплику) с изучаемой поверхности микрошлифа. Использование электронных излучений с очень малой длиной волны $(0,04...0,12) \cdot 10^{-10}$ м обеспечивает разрешающую способность системы до $(2...5) \cdot 10^{-10}$ м⁻¹, т. е. на уровне межатомных расстояний. В лабораторных работах № 8 и 9 приведены фотографии микроструктур, полученные с помощью ПЭМ.

РЭМ обеспечивает меньшую разрешающую способность системы $(2,5...3) \cdot 10^8$ м⁻¹, чем просвечивающий, но позволяет изучать непосредственно поверхность объекта. Направляемый им узкий пучок электронов (зонд) обегает изучаемую поверхность. Отраженные при этом электроны формируют изображение. РЭМ обеспечивает большую глубину резкости и высокое качество изображения.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.
2. Изучить устройство металлографического микроскопа, усвоить приемы работы на нем и начертить оптическую схему микроскопа.
3. Приготовить микрошлиф (например, серого чугуна или стали), изучить и зарисовать его структуру до и после травления.
4. Определить цену деления окуляра-микрометра.
5. Определить размер зерна по микрошлифу методом сравнения и одним из методов, предложенных преподавателем. Определить номер зерна.
6. Провести микроанализ сплава. Охарактеризовать его микроструктуру и фазовый состав.
7. Сделать выводы и составить отчет о работе в соответствии с вышеуказанными пунктами заданий.

При выполнении лабораторной работы желательно использовать атласы с фотоснимками микроструктур, а также ознакомиться со спецификой зарисовки микроструктур (рисунки наиболее типичных из них приведены в прил. 14).

Следует помнить о том, что металлографический микроскоп – точный, сложный и дорогостоящий прибор. Поэтому обращаться с ним нужно осторожно. Запрещается резко перемещать винты и рукоятки, вращать зафиксированный макровинт, прикасаться руками к линзам, разбирать узлы и оптические детали. Недопустимо попадание на линзы влаги или реактива, поэтому микрошлиф можно устанавливать на предметный столик только после тщательной просушки.

Контрольные вопросы

1. Что называется микроанализом?
2. Как приготовить микрошлиф?
3. Устройство и принцип работы металлографического микроскопа.
4. Что изучают при микроанализе?
5. Как определить размер зерна металла?

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Оптическая схема микроскопа МИМ–7.
4. Результаты выполненных заданий.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: ознакомиться с основными методами определения твердости; приобрести практические навыки измерения твердости различных материалов.

Теоретические сведения

Твердость как характеристика свойств материалов

В лабораторных и заводских условиях применяют различные способы определения твердости металлов для характеристики их механических свойств. Твердость металлов измеряют при помощи воздействия на поверхность металла наконечника, изготовленного из малодеформирующегося материала (твердая закаленная сталь, алмаз, сапфир или твердый сплав) и имеющего форму шарика, конуса, пирамиды или иглы. Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия наконечника. Твердость можно измерять вдавливанием наконечника (способ вдавливания), царапаньем поверхности (способ царапанья), ударом или же по отскоку наконечника-шарика. Твердость, определенная царапаньем, характеризует сопротивление разрушению (для большинства металлов путем среза); твердость, определенная по отскоку, – упругие свойства; твердость, определенная вдавливанием, – сопротивление пластической деформации.

Наибольшее применение получило измерение твердости вдавливанием. В результате вдавливания с достаточно большой нагрузкой поверхностные слои металла, находящиеся под наконечником и вблизи него, пластически деформируются. После снятия нагрузки остается отпечаток. Особенность происходящей при этом деформации заключается в том, что она протекает только в небольшом объеме, окруженном недеформированным металлом. В таких условиях испытания, близких к всестороннему неравномерному сжатию, возникают, главным образом, касательные напряжения, а доля растягивающих напряжений незна-

чительна по сравнению с получаемыми при других видах механических испытаний (на растяжение, изгиб, кручение, сжатие). При измерении твердости вдавливанием пластическую деформацию испытывают не только пластичные металлы, но и металлы (например, чугун), которые при обычных механических испытаниях (на растяжение, сжатие, кручение, изгиб) разрушаются хрупко, почти без макроскопически заметной пластической деформации.

Таким образом, твердость характеризует сопротивление пластической деформации и представляет собой механическое свойство металла, отличающееся от других его механических свойств способом измерения.

Выделяются следующие преимущества измерения твердости:

1. Между твердостью пластичных металлов, определяемой способом вдавливания, и другими механическими свойствами (главным образом, пределом прочности), существует количественная зависимость. Величина твердости характеризует предел прочности металлов, получающих в испытаниях на растяжение сосредоточенную пластическую деформацию (шейку), а именно сталей (кроме сталей с аустенитной и мартенситной структурой) и многих цветных сплавов. Это связано с тем, что при испытаниях на растяжение наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению и отнесенной к его первоначальной площади (предел прочности), отвечает сосредоточенная пластическая деформация (образование шейки), а не разрушение образца. Такая пластическая деформация аналогична деформации, создаваемой в поверхностных слоях металла при измерении твердости вдавливанием наконечника.

Подобная количественная зависимость не наблюдается для хрупких материалов, которые при испытаниях на растяжение (или сжатие, изгиб, кручение) разрушаются без заметной пластической деформации, а при измерении твердости получают пластическую деформацию. Однако в ряде случаев и для этих металлов (например, серых чугунов) наблюдается качественная зависимость между пределом прочности и твердостью; возрастанию твердости обычно соответствует увеличение предела прочности на сжатие. По значениям твердости можно определять также и некоторые пластические свойства металлов.

Твердость, определенная вдавливанием, характеризует также предел выносливости некоторых металлов, в частности, меди, дуралюмина и сталей в отожженном состоянии.

2. Измерение твердости по технике выполнения значительно проще, чем определение прочности, пластичности и вязкости. Испытания твердости не требуют изготовления специальных образцов и выполняются непосредственно на проверяемых деталях после зачистки на поверхности ровной горизонтальной площадки, а иногда даже и без такой подготовки. Измерения твердости выполняются быстро, например, при вдавливании конуса за 30–60 с, а при вдавливании шарика за 1–3 мин.

3. Измерение твердости обычно не влечет за собой разрушения проверяемой детали, и после измерения ее можно использовать по своему назначению, в то время как для определения прочности, пластичности и вязкости необходимо изготовление специальных образцов из детали.

4. Твердость можно измерять на деталях небольшой толщины, а также в очень тонких слоях, не превышающих (для некоторых способов измерения твердости) десятых долей миллиметра или в микрообъемах металла; в последнем случае измерения проводят способом микротвердости.

Многие способы измерения твердости пригодны для оценки различных по структуре и свойствам слоев металла, например, поверхностного слоя цементованной, азотированной или закаленной стали, имеющей разную твердость по сечению детали. Методом определения микротвердости можно также измерять твердость отдельных составляющих в сплавах. Для полной характеристики свойств металла необходимо, наряду с измерением твердости, проводить остальные механические испытания. Поскольку при измерении твердости в большинстве случаев детали не разрушаются, то эти измерения можно применять для сплошного контроля деталей, в то время как определение характеристик прочности и пластичности проводят в качестве выборочного контроля. Следует различать два способа определения твердости вдавливанием: измерение макротвердости и измерение микротвердости.

Измерение твердости (макротвердости) характеризуется тем, что в испытываемый материал вдавливается тело, проникаю-

щее на сравнительно большую глубину, зависящую прежде всего от величины прилагаемой нагрузки и свойств металла. Кроме того, во многих испытаниях вдавливается тело значительных размеров, например, стальной шарик диаметром до 10 мм, в результате чего в деформируемом объеме оказываются представленными все фазы и структурные составляющие сплава в количествах и с расположением, характерными для измеряемого материала. Измеренная твердость должна в этом случае характеризовать твердость всего испытываемого материала.

Выбор формы, размеров наконечника и величины нагрузки зависит от целей испытания, структуры, ожидаемых свойств, состояния поверхности и размеров испытываемого образца. Если металл имеет гетерогенную структуру с крупными выделениями отдельных структурных составляющих, различных по свойствам (например, серый чугун, цветные подшипниковые сплавы), то для испытания твердости следует выбирать шарик большого диаметра. Если же металл имеет сравнительно мелкую и однородную структуру, то малые по объему участки испытываемого металла могут быть достаточно характерными для оценки свойств материала в целом и его твердости в частности. В этих случаях испытания можно проводить вдавливанием тела меньшего размера, например, алмазного конуса или пирамиды, на меньшую глубину и, следовательно, при небольшой нагрузке.

При испытании металлов с высокой твердостью, например, закаленной или низкоотпущенной стали, приведенное условие является даже обязательным, поскольку вдавливание стального шарика или алмаза с большой нагрузкой может вызывать деформацию шарика или скалывание алмаза. Однако значительное снижение нагрузки нежелательно, так как это приведет к резкому уменьшению деформируемого объема и может дать значения, нехарактерные для основной массы металла. Нагрузки и размеры получаемых в материалах отпечатков не должны быть меньше определенных пределов.

Цель измерения микротвердости состоит в определении твердости отдельных зерен, фаз и структурных составляющих сплава (а не «усредненную» твердость, как при измерении макротвердости). В данном случае объем, деформируемый вдавливанием, должен быть меньше объема (площади) измеряемого

зерна, поэтому прилагаемая нагрузка выбирается небольшой. Кроме того, микротвердость измеряют для характеристики свойств очень малых по размерам деталей.

У полимерных материалов измерение твердости дает меньше информации об их свойствах, так как между твердостью и прочностью этих материалов нет определенной зависимости. Результаты измерений являются лишь дополнительной характеристикой свойств полимерных материалов

Значительное влияние на результаты испытаний твердости оказывает состояние поверхности измеряемого материала. Если поверхность неровная (криволинейная или с выступами), то отдельные участки в различной степени участвуют в сопротивлении вдавливанию и деформации, что приводит к ошибкам в измерении. Чем меньше нагрузка для вдавливания, тем более тщательно должна быть подготовлена поверхность. Она должна представлять шлифованную горизонтальную площадку, а для измерения микротвердости – полированную (в этом случае при изготовлении шлифа нельзя допускать наклепа в поверхностном слое).

Измеряемая поверхность должна быть установлена горизонтально, т. е. перпендикулярно действию вдавливаемого тела. Противоположная сторона образца также должна быть зачищена и не иметь окалины, так как последняя при нагружении образца сминается, что искажает результаты измерения.

Измерение твердости вдавливанием шарика (твердость по Бринеллю)

Способ измерения твердости вдавливанием шарика используется для определения твердости как металлов, так и полимерных материалов. В материал вдавливается стальной шарик, и по величине поверхности отпечатка, оставляемого шариком, определяют значение твердости. Шарик вдавливают с помощью пресса. В некоторых конструкциях давление осуществляется гидравлическим способом, а в других – грузами, перемещение которых осуществляется электродвигателем.

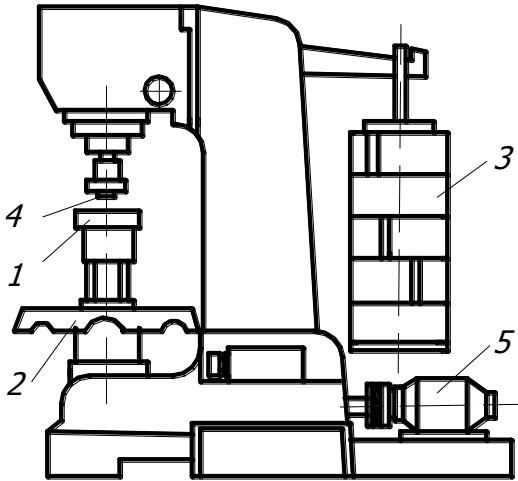


Рис. 3.1. Схема прибора для измерения твердости вдавливанием шарика (измерение по Бринеллю):
1 – столик; 2 – маховик; 3 – груз; 4 – индентор; 5 – двигатель

Испытуемый образец (деталь) устанавливают на столике *1* в нижней части неподвижной станины прессы (рис. 3.1), шлифованной поверхностью кверху. Поворотом вручную маховика *2* по часовой стрелке столик прибора поднимают так, чтобы шарик *4* мог вдавиться в испытуемую поверхность. В прессах с электродвигателем вращают маховик *2* до упора и нажатием кнопки включают двигатель *5*. Последний сначала перемещает коромысло и постепенно нагружает шток, а следовательно, и вдавливает шарик под действием нагрузки *3*, сообщаемой привешенным к коромыслу грузом. Эта нагрузка действует в течение определенного времени, обычно 10–60 с, в зависимости от твердости измеряемого материала (табл. 3.1), после чего вал двигателя, вращаясь в обратную сторону, соответственно перемещает коромысло и снимает нагрузку. После автоматического выключения двигателя, поворачивая маховик *2* против часовой стрелки, опускают столик прибора и затем снимают образец. Регулировкой реле двигателя можно изменять время приложения нагрузки.

Условия испытаний металлов на твердость по Бринеллю

Металлы	Твердость НВ, МПа	Толщина образца, мм	Соотношение между Р и D^2	Диаметр шарика D, мм	Нагрузка Р, кгс	Выдержка под нагрузкой, с
Черные	1400–4500	6–3	$P = 30D^2$	10	3000	10
		4–2		5	750	10
Черные	≤ 1400	> 2	$P = 10D^2$	2,5	187,5	10
		> 6		10	3000	10
Цветные	≥ 1300	6–3	$P = 30D^2$	5	250	10
		< 3		2,5	62,5	10
Цветные	350–1300	6–3	$P = 30D^2$	10	3000	30
		4–2		5	750	30
Цветные	350–1300	< 3	$P = 10D^2$	2,5	187,5	30
		9–3		10	1000	30
Цветные	80–350	6–3	$P = 10D^2$	5	250	30
		2–3		2,5	62,5	30
Цветные	80–350	> 6	$P = 2,5D^2$	10	250	60
	80–350	6–3		5	62,5	60
	80–350	< 3		2,5	15,6	60

В образце остается отпечаток со сферической поверхностью (лунка). Диаметр отпечатка измеряют лупой, на окуляре которой нанесена шкала с делениями, соответствующими десятым долям миллиметра. Диаметр отпечатка измеряют с точностью до 0,05 мм (при вдавливании шарика диаметром 10 и 5 мм) в двух взаимно перпендикулярных направлениях; для определения твердости следует принимать среднюю из полученных величин. Имеются приборы (бринископы), в которых получаемый отпечаток в увеличенном масштабе проецируется на экране прибора и диаметр этого отпечатка измеряется линейкой.

При измерениях расстояние от центра получаемого отпечатка до края образца должно быть не меньше двух диаметров отпечатка во избежание искажения результатов из-за «выпучивания» края образца. Каждое последующее измерение надо про-

водить на расстоянии не меньше двух диаметров предыдущего отпечатка. Число твердости по Бринеллю HB определяется как отношение нагрузки, действующей на шарик, к поверхности отпечатка:

$$HB = \frac{2P}{pD(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, [МПа]$$

- где P – нагрузка на шарик, н;
 F – поверхность отпечатка, м²;
 D – диаметр вдавливаемого шарика, м;
 d – диаметр отпечатка, м.

Получаемое число твердости при прочих равных условиях определяется диаметром отпечатка d . Он тем меньше, чем выше твердость испытуемого металла. Однако получение постоянной и одинаковой зависимости между величиной нагрузки и диаметром отпечатка, необходимое для точного определения твердости, сравнительно надежно достигается только при соблюдении определенных условий. При вдавливании шарика на разную глубину, т. е. с разной нагрузкой для одного и того же материала, не соблюдается закон подобия между получаемыми диаметрами отпечатка.

Наибольшие отклонения наблюдаются, если шарик вдавливается с малой нагрузкой и оставляет отпечаток небольшого диаметра или вдавливается с очень большой нагрузкой и оставляет отпечаток большого диаметра, приближающегося по величине к диаметру шарика. Поэтому твердость измеряют при постоянном соотношении между величиной нагрузки P и квадратом диаметра шарика D^2 . Это соотношение должно быть различным для металлов разной твердости. Деформация металла в разных участках под шариком неодинакова. Вызываемая этим неоднородность напряженного состояния возрастает с увеличением поверхности отпечатка, т. е. величины нагрузки. В процессе вдавливания, наряду с пластической деформацией измеряемого металла, происходит также упругая деформация вдавливаемого шарика. Величина этой деформации, искажающей результаты определения, возрастает при измерении твердых материалов. Этим методом производят измерение твердости металлов

небольшой и средней твердости (для стали с твердостью не более 4500 НВ).

Известное влияние оказывает также длительность выдержки металла под нагрузкой. Легкоплавкие металлы (свинец, цинк, баббиты), имеющие низкую температуру рекристаллизации, испытывают пластическую деформацию не только в момент вдавливания, но и в течение некоторого времени после приложения нагрузки. С увеличением выдержки под нагрузкой пластическая деформация этих металлов практически стабилизируется. Для металлов с высокими температурами плавления влияние продолжительности выдержки под нагрузкой незначительно, что позволяет применять более короткие выдержки (10–30 с). ГОСТом установлены нормы для испытаний по Бринеллю (см. табл. 3.1).

Твердость полимерных материалов, как и их прочность, в большой степени зависит от длительности приложения нагрузки. При измерении твердости шариком определенного диаметра и с установленными нагрузками нет необходимости проводить расчет по указанной выше формуле. На практике пользуются заранее составленными таблицами, указывающими число **НВ** в зависимости от диаметра отпечатка и соотношения между нагрузкой **P** и поверхностью отпечатка **F**. При указании твердости **НВ** иногда отмечают принятую нагрузку и диаметр шарика **D**.

Между пределом прочности (МПа) и числом твердости **НВ** различных металлов существует следующая зависимость:

Сталь с твердостью НВ:

1200–1750..... $\sigma_B \approx 3,4\text{НВ}$

1750–4500..... $\sigma_B \approx 3,5\text{НВ}$

Медь, латунь, бронза:

Отожженная $\sigma_B \approx 5,5\text{НВ}$

Наклепанная $\sigma_B \approx 4,0\text{НВ}$

Алюминий и алюминиевые сплавы с твердостью НВ:

200–450..... $\sigma_B \approx (3,3...3,6)\text{НВ}$

Дуралюмин:

Отожженный $\sigma_B \approx 3,6\text{НВ}$

После закалки и старения..... $\sigma_B \approx 3,5\text{НВ}$

Измерение площади отпечатка (лунки) $F_{\text{лунк}}$ и площади проекции отпечатка $F_{\text{пр}}$ позволяет охарактеризовать пластичность стали по формуле:

$$\psi_{\text{вдавл}} = (F_{\text{лунк}} - F_{\text{пр}}) / F_{\text{лунк}}$$

Величина $\psi_{\text{вдавл}}$ связана с относительным сужением ψ (%).

В меньшей степени соблюдается точная количественная зависимость между числами твердости **НВ** и пределом выносливости. Сравнительно простая зависимость существует лишь для сплавов в равновесном (отожженном) состоянии. Для этих сплавов предел выносливости, определяемый в условиях повторно-переменного изгиба вращающегося образца при отсутствии резких переходов по сечению, надрезов, царапин на поверхности и обезуглероживания, характеризуется следующими данными: медь – **0,15 НВ**; дуралюмин – **0,12 НВ**; сталь с 0,2 % С – **0,15 НВ**; сталь с 0,45 % С – **0,15 НВ**; сталь с 0,77 % С – **0,12 НВ**.

Эти данные соответствуют соотношению, по которому предел выносливости составляет примерно **0,5 $\sigma_{\text{в}}$** . Для стали в закаленном и отпущенном или нормализованном состоянии, дуралюмина после старения и для металлов в холоднодеформированном состоянии предел усталости не может быть достаточно точно определен по результатам измерения твердости.

Измерение твердости вдавливанием стального шарика не является универсальным способом. Этот способ не позволяет: испытывать материалы с твердостью более 4500 НВ; измерять твердость тонкого поверхностного слоя (толщиной менее 1–2 мм), так как стальной шарик продавливает этот слой и проникает на большую глубину. Толщина измеряемого слоя (или образца) должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка.

Измерение твердости вдавливанием конуса или шарика (твердость по Роквеллу)

Принципиальное отличие измерения твердости по способу Роквелла от измерения по способу Бринелля состоит в том, что твердость определяют по глубине отпечатка, получаемого при

вдавливании алмазного конуса или стального шарика, а не по площади отпечатка. По способу Роквелла можно изменять нагрузку в широких пределах, без изменения значений твердости, так как при вдавливании конуса сохраняется закон подобия, а условия деформации под вершиной конуса с увеличением давления не изменяются.

Твердость измеряют на приборе (рис. 3.2), в нижней части неподвижной станины которого установлен столик **6**. В верхней части станины укреплены индикатор **4**, масляный регулятор **2** и шток **5**, в котором устанавливается наконечник с алмазным конусом, имеющим угол в вершине 120° , или со стальным шариком диаметром 1,59 мм. Индикатор **4** представляет собой циферблат, на котором нанесены две шкалы (черная и красная) и имеются две стрелки – большая (указатель твердости), вращающаяся по шкале, и маленькая для контроля величины предварительного нагружения, сообщаемого вращением маховика **7**.

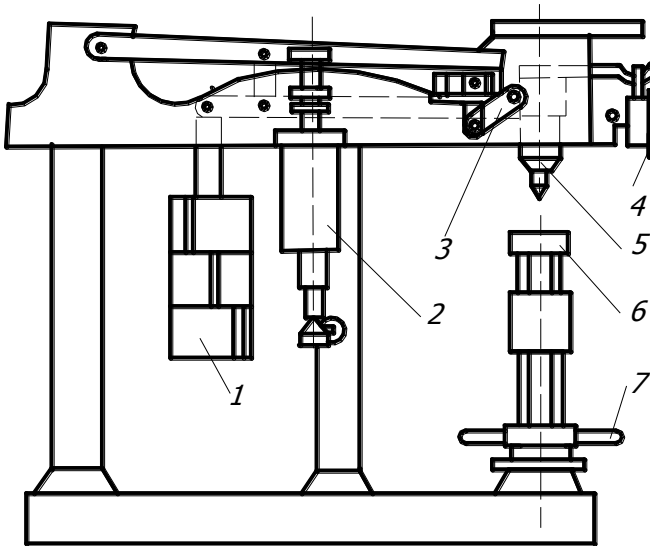


Рис. 3.2. Схема прибора для измерения твердости вдавливанием алмазного конуса или стального шарика (измерение по Роквеллу):
1 – груз; 2 – масляный регулятор; 3 – рукоятка; 4 – индикатор; 5 – шток;

6 – столик; 7 – маховик

Образец для измерений должен иметь тщательно зашлифованную плоскую поверхность, в которую вдавливается конус или шарик, а противоположная параллельная поверхность также должна быть ровной, зачищенной. Поворотом маховика по часовой стрелке столик поднимают таким образом, чтобы наконечник мог вдавливаться в поверхность установленного образца; при дальнейшем подъеме столика начинают вращаться стрелки на циферблате. Подъем столика продолжают до тех пор, пока малая стрелка не примет вертикального положения, указываемого на циферблате красной точкой. Это означает, что наконечник вдавился в образец под действием определенной (предварительной) нагрузки, равной 10 кг.

Предварительное нагружение проводят для того, чтобы исключить влияние упругой деформации и различной степени шероховатости поверхности образца на результаты измерений.

Когда образец получает предварительную нагрузку 10 кг, большая стрелка на циферблате принимает вертикальное положение или близкое к нему. Для точности измерения необходимо, чтобы большая стрелка указывала на цифру 0 на черной шкале циферблата. Если положение большой стрелки не совпадает точно с цифрой 0, то, не меняя величины предварительного нагружения и, следовательно, не вращая маховик, поворачивают шкалу индикатора (круг циферблата) таким образом, чтобы цифра 0 на черной шкале циферблата переместилась и совпала с большой стрелкой, отклонение которой от вертикали допускается в пределах ± 5 единиц шкалы.

Затем освобождают рукоятку 3, и она плавно перемещается до упора. Такое перемещение рукоятки сообщает испытуемому образцу через рычаг основную нагрузку, определяемую грузом I , привешенным к рычагу. Один груз на рычаге сообщает образцу дополнительную нагрузку 50 кг, следовательно, общая нагрузка составит 60 кг. Два груза сообщают дополнительную нагрузку 90 кг, что отвечает общей нагрузке 100 кг, и, наконец, три груза сообщают нагрузку 1,4 кН, что соответствует общей нагрузке 150 кг. На приборе указана общая нагрузка. При этом нагружении большая стрелка перемещается по циферблату влево, против часовой стрелки. Время приложения основной

нагрузки 5–7 с. Затем рукоятку прибора плавно переводят в исходное состояние и тем самым снимают дополнительную нагрузку, но оставляют предварительную. Большая стрелка перемещается по циферблату по часовой стрелке. Цифра, которую указывает на шкале циферблата большая стрелка, представляет число твердости по Роквеллу. Эту цифру записывают и, поворачивая маховик против часовой стрелки, опускают столик прибора с образцом, снимая тем самым предварительную нагрузку.

Прибор измеряет глубину отпечатка алмазного конуса (стального шарика) или, точнее, разность между глубиной отпечатков, полученных от вдавливания наконечника под действием основной нагрузки и от вдавливания под предварительной нагрузкой. Каждое деление (единица шкалы) индикатора соответствует глубине вдавливания в 2 мкм. Однако стрелка индикатора отмечает не указанную величину глубины вдавливания h , а величину $100 - h$ по черной шкале при измерении алмазом и величину $130 - h$ по красной шкале при измерении шариком.

Поэтому чем тверже измеряемый материал и, следовательно, меньше h , тем больше должно быть число твердости. Наоборот, чем мягче измеряемый материал и больше величина h , тем меньше число твердости, т. е. числа твердости по Роквеллу возрастают с увеличением твердости материала, что позволяет сравнить числа Роквелла с числами Бринелля. Вместе с тем числа твердости по Роквеллу не имеют той размерности, которую имеют числа твердости по Бринеллю.

Однако числа твердости по Роквеллу можно пересчитать на числа твердости по Бринеллю с помощью таблицы.

Твердость на приборе Роквелла можно измерять:

алмазным конусом с общей нагрузкой 150 кг (в этом случае значения твердости характеризуются цифрой, указываемой стрелкой на черной шкале C циферблата, и обозначаются HRC). Например, 65 HRC означает, что твердость материала составляет 65 единиц по Роквеллу по шкале C с нагрузкой 150 кг);

алмазным конусом с общей нагрузкой 60 кг. (в этом случае значения твердости также характеризуются цифрой, указываемой стрелкой на черной шкале C циферблата, но обозначаются HRA). Числа HRA можно перевести на числа HRC по следующей формуле:

$$HRC = 2HRA - 104;$$

стальным шариком с общей нагрузкой 100 кг (в этом случае значения твердости характеризуются цифрой, указываемой стрелкой по красной шкале **B** циферблата, и обозначаются **HRB**).

Измерения алмазным конусом с нагрузкой 150 кг (HRC) проводят:

для закаленной или низкоотпущенной стали с твердостью более 4500 НВ, т. е. в условиях, когда вдавливание стального шарика (по Бринеллю или Роквеллу по шкале В) в твердый материал может вызвать деформацию шарика и искажение результатов;

для материалов средней твердости (более 2300 НВ) как более быстрым способом определения, оставляющим, кроме того, меньший след на измеряемой поверхности, чем при испытании по Бринеллю;

для определения твердости тонких поверхностных слоев, но толщиной более 0,5 мм (например, цементованного слоя).

Измерения алмазным конусом с нагрузкой 60 кг (HRA) применяют для очень твердых материалов (HRC более 70), например, твердых сплавов, когда вдавливание алмазного конуса с большой нагрузкой может вызвать выкрашивание алмаза, а также для измерения твердых поверхностных слоев (0,3–0,5 мм) или тонких образцов (пластинок). Стальным шариком с нагрузкой 100 кг твердость определяют для мягкой (отожженной) стали или отожженных цветных сплавов в деталях или образцах толщиной 0,8–2 мм, т. е. в условиях, когда измерение по Бринеллю, выполняемое шариком большого диаметра, может вызвать смятие образца. Условия для испытания по Роквеллу установлены ГОСТом (табл. 3.2).

Условия для испытания по Роквеллу

Твердость по Виккерсу	Обозначение шкалы Роквелла	Тип наконечника	Нагрузка, кгс	Допускаемые измерения
600–2400	В	Шарик стальной	100	25–100
2400–9000	С	Алмазный конус	150	20–67
3900–9000	А	Алмазный конус	60	70–85

Расстояние от центра отпечатка до края образца или до центра другого отпечатка должно быть не менее 1,5 мм при вдавливании конуса и не менее 4 мм при вдавливании шарика. Толщина образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка. Твердость следует измерять не менее чем в трех точках (особенно алмазным конусом), т. е. не менее чем три раза на одном образце. Для расчета лучше принимать среднее значение результатов второго и третьего измерений и не учитывать результат первого измерения. Измерение твердости по способу Роквелла требует меньше времени (30–60 с), чем по способу Бринелля, причем результат измерения виден на шкале (он указан стрелкой). Кроме того, измерение твердости по Роквеллу оставляет меньший отпечаток на поверхности детали.

Твердость очень тонких слоев металла (толщиной менее 0,3 мм) с указанными нагрузками 60–150 кг измерять нельзя, так как алмазный конус проникает на глубину, превышающую толщину этих слоев, и указывает, следовательно, твердость нижележащих областей. Вместе с тем с увеличением твердости измеряемого материала глубина отпечатка уменьшается, вследствие чего понижается точность измерения (особенно для металлов с твердостью более 60 HRC). Для этих же целей иногда применяют приборы типа *суперроквелл*, у которых твердость измеряют с меньшей нагрузкой и с меньшей глубиной вдавливания. Пред-

варительная нагрузка составляет 3 кг, а каждое деление (единица шкалы) индикатора соответствует глубине вдавливания, равной 1 мкм. Поэтому чувствительность этих приборов заметно выше.

Измерение твердости вдавливанием алмазной пирамиды (твердость по Виккерсу)

При измерении твердости по способу Виккерса в металл вдавливаются четырехгранная алмазная пирамида с углом в вершине 136° и твердость характеризует площадь получаемого отпечатка. При вдавливании пирамиды соотношение между диагоналями получающегося отпечатка при изменении нагрузки остается постоянным, что позволяет в широких пределах в зависимости от целей исследования увеличивать или уменьшать нагрузку.

Испытания проводят на приборе (рис. 3.3), имеющем неподвижную станину, в нижней части которой установлен столик 3, перемещающийся по вертикали вращением маховика 2. Образец устанавливают на столике кверху испытываемой поверхностью (перпендикулярной действующей силе) и затем поднимают столик почти до соприкосновения образца с алмазной пирамидой, закрепленной в штоке 4. Нажатием педали спускового рычага 1 приводят в действие нагружающий механизм, который через рычаг передает давление предварительно поднятых грузов 6 на алмазную пирамиду. После этого опускают столик прибора и подводят микроскоп 5, установленный на штанге, прикрепленной к станине. С помощью микроскопа определяют длину диагоналей полученного отпечатка.

На окуляре микроскопа имеются две шторки: подвижная и неподвижная. Микрометрический винт соединен с вращающимся указателем (барабаном) с цифрами. Передвижение подвижной шторки вызывает вращение цифровой ленты указателя. Цифру, которая будет соответствовать положению подвижной шторки, когда она соприкасается с углом отпечатка (рис. 3.4), переводят по таблице на числа твердости по Виккерсу. Измерить необходимо обе диагонали отпечатка и принимать среднюю величину измерений.

В этом приборе можно создавать нагрузки в 1, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100 и 120 кг. Чем больше выбираемая нагрузка, тем глубже проникает алмазная пирамида в испытуемый материал. Поэтому для измерения твердости тонких слоев применяют меньшие нагрузки: 1, 3 или 5 кг. На этом приборе можно измерять твердость образцов толщиной до 0,3–0,5 мм или поверхностных слоев толщиной до 0,03–0,05 мм. Необходимо учитывать, что при небольшой нагрузке, например в 1 кг отпечаток пирамиды может быть недостаточно отчетливым, что вызовет ошибку в определении длины диагонали. Поэтому для измерения твердости очень тонких поверхностных слоев, например цианированного слоя стали толщиной 0,04 – 0,06 мм, чаще применяют нагрузку в 5 кг, а для измерения твердости азотированного слоя стали толщиной до 0,05 мм – нагрузку в 5 или 10 кг. При обозначении твердости по Виккерсу следует указывать величину применяющейся нагрузки (1, 3 кг и т. д.). Поверхность образцов для определения твердости пирамидой должна быть тщательно отшлифована шкуркой с мелким зерном или даже отполирована. Толщина испытуемого образца должна быть не меньше чем 1,5 диагонали отпечатка.

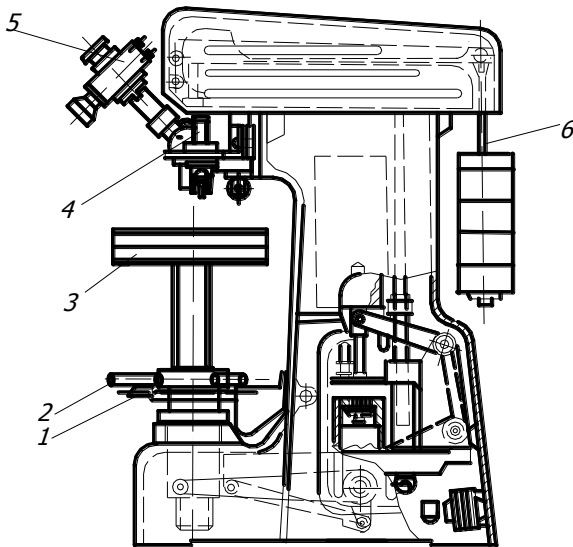


Рис. 3.3. Схема прибора для измерения твердости вдавливанием алмазной пирамиды (измерение по Виккерсу):

1 – педаль; 2 – маховик; 3 – столик; 4 – шток; 5 – микроскоп; 6 – груз

Твердость по Виккерсу HV так же, как и по Бринеллю, определяется как усилие, приходящееся на единицу поверхности отпечатка:

$$HV = \frac{2P \sin \alpha / 2}{d^2} = 1,854 \frac{P}{d^2}, [МПа],$$

где P – нагрузка на пирамиду, н;

α – угол между противоположными гранями пирамиды (136°);

d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, м.

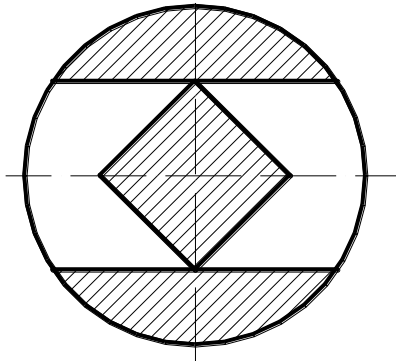


Рис. 3.4. Схема измерения отпечатка, полученного вдавливанием алмазной пирамиды (измерение по Виккерсу)

Числа твердости по Виккерсу и Бринеллю имеют одинаковую размерность и для материалов твердостью до 4500 НВ практически совпадают. Вместе с тем измерения пирамидой дают более точные значения для металлов с высокой твердостью, чем измерения шариком или конусом. Алмазная пирамида имеет большой угол в вершине (136°), и диагональ ее отпечатка примерно в семь раз больше глубины отпечатка, что повышает точность измерения отпечатка даже при проникновении пира-

миды на небольшую глубину и делает этот способ особенно пригодным для определения твердости тонких или твердых сплавов.

При испытании твердых и хрупких слоев (азотированного, цианированного) около углов отпечатка иногда образуются трещины (отколы), по виду которых можно судить о хрупкости измеряемого слоя.

Измерение микротвердости

Для изучения свойств и превращений в сплавах необходимо не только знать «усредненную» твердость, представляющую твердость в результате суммарного влияния присутствующих в сплаве фаз и структурных составляющих, но и определять твердость отдельных фаз и структур сплава. Микротвердость определяют вдавливанием алмазной пирамиды.

Прибор типа ПМТ-3, разработанный М. М. Хрущевым и Е. С. Берковичем (рис. 3.5), имеет штатив **8** вертикального микроскопа с тубусом, перемещающимся вверх и вниз с помощью макрометрического винта **6** и микрометрического винта **5**. На верхний конец тубуса установлен окулярный микрометр **7**, а в нижнем конце закреплены штوك **2** с алмазной пирамидой, опакиллюминатор **9** и объективы **11**.

В опакиллюминаторе имеется лампочка напряжением 6 В, питаемая от электросети через трансформатор.

Прибор снабжен двумя объективами для просмотра микрошлифа при увеличениях в 478 и 135 раз. Окуляр увеличивает в 15 раз. Окулярный микрометр имеет неподвижную сетку, отсчетный микрометрический барабанчик и каретку с подвижной сеткой. На неподвижной сетке длиной 5 мм нанесены штрихи с цифрами и угольник с прямым углом, вершина которого совпадает с цифрой 0. На подвижной сетке нанесен угольник с прямым углом и две риски. Для определения микротвердости, согласно ГОСТ 9450–76, применяют следующие типы алмазных наконечников: с четырехгранной пирамидой с квадратным основанием (индекс «кв»); с трехгранной пирамидой с основанием в виде равностороннего треугольника (индекс «тр»); с четырех-

гранной пирамидой с ромбическим основанием (индекс «рб»); бицилиндрический наконечник (индекс «ц»).

Наиболее широко используют алмазный наконечник в виде пирамиды с углом между гранями при вершине 136° , т. е. такой же, как и в пирамиде для измерения твердости по Виккерсу (что облегчает пересчет на числа Виккерса). Нагрузка для вдавливания пирамиды создается грузами 3, устанавливаемыми на шток 2. В приборе применяют грузы от 1 до 500 г в зависимости от особенностей изучаемой структуры и задач исследования.

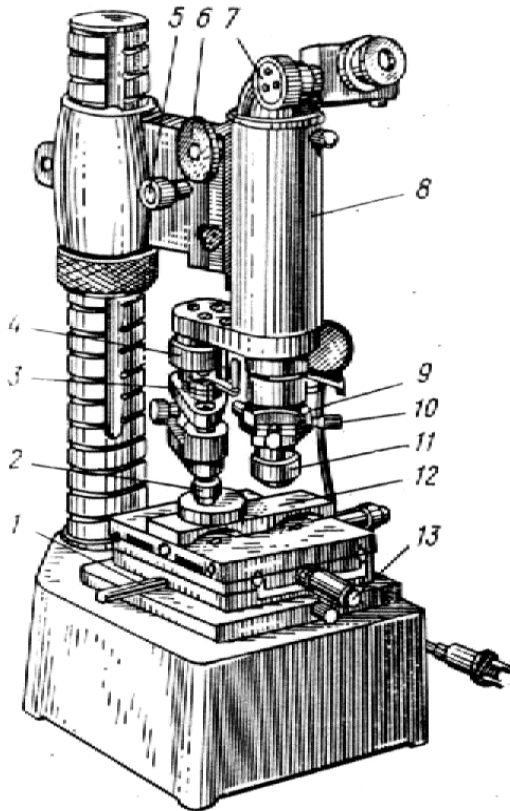


Рис. 3.5. Схема прибора ПМТ-3 для измерения микротвердости: 1 – поворотный столик; 2 – шток; 3 – груз; 4 – ручка; 5 – микрометрический винт; 6 – макрометрический винт; 7 – окулярный микрометр; 8 – штатив;

9 – опакиллюминатор; 10 – винт; 11 – объектив; 12 – столик; 13 – механизм перемещения

Поверхность измеряемого образца шлифуют и полируют, а при необходимости подвергают травлению реактивами, применяемыми для микроанализа соответствующих сплавов (см. табл. 2.1).

Подготовленный образец (микрошлиф) устанавливают на столике **12** так, чтобы исследуемая поверхность была параллельна плоскости столика и обращена вверх. При испытании образцов сложной формы это достигается предварительной установкой образца в пластилин и выравниванием положения шлифуемой поверхности образца ручным прессом.

Установленный микрошлиф просматривают через окуляр. С помощью двух винтов столик перемещается в двух перпендикулярных направлениях, что позволяет перемещать микрошлиф и выбрать на нем участок, в котором необходимо измерить твердость. Этот участок следует разместить в середине поля зрения микроскопа – точно в вершине угла неподвижной сетки. Затем устанавливают грузы, поворачивают с помощью ручки столик **12** на 180° (от одного упора до другого) для подведения выбранного участка образца под алмазную пирамиду. После этого медленным (в течение 10–15 с) поворотом ручки приблизительно на 180° опускают шток с алмазной пирамидой так, чтобы алмаз коснулся образца. В этом положении выдерживают образец под нагрузкой 5–10 с, после чего, поворачивая ручку **4** в исходное положение, поднимают шток с алмазом. Затем поворачивают столик **12** на 180° и возвращают образец в исходное положение под объектив микроскопа для измерения диагонали отпечатка (рис. 3.6).

Если прибор правильно центрирован, то изображение отпечатка окажется в поле зрения микроскопа или будет близко к вершине угла неподвижной сетки. Точность совмещения места, намеченного для испытания, с местом фактического вдавливания пирамиды составляет в этом приборе 3 мкм.

Затем вращением винтов **10** подводят отпечаток к угольнику неподвижной сетки таким образом, чтобы вершина угольника совпала с левым углом отпечатка, а пунктирные линии

угольника совпали с гранями левой части отпечатка. После этого вращением микрометрического барабана окуляра подводят вершину угольника подвижной сетки к противоположному углу отпечатка; тогда пунктирные линии угольника подвижной сетки совместятся с гранями правой части отпечатка.

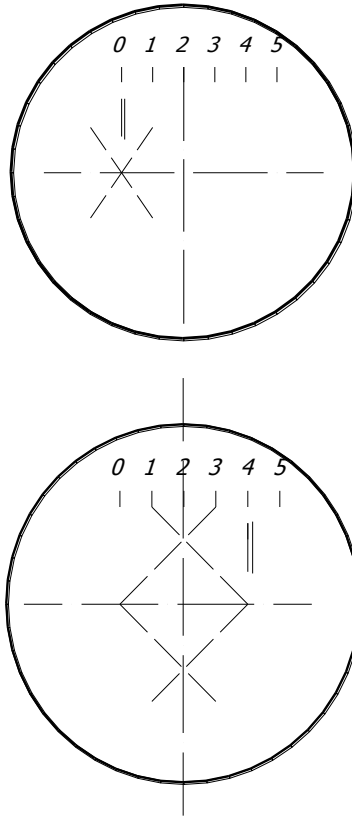


Рис. 3.6. Схема измерения отпечатков на приборе ПМТ-3

При таком положении сеток деления микрометрического барабанчика указывают длину диагонали отпечатка. Поворачивая окуляр на 90° , определяют также длину второй диагонали и вычисляют среднюю длину диагонали. Полученную среднюю длину переводят по таблице на число микротвердости. Указан-

ные измерения полученного отпечатка проводят не менее двух – трех раз.

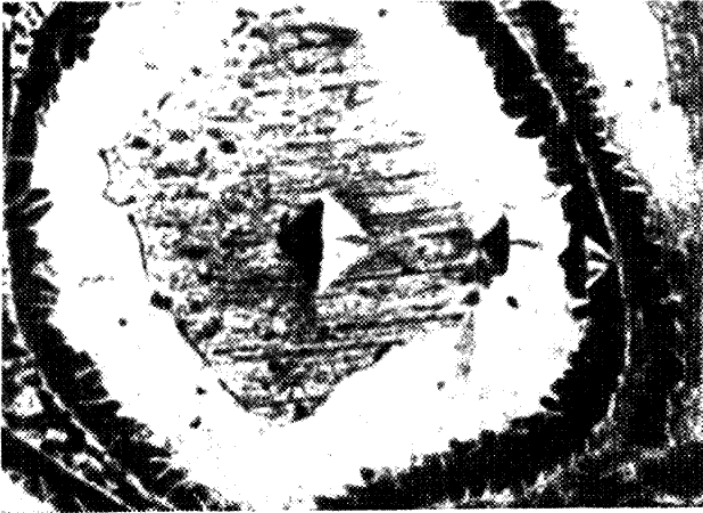


Рис. 3.7. Литая быстрорежущая сталь после закалки (видны отпечатки алмазной пирамиды, g 500).

Числа твердости в таблице вычислены по формуле $H = 1,854P/d^2$ и представляют числа твердости по Виккерсу. Для получения более точного результата измеряют твердость изучаемого участка микрошлифа, например, одного зерна два – три раза. Для этого необходимо, чтобы на площади одного и того же зерна (или карбида и т. д.) разместились, по крайней мере, два отпечатка. Исходя из этого условия, экспериментально подбирают величину нагрузки для исследования. Необходимо учесть, что при очень малых нагрузках могут получиться недостаточно точные результаты. Прибор позволяет фотографировать микроструктуру сплава с полученными отпечатками. Измерения микротвердости широко применяют для изучения структуры и свойств сплавов.

На рис. 3.7 показана микроструктура литой быстрорежущей стали после закалки. Сталь состоит из крупных зерен

неоднородного строения, причем каждое зерно имеет три концентрических слоя: сердцевина зерна имеет твердость $HV = 3200 - 3500$ МПа (35 HRC), промежуточный слой $HV = 7000 - 7250$ МПа (58 HRC), наружный слой $HV = 9400 - 10000$ МПа (65–67 HRC).

Макротвердость стали (65 HRC) не выявляет этой неоднородной твердости, а следовательно, и структуры.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.
2. Ознакомиться с методикой определения твердости по способам Бринелля, Роквелла, Виккерса, определения микротвердости.
3. Ознакомиться с приборами для определения твердости по способам Бринелля, Роквелла, Виккерса, микротвердости.
4. Выбрать способ определения твердости, условия проведения испытаний и определить твердость образцов цветных сплавов, отожженной стали, стали после упрочняющей термообработки.
5. Сделать выводы и составить отчет о работе.

Контрольные вопросы

1. Что называется твердостью?
2. Способы определения твердости.
3. Как определить твердость по Бринелю?
4. Условия испытаний металлов на твердость по Бринелю.
5. Связь твердости с другими характеристиками механических свойств металлов.
6. Как определить твердость по Роквеллу?
7. Условия испытаний металлов на твердость по Роквеллу.
8. Как определить твердость по Виккерсу?

9. Условия испытаний металлов на твердость по Виккерсу.
10. Измерение микротвердости.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Результаты измерения твердости.
4. Выводы.

Лабораторная работа № 4

ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ЖЕЛЕЗО – УГЛЕРОД

Цель работы: изучение диаграммы состояния железо-углеродистых сплавов; анализ превращений, происходящих в сплавах при охлаждении и нагреве; определение фазового и структурного состояния сплавов в зависимости от их состава и температуры.

Теоретические сведения

Важнейшими материалами в современном машиностроении являются железоуглеродистые сплавы: техническое железо, стали и чугуны. Основа для изучения процессов формирования их структуры – диаграмма состояния системы $Fe - C$.

Структура сплава определяет его свойства. Важно знать, какие фазы и структуры формируются в сплавах в зависимости от их состава и температуры. Необходимо уметь управлять процессом структурообразования для обеспечения эксплуатационных свойств сплавов.

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо и углерод, который может находиться в сплавах в химически связанном состоянии в виде цементита – Fe_3C (Ц) или в свободном состоянии – в виде графита (Г). В зависимости от этого структурообразование железоуглеродистых сплавов при их охлаждении из жидкого состояния рассматривается по диаграмме метастабильного равновесия $Fe - Fe_3C$ или по диаграмме стабильного равновесия $Fe - C$.

Железо плавится при температуре 1539 °С, обладает температурным полиморфизмом, т. е. в зависимости от температуры имеет различное кристаллическое строение, его плотность $7,86 \cdot 10^3$ кг/м³.

При кристаллизации ($1539\text{ }^{\circ}\text{C}$) образуется $\delta\text{-Fe}$, кристаллическая решетка которого описывается объемноцентрированной кубической (ОЦК) решеткой (рис. 4.1а), длина ребра куба (параметр решетки) $a = 0,293\text{ нм}$ (при $1425\text{ }^{\circ}\text{C}$). Железо δ существует в интервале температур $1539\text{...}1399\text{ }^{\circ}\text{C}$. При $1399\text{ }^{\circ}\text{C}$ вместо $\delta\text{-Fe}$ (ОЦК) путем перегруппировки атомов образуется $\gamma\text{-Fe}$ с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой (рис. 4.1б), характеризующееся меньшей свободной энергией. Параметр решетки $\gamma\text{-Fe}$ $a = 0,365\text{ нм}$ (при $950\text{ }^{\circ}\text{C}$); плотность – $(8,0\text{--}8,1) \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$. Оно устойчиво в температурном интервале $1392\text{...}910\text{ }^{\circ}\text{C}$. При $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит полиморфное превращение, $\gamma\text{-Fe}$ переходит в $\alpha\text{-Fe}$, имеющее ОЦК решетку с параметром $a = 0,286\text{ нм}$ (при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), устойчивое ниже $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ вплоть до температуры близкой к абсолютному нулю.

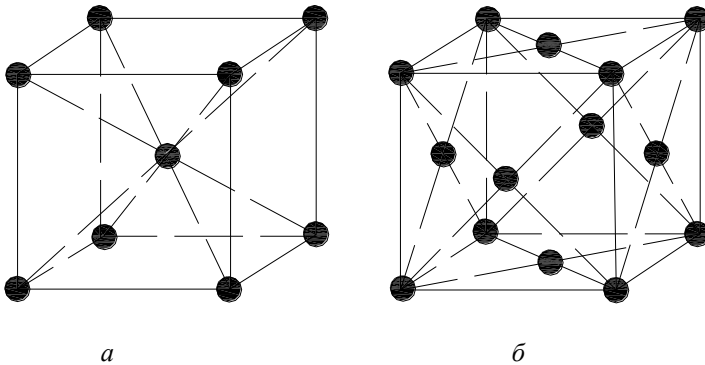


Рис. 4.1. Кристаллическая структура железа:
 а – объемноцентрированная кубическая (ОЦК) решетка;
 б – гранецентрированная кубическая (ГЦК) решетка

Железо α в зависимости от температуры может находиться в различных магнитных состояниях. При температуре выше $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($768\text{--}911\text{ }^{\circ}\text{C}$) $\alpha\text{-Fe}$ так же, как и $\gamma\text{-Fe}$, – парамагнетик, ниже $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ – ферромагнетик. Температура $768\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точка Кюри) является температурой перехода $\alpha\text{-Fe}$ из парамагнитного состояния в ферромагнитное при охлаждении железа и, наоборот, – при

его нагреве. Железо α с парамагнитными свойствами иногда называют β -Fe.

Таким образом, при температуре 1399 °С в равновесии находятся δ -Fe и γ -Fe (δ -Fe \leftrightarrow γ -Fe); температура равновесия γ -Fe и α -Fe равна 911 °С (γ -Fe \leftrightarrow α -Fe).

Температуры равновесного состояния двух или нескольких фаз называются критическими. Их обозначают буквой А с соответствующим индексом (порядковый номер температуры возрастает с ее увеличением). Для железа: 768 °С – А₂, 911 °С – А₃, 1392 °С – А₄.

Как все чистые металлы, железо обладает низкой твердостью и прочностью, высокой пластичностью и вязкостью. Так, железо с содержанием примесей 0,01–0,1% имеет следующие свойства: твердость по Бринеллю НВ = 700–800 МПа; предел прочности на растяжение $\sigma_b = 200$ –250 МПа; относительное удлинение $\delta = 50$ –55 %, ударная вязкость КС = 220–250 кДж/м².

Цементит содержит 6,67 % углерода, кристаллическая структура его описывается ромбической элементарной ячейкой, образованной атомами углерода (рис. 4.2). Вокруг каждого атома углерода располагаются на расстоянии 0,18–0,20 нм по шесть атомов железа таким образом, что на одну ячейку приходится 4 атома углерода и 12 атомов железа. Поэтому ячейка состоит из трех формульных единиц Fe_3C .

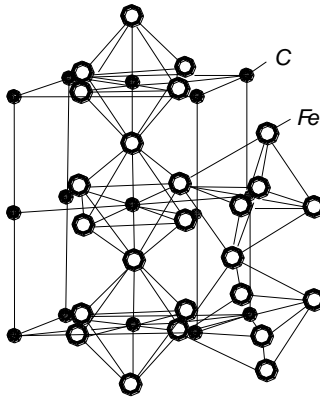


Рис. 4.2. Элементарная ячейка кристаллической структуры цементита:

○ – ионы железа; ● – ионы углерода

На рис. 4.2 для удобства при рассмотрении решетки показано расположение атомов железа только вокруг пяти атомов углерода. Связь между атомами в цементите сложная: металлическая ($Fe - Fe$), дополненная ковалентной ($Fe - C$). Цементит тверд ($HV \sim 8000$ МПа) и хрупок ($\delta \sim 0$), прочность его на растяжение очень мала ($\sigma_b \sim 40$ МПа). Температура плавления равна 1450 °С. Цементит – фаза метастабильная (временно устойчивая), слабоферромагнитная, точка Кюри – 210 °С. Время устойчивости цементита уменьшается с повышением температуры: при низких температурах он существует бесконечно долго, при температурах, превышающих 950 °С, в течение несколько часов он распадается на железо и графит. На этом явлении основан отжиг белого чугуна на ковкий (см. работу № 6).

Графит – одна из двух (алмаз, графит) кристаллических модификаций углерода. Структура графита слоистая (рис. 4.3). В слоях атомы углерода расположены по вершинам правильных шестиугольников. Каждый атом кристаллической структуры цементита окружен тремя соседними, находящимися на расстоянии, равном $0,141$ нм.

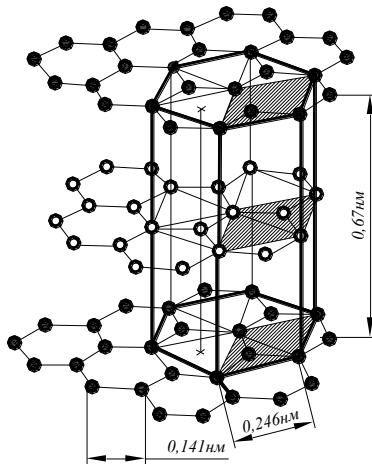


Рис. 4.3. Кристаллическая структура графита:

- – ионы углерода гексагональных нечетных слоев; ◦ – ионы углерода четных слоев (толстыми линиями показана полная ячейка, элементарная ячейка заштрихована)

Слои через один сдвинуты на 0,141 нм (четные относительно нечетных). Расстояние между ними – 0,335 нм. Связь между атомами в слоях прочная, ковалентного типа, между слоями – слабая молекулярная. При коллективизации валентных электронов в слое графита он приобретает частично физические свойства металлов: высокие тепло- и электропроводность, металлический блеск и непрозрачность. Графит имеет очень низкую прочность, плохо проводит теплоту и электричество в направлениях, перпендикулярных к слоям. Под действием сравнительно небольших внешних усилий он легко расслаивается. Температура плавления графита составляет 3850 °С.

Своеобразное строение графита придает ему целый ряд ценных свойств: жаропрочность, высокую тепло- и электропроводность, малый коэффициент трения, склонность к расслаиванию и др. Этими свойствами объясняется применение графита при изготовлении сопел реактивных двигателей и деталей ракет, электротехнических и антифрикционных изделий, смазочных веществ, красок.

В железоуглеродистых сплавах графит, в отличие от цементита, является стабильной фазой. Сплавления железо с углеродом и варьируя содержание этих элементов, получают сплавы с различной структурой и свойствами.

В случае, когда высокоуглеродистой фазой является цементит, фазовое состояние сплавов описывается *диаграммой метастабильного равновесия системы $Fe - Fe_3C$* (рис. 4.4). Если же в силу определенных условий вместо цементита кристаллизуется графит, рассматривается *диаграмма стабильного равновесия системы $Fe - C$* . Нередко структурообразование сплавов изучается по обеим диаграммам, вычерчиваемым в одной координатной системе (рис. 4.5): $Fe - C$ – пунктирными линиями, $Fe - Fe_3C$ – сплошными.

При повышенных скоростях охлаждения сплавов в результате ускоренного процесса кристаллизации обычно образуется цементит. Образование графита наблюдается только в высокоуглеродистых сплавах в случае их медленного охлаждения

или при определенных изотермических выдержках. В сплавах с пониженным содержанием углерода образование графита маловероятно.

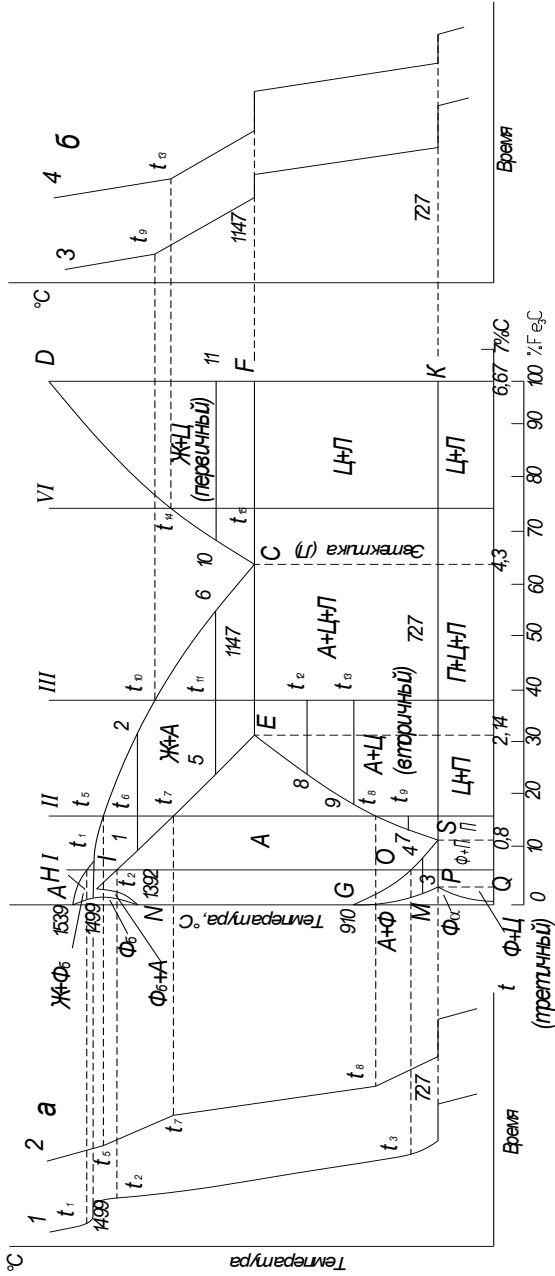


Рис. 4.4. Диаграмма состояния сплавов системы Fe-Fe₃C (метастабильное) и кривые охлаждения сталей (а) и чугунов (б)

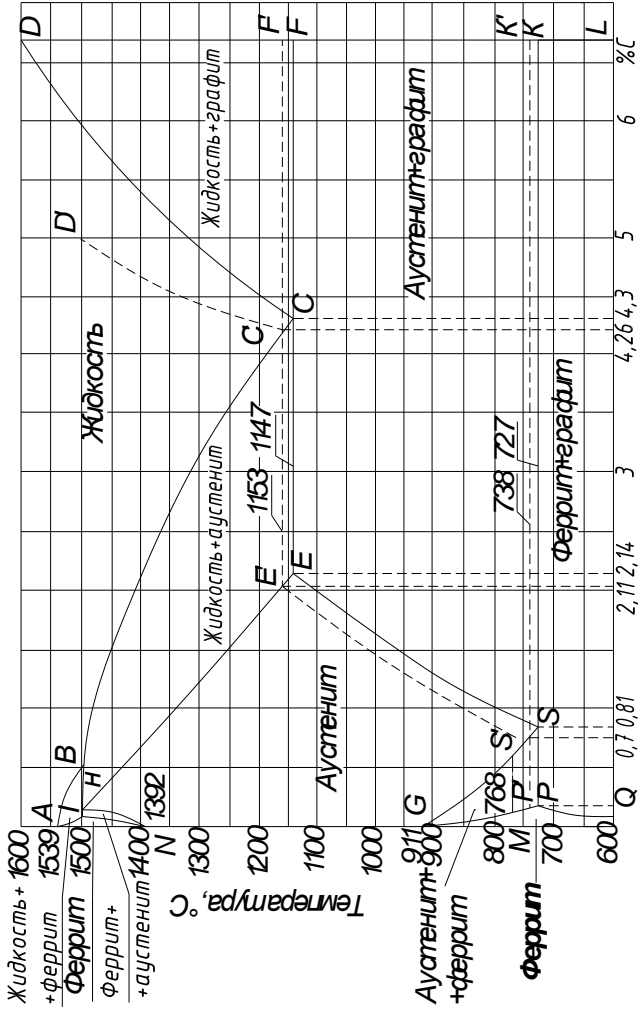


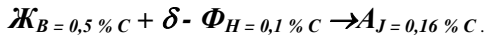
Рис. 4.5. Диаграмма состояния системы Fe-C;

пунктир – стабильное равновесие; сплошная линия – метастатическое равновесие

На диаграмме метастабильного равновесия крайние ординаты соответствуют чистым компонентам: *ANGQ* – железу, *DFKL* – цементиту. Ординаты между ними – двойным сплавам, общее содержание железа и углерода в которых равно 100 %. Для железа на линии *ANGQ* точка *A* соответствует температуре плавления (1539 °C).

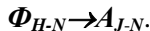
Затвердевание сплавов, содержащих до 0,5 % C, начинается с образования *δ-феррита* по реакции $\mathcal{J}_{AB} \rightarrow \delta - \Phi_{AH}$ (см. рис. 4.4). Характер дальнейшей кристаллизации сплавов зависит от содержания в них углерода. Сплавы, содержащие до 0,1 % C, полностью затвердевают в интервале температур, соответствующих линиям *AB* и *АН* с образованием однофазной структуры *δ-феррита*. Этой структуре соответствует область диаграммы, лежащая левее линии *АНН*.

Сплавы с 0,1...0,5 % C кристаллизуются несколько сложнее (рис. 4.4а, сплав 1). После выделения из жидкости определенного количества *δ-феррита* при температуре 1499 °C они испытывают перитектическое превращение:



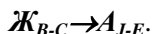
В перитектическом сплаве, содержащем 0,16 % C (*J*), обе исходные фазы ($\mathcal{J} + \delta\Phi$), взаимодействуя между собой при перитектическом превращении, без остатка расходятся на образование γ -твердого раствора. После этого сплав приобретает однофазную структуру – аустенит.

В доперитектических сплавах, содержащих от 0,1 (*H*) до 0,16 % C (*J*), после рассматриваемой реакции остается в избытке определенная доля *δ-феррита*, который при дальнейшем охлаждении сплавов (в результате перестройки решетки ОЦК в ГЦК) в интервале температур, соответствующих линиям *HN* и *JN*, превращается в аустенит:



Заперитектические сплавы (рис. 4.4а, сплав 1) окончательно затвердевают в интервале температур ликвидус (*BC*) –

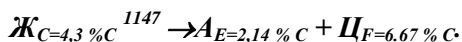
солидус (JE), при которых избыточная жидкость, оставшаяся от перитектического превращения, кристаллизуется в аустенит:



Этой реакцией описывается также процесс затвердевания сплавов с содержанием углерода 0,5–2,14 %.

Таким образом, все сплавы, содержащие менее 2,14 % С, после первичной кристаллизации приобретают однофазную структуру – аустенит, сохраняющуюся при охлаждении до температур, соответствующих линии GSE . При дальнейшем охлаждении происходит перекристаллизация аустенита, в результате чего формируется окончательная структура сплавов.

В группе сплавов, содержащих от 2,14 (E) до 6,67 % С (F), имеется эвтектический сплав с 4,43 % С (C), который при температуре 1147 °С (изотерма ECF), будучи предельно насыщенным одновременно углеродом и железом, кристаллизуется по эвтектической реакции:



Образующаяся эвтектическая смесь двух фаз ($A+Ц$) называется **ледебуритом** (при данном фазовом составе – **ледебурит аустенитный**).

Сплавы доэвтектические 2,14–4,3 % С ($E-C$) (рис. 4.4б, сплав 3) и заэвтектические 4,3–6,67 % С ($C-F$) (рис. 4.4б, сплав 4) кристаллизуются в два этапа. На первом этапе в интервале температур ликвидус (BCD) – солидус (ECF) из жидкой фазы выделяются первичные кристаллы: в доэвтектических – A , в заэвтектических – $Ц$. На втором этапе оставшаяся жидкость затвердевает с образованием эвтектики. В результате после первичной кристаллизации доэвтектические сплавы имеют структуру $A + Л$ ($A + Ц$), заэвтектические – $Ц_I + Л$.

Структурные превращения в сплавах, находящихся в твердом состоянии, вызваны следующими причинами: изменением растворимости углерода в железе в зависимости от температуры сплава, полиморфизмом железа и влиянием содержания

растворенного углерода на температуру полиморфных превращений.

Линия *AHN* (см. рис. 4.4) показывает пределы растворимости углерода в $\delta\text{-Fe}$, линия *GPQ* – в $\alpha\text{-Fe}$: 0,02 % С при температуре 727 °С (*P*), 0,01 % С при температуре 600 °С, 0,008 % С при температуре 20 °С. Феррит левее линии *GPQ* является ненасыщенным твердым раствором, на *GPQ* он предельно насыщен. При охлаждении сплавов, расположенных на диаграмме правее *PQ*, ниже 727 °С из феррита, вследствие его пересыщения, выделяется углерод, что приводит к формированию **цементита третичного (Ц_{III})** в виде сетки по границам зерен феррита. Если же в структуре сплавов (0,02...6,67 %С) уже есть цементит, то Ц_{III} наслаивается на него и металлографическим методом не обнаруживается.

Линия *ES* показывает пределы насыщения аустенита углеродом в зависимости от температуры сплава. Растворимость углерода максимальная при температуре 1147 °С (*E*) – 2,14 %. С понижением температуры она уменьшается до 0,8 % при температуре 727 °С (*S*). В результате аустенит в сплавах правее линии *ES* оказывается пересыщенным твердым раствором, поэтому из него выделяется углерод, который идет на образование **цементита вторичного (Ц_{II})**. В сталях Ц_{II} формируется обычно в виде сетки по границам зерен аустенита, в чугунах чаще всего нарастает на цементите ледебурита.

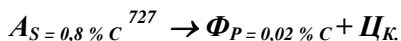
Углерод, растворяясь в ОЦК решетках железа δ и α , искажает их и тем самым снижает температурную устойчивость этих структур. Поэтому чем больше углерода растворено в $\delta\text{-Fe}$, тем при более высоких температурах решетка δ перестраивается в γ -решетку; чем больше углерода в сплаве, тем при более низких температурах аустенит превращается в α -феррит. Таким образом, растворение углерода в железе способствует повышению температуры A_4 (линия *JN*) и снижению температуры A_3 , (линия *GS*), расширению температурной области существования аустенита и сужению области феррита.

В охлаждающихся сплавах, содержащих менее 0,8 % С, превращение аустенита в феррит начинается не при температуре 911 °С, как в безуглеродистом железе, а при температурах, соот-

ветствующих линии GS . Это превращение из-за различной растворимости углерода в феррите (PQ) и аустените (ES) сопровождается диффузионным перераспределением углерода между ними. Поэтому перестройка решеток протекает в интервале температур $GS - GP$. Область GSP является областью двухфазной структуры, в ней феррит находится в равновесии с аустенитом.

В охлаждающихся сплавах, расположенных между точками P и S (рис. 4.4а, сплав 1), по мере образования феррита в указанном интервале температур аустенит обогащается углеродом (GS). При температуре 727°C содержание углерода в аустените на заключительном этапе достигает $0,8\%$ (S), решетка $\gamma\text{-Fe}$ (ГЦК) теряет устойчивость и перестраивается в решетку $\alpha\text{-Fe}$ (ОЦК), в которой при температуре 727°C растворяется только $0,02\%$ C (P).

Полиморфное превращение $ГЦК \rightarrow ОЦК$ сопровождается выделением углерода из раствора и образованием цементита:



Это трехфазное превращение, обусловленное полиморфизмом железа и протекающее при температуре 727°C , называется *эвтектоидным*. В отличие от трехфазного эвтектического превращения при эвтектоидном исходной фазой является не жидкий, а твердый раствор (в данном случае аустенит). Выделяющаяся из твердого раствора смесь фаз, число которых равно числу компонентов системы, называется *эвтектоидом*. Структурная составляющая железоуглеродистых сплавов, образующаяся в результате распада аустенита и состоящая из чередующихся пластинок двух фаз – феррита и цементита, называется *перлитом* (Π). Температура образования перлита соответствует критической температуре A_1 .

На диаграмме метастабильного равновесия (см. рис. 4.4) точке A_1 соответствует линия PSK (727°C). Эвтектоидное превращение протекает во всех сплавах, содержащих более $0,02\%$ углерода (P), т. е. в сталях и чугунах. Поэтому в чугунах ледебурит аустенитный при эвтектоидной температуре 727°C видо-

изменяется, становясь *ледебуритом перлитным*, $L (A + C) \rightarrow L (П+Ц)$.

Строение окончательно сформировавшейся структуры железоуглеродистых сплавов зависит от содержания в них углерода. Сплавы, в которых углерода менее 0,02 %, имеют структуру $\Phi + Ц_{III}$ и называются *техническим железом*.

Сплавы с содержанием углерода 0,02–2,14 %, в структуре которых непременно присутствует перлит, являются *сталими*. Стали делятся на *доэвтектоидные* ($C = 0,02\text{--}0,8$ %, структура – $\Phi + П$); *эвтектоидную* ($C = 0,8$ %, структура – перлит); *заэвтектоидные* ($C = 0,8\text{--}2,14$ %, структура – $П + Ц_{II}$).

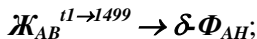
Сплавы, которые содержат от 2,14 до 6,67 % С и в структуре которых присутствует определенная доля эвтектики — ледебурит, называются *белыми чугунами*. Они подразделяются на доэвтектические ($C = 2,14\text{--}4,43$ %, структура – $П + Ц_{II} + Л$), *эвтектические* ($C = 4,43$ %, структура – ледебурит), *заэвтектические* (4,43–6,67 % С, структура – $Ц_I + Л$).

Цементит третичный в сталях и чугунах, а также цементит вторичный в эвтектическом и заэвтектических чугунах как самостоятельные структурные составляющие при микроструктурном анализе обычно не обнаруживаются.

Следует подчеркнуть, что все описанные изменения структуры, происходящие при охлаждении сплавов, обратимы, т. е. они совершаются и при нагреве сплавов (в обратном порядке). Это справедливо только в случае, когда охлаждения и нагревы протекают с очень малыми скоростями, а при любой рассматриваемой температуре все возможные превращения полностью завершены и сплавы находятся в состоянии фазового равновесия. Поэтому при рассмотрении диаграмм не учитываются переохлаждения и перегревы, необходимые для завершения фазовых превращений в случае охлаждений и нагревов сплавов даже с малыми конечными скоростями.

О фазовых превращениях, происходящих в сплавах, можно судить по кривым их охлаждения или нагревания. В качестве дополнительного примера можно подробно рассмотреть процесс структурообразования при охлаждении стали с 0,4 % С (рис. 4.4а, сплав 1). Выше точки t_I сталь находится в жидком состоянии и непрерывно охлаждается.

В интервале $t_1 \rightarrow 1499^\circ\text{C}$ из жидкой фазы, состав которой изменяется по ликвидусу AB , выпадают кристаллы δ -феррита. Состав их определяется с помощью коноды по солидусу $АН$:



$$C = 2 - 2 + 1 = 1, t \neq \text{const.}$$

При кристаллизации выделяется теплота, на участке кривой $t_1 \rightarrow 1499^\circ\text{C}$ охлаждение сплава замедляется.

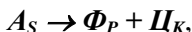
При температуре 1499°C происходит трехфазное перитектическое превращение; $C = 2 - 3 + 1 = 0, t = \text{const.}$ Жидкость состава B взаимодействует с ранее выпавшими кристаллами δ -феррита состава H . В результате образуется новая твердая фаза-аустенит состава J :



Перитектическое превращение в заперитектическом сплаве с 0,4 % С завершается с избытком жидкой фазы. Избыточная жидкость кристаллизуется при непрерывном охлаждении в интервале $1499^\circ\text{C} \rightarrow t_2$ с образованием аустенита. В интервале $t_2 \rightarrow t_3$ закристаллизовавшийся сплав, имеющий структуру A , непрерывно охлаждается. При температурах $t_3 \rightarrow 727^\circ\text{C}$ происходит полиморфное превращение, ГЦК решетка перестраивается в ОЦК, т. е. аустенит, состав которого изменяется по линии GS , превращается в феррит (по GP). По мере превращения массовая доля аустенита уменьшается, содержание же углерода в нем увеличивается.

Образующаяся решетка феррита (ОЦК) при данных температурах энергетически более выгодна, чем аустенита (ГЦК), и при перестройке решеток выделяется теплота, поэтому сплав на участке $t_3 \rightarrow 727^\circ\text{C}$ охлаждается замедленно.

При температуре 727°C происходит трехфазное эвтектическое превращение (изотерма PSK на кривой охлаждения):



когда из аустенита, не превращенного в феррит, образуется перлит ($\Phi + \Pi$). В процессе дальнейшего охлаждения сплава из феррита выделяется Π_{III} , наслаивающийся на цементите перлитном. Структура охлаждающейся стали при температурах ниже $727^\circ\text{C} - \Phi + \Pi$.

Массовые доли (%) феррита и перлита как структурных составляющих стали с допустимой погрешностью могут быть определены по правилу отрезков. Например, при температуре 600°C $\Phi = (0,8 - 0,4) / (0,8 - 0,01) \cdot 100 \approx 50$. Массовая доля феррита как фазы, существующей вместе с цементитом, $\Phi = (6,67 - 0,4) / (6,67 - 0,01) \cdot 100 \approx 94$. Остальные 6 % приходятся на долю другой фазы – цементита.

Таким образом, структура медленно охлажденной стали, содержащей 0,4 % С, состоит из 50 % феррита и 50 % перлита (согласно фазовому анализу, $94\% \Phi + 6\% \Pi$).

Диаграмма стабильного равновесия, обозначенная на рис. 4.5 пунктиром, отображает возможность образования высокоуглеродистой фазы – графита – на всех этапах процесса структурообразования в сплавах с повышенным содержанием углерода. В интервале температур ликвидус $D'C'$ – солидус $C'F'$ из жидкости выделяется графит. При эвтектической температуре 1153°C (изотерма $E'C'F'$) жидкость состава C' затвердевает с образованием графитной эвтектики ($A_{E'} + \Gamma$). В интервале температур $E'C'F' - P'S'K'$ из-за уменьшения растворимости углерода в аустените (линия $E'S'$) выделяется графит. При эвтектоидной температуре ($t_{P'S'K'} = 738^\circ\text{C}$) содержание углерода в аустените достигает 0,7 % (S') и аустенит распадается на феррит и графит.

Таким образом, при охлаждении сплавов, содержащих 2,14–6,67 % С, формируется структура, состоящая из феррита и графита.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.

2. Вычертить диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов, обозначив буквами ее линии, указав значения температур и содержание углерода.

3. Указать кристаллическое строение и свойства компонентов сплавов.

4. Описать фазы и структурные составляющие сплавов, указать их в областях диаграммы.

5. Записать и объяснить реакции образования фаз и структурных составляющих в железоуглеродистых сплавах согласно их диаграмме.

6. Построить и проанализировать с применением правила фаз Гиббса кривую охлаждения (нагрева) сплава, заданного преподавателем, а также кривую охлаждения сплава с 0,4 % С.

7. Определить составы фаз, структурные составляющие, их массовые доли в исследуемом сплаве при температурах, заданных преподавателем.

8. Написать отчет о работе в соответствии с вышеуказанными пунктами заданий.

Контрольные вопросы

1. Краткая характеристика компонентов сплавов системы $Fe - C$ (кристаллическая структура, основные свойства).

2. Краткая характеристика фаз, образующихся в сплавах системы $Fe - C$.

3. Основные превращения в сплавах системы $Fe - C$.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.

2. Ответы на контрольные вопросы.

3. Диаграмма состояния системы $Fe - C$.

4. Кривая охлаждения сплава $Fe - 0,4 \% C$.

5. Кривая охлаждения сплава, заданного преподавателем.

6. Результаты выполнения всех пунктов заданий.

Лабораторная работа № 5

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы: изучение микроструктуры углеродистых сталей в равновесном состоянии; определение марок сталей, установление зависимости между структурой сталей, диаграммой состояния системы Fe – Fe₃C и свойствами сплавов.

Теоретические сведения

Равновесное состояние сплава может быть достигнуто при охлаждении его с бесконечно малой скоростью. В этом случае при любой произвольно взятой температуре сосуществующих фаз содержание в них компонентов вполне определенное. Каждая фаза сплава гомогенна. Размеры и морфология фазовых выделений определяются минимальными значениями свободной энергии.

Равновесные структуры сталей и превращения в них описываются диаграммой состояния системы **Fe – Fe₃C** (см. рис. 4.4). Фазовые превращения в сталях, наблюдаемые на практике, протекают при температурах, отличающихся от температур, соответствующих равновесному состоянию, и зависят от реальной скорости охлаждения. Допускается считать, что состояние, близкое к равновесному, достигается при охлаждении из аустенитного состояния вместе с отключенной печью (отжиг второго рода).

Структура технического железа при комнатной температуре, как видно из диаграммы состояния **Fe – Fe₃C** (см. рис. 4.4), может быть однофазной (феррит) или двухфазной (феррит и цементит третичный). Равноосные зерна феррита при протравливании реактивом Ржешотарского имеют соломенно-желтый цвет. Светло-голубой цементит располагается по границам зерен феррита в виде тонких включений (рис. 5.1). Феррит мягкий и пластичный ($\sigma_B = 200\text{--}300$ МПа, $\sigma_T = 120\text{--}200$ МПа, $\delta = 30\text{--}50$ %, $\psi = 60\text{--}85$ %, НВ = 800–1000 МПа). Цементит твердый (НВ = 8000 МПа) и хрупкий.

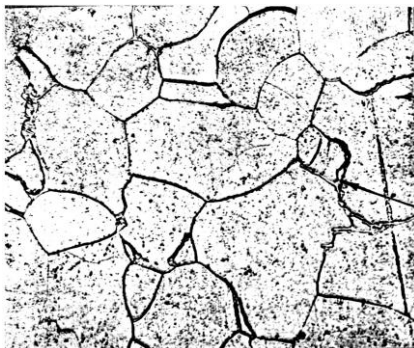


Рис. 5.1. Микроструктура технического железа:
феррит и цементит третичный, $\times 500$

В структуре сталей по мере увеличения содержания углерода увеличивается массовая доля цементита и уменьшается соответственно массовая доля феррита. Это ведет к повышению твердости и прочности стали, снижению ее пластичности и вязкости (рис. 5.2), изменению физических и технологических свойств. В частности, ухудшаются свариваемость, литейные свойства, штампуемость, обрабатываемость резанием, улучшаются закаливаемость и прокаливаемость, повышается износостойкость.

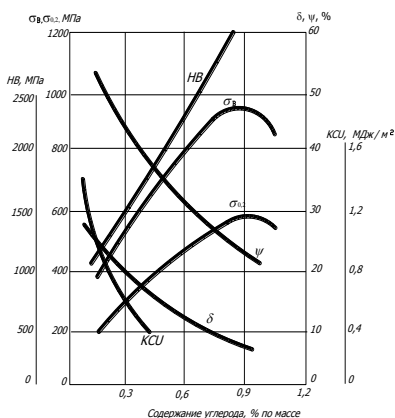


Рис. 5.2. Зависимость механических свойств сталей от содержания углерода

В равновесной структуре доэвтектоидных сталей, состоящих из феррита (светлые зерна) и перлита (темные зерна), расчет доля перлита пропорционально увеличению содержания углерода (рис. 5.3–5.5).

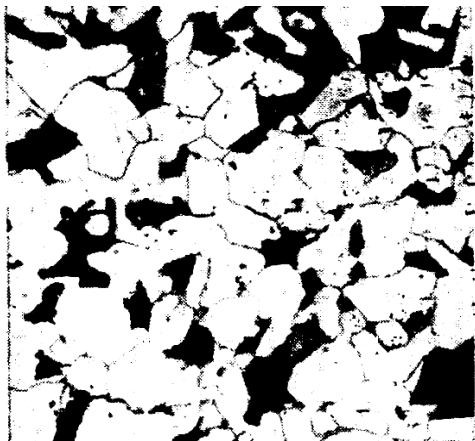


Рис. 5.3. Микроструктура доэвтектоидной стали с 0,2 % С, $\times 200$

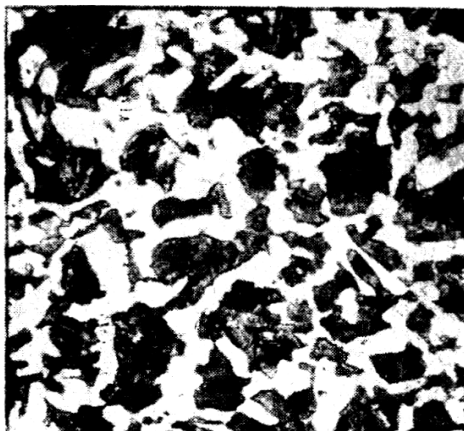


Рис. 5.4. Микроструктура доэвтектоидной стали с 0,4 % С, $\times 200$

В перлите находится практически весь углерод стали (в феррите растворимость углерода при комнатной температуре не более 0,008 %). Поэтому, если допустить, что значения плотности феррита и цементита близки друг другу, по структуре отожженной стали можно определить содержание в ней углерода. Для этого находится площадь поверхности шлифа стали, занятой перлитом. Например, она составляет 50 %. Тогда, зная, что в перлите содержится 0,8 % углерода, из пропорции

$$\begin{array}{l} 100 \% \text{ перлита} - 0,8 \% \text{ C} \\ 50 \% \text{ перлита} - X \% \text{ C} \end{array}$$

можно определить содержание в стали углерода $X = 0,8 \times 50/100 = 0,40 \% \text{ C}$. Затем определяется марка углеродистой стали. По ГОСТ 1050–74 сталь, содержащая 0,4 % углерода, является качественной конструкционной углеродистой сталью марки 40.

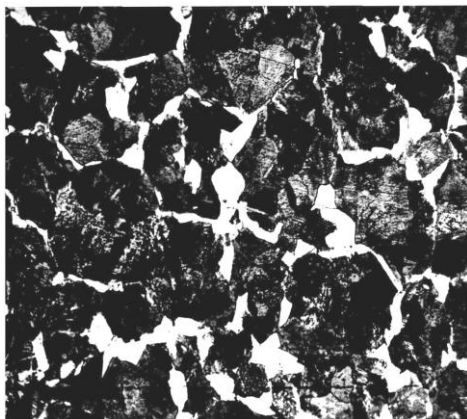


Рис. 5.5. Микроструктура доэвтектоидной стали с 0,7 % С, τ 200

Сталь, содержащая 0,8 % углерода, имеет перлитную структуру и называется эвтектоидной. Перлит – эвтектоид, двухфазная структурная составляющая, представляет собой смесь феррита и цементита пластинчатого (рис. 5.6) или зернистого (рис. 5.7) строения.

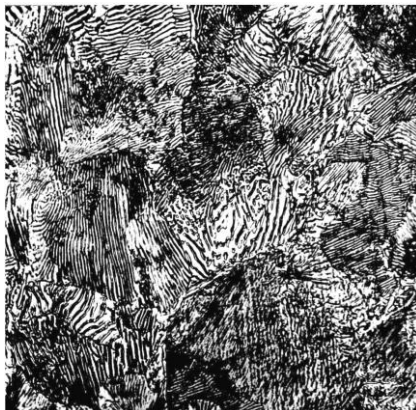


Рис. 5.6. Микроструктура эвтектоидной стали с пластинчатым перлитом, $\times 200$

Пластинчатый перлит состоит из чередующихся пластин феррита и цементита. Зародыши зерен этих фаз образуются при температуре $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ на границах зерен аустенита и растут одновременно по направлению от границ к центру аустенитного зерна. В результате аустенитное зерно разделяется на несколько частей с определенной, но различной относительно друг друга ориентировкой взаимнопараллельных пластин феррита и цементита. Каждая такая часть представляет собой перлитное зерно. Следовательно, в одном аустенитном зерне при эвтектоидном превращении формируется несколько зерен перлита. Перлит состоит из двух фаз – феррита и цементита с различной твердостью, полируемостью и травимостью в реактивах. При полировке и травлении шлифа на его поверхности создается рельефность. Твердые, малотравящиеся пластины цементита выступают над ферритными и остаются гладкими и блестящими. Утопающий между ними феррит оказывается затененным и, кроме того, из-за повышенной травимости, тусклым и темным. Поскольку в перлите содержится сравнительно мало (около 9 %) цементита, перлит на микрошлифе выглядит темным, но не черным, как различного рода пустоты.

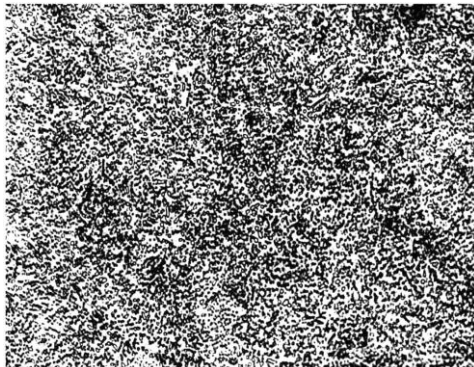


Рис. 5.7. Микроструктура эвтектоидной стали с зернистым перлитом, $\times 200$

Перлит зернистый – светлый, цементит в нем имеет округлую форму. Зерна цементита расположены в ферритной матрице. Структуру зернистого перлита может иметь после специальной термической обработки не только эвтектоидная сталь, но доэвтектоидные и заэвтектоидные стали. Поэтому определить содержание углерода в стали с зернистым перлитом нельзя. Сталь со структурой зернистого перлита имеет пониженную твердость ($HV = 1600\text{--}2200$ МПа), нежели сталь со структурой пластинчатого перлита ($HV = 2000\text{--}2500$ МПа), лучше обрабатывается резанием.

Стали, содержащие более 0,8 % углерода, относятся к заэвтектоидным. В равновесной структуре таких сталей темные зерна перлита окружены более или менее сплошной светлой сеткой цементита вторичного (рис. 5.8). Толщина цементитной сетки увеличивается по мере увеличения содержания углерода в стали.

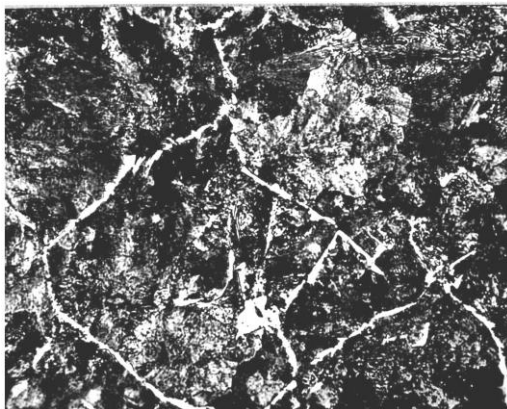


Рис. 5.8. Микроструктура заэвтектоидной стали с 1,2 % С, $\times 200$

При определении содержания углерода по структуре заэвтектоидной стали следует под микроскопом установить площадь поверхностей шлифа, занятых перлитом и цементитом вторичным. Затем из соответствующих пропорций определить содержание углерода, находящегося в перлите и цементите вторичном. Сумма полученных результатов представляет собой содержание углерода в заэвтектоидной стали.

В значительной степени свойства углеродистых сталей зависят от содержания в них вредных примесей серы и фосфора. Сера в стали вызывает красноломкость – образование трещин при температуре горячей деформации. Фосфор вызывает хладноломкость – охрупчивание при пониженных температурах. Чем меньше этих примесей в стали, тем выше ее качество. Соответственно различают стали обыкновенного качества, качественные, высококачественные и особо высококачественные.

Стали обыкновенного качества (ГОСТ 380–71) содержат до 0,07 % фосфора, 0,06 % серы, 0,06–0,49 % углерода, являются конструкционными, в равновесном состоянии имеют феррито-перлитную структуру. В зависимости от назначения они подразделяются на три группы: группа А – поставляемые по механическим свойствам (Ст0, Ст1, Ст2, Ст3, Ст4, Ст5 и Ст6) и предназначенные для изготовления изделий, не подвергаемых горячей обработке; группа Б – поставляемые по химическому

составу (БСт0, БСт1, БСт2, БСт3, БСт4, БСт5, БСт6) и предназначенные для изготовления изделий подвергаемых горячей обработке; группа В – поставляемые по механическим свойствам и химическому составу (ВСт0, ВСт1, ВСт2, ВСт3, ВСт4, ВСт5) и предназначенные для изготовления сварных конструкций.

Буквы Ст в марке означают «сталь обыкновенного качества», а цифры – условный номер стали в зависимости от нормируемых показателей. Чем больше условный номер стали, и тем больше в ней содержание углерода тем выше ее прочность (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Прочностные свойства сталей обыкновенного качества

Марка стали	Предел прочности, МПа	Марка стали	Предел прочности, МПа
Ст0	310	Ст4кп	380–490
Ст1кп	310–400	Ст3сп	380–490
Ст1пс	320–420	Ст4пс	410–520
Ст1сп	320–420	Ст4сп	410–520
Ст2пс	330–420	Ст5пс	420–540
Ст3кп	330–440	Ст5сп	420–540
Ст2сп	330–440	Ст6пс	500–640
Ст3пс	370–470	Ст6сп	500–640

Буквы кп, пс, сп, стоящие за цифрой, указывают степень раскисления стали (кипящая, полуспокойная, спокойная). Из спокойных сталей наиболее полно удален кислород. В термически упроченном состоянии они обладают высокой вязкостью и сохраняют ее до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цифра в конце марки стали, например, Ст4сп2, означает категорию стали. Чем выше категория стали, тем больше число нормируемых показателей (химический состав, временное сопротивление растяжению, предел текучести, относительное удлинение, предел прочности при изгибе в холодном состоянии, ударная вязкость при температурах от $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и др.).

Стали обыкновенного качества являются сталями общего назначения и используются для изготовления проката различного профиля листовой стали, крепежных деталей и другой продукции.

Стали качественные конструкционные (ГОСТ 1050–74) содержат не более 0,035 % фосфора, не более 0,04 % серы, 0,05–0,6 % углерода и выпускаются следующих марок: 05кп, 08кп, 08пс, 10кп, 10пс, 15кп, 15пс, 20кп, 20пс и т. д.

Двузначные цифры в марке качественной конструкционной стали означают среднее содержание в ней углерода в сотых долях процента. Данные стали обладают высокой пластичностью и свариваемостью. Они могут быть использованы без упрочняющей термической обработки (прокат в состоянии поставки) или после упрочняющей термической или какой-либо другой обработки.

Стали 05кп, 08кп, 08, 10 идут на изготовление изделий сложной конфигурации, получаемых методами холодной листовой и объемной штамповки. Из сталей 15кп, 15, 20 изготавливают болты, гайки, винты, пальцы, валки, оси, крюки, шпильки и другие детали неотчетственного назначения. Часто детали из этих сталей работают в условиях износа и поэтому подвергаются поверхностному упрочнению цементацией или нитроцементацией.

Стали 30, 35, 40, 45 применяют для изготовления деталей с высокой прочностью и вязкостью сердцевины (оси, валики, винты, шайбы, втулки, коленчатые валы, тяги, шатуны и др.).

Высокоуглеродистые стали марок 65, 70, 75, 80, 85 идут на изготовление деталей, работающих в условиях трения и вибрационных нагрузок: прокатные валки (сталь 60), крановые колеса (сталь 60), диски сцепления и выпускные клапаны компрессоров (сталь 85), а также пружины и рессоры небольшого сечения (ГОСТ 14959-79).

Углеродистые качественные конструкционные стали в зависимости от условий эксплуатации деталей подвергаются нормализации, закатке с последующим отпуском, поверхностной закатке с нагревом ТВЧ с отпуском или без него (ГОСТ 1050–74, ГОСТ 14959–79).

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ1435–74)

выпускают качественными (У7, У8, У8Г, У9, У10, У11, У12, У13) с содержанием серы не более 0,03 % и фосфора не более 0,035 % и высококачественными (У7А, У8А, У9А, У10А, У11А, У12А, У13А) с содержанием серы не более 0,02% и фосфора не более 0,03 %. Буква У в марке стали означает «углеродистая инструментальная сталь», буква А в конце марки стали означает, что она высококачественная. Цифра показывает содержание углерода в десятых долях процента.

Доэвтектоидная сталь У7 и эвтектоидные стали У8 и У8А, обладающие наибольшей пластичностью в данной группе сталей, идут на изготовление молотков, стамесок, долот, зубил, штампов и других инструментов, работающих в условиях ударных нагрузок. Стали У10, У11, У11А идут на производство резцов, фрез, сверл, метчиков и другого режущего инструмента для обработки мягких материалов, на производство измерительных инструментов. Из сталей У12, У13, У13А изготавливают инструменты повышенной твердости, работающие без ударных нагрузок (напильники, надфили, рашпили и др.).

Для массового изготовления резанием на станках-автоматах деталей неотчетственного назначения, в основном крепежных (шайбы, болты, гайки, шпильки и др.), применяют низкоуглеродистые стали (0,08–0,45 % С) с повышенным содержанием серы (0,05–0,3 %), фосфора (0,05–0,16 %) и часто марганца (0,6–1,55 %). Такие стали называют ***автоматными***. Обогащение границ зерен феррита фосфором, а также образование хрупких включений MnS по границам зерен стали облегчает резание, способствует дроблению и легкому отделению стружки. При использовании таких сталей увеличивается стойкость режущего инструмента и улучшается качество обработанных поверхностей.

Автоматные стали маркируют А11, А12, А20, А30, А40Г (ГОСТ 1414–75). В марке стали буква А указывает, что сталь автоматная, цифры показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Улучшение обрабатываемости стали резанием достигается также добавкой в нее свинца и селена.

Порядок выполнения работы

1. Начертить область диаграммы состояния $Fe - Fe_3C$, соответствующую сталям.
2. Изучить и зарисовать микроструктуру доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей, указать их свойства и области применения.
3. Изучить влияние углерода в исследуемых сталях на их твердость и построить график.
4. Определить содержание углерода и марку предложенной преподавателем стали, указать ее свойства и область применения.
5. Сделать выводы и написать отчет о работе в соответствии с заданием.

Контрольные вопросы

1. Дать характеристику фаз и структурных составляющих сталей.
2. Описать влияние углерода на структуру и свойства углеродистых сталей. Привести соответствующий график.
3. Как определить содержание углерода по микроструктуре доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей?
4. Что называется качеством стали? Как подразделяются стали по качеству?
5. Как маркируются углеродистые стали?
6. Какие стали называются автоматными?

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Ответы на контрольные вопросы.
3. Диаграмма состояния системы $Fe - Fe_3C$ (стальная часть).
4. Рисунки микроструктур исследованных сталей.
5. График зависимости твердости сталей от содержания в них углерода.
6. Результаты определения марки стали по ее микроструктуре.
7. Выводы.

Лабораторная работа № 6

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЧУГУНОВ

Цель работы: изучение микроструктуры чугунов разных марок, их свойств и области применения.

Теоретические сведения

Чугунами называют железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % углерода. В машиностроении чугун является одним из основных литейных материалов, прежде всего из-за хороших литейных свойств. Он не подвергается обработке давлением. Главным фактором, определяющим свойства, а следовательно, и область использования чугуна, является его структура, которая может быть весьма разнообразной.

По структуре чугуны делят на белые (БЧ), серые литейные (СЧ), ковкие (КЧ) и высокопрочные (ВЧ). Серыми литейными называют чугуны, в структуре которых высокоуглеродистой фазой является графит пластинчатой формы (ПГ, рис. 6.1). В ковких чугунах графит имеет хлопьевидную (ХГ) форму (рис. 6.2), в высокопрочных – шаровидную (ШГ, рис. 6.3). Включения графита располагаются в металлической основе (матрице), которая может быть ферритной, перлитной или ферритно-перлитной.



Рис. 6.1. Микроструктура серого литейного ферритного чугуна, τ 200

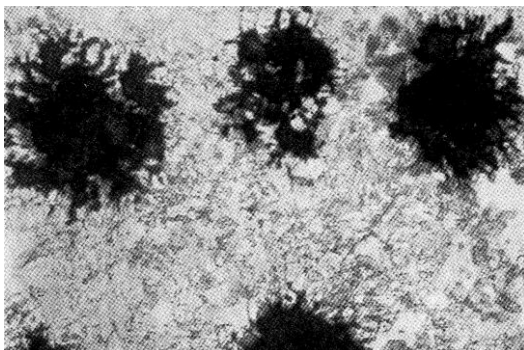


Рис. 6.2. Микроструктура ковкого перлитного чугуна, г 200

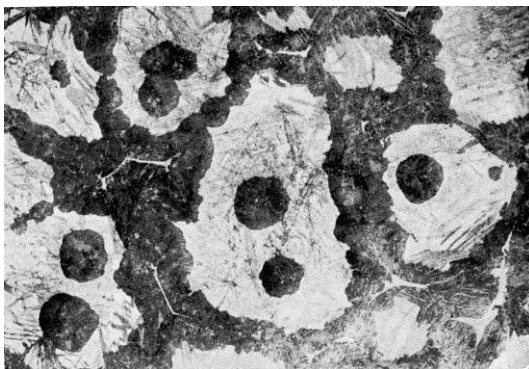


Рис. 6.3. Микроструктура высокопрочного феррито-перлитного Чугуна, г 200

Белые чугуны имеют белый блестящий излом, подобно сталям, кристаллизуются по диаграмме метастабильного равновесия системы $Fe - Fe_3C$ (см. рис. 4.4a). В них практически весь углерод находится в химически связанном состоянии в виде цементита. Процесс структурообразования в белых чугунах рассмотрен в лабораторной работе № 4.

Белые чугуны подразделяются на доэвтектические, эвтектические и заэвтектические. **Доэвтектические белые чугуны** содержат 2,14–4,43 % углерода. Они состоят из перлита ($\Phi + \Psi$) и ледебурита ($\Pi + \Psi$). Перлит имеет дендритное строение, кото-

рое он наследует от аустенита первичного, кристаллизующегося из жидкости и затем превращающегося в перлит (при температуре 727 °С). Основной структуры является эвтектика – ледебурит, состоящая из цементита и расположенного в нем перлита сравнительно высокой дисперсности (рис. 6.4).

Белый эвтектический чугун содержит 4,43 % углерода. Его структура (рис. 6.5) – ледебурит (П + Ц). **Заэвтектические белые чугуны** являются сплавами с повышенным содержанием углерода (более 4,43 %), имеют структуру Л(П + Ц) + Ц_г (рис. 6.6). В матрице ледебурита расположены крупные пластинчатые кристаллы цементита первичного.

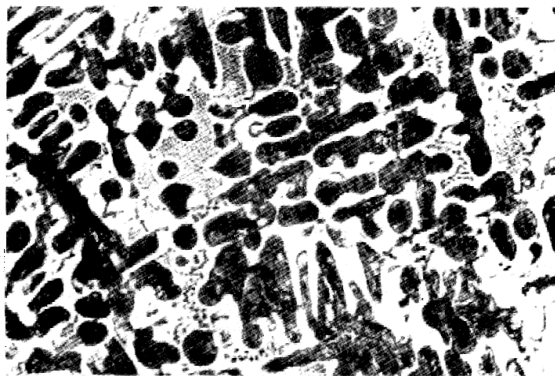


Рис. 6.4. Микроструктура белого доэвтектического чугуна: перлит, ледебурит и цементит вторичный, г 200

Массовые доли фаз и структурных составляющих чугунов могут быть определены с помощью правила отрезков. Применяв его, можно убедиться, что относительное содержание твердой и хрупкой фазы – цементита – возрастает с повышением содержания углерода в сплаве. Например, в структуре белого чугуна с 3 % С находится около 45 % цементита и 55 % феррита, в чугуне с 4,43 % С доля цементита возрастает до 66 %.

Из-за большого содержания цементита белые чугуны имеют повышенную хрупкость и низкие показатели механических свойств. Поэтому в качестве конструкционных материалов

их применяют редко, используя только для изготовления деталей, работающих в условиях повышенного абразивного изнашивания (детали гидромашин, пескометов и др.). Для увеличения износостойкости белые чугуны легируют хромом, ванадием, молибденом и другими карбидообразующими элементами.

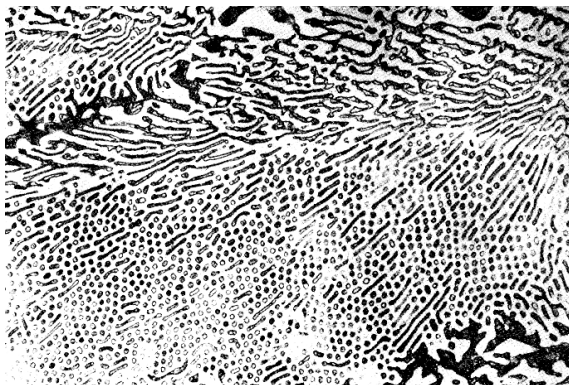


Рис. 6.5. Микроструктура белого эвтектического чугуна:
Ледебурит, $\times 200$

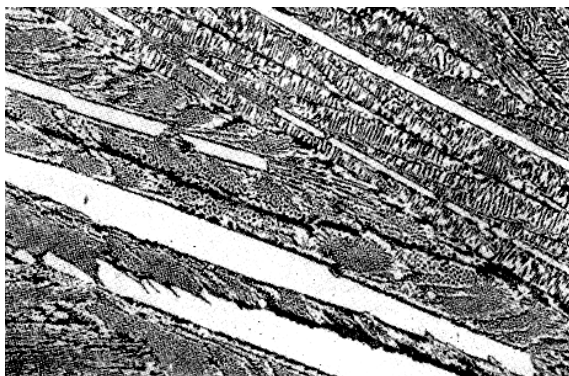


Рис. 6.6. Микроструктура белого доэвтектического чугуна:
ледебурит и цементит первичный, $\times 200$

Если отливку из белого доэвтектического чугуна подвергнуть специальному графитизирующему отжигу, структура чугу-

на изменится; он приобретет высокую прочность и удовлетворительную пластичность. Такой отожженный чугун называется **ковким**.

При выборе режимов термической обработки чугуна, в том числе и режима графитизирующего отжига, необходимо помнить о существовании двух диаграмм состояния железоуглеродистых сплавов – метастабильного и стабильного, т. е. учитывать, что эвтектоидное (и эвтектическое) превращение в чугунах происходит в интервале температур $A_1 \rightarrow A_1'$. Величина этого интервала и его расположение относительно равновесной температуры (t_{PSK}) определяются химическим составом чугуна.

Отжиг белого чугуна основан на метастабильности цемента и обычно ведется по графику, показанному на рис. 6.7.

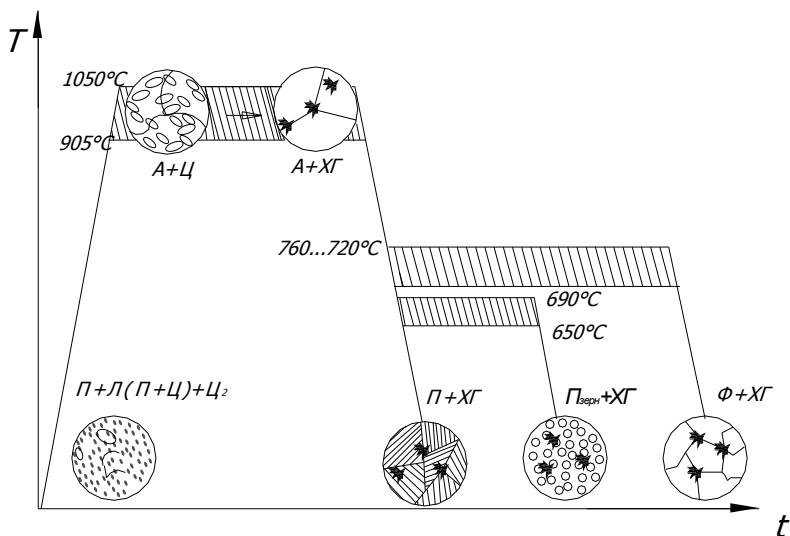


Рис. 6.7. График отжига на ковкий чугун

Рекомендуемый химический состав заливаемого в формы сплава следующий: **2,4–2,9 % C; 1,0–1,6 % Si; 0,3–1,0 % Mn**. Содержание углерода и кремния подбирается из расчета $Si + C \leq 3,8 \%$. При таком составе сплава и ускоренном охлаждении (для этого толщина стенок отливки не должна превышать 20 мм, в отдельных случаях 50 мм) в отливке формируется

структура белого доэвтектического чугуна $\Pi + Л(\Pi + Ц) + Ц_{II}$. После охлаждения отливку отжигают.

Графитизирующий отжиг состоит обычно из двух стадий. Первую стадию рекомендуется проводить при температуре 950–1050 °С. При более высоких температурах возможно оплавление отливок, расположенных вблизи от нагревателей, что недопустимо. Длительность первой стадии отжига подбирается в каждом конкретном случае такой, **чтобы весь цементит, находящийся в структуре отливки ($A + Ц$), распался на $A + ХГ$.**

Металлическая основа чугуна формируется на второй стадии отжига при эвтектоидном превращении. В случае непрерывного охлаждения отливки в области эвтектоидной температуры аустенит распадается на перлит пластинчатый. Получается **ковкий чугун с перлитной металлической основой** (рис. 6.2). Он обладает высокой твердостью ($HВ = 2350–3050$ МПа) и прочностью ($\sigma_B = 650–800$ МПа) в сочетании с небольшой пластичностью ($\delta = 3,0–1,5$ %). Для повышения пластичности при сохранении достаточно высокой прочности проводится непродолжительная (2–4 ч) изотермическая выдержка чугуна или замедленное охлаждение при температуре 690–650 °С. Это вторая стадия отжига, представляющая собой в данном случае отжиг на зернистый перлит. Перлит пластинчатый переходит в перлит зернистый путем сфероидизации (округления) пластин цементита.

Наряду с ковким чугуном с основой перлит зернистый широко распространен в машиностроении **ковкий ферритный чугун**, характеризующийся высокой пластичностью ($\delta = 10–12$ %) и относительно низкой прочностью ($\sigma_B = 370–300$ МПа). Ферритная основа чугуна образуется при очень медленном прохождении интервала 760–720 °С или в процессе изотермической выдержки при температуре 720–700 °С.

Здесь аустенит и цементит, в том числе и цементит перлита, если перлит успел образоваться, распадаются на $\Phi + ХГ$. Продолжительность отжига в целом составляет 20–40 ч (при этом длительность второй стадии примерно в 1,5 раза больше, чем первой). Для сокращения продолжительности отжига белого чугуна на ковкий, что экономически целесообразно, ис-

пользуют ряд приемов. Чтобы ускорить распад цементита, первую стадию отжига проводят при повышенных температурах (1000–1050 °С).

Процесс графитообразования облегчается при введении в расплав чугуна перед его разливкой по формам небольших доз некоторых элементов (модифицирование), создающих дополнительные искусственные центры образования графита. Например, при производстве тонкостенного литья с толщиной стенки $h < 20$ мм вводят алюминий из расчета 0,015–0,025 % от массы сплава. В случае толстостенного литья (h до 50 мм) вводят бор (0,001–0,003 %). Образующиеся тугоплавкие высокодисперсные оксиды Al_2O_3 и нитриды AlN , BN являются центрами кристаллизации графита. В качестве таких центров могут выступать и другие элементы (висмут, теллур, титан). Чугун с модифицирующими добавками называется модифицированным.

Для получения в модифицированном КЧ перлитной основы рекомендуется увеличивать содержание марганца до 1,2 %, хрома и некоторых других элементов. Марганец (хром), растворяясь в цементите, повышает его устойчивость к распаду на Φ и XI в области эвтектоидных температур. Для получения ферритно-перлитной основы продолжительность второй стадии отжига сокращают.

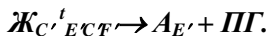
Согласно ГОСТ 1215–79, выпускаются следующие марки ковких чугунов: КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3, КЧ70-2, КЧ80-1,5. Первые две цифры в обозначении марки соответствуют минимальному пределу прочности при растяжении (σ_B , кгс/мм²), цифры после тире – относительному удлинению при растяжении (δ , %). Первые четыре марки, имеющие повышенные значения δ , относятся к ферритным чугунам, все последующие – к перлитным.

Перечень литых изделий из КЧ весьма разнообразен: пробки, гайки, втулки, фланцы, кронштейны, ступицы, тормозные колодки, коленчатые валы и др. Толщина их стенок составляет 3...50 мм, масса деталей – от нескольких граммов до нескольких тонн.

Существенным недостатком технологического процесса получения КЧ является длительный отжиг отливок и ограниче-

ние толщины их стенок (до 50 мм). В массивных отливках в результате замедленного охлаждения при первичной кристаллизации возникает пластинчатый графит (ПГ), который снижает прочность и пластинчатость металлической основы чугуна.

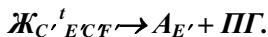
Структура *серого литейного чугуна* (см. рис. 6.1) формируется непосредственно при кристаллизации его в отливке в соответствии с диаграммой стабильного равновесия системы *Fe – C*. Характер структурообразования при эвтектическом превращении определяется, прежде всего, содержанием углерода и кремния в сплаве, а также скоростью охлаждения. Установлено, что, чем больше углерода и кремния в сплаве и чем ниже скорость его охлаждения, тем выше вероятность кристаллизации по диаграмме стабильного равновесия с образованием графитной эвтектики по схеме:



Обычно в серых чугунах содержится 3,0–3,7 % C; 1,2–2,6 % Si. Содержание элементов (%) подбирают так, чтобы $C + Si/3 = 4,3$. При удовлетворении этого условия чугун получается эвтектическим и обладает хорошими технологическими свойствами (жидкотекучестью, малой усадкой, незначительным пригаром металла к форме и др.).

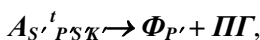
Высокое содержание кремния в сером чугуне объясняется тем, что кремний является сильным графитообразующим элементом. Растворяясь в аустените, кремний способствует уменьшению растворимости углерода в нем. В результате жидкая фаза обогащается углеродом и процесс образования графита облегчается. При низком содержании углерода и кремния чугун модифицируют графитизирующими добавками (алюминием, кальцием, церием).

При медленном охлаждении сплав не переохлаждается до эвтектической температуры (t_{ECF} на диаграмме метастабильного состояния, см. рис. 4.4.), и расплав кристаллизуется по диаграмме стабильного состояния с образованием графитной эвтектики:



Если же появляется некоторое количество цементита ($\text{Ж} \rightarrow \text{А} + \text{ПГ} + \text{Ц}$), то он при наличии кремния теряет устойчивость и быстро распадается с образованием $\text{А} + \text{ПГ}$.

Металлическая основа серых чугунов, как и ковких, формируется из аустенита при эвтектоидном распаде. Образование перлита (диаграмма метастабильного состояния, область t_{PSK}) происходит легко, в сравнительно короткий промежуток времени. Получается *серый литейный чугун на перлитной металлической основе*. Формирование же феррита, т. е. распад аустенита по диаграмме стабильного состояния



протекает крайне инертно и только около имеющихся пластин графита. Вокруг **ПГ** образуется ферритная оторочка той или иной ширины. Получается *серый литейный чугун с ферритно-перлитной металлической основой*.

Для получения *серого ферритного литейного чугуна* (см. рис. 6.1) оставшийся перлит устраняется путем изотермической выдержки при температуре 690–650 °С, цементит перлита распадается на $\Phi + \text{ПГ}$. В этом случае чугун необходимо модифицировать.

При конструировании деталей машин следует учитывать, что серые чугуны работают на сжатие лучше, чем на растяжение. Они мало чувствительны к надрезам при циклическом нагружении, хорошо поглощают колебания при вибрациях, обладают высокими антифрикционными свойствами из-за смазывающей способности графита. Серые чугуны хорошо обрабатываются резанием, дешевы и просты в изготовлении.

Согласно ГОСТ 1412–85, отливки изготавливают из чугуна следующих марок: СЧ10, СЧ15, СЧ18, СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35. Цифры в обозначении марки соответствуют минимальному пределу прочности при растяжении ($\sigma_{\text{в}}$ кгс/мм²). Чугун СЧ10 – ферритный, СЧ15, СЧ18, СЧ20 – ферритно-перлитные, начиная с СЧ25 – перлитные. Из ферритно-перлитных чугунов в автомобилестроении изготавливают картеры, тормозные барабаны, крышки и др.; из перлитных – блоки цилиндров, гильзы,

маховики и др. В станкостроении серый чугун является основным конструкционным материалом (станины станков, столы и верхние салазки, шпиндельные бабки, колонки, каретки и др.). Для производства деталей с толщиной стенок менее 100 мм рекомендуются чугуны СЧ28, СЧ30, более 100 мм – СЧ35. Из серого чугуна, содержащего фосфор (0,5 % Р), изготавливают художественные изделия.

В настоящее время наблюдается тенденция к замене ковкого чугуна **высокопрочным чугуном с графитом шаровидной формы** (ШГ), который в меньшей степени ослабляет металлическую основу, чем графит хлопьевидной формы и, тем более, пластинчатой формы (см. рис. 6.3). Такой чугун получают модифицированием (микролегированием) жидкого чугуна присадками (0,1–0,5 % магния от массы обрабатываемой порции чугуна, 0,2–0,3 % церия, иттрия и некоторых других элементов). При этом перед вводом модификаторов необходимо снизить содержание серы до 0,02–0,03 % (против 0,1–0,15 % в СЧ и КЧ), что существенно сдерживает широкое внедрение высокопрочного чугуна в производство.

Рекомендуемый химический состав высокопрочного чугуна (2,7–3,7 % С; 0,5–3,8 % Si) выбирается в зависимости от толщины стенки отливки (чем тоньше стенка, тем больше углерода и кремния). Часто в структуре отливок образуется ледебурит. В этом случае их подвергают высокотемпературному графитизирующему отжигу, подобно белому чугуну, для разложения цементита. Продолжительность отжига чугуна с графитом шаровидной формы значительно меньше продолжительности отжига белого, так как в ВЧ содержание графитизирующих элементов (углерода, кремния) более высокое.

Согласно ГОСТ 7293–85, отливки изготавливают из высокопрочного чугуна следующих марок: ВЧ35, ВЧ40, ВЧ45, ВЧ50, ВЧ60, ВЧ70, ВЧ80, ВЧ100 (цифры в обозначении соответствуют минимальному пределу прочности при растяжении σ_b , кгс/мм²).

Высокопрочный чугун обладает хорошими литейными и технологическими свойствами, применяется для замены стальных литых и кованных деталей (коленчатые и распределительные валы, детали зубчатых передач и др.). Для повышения износостойкости деталей из ВЧ применяется азотирование (или азоти-

рование с последующей обдувкой дробью), при котором в поверхностных слоях изделий создаются благоприятные сжимающие напряжения. Рекомендуется также подвергать изделия объемной закалке. Образование мелкоигольчатого мартенсита в закаленном поверхностном слое изделий способствует повышению их износостойкости в три и более раз.

Для улучшения прочностных и эксплуатационных характеристик или придания специальных свойств (жаростойкость, коррозионной стойкости и др.) чугуны легируют. Так, жаростойкие чугуны содержат 5–7 % Si (силал), коррозионно-стойкие – 12–18 % Si (ферросилал).

Высокой износостойкостью обладают так называемые *полловинчатые чугуны* (ИЧ). В них часть углерода находится в свободном состоянии в виде *ШГ* или *ПГ*, часть – в связанном состоянии, в виде цементита. К таким чугунам относятся, например, серый чугун марки ИЧНХ2, легированный никелем и хромом, а также чугуны ИЧХНТ, ИЧН1МШ (шаровидный графит). Из этих чугунов отливают детали двигателей внутреннего сгорания (крышки и днища цилиндров, головки поршней и др.).

К износостойким относится *отбеленный серый чугун* (ОЧ), имеющий тонкий поверхностный слой со структурой белого чугуна. Применяется для изготовления отливок прокатных валов, вагонных колес и т. п.

Для определения в сплаве наличия графита и формы его включений шлиф первоначально исследуют в нетравленном состоянии. Графит выглядит темной фазой на светлом фоне нетравленного шлифа. По форме графита устанавливают вид чугуна: серый, ковкий, высокопрочный. Затем изучают металлическую основу травленных чугунов. Детальную оценку структуры производят по ГОСТ 3443–77, согласно которому структура чугуна оценивается как по графиту, так и по матрице. Определяют форму графита, его распределение, содержание и размеры включений (при оценке матрицы – тип структуры, содержание перлита и феррита и т. д.).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.
2. Вычертить двойную диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов, ее участок, соответствующий чугунам.
3. Описать фазы и фазовые превращения, возможные в чугунах.
4. Дать определение белых чугунов. Изучить, зарисовать и объяснить их микроструктуру. Указать химический состав. Описать процесс структурообразования БЧ химического состава, заданного преподавателем. Описать свойства и назвать область использования БЧ.
5. Дать определение ковких чугунов. Описать способ их получения, начертить график отжига. Объяснить формирование структуры КЧ с определенной (по заданию преподавателя) металлической основой. Изучить, зарисовать и объяснить микроструктуру. Указать химический состав, свойства и область применения КЧ. Объяснить принцип их маркировки.
6. Дать определение серых чугунов. Указать их химический состав, описать процесс структурообразования. Изучить, зарисовать и объяснить микроструктуру. Привести марки СЧ, назвать их механические свойства и область применения.
7. Дать определение высокопрочных чугунов. Объяснить способ получения, указать химический состав. Изучить, зарисовать микроструктуру. Назвать марки ВЧ, их свойства, область применения и преимущества перед другими (СЧ и КЧ) чугунами.
8. По заданию преподавателя описать пути повышения износостойкости определенных чугунов.
9. Написать отчет по работе в соответствии с вышеуказанными пунктами заданий.

Контрольные вопросы

1. Какие сплавы называются белыми, серыми чугунами?
2. Какие сплавы называются серыми литейными, ковкими, высокопрочными чугунами?

3. Каковы структура, свойства, маркировка и применение белых чугунов?
4. Как получают ковкий чугун? Каковы его структура, свойства, маркировка и применение?
5. Как получают высокопрочный чугун? Какова его структура, свойства, маркировка и применение?
6. Каковы структура, свойства, маркировка и применение половинчатых, отбеленных чугунов?

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Область диаграммы состояния сплавов системы $Fe - C$ (стабильной и метастабильной), относящаяся к чугунам.
4. Результаты микроструктурного анализа сплавов, выполненного в соответствии с заданиями.
5. Выводы.

Лабораторная работа № 7

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ

Цель работы: изучение методики назначения режимов отжига, нормализации и закалки; приобретение практических навыков проведения различных операций термической обработки; исследование влияния содержания углерода и температуры отпуска на твердость закаленной стали.

Теоретические сведения

Около 40 % стали, потребляемой машиностроением для изготовления деталей машин, приборов, оборудования, подвергают различным видам термической обработки. Под термической обработкой сплавов понимают совокупность операций теплового воздействия на металлы (иногда в сочетании с химическим, механическим и другими воздействиями) с целью изменения их структуры, а следовательно, и свойств. Поскольку основными факторами при термической обработке являются температура и время, то любой процесс термической обработки можно представить в этих координатах.

Основные параметры режима термической обработки – температура нагрева (t_n), скорость нагрева (v_n), продолжительность выдержки при температуре нагрева (τ_o) и скорость охлаждения (v_o).

Температура нагрева сплава при конкретном виде термической обработки определяется температурами фазовых превращений (критическими температурами) на соответствующей диаграмме его состояния. Эти критические температуры для каждой стадии обозначаются буквой A с соответствующим индексом ($A_1, A_2, A_3, A_4, A_{cm}$). Критические точки A_1 на линии PSK показывают превращение $A \rightarrow \Pi$ (при охлаждении) или $\Pi \rightarrow A$ (при нагреве); A_3 на линии GS – начало выделения феррита из аустенита при охлаждении или конец его растворения при нагреве; A_{cm} на линии SE – начало выделения цементита вто-

ричного из аустенита в заэвтектоидных сталях при охлаждении или конец его растворения при нагреве.

Поскольку при нагревах и охлаждениях сплавов с реальными скоростями фазовые превращения в твердом состоянии протекают со значительным тепловым гистерезисом, следует отличать критические температуры при нагреве сплава, которые обозначаются A_{c1} , A_{c3} , A_{ccm} , от аналогичных температур при охлаждении A_{r1} , A_{r3} , A_{rcm} . Температура нагрева при термической обработке сталей во избежание их оплавления не должна превышать линии солидуса.

Скорость нагрева выбирается в зависимости от ряда факторов: теплопроводности стали, формы и размеров деталей, общей массы нагреваемых деталей, характера их расположения в печи и некоторых других.

Продолжительность выдержки при заданной температуре нагрева определяется скоростью фазовых превращений, происходящих в металле. Выдержка необходима для завершения фазовых превращений и выравнивания температуры по объему детали.

Скорость охлаждения выбирается в зависимости от степени устойчивости переохлажденного аустенита, определяемой преимущественно химическим составом стали, а также от требуемой структуры и свойств сплава. В зависимости от скорости охлаждения углеродистой стали могут быть получены перлитная, сорбитная, трооститная или мартенситная структуры с различными свойствами.

В соответствии с общепринятой классификацией (по А.А. Бочвару) термическая обработка делится на собственно термическую, химико-термическую и деформационно-термическую (термомеханическую). Первая в свою очередь включает четыре основные группы: отжиг первого рода, отжиг второго рода, закалка, отпуск.

Температуры нагрева при различных видах отжига приведены на рис. 7.1.

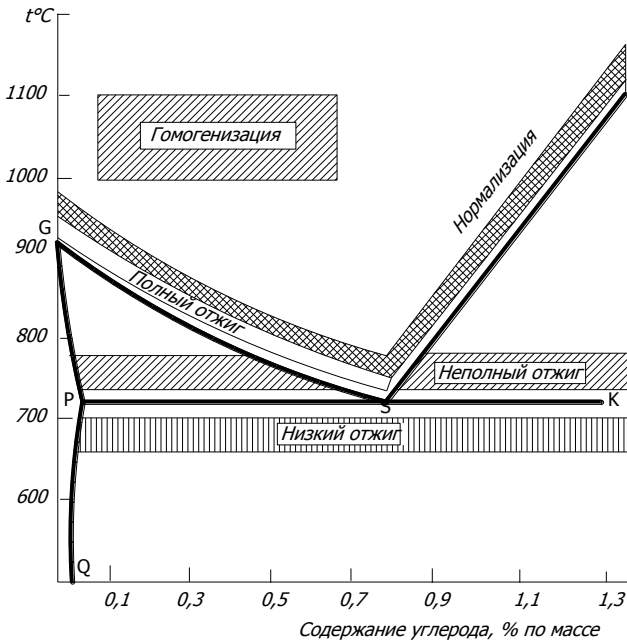


Рис. 7.1. Температуры нагрева для различных видов отжига

Отжиг первого рода способствует устранению отклонений в структуре сплавов от равновесного состояния, возникших при литье, деформировании, механической обработке, сварке и других технологических процессах. Различают следующие основные виды отжига первого рода: диффузионный, рекристаллизационный, низкий.

Диффузионный, или гомогенизирующий, отжиг применяется для устранения ликвации, т. е. неоднородности химического состава внутри отдельных зерен или в объеме сплава, возникающей чаще всего в процессе кристаллизации. Он состоит из нагрева стали до температур, значительно превышающих критические (1050–1200 °C) и обеспечивающих диффузию неравномерно распределенных элементов, а также длительной выдержки (10–100 ч) и медленного охлаждения (с выключенной печью).

Для устранения различных отклонений в структуре сплавов от равновесного состояния, возникших в результате наклепа при пластической деформации, применяется **рекристаллизационный отжиг**. Он включает нагрев металла до температур, превышающих температуру рекристаллизации (для стали $T_{рекр} = 0,3-0,4 T_{пл}$), выдержку (1–2 ч), медленное охлаждение.

Низкий отжиг применяется для устранения остаточных внутренних напряжений, возникающих, например, в зоне термического влияния при сварке изделий, вследствие неравномерного охлаждения отливок или срезания отдельных объемов металла при механической обработке и нарушения установившихся напряжений между отдельными частями детали. Он включает нагрев металла до температур 150–700 °С, выдержку и последующее медленное охлаждение.

Отжиг второго рода (фазовая перекристаллизация) – термическая обработка, включающая нагрев стали до температур, превышающих A_{c1} или A_{c3} , выдержку и медленное охлаждение и имеющая целью обеспечение фазовых превращений и достижение практически равновесных (в соответствии с диаграммой состояния системы $Fe - Fe_3C$) фазового и структурного состояний. После отжига структура сталей такова: доэвтектоидных – $\Phi + \Pi$; эвтектоидных – Π ; заэвтектоидных – $\Pi + \text{Ц}_{II}$. Поскольку такой отжиг обеспечивает минимальную твердость и наилучшую обрабатываемость стали резанием, как правило, он является подготовительной термической обработкой перед обработкой резанием. Однако в некоторых случаях (например, для крупных отливок) он может быть и окончательным видом обработки. Различают следующие основные виды отжига второго рода: полный, неполный, нормализационный, изотермический.

При **полном отжиге** сталь нагревают до температуры, на 30–50 °С превышающей A_{c3} , выдерживают при этой температуре, медленно охлаждают до 500–600 °С вместе с печью, а затем на воздухе. Полный отжиг обеспечивает полную фазовую перекристаллизацию и применяется обычно для доэвтектоидных сталей.

При **неполном отжиге** температура нагрева стали на 30–50 °С выше A_{c1} , но не превышает A_{c3} или $A_{сст}$. После вы-

держки сталь медленно охлаждают с печью. При нагреве происходит частичная (неполная) перекристаллизация стали (в структуре $\Phi + П$ или $П + Ц_{II}$ только перлит превращается в аустенит). Неполный отжиг, проводимый обычно для заэвтектоидных сталей, называют сфероидизацией. Он позволяет получать сталь со структурой зернистого перлита. Такая сталь имеет более низкую твердость, большую пластичность и лучшую обрабатываемость резанием, чем сталь с пластинчатым перлитом.

Нормализационный отжиг (нормализация) включает нагрев доэвтектоидной стали до температуры, на $30\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$ превышающей A_{c3} , а заэвтектоидной – на $30\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$ превышающей A_{cm} , изотермическую выдержку и охлаждение на спокойном воздухе. Ускоренное охлаждение при нормализации позволяет получить более дисперсную (измельченную) структуру стали, что приводит к повышению ее твердости и прочности, по сравнению со сталью, подвергнутой полному отжигу. Поскольку температуры нагрева под нормализацию весьма высоки, во избежание значительного роста зерна металла выдержка должна быть минимальной, но обеспечивающей равномерный прогрев изделия по всему сечению.

Нормализацией устраняется цементитная сетка в заэвтектоидных сталях при подготовке их к закалке. Учитывая более высокую производительность нормализации по сравнению с полным или неполным отжигом, их часто заменяют ею при подготовке углеродистых сталей к механической обработке.

Изотермический отжиг включает нагрев стали до температуры, на $30\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$ превышающей A_{c3} , выдержку, а затем перенос детали в другую печь с заданной температурой (ниже A_{c1}) и изотермическую выдержку ее до полного распада аустенита. Изотермический отжиг улучшает обрабатываемость резанием и применяется для деталей и заготовок небольших размеров.

Закалка – термическая обработка, включающая нагрев стали выше критических температур, изотермическую выдержку и последующее охлаждение со скоростью выше критической ($V_{кр}$). Под **критической скоростью закалки** понимают минимальную скорость охлаждения, обеспечивающую бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит. Цель закалки – повышение твердости, прочности и износостойкости стали. Изме-

няя скорость охлаждения нагретых сталей, имеющих аустенитную структуру, и варьируя тем самым степень переохлаждения, можно получать стали с различной структурой и свойствами (рис. 7.2).

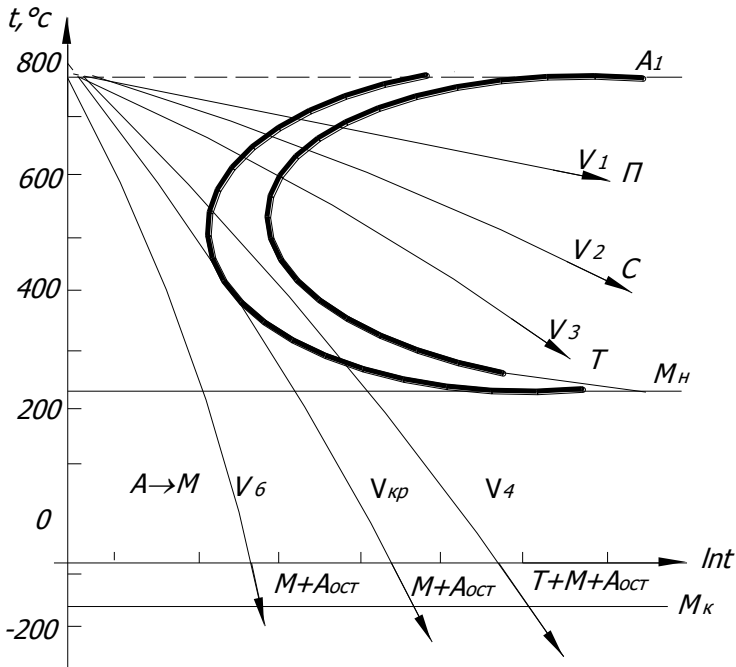


Рис. 7.2. Диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита с наложенными на нее кривыми охлаждения

Так, при небольших скоростях охлаждения в интервале температур 720–550 °С из аустенита образуются пластинчатые феррито-цементитные смеси (перлит, сорбит или троостит). По мере увеличения скорости охлаждения дисперсность смеси, неравновесность структуры стали, а, следовательно, ее твердость и прочность возрастают. При охлаждении со скоростью выше критической из аустенита образуется мартенсит, представляющий собой пересыщенный твердый раствор внедрения углерода в α -Fe. Зависимость критической скорости закалки от

содержания углерода в стали представлена на рис. 7.3. На $V_{кр}$ влияют также вид охлаждающей среды, размер зерна и легирующие элементы.

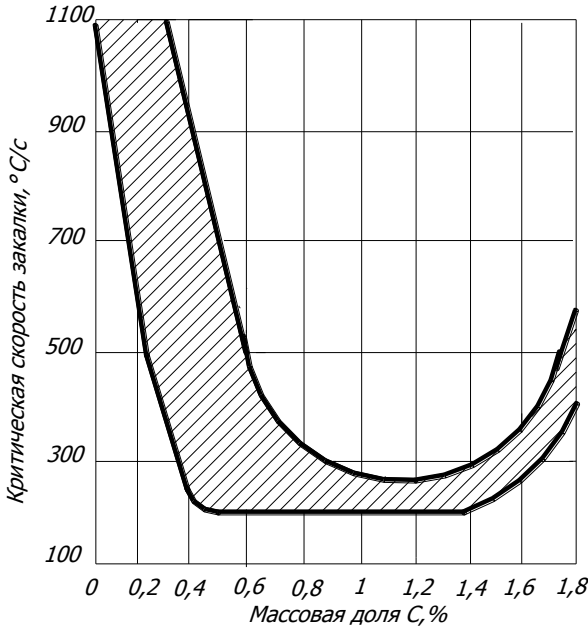


Рис. 7.3. Критическая скорость заковки в зависимости от содержания углерода в стали

По возрастанию интенсивности охлаждения применяемые в практике термической обработки охлаждающие среды можно расположить так: минеральные масла, вода, водные растворы солей, кислот, щелочей. Для заковки углеродистых сталей предпочтительны вода или водные растворы солей. Идеальный охладитель при заковке такой, который не допускает распада аустенита на перлитные структуры, обеспечивая максимальную скорость охлаждения в интервале температур $A_1 - M_n$ и минимально допустимую в мартенситном интервале, что исключает появление значительных внутренних структурных и термических напряжений, коробления, трещин.

Недостатки воды как охладителя: высокая скорость охлаждения в мартенситном интервале и резкое падение охлаждающей способности при ее нагреве. Минеральные масла лишены этих недостатков, но характеризуются в несколько раз меньшей охлаждающей способностью. Поэтому их целесообразнее применять для охлаждения легированных сталей, критическая скорость закалки которых меньше, чем углеродистых.

При расчете продолжительности нагрева τ_n под термическую обработку можно руководствоваться табл. 7.1. Продолжительность изотермической выдержки τ_i принимают чаще всего равной 1/5 от общей продолжительности нагрева.

Таблица 7.1

Ориентировочная продолжительность нагрева стальных изделий

Тип нагревательного устройства	Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева (с) на 1 мм сечения изделия	
		углеродистой	легированной
Пламенная печь	800–900	60–70	65–80
	Электropечь	770–820	60–65
Соляная ванна	820–880	50–55	60–65
	770–820	12–14	18–20
	820–880	10–12	16–18

Закалку доэвтектоидных сталей, включающую нагрев до температур выше A_{c3} , т. е. в аустенитное состояние, называют **полной закалкой**. Для заэвтектоидных сталей используют **неполную закалку**, при которой сталь, нагретая до температуры, несколько превышающей A_{c1} , приобретает структуру $A + \text{ЦII}$, при охлаждении претерпевает лишь превращение $A \rightarrow M$, т. е. частичное (неполное) изменение структуры (рис. 7.4).

Сохранение некоторой доли твердого и износостойчивого цементита вторичного способствует повышению прочностных свойств стали. Полная закалка заэвтектоидных сталей с нагревом до температур, превышающих A_{ccm} , приводит к повышению содержания в них аустенита остаточного и ухудшению свойств закаленных сталей.

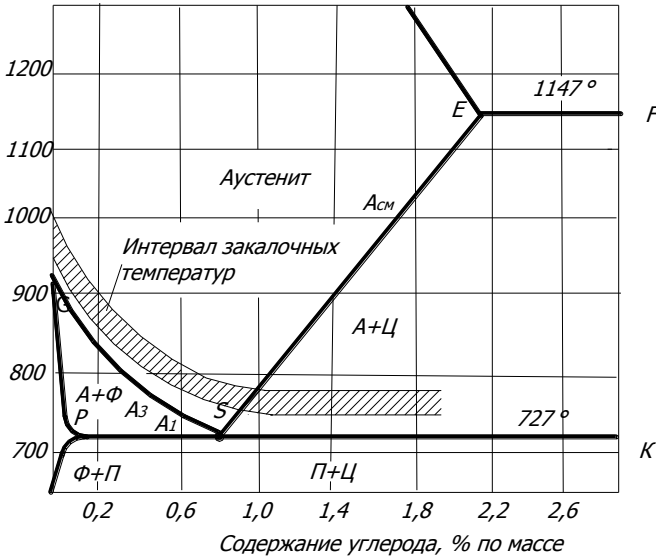


Рис. 7.4. Оптимальный интервал закалочных температур для углеродистых сталей

Неполная закалка для доэвтектоидных сталей нежелательна, так как после нее, наряду с твердым мартенситом, сохраняется мягкий избыточный феррит. В промышленности в зависимости от характера охлаждения применяют различные способы закалки: в одном или двух охладителях, струйчатую, ступенчатую, изотермическую, с самоотпуском. Во избежание коробления или образования трещин вследствие высоких внутренних напряжений, возникших при закалке, в дальнейшем сталь подвергают отпуску.

Отпуск – операция термической обработки, включающая нагрев закаленной стали до температур ниже A_1 , выдержку при этой температуре, охлаждение. Цель отпуска – уменьшение внутренних напряжений в металле и получение требуемых структуры и свойств. При нагреве закаленной стали со структурой мартенсита или мартенсита и аустенита остаточного протекают следующие превращения. До температуры 100 °С (стадия предвыделения) в мартенсите происходит диффузионное пере-

распределение углерода. Образуются ультрамикроскопические объемы с содержанием углерода и структурой, близкими к аналогичным показателям той фазы, которая должна выделиться. На первой стадии отпуска в интервале температур 100–200 °С в результате выделения из мартенсита углерода образуется ***ε-карбид*** ($Fe_{2,4}C$) в виде тонких пластин. Решетка карбида когерентно связана с решеткой мартенсита, который значительно обеднен углеродом (0,25–0,35 % С). На второй стадии (200–300 °С) аустенит остаточный превращается в смесь мартенсита с 0,25–0,35 % С и когерентного ϵ -карбида. Одновременно происходит дальнейшее выделение углерода из мартенсита, который обедняется углеродом (0,1 % С), становясь отпущенным, решетка его из тетрагональной трансформируется в кубическую. Обогащаясь углеродом, ϵ -карбид превращается в цементит Fe_3C .

На третьей стадии отпуска (300–350 °С) заканчивается выделение углерода из мартенсита, который становится ферритом. Происходит срыв когерентности решетки феррита и цементита. В конечном итоге к концу третьей стадии отпуска формируется смесь феррита и цементита. Дальнейший нагрев стали приводит к коагуляции (рост с одновременным округлением) ферритно-цементитной смеси. Зернистая феррито-цементитная смесь, образующаяся при отпуске (350–500 °С) из мартенсита, называется ***трооститом отпуска***, при 500–650 °С – ***сорбитом отпуска***, выше 650 °С – ***перлитом отпуска***.

Троостит, сорбит и перлит отпуска, в отличие от получаемых из аустенита, при непрерывном охлаждении имеют зернистое, а не пластинчатое строение. Стали с зернистой структурой характеризуются более высокой пластичностью и лучшей обрабатываемостью резанием.

Низкий отпуск включает нагрев закаленной стали до 150–250 °С. Он применяется для придания поверхностным слоям изделий высокой твердости и износостойкости. Низкий отпуск, несколько уменьшающий внутренние напряжения, повышающий вязкость стали при сохранении ее высокой твердости, широко применяют при изготовлении измерительного, режущего и штампового инструмента (шаблоны, фрезы, метчики, зубила, штампы и др.), для деталей после цементации.

При *среднем отпуске* закаленная сталь нагревается до 300–400 °С, чем обеспечивается получение структуры троостита отпуска, обладающего достаточной твердостью (40–55 HRC) и прочностью при высоком пределе упругости. Средний отпуск еще в большей степени, чем низкий, способствует уменьшению внутренних напряжений и наиболее часто применяется при термической обработке рессор и пружин.

Высокий отпуск заключается в нагреве закаленной стали до температуры 500–650 °С и обеспечивает получение структуры сорбита отпуска, обладающего хорошим комплексом свойств (прочность, ударная вязкость, твердость). Закалку с высоким отпуском называют *термическим улучшением* и применяют для ответственных деталей из среднеуглеродистых сталей (коленчатые валы, шатуны и т. д.).

На рис. 7.5 представлена зависимость механических свойств углеродистой стали от температуры отпуска. По этой зависимости различают низкотемпературный (низкий), среднетемпературный (средний) и высокотемпературный (высокий) виды отпуска.

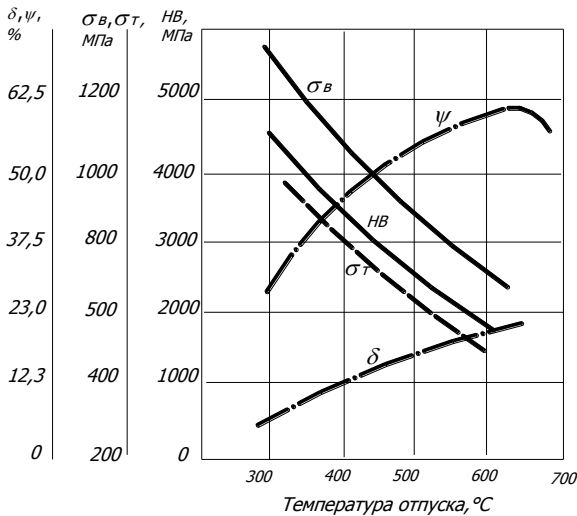


Рис. 7.5. Зависимость механических свойств стали от температуры отпуска

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.

2. Составить режимы отжига, нормализации, закалки и отпуска сталей 45 и У10, используя справочники, марочники сталей и материалы данной работы.

3. Ознакомиться с принципами работы лабораторных нагревательных устройств.

4. Измерить твердость серии образцов из сталей 45 и У10 до закалки.

5. Загрузить образцы сталей 45 и У10 в заранее разогретые печи и провести различные операции термической обработки в соответствии с рассчитанными режимами.

6. Измерить твердость образцов закаленных сталей 45 и У10.

7. Закаленные образцы сталей 45 и У10 подвергнуть отпуску при различных температурах (200, 400, 600 °С) и затем измерить их твердость.

8. Результаты всех измерений внести в табл. 7.2 и 7.3.

9. Проанализировать скорость охлаждения стали при отжиге, нормализации и закалке и ее влияние на свойства сталей 45 и У10.

10. Сделать выводы по работе и составить отчет в соответствии с заданиями.

При выполнении работы предусматривается знание студентами диаграмм изотермического распада переохлажденного аустенита.

Влияние термической обработки на твердость сталей 45 и У10

Режим термической обработки	Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, мин	Продолжительность выдержки, мин	Охлаждающая среда	HRC	HB
Сталь 45						
Отжиг						
Нормализация						
Закалка						
Отпуск	200					
Отпуск	400					
Отпуск	600					
Сталь У10						
Отжиг						
Нормализация						
Закалка						
Отпуск	200					
Отпуск	400					
Отпуск	600					

Таблица 7.3

Влияние содержания углерода на твердость закаленной стали

Марка стали	Содержание углерода, %	Твердость		
		HRB	HRC	HB
20	0,2			
45	0,45			
У8	0,8			
У12	1,2			

Контрольные вопросы

1. Что называется термической обработкой металлов?
2. Основные параметры режима термической обработки.
3. Классификация видов термической обработки (по А.А. Бочвару).
4. Отжиг первого рода – виды, режимы, назначение.
5. Отжиг второго рода – виды, режимы, назначение.
6. Что называется закалкой стали? Цель закали. Структура и свойства стали после закали.
7. Что понимают под критической скоростью закали? От чего она зависит?
8. Охлаждающие среды.
9. Продолжительность выдержки стали при нагреве под закали.
10. Виды закали стали.
11. Выбор температуры нагрева стали под закали.
12. Отпуск стали – виды, режимы, назначение.
13. Структура и свойства стали после отпуска.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Область диаграммы состояния сплавов системы $Fe - C$, относящаяся к сталям с температурными интервалами нагрева сталей под термическую обработку.
4. Режимы отжига, нормализации, закали и отпуска сталей 45 и У10.
5. Результаты измерения твердости сталей 45 и У8 после различных видов термической обработки в соответствии с заданиями.
6. Выводы.

Лабораторная работа № 8

СТРУКТУРА СТАЛЕЙ В НЕРАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Цель работы: изучение влияния закалки и отпуска на структуру углеродистых сталей; установление связи между структурой термически обработанных сталей, их диаграммами изотермического распада аустенита и механическими свойствами.

Теоретические сведения

Эксплуатационные свойства стали зависят от ее химического состава и структуры. Желаемое изменение структуры, а следовательно, и механических свойств, достигается термической обработкой. Различные структуры стали формируются в процессе ее охлаждения из аустенитного состояния.

Незначительная степень переохлаждения или весьма медленное охлаждение обеспечивает получение равновесных структур (см. лабораторную работу № 7). Чем больше степень переохлаждения аустенита или скорость его охлаждения, тем при более низких температурах происходит превращение аустенита, тем более неравновесная структура получаемой стали. Сталь при этом может приобрести структуры сорбита, троостита, игольчатого троостита (бейнита) или мартенсита.

Закалка, обеспечивающая получение наиболее неравновесной структуры стали – мартенсита, сопровождается возникновением больших внутренних напряжений. Поскольку эти напряжения могут вызвать коробление или разрушение детали, их уменьшают путем отпуска.

При отпуске из структур закаленной стали образуются структуры отпуска (троостит, сорбит, перлит).

Рассмотрим подробнее структуры углеродистых сталей, образующиеся при закалке, а затем при отпуске. Получаемая структура стали зависит не только от скорости охлаждения аустенита, но и от температуры нагрева и химического состава стали.

Низкоуглеродистая сталь, содержащая до 0,15 % углерода, нагретая выше температуры A_{C3} и закаленная в воде, имеет структуру малоуглеродистого мартенсита (рис. 8.1).



Рис. 8.1. Микроструктура закаленной низкоуглеродистой (0,15 % C) стали, $\times 200$

Мартенсит – это пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. Он содержит столько углерода, сколько было в аустените, т.е. в стали. Мартенсит имеет тетрагональную объемно центрированную решетку. С увеличением содержания углерода тетрагональность кристаллической решетки мартенсита, твердость и прочность закаленной стали возрастают. Он имеет характерное пластинчатое, под микроскопом – игольчатое, строение. Рост пластин мартенсита происходит со скоростью около 1000 м/с по бездиффузионному механизму. Они ориентируются по отношению друг к другу под углом 60° и 120° в соответствии с определенными кристаллографическими плоскостями аустенита в пределах аустенитного зерна. Чем выше температура нагрева под закалку и чем, следовательно, крупнее зерно аустенита, то тем более крупноигольчатым и хрупким он будет.

Твердость мартенсита весьма высока, например, для среднеуглеродистой стали – 55–65 HRC (HB = 5500–6500 МПа). Превращение аустенита в мартенсит сопровождается увеличением удельного объема стали, поскольку мартенсит имеет больший объем, чем аустенит. В сталях, содержащих более

0,5 % С, не происходит полного превращения аустенита в мартенсит и сохраняется так называемый остаточный аустенит. Чем выше содержание углерода в стали, тем ниже температурный интервал ($M_n - M_k$) мартенситного превращения (рис. 8.2а) и больше остаточного аустенита (рис. 8.2б). При обработке холодом можно достичь температуры M_k и обеспечить переход аустенита остаточного в мартенсит.

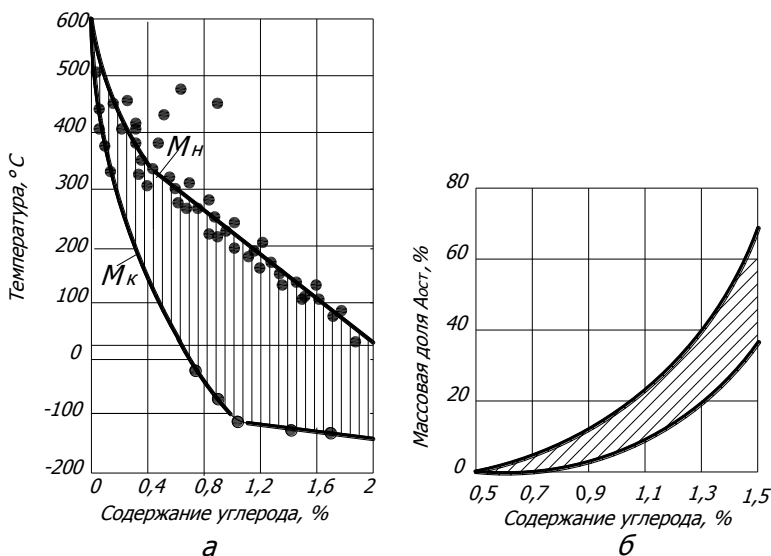


Рис. 8.2. Изменение температурного интервала мартенситного превращения – а (область $M_n - M_k$ заштрихованная, сплошная линия – $t_{комн}$) и массовой доли остаточного аустенита – б (возможная доля $A_{ост}$ заштрихованая) от содержания углерода в стали

В доэвтектоидных сталях, закаленных с оптимальных температур (на 30–50 °С выше A_{C3}), мартенсит имеет мелко-игльчатое строение (рис. 8.3).

Заэвтектоидные стали подвергают неполной закалке (температура нагрева на 30–50 °С превышает A_{C1}). Сталь приобретает структуру мартенсита с равномерно распределенными зернами вторичного цементита и остаточного аустенита (5–10 % $A_{ост}$) (рис. 8.4).

После полной закалки заэвтектоидная сталь имеет структуру крупноигльчатого мартенсита и в ней содержится свыше 20 % остаточного аустенита (рис. 8.5). Такая сталь обладает значительно меньшей твердостью, чем после неполной закалки.

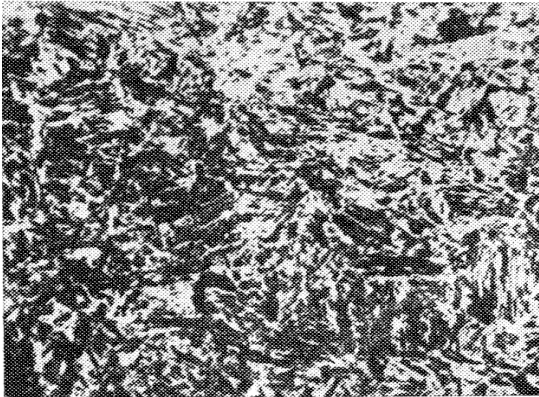


Рис. 8.3. Мартенсит закалки в доэвтектоидной стали, $\times 600$

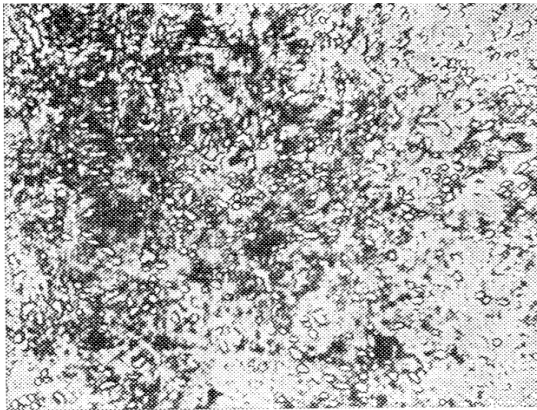


Рис. 8.4. Микроструктура закаленной заэвтектоидной стали: мартенсит, аустенит остаточный, зерна цементита вторичного, $\times 400$

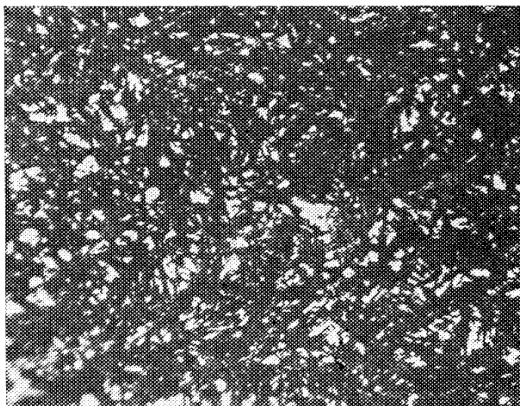
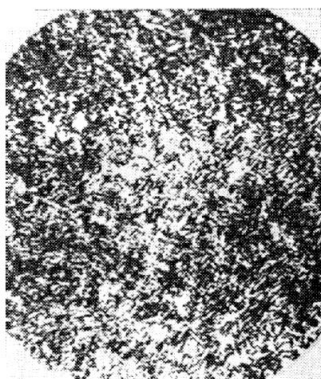


Рис. 8.5. Микроструктура перегретой закаленной стали:
 мартенсит крупноугольчатый, аустенит остаточный, Г 400

Закалка на мартенсит обеспечивается охлаждением углеродистых сталей в воде со скоростью выше критической. При более медленном охлаждении стали из аустенитного состояния, например, в масле со скоростью, меньше критической, аустенит при температурах 400–500 °С распадается на высокодисперсную ферритоцементитную смесь пластинчатого строения, называемую *трооститом закалки*. Троостит – структура с повышенной травимостью (рис. 8.6а) и характерным пластинчатым строением (рис. 8.6б).



а



б

Рис. 8.6. Микроструктура троостита закалки:
 а – увеличение 500; б – увеличение 7500

Еще более медленное охлаждение стали (например, в струе холодного воздуха) вызывает при температурах 500–650 °С распад аустенита на более грубую, чем троостит, феррито-цементитную смесь также пластинчатого строения, называемую **сорбитом закалки**. По мере уменьшения скорости охлаждения и перехода от структур мартенсита к трооститу, сорбиту и, наконец, перлиту твердость стали уменьшается.

Сталь с неравновесной мартенситной структурой при нагреве получает равновесную перлитную структуру. При нагреве закаленной стали до температур 150–250 °С (низкий отпуск) образуется структура кубического (**отпущенного**) **мартенсита**. Увеличение температуры отпуска (300–400 °С – средний отпуск и 550–650 °С – высокий отпуск) ведет к появлению структуры зернистых **троостита** и **сорбита отпуска** соответственно. Эти структуры показаны на рис. 8.7а и 8.7б. Сталь со структурой троостита с твердостью 35–45 HRC (HB = 3500–4500 МПа) обеспечивает максимальную упругость, необходимую, как правило, при изготовлении рессор, пружин, мембран. Сталь со структурой зернистого сорбита отпуска (25–35 HRC) обладает наилучшим комплексом механических свойств и высокой конструкционной прочностью. Именно поэтому закалку и высокий отпуск называют термическим улучшением.

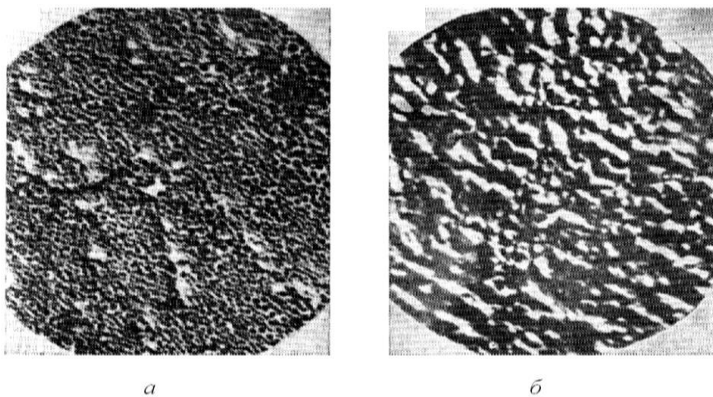


Рис. 8.7. Микроструктура троостита (а) и сорбита (б) отпуска, t 7500

Нагрев закаленной стали вплоть до температуры A_{C1} ($727\text{ }^{\circ}\text{C}$) обеспечивает получение равновесной структуры зернистого перлита, т. е. менее дисперсной, чем сорбит и троостит, ферритно-цементитной смеси. Если сталь является доэвтектоидной, в ней обособляются зерна избыточного феррита.

Таким образом, при переохлаждении аустенита по мере увеличения скорости охлаждения образуется перлит, сорбит, троостит пластинчатого строения и мартенсит закалки, а при распаде мартенсита по мере повышения температуры отпуска формируется мартенсит кубический (отпущенный), троостит, сорбит, перлит зернистого строения.

Зернистые структуры, образующиеся при отпуске, характеризуются более высокой пластичностью и ударной вязкостью по сравнению с аналогичными структурами пластинчатого строения.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.

2. Вычертить двойную диаграмму состояния железоуглеродистых сплавов, ее участок, соответствующий сталям и нанести на него температурные интервалы нагрева сталей под термическую обработку.

3. Начертить диаграммы изотермического распада аустенита для исследуемых сталей и нанести на них режимы термической обработки (температуры изотермических выдержек, скорости охлаждения).

4. Изучить и зарисовать микроструктуры термообработанных сталей, указать их твердость.

5. Сделать выводы и отчет о работе в соответствии с заданиями.

Контрольные вопросы

1. Что называется мартенситом? Какова его структура и свойства?
2. Какая фаза называется остаточным аустенитом? Какова причина появления остаточного аустенита в закаленной стали? Назовите условия, от которых зависит количество остаточного аустенита в структуре закаленных сталей. Влияние остаточного аустенита на свойства закаленных сталей.
3. Оптимальные температуры нагрева под закалку доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей. Какова структура и свойства сталей после закалки?
4. Что называется сорбитом, трооститом закалки, сорбитом и трооститом отпуска? Назовите условия образования этих структур. Каковы их структура и свойства?
5. Что называется низким, средним и высоким отпуском?

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Область диаграммы состояния сплавов системы $Fe - C$, относящаяся к сталям с температурными интервалами нагрева сталей под термическую обработку.
4. Диаграммы изотермического распада аустенита для исследуемых сталей с режимами термической обработки (температуры изотермических выдержек, скорости охлаждения).
5. Результаты микроструктурного анализа сплавов, выполненного в соответствии с заданиями.
6. Выводы.

Лабораторная работа № 9

ЛЕГИРОВАННЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ И МЕТОДЫ ИХ УПРОЧНЕНИЯ

Цель работы: изучение принципов легирования конструкционных сталей и влияния легирования на их свойства; изучение технологических процессов упрочнения сталей, микроструктуры и свойств поверхностно упрочненных стальных изделий.

Теоретические сведения

Легированной называется сталь, в которую для придания ей определенных механических, технологических или специальных свойств добавлены легирующие элементы. Основными легирующими элементами в стали являются *Cr – X, Ni – H, Mn – Г, Si – С, Mo – М, W – В, V – Ф, Ti – Т, Co – К, Al – Ю, B – Р, Nb – Б, Se – Е, N – А, Cu – Д, P – П, Zr – Ц, PЗМ – Ч* (буква после тире соответствует обозначению в марке). В сталь вводится один или несколько легирующих элементов. В марке содержание легирующего элемента, если оно превышает 1–1,5 %, указывается цифрой (массовая доля в процентах), стоящей после соответствующей буквы. Цифры в начале марки обозначают содержание углерода в сотых долях процента для конструкционных сталей (двухзначная цифра), в десятых – для инструментальных (однозначная цифра).

В настоящее время число марок сталей очень велико, разнообразны их структуры и свойства. Важно знать, как изменяются структура и свойства исходной стали при введении легирующих элементов. Необходимо уметь правильно выбрать марку стали, которая после соответствующей термической обработки обеспечит необходимые свойства, долговечность изделий в работе.

Легированные и углеродистые стали можно классифицировать по различным параметрам, в том числе и по применению. В последнем случае их подразделяют на конструкционные, инструментальные и стали специального назначения.

Конструкционные стали делятся на строительные и машиностроительные. Строительные стали – предназначены для изготовления строительных конструкций, машиностроительные стали – для изготовления деталей машин. В данной работе рассматриваются машиностроительные стали. Если к машиностроительной стали не предъявляется каких-либо специальных требований, работоспособность изделий определяется значениями следующих характеристик: прочности, пластичности, вязкости разрушения (ударной вязкости).

Мерами прочности являются условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ предел прочности при растяжении σ_B и др. Предел текучести $\sigma_{0,2}$ (МПа) – напряжение, при котором относительная пластическая деформация образца не превышает 0,2 %. Предел прочности при растяжении (временное сопротивление) σ_B (МПа) – напряжение при растяжении образца, соответствующее наибольшей нагрузке, приводящей к его разрушению.

Пластичность металлических материалов характеризуется относительным удлинением δ (%) – отношением прироста длины образца (Δl) в момент его разрыва к первоначальной длине (l_0), а также относительным сужением ψ (%) – отношением наибольшего уменьшения (в месте разрыва) поперечного сечения образца (ΔF) к первоначальной площади поперечного сечения (F_0).

Ударная вязкость KCU (МДж/м²) является мерой надежности материала и определяет его способность поглощать механическую энергию в процессе работы под нагрузкой, т. е. характеризует сопротивляемость материала разрушению вследствие разрастания возникшей в месте концентрации напряжений микротрещины. Микротрещина, если она не растет, может существовать достаточно долго в материале, не снижая его работоспособности. Рост трещины при низкой пластичности металла приводит к его разрушению. Таким образом, разрушение материала следует рассматривать как процесс зарождения и роста трещины, который характеризуется периодом времени τ от момента приложения нагрузки до момента разрушения. Этот период времени, в течение которого работает изделие, характеризует долговечность материала.

В случаях, когда детали машин подвергаются высоким нагрузкам, для их изготовления необходимо применять улучшаемые стали. Улучшаемыми называют стали, подвергаемые закалке и высокому отпуску. При такой обработке сталь имеет структуру зернистого сорбита, обеспечивающую наилучшее сочетание ее прочности и вязкости. Естественно, что для получения такой структуры сталь должна обладать сквозной прокаливаемостью.

Если же деталь испытывает изгибающие или крутящие нагрузки, сердцевина детали практически не подвергается их воздействию. В этом случае сквозная прокаливаемость не всегда необходима, более того, требуется вязкая, не закаленная на мартенсит сердцевина. При таких нагрузках важно упрочнять рабочие поверхностные слои изделий одним из известных в настоящее время методов. Выделяют группу конструкционных поверхностно упрочняемых сталей. Они могут использоваться благодаря высокой поверхностной твердости как конструкционные износостойкие (например, при работе детали в паре с подшипником скольжения).

Сквозную прокаливаемость, одинаковую структуру и свойства по всему сечению, высокие пределы упругости, пропорциональности, текучести и выносливости, повышенную релаксационную стойкость должны иметь рессорно-пружинные стали (табл. 9.1).

Оптимальные свойства рессор и пружин обеспечивает сталь со структурой троостита отпуска твердостью 42–48 HRC. При выборе материала надо учитывать, что углеродистые стали имеют значительно меньшую прокаливаемость, чем легированные, и пригодны лишь для изготовления рессор и пружин малого сечения. В 1,5–2 раза можно повысить предел выносливости рессор и пружин, а следовательно, и их долговечность за счет гидроабразивного или дробеструйного наклепа.

Конструкционные улучшаемые углеродистые и легированные стали содержат 0,3–0,5 % С. Повышать содержание углерода в этих сталях нецелесообразно, так как они становятся хрупкими и непригодными для использования в машиностроении. Из улучшаемых сталей изготавливают шпильки, болты,

гайки, шпонки, шпиндели, оси, муфты, коленчатые валы, шатуны, зубчатые колеса, шестерни и другие детали.

Таблица 9.1

Свойства рессорно-пружинных сталей (ГОСТ 14959–79)
после закалки и среднего отпуска

Марка стали	Температура, °С		Механические свойства (не менее)				Назначение
	закалки	отпуска	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	
65	840	480	780	980	10	35	Рессоры, пружины, упругие элементы станочного оборудования
65Г	830	480	780	980	8	30	
55С2	870	460	1170	1270	6	30	
50ХГА	840	440	1170	1270	7	35	
50ХФА	850	520	1070	1270	8	20	Рессоры легковых автомобилей, пружины ответственного назначения
60С2ХФА	850	410	1660	1860	5	20	
65С2ВА	850	420	1660	1860	5	20	То же при нагреве до 250 °С
60С2ХА	870	420	1560	1760	5	20	Пружины часовых механизмов
45ХН2МФА	860	460	1270	1410	7	35	Торсионные валы, крупные клапанные пружины

Хром, марганец, кремний и никель, легируя феррит, повышают его прочность (рис. 9.1а), не снижая или даже увеличивая при этом вязкость (рис. 9.1б). Кроме того, эти элементы, введенные по отдельности или в сочетании ($Cr + Ni$; $Cr + Ni + Mo$), повышают устойчивость переохлажденного аустенита. В результате снижается критическая скорость закалки и, как следствие, существенно повышается прокаливаемость стали. Сказанное позволяет использовать легированные стали для изготовления изделий сечением более 10–12 мм и проводить их закалку в мягких средах, таких как масло.

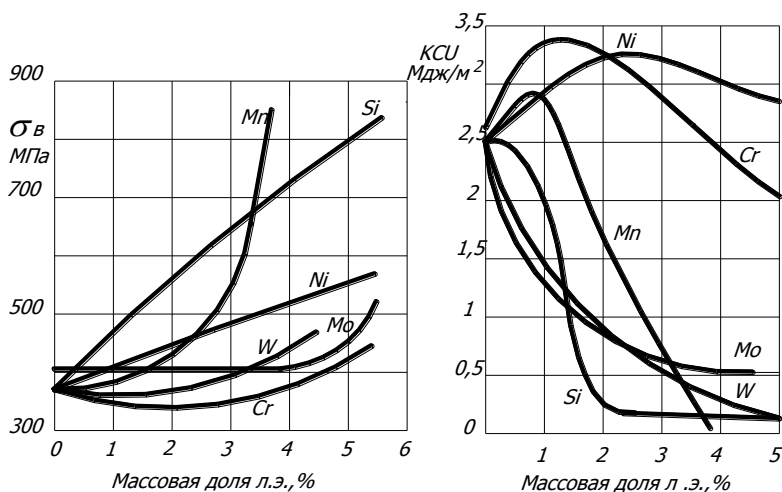


Рис. 9.1. Зависимость прочности (а) и ударной вязкости (б) феррита от содержания в нем легирующих элементов

При выборе стали (табл. 9.2) следует учитывать и ее стоимость. Чем больше легирующих элементов в стали, тем она дороже. Никель и хром (до 1 %) – те немногие элементы, которые надежно понижают порог хладноломкости стали. Молибден при введении в хромомарганцовистые и хромоникелевые стали предотвращает их охрупчивание, развивающееся при медленном охлаждении с температур высокого отпуска.

Свойства улучшаемых конструкционных сталей (ГОСТ 4543–71)
после закалки в масле и высокого отпуска

Марка стали	$\sigma_{0,2}$, МПа	КСУ, МДж/м ²	Критический диаметр прокаливаемости, мм	T ₅₀ , °С
40*	600–620	0,50–0,62	10	–20
45*	610–630	0,60–0,62	12	–20
45Х*	730–820	0,78–0,85	15	–50
30ХГТ	900–1000	0,75–0,80	20	–20
30ХГС	900–960	0,70–0,80	25	–20
30ХМ	820–840	0,80–0,85	20	–60
38ХГМ	900–950	0,80–0,85	25	–40
40ХН	820–930	0,80–0,85	20	–60
45ХН	900–950	0,75–0,85	25	–60
40ХНМ	950–1000	1,00–1,05	40	–80
40ХН2М	980–1000	0,90–1,00	100	–80
38ХНЗМФ	1000–1100	0,75–0,80	100	–100
40Х2Н2М	950–1100	0,90–1,00	100	–90

* – закалка в воде.

Если деталь имеет сравнительно простую конфигурацию, при которой закалка в воде допустима, размер ее сечения не превышает 10–12 мм, а воспринимаемые нагрузки сравнительно невелики ($\sigma_B < 600$ МПа), ее можно изготавливать из углеродистых сталей марок **30**, **35**, **45**. После закалки и высокого отпуска сталь приобретает структуру сорбита зернистого (см. рис. 8.7). Для повышения прочностных характеристик изделий сложных форм при размерах сечения более 10–12 мм используют легированные стали. Суммарное содержание легирующих элементов, как правило, не превышает 5 %. Стали в этом случае легируют хромом, марганцем, кремнием (массовая доля каждого не должна превышать 2 %, а также *Ni* – до 5 %, *Mo* – до 0,5, *V* или *Ti* – до 0,12 %). Легирующие элементы растворяются в цементите и феррите.

Порог хладноломкости – интервал температур, при которых металл из вязкого состояния переходит в хрупкое. При температурах выше порога хладноломкости металл разрушается вязко (т. е. разрушению предшествует пластическая деформация), ниже порога – хрупко. Обычно за порог хладноломкости принимают температуру полухрупкого разрушения (T_{50}). Надежная эксплуатация изделия возможна лишь при температурах выше порога хладноломкости. Чем больше разница между температурой эксплуатации изделия и средней температурой интервала хладноломкости T_{50} , тем больше запас вязкости, тем надежнее работа изделия.

Температура полухрупкого разрушения зависит от химического состава и микроструктуры стали, размера зерна, вида термической обработки и микроструктуры. Порог хладноломкости стали активно снижается за счет ее легирования хромом (до 1 %) и особенно никелем (см. рис. 9.1а). Снижение T_{50} составляет примерно 10 °С при увеличении массовой доли никеля в стали на 0,01. Улучшенное состояние сталей соответствует наиболее низкому значению T_{50} , т. е. повышению запаса вязкости.

Повышение долговечности деталей машин и оборудования, прежде всего, связано с упрочнением поверхностных слоев изделий, поскольку разрушение металлических изделий в большинстве случаев развивается с поверхности. Условно методы упрочнения можно разделить на три группы: 1) нанесение на поверхность слоя другого материала с заданными свойствами; 2) изменение структуры поверхностного слоя; 3) изменение химического состава поверхностного слоя диффузионным путем.

Нанесение на поверхность изделий слоев других металлов (химическим или гальваническим способом, сваркой, наплавкой, пайкой, припеканием, металлизацией) или неметаллических материалов (окрашиванием, эмалированием, гуммированием и другими методами) позволяет не только упрочнять или защищать детали от воздействия внешней среды, но и в большинстве случаев восстанавливать их изношенные поверхности. Так, газопорошковая или индукционная наплавка металлических порошков системы $Ni - Cr - B - Si - C$ позволяет восстанавливать и упрочнять гильзы цилиндров, штоки, валы, защитные втулки и ряд других деталей. Полученные покрытия обладают высокой

твердостью (до 61 HRC), износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Поверхностные слои стальных изделий можно упрочнять холодным пластическим деформированием, поверхностной закалкой, лазерной обработкой и некоторыми другими методами. Рассмотрим названные методы несколько подробнее. Холодное пластическое деформирование обеспечивает наклеп, т. е. упрочнение металла. Если наклепу подвергать поверхностный слой изделия, повышается твердость и износостойкость его поверхности, создаются большие остаточные напряжения сжатия, возрастает сопротивление усталости, улучшается качество поверхности. Основные способы поверхностного упрочнения деталей наклепом: дробеструйная обработка, обкатка, чеканка. Упрочнение наклепом на глубину до 0,7 мм небольших деталей сложной формы (пружин, рессор, гильз, звеньев цепей и др.) осуществляют дробеструйной обработкой. Поток твердой дроби из белого чугуна направляют дробеметом на упрочняемую поверхность. Дробь при ударе пластически деформирует металл на большую глубину.

Обкатка твердосплавными роликами или шариками с помощью специальных приспособлений на металлообрабатывающих станках позволяет обеспечить наклеп на большую глубину (до нескольких миллиметров) и применяется для упрочнения больших деталей в зонах концентрации напряжений (например, шеек и галтелей валов).

Ответственные сварные соединения подвергают поверхностному упрочнению чеканкой, т. е. ударному воздействию механических или пневматических бойков. Глубина наклепа при этом увеличивается.

Поверхностная закалка детали, в отличие от объемной, позволяет упрочнять только поверхностный слой на определенную глубину. Ее можно проводить двумя способами. В первом случае нагревают только поверхностный слой, который затем закалывают при охлаждении. Во втором случае нагревают всю деталь, но при закалке охлаждают только поверхностный слой со скоростью, большей критической.

Наиболее распространены в практике поверхностная закалка с индукционным нагревом токами высокой частоты (ТВЧ)

и газопламенная. Способ поверхностной закалки с нагревом ТВЧ заключается в следующем. В переменное электромагнитное поле, создаваемое электрическим током высокой частоты, пропускаемым по проводнику-индуктору, помещают металлическую деталь-проводник. В поверхностном слое детали индуцируются вторичные вихревые токи Фуко, которые и вызывают нагрев поверхностного слоя детали. Повышение частоты первичного тока приводит к уменьшению толщины поверхностного слоя (δ , см), по которому протекает ток:

$$\delta = 5 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}},$$

где ρ – удельное электросопротивление нагреваемого металла, Ом·см;

f – частота тока, Гц;

μ – магнитная проницаемость, Гн/м.

Поверхностный слой нагретой детали закалывают с помощью душевого устройства (спрейера), зачастую совмещаемого с индуктором. После закалки проводят низкий отпуск при температуре 150–200 °С. Поверхностной закалке с нагревом ТВЧ и последующему низкому отпуску подвергают коленчатые валы, распределительные валики, шестерни и другие детали машин, изготавливаемые из углеродистых и легированных сталей, содержащих 0,4–0,6 % С (стали **40**, **45**, **50**, **35X**, **45X**, **40XH**, **40XHM** и др.). Получаемая в закаленном слое микроструктура мелкоигольчатого мартенсита отпуска обеспечивает его высокую твердость (55–62 HRC) и износостойкость. Рассматриваемый технологический процесс высокопроизводителен, успешно применяется в массовом и серийном производстве в машиностроении, характеризуется высоким уровнем автоматизации.

Для крупных деталей (валы, прокатные валки) более экономичной является поверхностная закалка с нагревом газопламенными горелками (кислород-ацетиленовыми, кислород-пропановыми и другими).

При поверхностном упрочнении деталей особо сложной конфигурации на малых участках их поверхности с обеспечением минимальных деформаций (резцы, элементы штамповой оснастки, втулки и седла клапанов, поршневые кольца, галтели коленчатых валов, вкладыши цилиндров и др.) наиболее эффективно лазерное поверхностное упрочнение. Общие затраты энергии при таком упрочнении примерно в 3 раза ниже, чем при закалке ТВЧ, и в 20 раз ниже, чем при объемной закалке в печи. Наибольшее применение лазерное упрочнение нашло в автомобилестроении.

Лазеры – это оптические квантовые генераторы, вырабатывающие высококонцентрированный пучок световой энергии. Известны газовые, полупроводниковые, твердотельные и жидкостные лазеры различной мощности.

Для поверхностного упрочнения чаще всего применяют газовые CO_2 -лазеры непрерывного действия типа “Кардамон” или импульсные твердотельные лазеры типа “Квант” мощностью 0,5–10 кВт. Кратковременное (10^{-3} – 10^{-8} с) воздействие светового пучка вызывает разогрев небольшого (до 4 мм в диаметре и до 1 мм глубиной) объема металла, который закаливается вследствие быстрого отвода теплоты в металл. В случае нагрева до оплавления весьма тонкого слоя возможно даже образование аморфного металла (остекловывание).

Обычно след воздействия луча лазера (“дорожка”) состоит из последовательно расположенных округлых пятен, каждое из которых имеет две термические зоны – центральную и периферийную. Микроструктура стали в пятне (от его периферии к сердцевине): белая зона – нетравящийся мелкодисперсный весьма твердый мартенсит, затем крупноигльчатый мартенсит и мартенситно-ферритная смесь неполной закалки.

Лазерная обработка применяется для упрочнения углеродистых и легированных конструкционных и инструментальных сталей (**40, 45, У10, Х12, ХВГ, Р18, ШХ15**), серых, ковких и высокопрочных чугунов.

Можно получить закаленный поверхностный слой также и при сквозном нагреве детали, если она изготовлена из стали ограниченной прокаливаемости (**55ПП** – пониженной прокаливаемости; **47РП** – регламентируемой прокаливаемости).

Поверхностное упрочнение деталей можно осуществить химико-термической обработкой (ХТО), т. е. путем их нагрева в химически активной среде, вызывающего изменение химического состава, а следовательно, структуры и свойств металла поверхностного слоя. В зависимости от вида применяемой ХТО можно избирательно повысить его твердость, износостойкость, окалиностойкость и улучшить ряд других свойств. Основным преимуществом ХТО перед другими методами поверхностного упрочнения является возможность радикального изменения свойств стали и независимость результатов от степени сложности формы детали. При ХТО происходит диффузионное насыщение стали при высокой температуре соответствующим элементом (*C, N, B, Cr* и др.) или комплексом элементов.

Любой вид ХТО состоит из трех элементарных этапов: 1) образования в насыщающей среде активных атомов насыщающего элемента; 2) адсорбции, т. е. поглощения активных атомов поверхностью насыщаемого металла; 3) диффузии, т. е. проникновения активных атомов в насыщаемый металл.

ХТО возможна в случае, если насыщающий материал и насыщаемый элемент взаимодействуют, т. е. образуют твердые растворы или химические соединения. Для того чтобы судить о фазовом составе полученных диффузионных слоев, рассматривают при температуре ХТО изотермический разрез соответствующей диаграммы состояния сплавов (например, при науглероживании железа – диаграмму *Fe – C*). Скорость формирования диффузионного слоя зависит от природы насыщающего элемента и насыщаемого металла, температуры и продолжительности ХТО. Элементы, имеющие атомы значительно меньшего размера, чем насыщаемый металл, и образующие твердые растворы внедрения, диффундируют значительно быстрее, чем элементы, образующие твердые растворы замещения.

Применяются в промышленности и такие виды обработки поверхностных слоев стальных изделий, как науглероживание, азотирование, цианирование, борирование, диффузионная металлизация.

Науглероживание (цементация) – это процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей углеродом при температурах 880–950 °С в углеродсодержащей среде (карбюриза-

торе) Выбор температур выше A_{C3} обусловлен значительной растворимостью углерода в аустените. Иногда цементацию ведут при температурах до 1050 °С, что позволяет значительно ускорить диффузию углерода и процесс насыщения им поверхностного слоя детали. Цель цементации и последующей термической обработки – повышение твердости, износостойкости и предела выносливости стали.

Цементации подвергают зубчатые колеса, распределительные валики, втулки, поршневые пальцы и другие детали из углеродистых или легированных сталей, содержащих до 0,3 % С. Такие стали называют цементуемыми. Науглероживание и термическая обработка детали обеспечивают получение ее твердого поверхностного слоя при вязкой сердцевине. Толщина науглероженного слоя обычно составляет 0,4–2 мм, содержание углерода в нем – 0,9–1,1 %.

В массовом производстве широко применяют газовую цементацию, преимущества которой в высокой производительности и возможности термообработки с цементационного нагрева. В качестве карбюризаторов используют метан, пропан-бутановые смеси, специальные эндогазы, жидкие углеводороды (керосин, синтин), образующие при температурах цементации газы, диссоциирующие с выделением атомарного углерода. Процесс ведут при 910–930 °С в течение 6–12 ч в шахтных печах или автоматизированных безмуфельных агрегатах непрерывного действия. Для получения науглероженного слоя стали толщиной около 1 мм при газовой цементации требуется 6–7 ч, а при цементации в твердом карбюризаторе (древесный уголь) – около 10 ч. Такая продолжительная выдержка вызывает укрупнение зерна аустенита. Исправить крупнозернистость поверхностного слоя детали и придать ему высокую твердость позволяет последующая термическая обработка, закалка и низкий отпуск. Первую закалку или нормализацию осуществляют с температур 900–920 °С. Она позволяет измельчить зерно сердцевины и уничтожить цементитную сетку в поверхностном слое детали. Вторая закалка с температур 750–760 °С устраняет перегрев в поверхностной заэвтектонидной зоне науглероженного слоя и придает ей максимальную твердость. Низкий отпуск позволяет уменьшить внутренние напряжения в детали.

После медленного охлаждения детали (в равновесном состоянии) науглероженный слой имеет микроструктуру, представленную на рис. 9.2. Аустенит поверхностного слоя с содержанием углерода более 0,8 % превращается в перлит и цементит вторичный (заэвтектоидная зона), около 0,8 % – в перлит (эвтектоидная зона), а содержащий меньше 0,8 % – в феррит и перлит (переходная зона). За толщину науглероженного слоя принимают суммарную толщину заэвтектоидной, эвтектоидной и половины переходной зоны. Сталь после цементации, закалки и низкого отпуска в поверхностной зоне имеет структуру мелкоигольчатого мартенсита отпуска с включениями остаточного аустенита (58–64 HRC). Если цементации подвергают наследственно-мелкозернистые стали, в которых зерно растет незначительно, применяют одинарную закалку при температурах, превышающих A_{C1} , (820–850 °С), и низкий отпуск. Для наследственно-мелкозернистых сталей типа *20ХГТ*, *20ХГТЦ* или неотчетственных деталей можно после газовой цементации применять закалку с подстуживанием до температур 840–860 °С и охлаждение в горячем масле (160–180 °С). Свойства некоторых цементуемых сталей после упрочнения приведены в табл. 9.3.



Рис. 9.2. Микроструктура цементованного слоя после медленного охлаждения. $\times 200$

Свойства конструкционных сталей (ГОСТ 4543–71)
после цементации, заковки и низкого отпуска

Марка стали	Изделия	Режим обработки	Толщина упрочненного слоя, мм	Твердость HRC	
				поверхностного слоя	сердцевины
12ХН3А	Зубчатые колеса дизелей, станков	Цементация – 900 °С, заковка – 800 °С, отпуск – 170 °С	0,8–1,1	58	26–40
18Х2Н4ВА	То же	Цементация – 900 °С, отпуск – 500 °С (двукратный), заковка – 830 °С (на воздухе), отпуск – 180 °С	0,8–1,1	56–59	35–43
18ХГТ	Нагруженные зубчатые колеса автомобилей, станков	Газовая цементация – 930 °С, подстуживание и заковка – 830 °С, отпуск – 190 °С	0,2–0,25 модуля колеса	56–60	30

Азотирование – это процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стальных изделий азотом при температурах 500–650 °С в среде аммиака.

Азотирование широко применяют в машиностроении для повышения твердости, износостойкости, предела выносливости и коррозионной стойкости ответственных деталей, например, зубчатых колес, гильз цилиндров, штоков пароводяной арматуры, валов. Ему предшествует термическая обработка (улучшение). При температурах азотирования аммиак диссоциирует с выделением атомарного азота ($2NH_3 \rightarrow 3H_2 + 2N_{am}$), который диффундирует в сталь, образуя в ней твердые растворы и химические соединения (нитриды). Микроструктура азотированной углеродистой стали в равновесном состоянии достаточно хорошо определяется диаграммой состояния системы $Fe - N$.

В сталях, подвергаемых азотированию, – нитраллоях (**38ХМЮА**, **35ХМА**, **30Х2В2НФА**, **38ХНМФА**, **38ХВФЮА**,

3Х2ВФ и др.) легирующие элементы образуют стойкие и весьма твердые нитриды (VN , W_2N , AlN , CrN и др.). Если твердость углеродистой азотированной стали составляет около 2000 HV, легированной конструкционной – около 8000 HV, то нитраллоя – около 12000 HV. Углеродистые и низколегированные стали азотируют для повышения их коррозионной стойкости, а высоколегированные – для повышения твердости, износостойкости и предела выносливости. Азотированная сталь сохраняет высокую твердость, в отличие от цементованной, до сравнительно высоких температур (500–520 °С). Преимущество азотирования перед цементацией – меньшая температура проведения процесса и меньшие деформации, недостатки – весьма большая (до 90 ч) продолжительность процесса и малая толщина получаемого диффузионного слоя (не более 0,8 мм).

Цианирование – процесс одновременного насыщения поверхностных слоев стальных изделий азотом и углеродом. Наибольшее распространение получило одновременное насыщение азотом и углеродом в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака, при температурах 820–860 °С (**нитроцементация**). Продолжительность процесса составляет 4–10 ч, оптимальное содержание азота в слое – около 0,15 %, углерода – 1,4 %. После нитроцементации детали (зубчатые колеса, втулки, валы и др.) подвергают термической обработке: закалке непосредственно из печи и низкому отпуску. Нитроцементованный слой имеет структуру мелкокристаллического мартенсита с небольшим содержанием карбонитридов и около 25 % остаточного аустенита. Его окончательная твердость – 58–60 HRC. Нитроцементацию, как правило, ведут в автоматизированных безмуфельных агрегатах. При проведении этого процесса изделия испытывают меньшие деформации, чем при цементации, повышается их износо- и коррозионная стойкость.

Для жидкостного цианирования можно использовать такой состав: $NaCl$ – 32 %, $CaCl_2$ – 65 %, $K_4Fe(CN)_6$ – 3 %. Температура процесса – 840–860 °С, продолжительность – 0,5–3 ч, толщина получаемого цианированного слоя – 0,05–0,5 мм. Термическая обработка – закалка из ванны и низкий отпуск, твердость поверхностного слоя – 57–64 HRC. Цианирование эффективно для инструментальных (в частности, быстрорежущих)

сталей. Однако, поскольку насыщение углеродом и азотом в жидких средах связано в большинстве случаев с использованием токсичных цианистых солей, этот процесс не нашел широкого распространения.

Борирование – процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стальных изделий бором при температурах 900–950 °С в течение 2–6 ч. Для борирования используют карбид бора (B_4C) и буру ($Na_2B_4O_7$), ферробор, аморфный бор, диборан (B_2H_6) и другие борсодержащие вещества. Цель борирования – повышение твердости, износостойкости и некоторых других свойств стали. Диффузионный слой толщиной 0,05–0,15 мм, состоящий из боридов FeB и Fe_2B (рис. 9.3), обладает весьма высокой твердостью (до $HV = 21000$ МПа), стойкостью к абразивному изнашиванию, коррозионной стойкостью. Поэтому борирование эффективно применяется для повышения стойкости бурового и штампового инструмента.

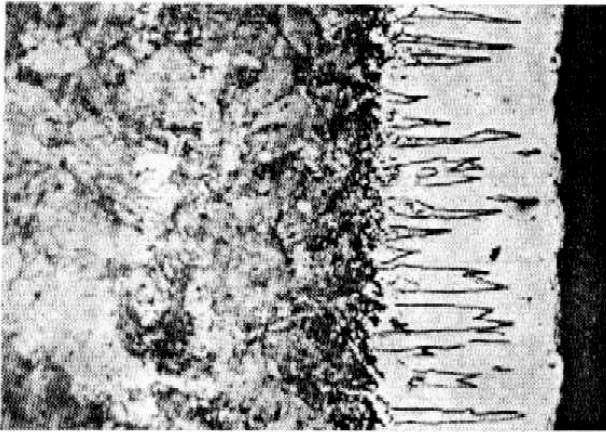


Рис. 9.3. Микроструктура борированного слоя, $\times 200$

Диффузионная металлизация – процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стальных изделий металлами (хромом, цинком, алюминием и др.). Насыщение разными металлами преследует различные цели. Так, **цинкование** позволяет в десятки раз повысить коррозионную стойкость труб и листо-

вого железа, *алюминирование (алитирование)* – жаростойкость и коррозионную стойкость стали, *хромирование* углеродистых сталей – их износо-, жаро- и коррозионную стойкость. После хромирования получается слой карбидов $(Cr, Fe)_{23}C_6$ и $(Cr, Fe)_7C_3$ (рис. 9.4) толщиной до 0,03 мм с весьма высокой твердостью (до $HV = 20000$ МПа). Хромирование весьма эффективно для обработки быстроизнашивающихся деталей, работающих в агрессивных средах.

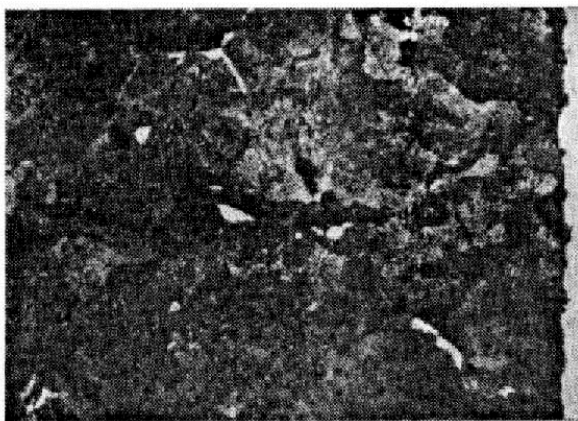


Рис. 9.4. Микроструктура хромированного слоя, $\times 200$

В настоящее время все большее распространение получают процессы многокомпонентного диффузионного насыщения.

При выборе способа и технологии поверхностного упрочнения стальных изделий необходимо учитывать не только условия, в которых они работают, возможные изменения их размеров, физико-механические свойства металла, но и характер производства деталей (единичный, массовый), производительность способа упрочнения, его рентабельность, возможность автоматизации и роботизации и ряд других важных для производства вопросов.

Порядок выполнения работы

1. Изготовить микрошлиф, изучить и зарисовать микроструктуру, определить толщину науглероженного слоя.
2. Изучить микроструктуру термообработанных образцов, измерить их твердость (HRC).
3. Изготовить микрошлифы, изучить и зарисовать микроструктуру упрочненных слоев, определить их толщину. Построить график зависимости толщины упрочненного слоя от продолжительности нагрева.
4. Измерить и сравнить твердость стали после различных видов упрочнения.
5. Сделать выводы и составить отчет о работе в соответствии с заданием.

Контрольные вопросы

1. Какие стали называются легированными?
2. Маркировка легированных сталей.
3. Классификация легированных конструкционных сталей.
4. Основные требования, предъявляемые к конструкционным сталям (комплекс свойств).
5. Способы объемного упрочнения конструкционных сталей.
6. Назначение способов объемного упрочнения сталей. Стали, подвергаемые объемному упрочнению. Структура и свойства сталей после объемного упрочнения.
7. Способы поверхностного упрочнения конструкционных сталей.
8. Назначение способов поверхностного упрочнения сталей. Стали, подвергаемые поверхностному упрочнению. Структура и свойства сталей после поверхностного упрочнения.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Результаты структурного анализа сталей, выполненного в соответствии с заданиями.
4. Выводы.

Лабораторная работа № 10

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СТАЛИ

Цель работы: изучение структуры, свойств, способов термической обработки инструментальных сталей и области их применения.

Теоретические сведения

Инструментальные стали предназначены для изготовления режущего и измерительного инструмента, штампов холодного и горячего деформирования, а также ряда деталей точных механизмов и приборов: пружин, подшипников качения, шестерен и др. Часто из таких сталей изготавливают только рабочую (режущую) часть инструмента, а крепежные части выполняют из конструкционных сталей (например, сталь 45).

Номенклатура инструментальных сталей весьма разнообразна. Поэтому для правильного выбора марки стали и режима термической обработки важно знать условия работы инструмента, требования, предъявляемые к нему.

Для уменьшения скорости изнашивания режущего, измерительного и штампового инструмента необходимо, чтобы используемые для его изготовления стали обладали достаточной износостойкостью, обеспечивающей длительное сохранение неизменными размеров и формы рабочей части.

Износостойкость стали определяется ее твердостью (увеличивается с ее ростом) и микроструктурой. При твердости, равной 60–65 HRC, наиболее износостойка сталь, состоящая из мартенсита и равномерно расположенных в нем карбидов ванадия, вольфрама, хрома и других элементов.

В процессе резания с повышенными скоростями или при горячем деформировании рабочая часть инструмента нагревается. Чтобы инструмент не терял при этом работоспособность, не должны меняться его структура и свойства, полученные в результате термической обработки.

Способность стали сохранять структуру и эксплуатационные свойства при повышенных температурах называется **тепло-**

стойкостью. Это технологическое свойство стали определяют по максимальной температуре, при нагреве до которой она сохраняет в течение определенного времени (обычно в течение 4 ч) эксплуатационную твердость. Теплостойкость стали достигается легированием ее вольфрамом, молибденом, ванадием.

Для обеспечения процесса резания инструмент должен обладать высокими прочностью и твердостью. Поэтому инструментальные стали содержат не менее 0,6 % С и подвергаются закалке с низким отпуском на необходимую твердость (исключение составляют стали, применяемые для изготовления штампов горячего деформирования и содержащие 0,3–0,6 % С). В результате термической обработки достигается твердость стали 60–65 HRC, и предел прочности ее при изгибе $\sigma_u = 2500\text{--}3500$ МПа.

Важной характеристикой стали является **прокаливаемость**, которая может быть повышена за счет легирования ее хромом и марганцем. В этом случае увеличивается интервал устойчивости переохлажденного аустенита стали и снижается $V_{кр}$. Стали, легированные хромом и марганцем, можно использовать для изготовления крупного инструмента. Тонкий и сложный по форме инструмент, изготовленный из таких сталей, можно закалывать в менее интенсивных, чем вода, охлаждающих средах.

Инструментальные стали легируют карбидообразующими элементами: **V, W, Mo, Cr**. Последние не только повышают износостойкость и теплостойкость стали, но и, растворяясь в аустените, уменьшают растворимость углерода в нем. Иначе говоря, они сдвигают линию **ES** диаграммы состояния системы **Fe – Fe₃C** (см. рис. 4.4a). Особенно сильно влияют на положение линии **ES** вольфрам и хром. Например, углеродистая сталь с 0,7 % С по структуре в отожженном состоянии (**Π + Φ**) является доэвтектоидной; сталь с 0,7 % С и 5 % W – заэвтектоидной. Сталь с 12 % W относят к ледебуритному классу, так как в процессе ее кристаллизации при эвтектической температуре образуется ледебурит. Ледебурит в сталях принято называть карбидной эвтектикой.

При выборе режимов термической обработки легированных инструментальных сталей необходимо учитывать следующее.

1. Хром, вольфрам и кремний повышают критические температуры A_1 и A_3 и тем в большей мере, чем выше их содержание в стали. Следовательно, легированные стали необходимо нагревать под закалку до более высоких температур, чем углеродистые с таким же содержанием углерода. Увеличение температуры нагрева под закалку способствует наиболее полному растворению карбидной фазы в аустените, повышению степени его легирования и, в конечном итоге, формированию в процессе закалики мартенсита, обладающего необходимой теплостойкостью. При отпуске, вследствие частичного распада высоколегированного мартенсита, образуются дисперсные карбиды, что сопровождается увеличением твердости стали (явление вторичной твердости).

2. Хром, молибден, вольфрам, ванадий повышают устойчивость переохлажденного аустенита, при этом снижается $V_{кр}$ и создается возможность закалики инструмента из легированных сталей, обладающих низкой теплопроводностью, в мягких закалочных средах (масло и др.). При этом не происходит коробления инструмента и в нем не возникают закалочные трещины.

3. Карбидообразующие элементы понижают температурный интервал мартенситного превращения ($M_n - M_k$), что приводит к увеличению массовой доли аустенита остаточного в структуре закаленной стали. Содержание аустенита остаточного растет также при повышении температуры нагрева стали под закалку. По сравнению с ферритно-карбидными смесями (перлит, сорбит, троостит) объем аустенита минимален, а мартенсита – максимален. Поэтому образование мартенсита приводит к увеличению объема стали, следовательно, и инструмента, причем тем значительнее, чем больше в стали содержание углерода. Это является одной из основных причин возникновения закалочных напряжений в изделиях. Размеры изделий при этом существенно не меняются, но для деталей точных приборов и ряда инструментов, размеры которых после закалики не могут быть исправлены шлифованием, даже небольшие изменения размеров недопустимы. Предотвратить увеличение объема при закалке и изменении размеров изделий можно путем применения их бездеформационной закалики или тепловой доводки. В том и другом случаях температура нагрева под закалку, длительность вы-

держки изделий при температуре отпуска, скорость охлаждения при нем, а также число проводимых отпусков (тепловая доводка) подбираются такими, чтобы соотношение массовых долей мартенсита и аустенита остаточного обеспечивало компенсацию объемных и размерных увеличений при образовании мартенсита за счет формирования аустенита остаточного.

Стали, которые подвергаются указанным обработкам, называются малодеформирующимися, к ним относятся легированные инструментальные стали *X, XГ, ХВГ, Х12Ф1* и другие.

4. Если в структуре литых инструментальных сталей (например, быстрорежущих) присутствуют частицы карбидов неблагоприятных форм (скелетного типа, остроугольные и т. п.) или сетка из карбидов, такие стали прежде всего подвергают горячей механической обработке – ковке. При этом карбиды или сетка из них разбиваются и перемешиваются по возможности равномерно. Литой заготовке придается необходимый профиль. Если проковка недостаточна или затруднительна (в стали Х12Ф1), разбитые карбиды в структуре оказываются собранными в полосы (карбидная ликвация). Такое неравномерное полосчатое распределение карбидов в стали нежелательно, так как в областях, обедненных карбидами, сталь имеет пониженные показатели эксплуатационных свойств.

5. Для улучшения обрабатываемости инструментальных сталей на режущих станках их подвергают сфероидизирующему отжигу при 780–800 °С, при котором частицы карбидов приобретают округлую форму.

Инструментальные стали по теплостойкости классифицируют на нетеплостойкие, полутеплостойкие и теплостойкие.

Нетеплостойкие стали (углеродистые, низко- и среднелегированные) сохраняют высокую твердость при нагреве до 200–250 °С. При дальнейшем нагревании происходят распад мартенсита и коагуляция (рост с округлением) частиц карбидов. Инструмент из таких сталей применяют для резания мягких материалов с небольшой скоростью и для холодного деформирования. По структуре в равновесном состоянии они, в зависимости от содержания углерода, являются доэвтектоидными (со структурой феррит и перлит), эвтектоидными (перлит), заэвтектоидными (перлит и цементит вторичный). По прокаливанию

подразделяются на стали небольшой, повышенной и высокой прокаливаемости.

К нетеплостойким инструментальным сталям небольшой прокаливаемости относятся углеродистые У7–У13, низколегированные стали 7ХФ–11ХФ, 13Х и др. Из-за малой устойчивости переохлажденного аустенита стали имеют небольшую прокаливаемость при охлаждении в воде. Поэтому их применяют для изготовления тонкого инструмента диаметром менее 12–15 мм, простой формы. В случае закалки изделий в масле (табл. 10.1) сквозная прокаливаемость достигается в очень тонких сечениях изделий (до 5 мм). При больших размерах деталей в результате закалки в воде и в масле достигается высокая твердость только поверхностного слоя, металл в сердцевине детали остается мягким, с повышенной вязкостью. Перед обработкой резанием изделия подвергают отжигу на перлит зернистый.

Таблица 10.1

Режимы термической обработки и твердость легированных инструментальных сталей (ГОСТ 5950–73, ГОСТ 19265–73)

Марка стали	Температура отжига, °С	Закалка		HRC после закалки	Температура отпуска, °С	HRC после отпуска
		T, °С	Среда			
11ХФ	760–780	810–830	Масло	64–62	140–160	65–62
Х	770–790	840–860	«	64–62	150–250	64–56
9ХС	780–810	840–860	«	64–62	150–200	64–60
ХВГ	770–790	830–850	«	64–62	160–220	63–58
ХВ5	800–820	800–820	Вода	67–65	120–160	69–67
6ХС	800–820	840–860	Масло	60–56	180–220	60–56
Х6ВФ	800–820	970–990	«	61–60	150–160	63–61
Х12Ф1	800–820	1050–1070	«	64–62	160–200	64–62
P18	860–880	1280	Масло	62–60	560	64–62

Р6М5	860–880	1230	Масло	62–60	(три раза)	64–63
------	---------	------	-------	-------	------------	-------

Стали с пониженным содержанием углерода (0,7–0,8 %) применяют для изготовления инструмента, испытывающего при работе толчки и удары (зубила, ножи и ножницы по металлу, отвертки, топоры, матрицы для холодной штамповки и др.). Их закалывают с нагревом до температуры выше A_{C1} (на 30–50 °С), затем подвергают отпуску (250–450 °С) на требуемую твердость 58–45 HRC (мартенсит или троостит).

Для изготовления мелкого инструмента высокой износостойкости и с острой режущей кромкой (сверла, метчики, фрезы, напильники, хирургический и измерительный инструмент и пр.) применяют стали с повышенным содержанием углерода (более 0,8 %). Такая сталь после закалки с температуры $A_{C1} + (30–50) \text{ }^\circ\text{C}$ и низкого отпуска при 150–200 °С имеет структуру мартенсита, твердость 60–64 HRC.

Хромованадиевые стали 7ХФ–11ХФ (0,4–0,7 % Cr; 0,15–0,20 % V) применяют, главным образом, для изготовления деревообрабатывающего инструмента.

Насквозь прокаливаются изделия из сталей повышенной прокаливаемости при закалке в масле ($d = 50 \text{ мм}$) и в воде ($d = 80 \text{ мм}$). Инструмент простой формы из стали ХВ5 можно закалывать в воде. К названной группе относятся стали Х (0,95–1,1 % С; 1,3–1,65 % Cr), 9ХС (0,95–1,25 % С; 1,3–1,65 % Cr; 1,2–1,6 % Si), предназначенные для изготовления массивного инструмента и инструмента сложной формы. При закалке в масле изделия из таких сталей мало подвержены трещинообразованию.

Стали марок ХВГ (0,9–1,05 % С; 0,9–1,2 % Cr; 1,2–1,6 % W; 0,8–1,1 % Mn) и ХГ относят к малодеформирующимся. Их используют для изготовления калибров, длинных метчиков, бритвенных ножей и лезвий и другого инструмента, для которого весьма важно сохранение размеров в процессе термической обработки, а также для изготовления деталей точных приборов.

Сталь ХВ5 (1,25–1,50 % С) называется алмазной, обладает исключительно высокой твердостью в закаленном состоянии (67–69 HRC) в силу большого содержания в мартенсите карбидов вольфрама Me_6C и легированного цементита $(Fe, Me)_3C$. Применяется для изготовления фильер холодного волочения,

отделочного инструмента, снимающего стружку с твердых материалов (белый чугун, стекло, камень).

К сталям высокой прокаливаемости относятся стали марок 6ХС–9ХС, ХГСВФ и др. Сквозная прокаливаемость в изделиях диаметром до 100 мм достигается за счет легирования хромом и дополнительно кремнием. Такие стали применяют для изготовления массивного штампового инструмента сложных форм, шариков и колец подшипников качения и др. Сталь 6ХС после соответствующей термической обработки (см. табл. 10.1) используют для изготовления пневматических зубил и ряда инструментов, работающих при ударных нагрузках и вибрации.

Полутеплостойкие стали сохраняют высокую твердость до 250–400 °С. К ним относятся высокохромистые и хромоникелевые стали. Стали с высоким содержанием хрома (до 12 %), представителями которых являются Х6ВФ (1,05–1,15 % С; 5,5–6,5 % Cr; 0,5–0,8 % V); Х12Ф1 (1,25–1,45 % С; 11,0–12,5% Cr; 0,7–0,9 % V), характеризуются повышенной износостойкостью в условиях абразивного изнашивания, обусловленной высоким содержанием карбидов (Cr, Fe)₇С₃ и, возможно, VC.

Сталь Х6ВФ применяется для изготовления деревообрабатывающего инструмента, ножовочных полотен, резьбо- и зубонакатного инструмента, матриц и пуансонов, штампов холодного деформирования. После закалки (см. табл. 10.1) и низкого отпуска (150–160 °С) она обладает высоким сопротивлением изнашиванию. Для повышения вязкости стали температуру отпуска рекомендуется повышать до 200–275 °С, при этом твердость стали несколько снижается до 59–58 HRC.

Стали типа Х12Ф1 (1,2–1,45 % С) относятся к малодеформирующимся сталям ледебуритного класса, применяются для изготовления массивного инструмента (фрезы, протяжки, матрицы и пуансонов штампов холодной штамповки, штампов горячей штамповки, калибров, шаблонов, фильеры для волочения проволоки и др.). Сталь послековки и отжига (800–820 °С) имеет структуру сорбитообразного зернистого перлита с включениями первичных и вторичных карбидов (рис. 10.1). Включения карбидов первичных (K_I) сравнительно крупные. Их размер зависит от степени размельченности карбидной эвтектики ковкой. Включения карбидов вторичных (K_{II}) мелкие, образуются при

охлаждении стали в интервале эвтектическая – эвтектоидная температура вследствие уменьшения растворимости углерода и хрома в аустените. Сталь чрезвычайно склонна к карбидной ликвации. Микроструктура закаленной и отпущенной стали представляет собой мартенсит и карбиды (K_I , K_{II}).

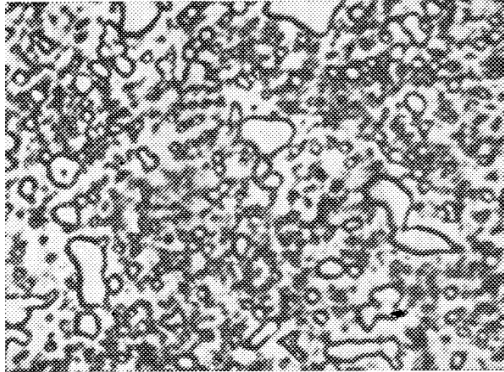


Рис. 10.1. Микроструктура стали X12Ф1 послековки и отжига: сорбитообразный зернистый перлит и карбиды, Г 500

Для обеспечения минимальных объемных и размерных изменений изделий в процессе термической обработки проводится их закалка с 1070–1120 °С и одно- или многократный отпуск при 450–480 °С (тепловая доводка) с контролем размеров изделий после каждого отпуска. Структура – мартенсит, карбиды $(Cr, Fe)_7C_3$ и аустенит остаточный.

Хромоникелевые стали (5ХНВ, 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХГВС и др.) используют для изготовления массивных штампов горячего деформирования. Мелкие штампы изготавливают из сталей У7, У8, У9. По структуре в равновесном (отожженном) состоянии хромоникелевые стали доэвтектоидные. Режим термической обработки (отпуск) зависит от размеров (толщина стенки) штампа. Закалку проводят в масле с температур 830–860 °С, очень крупные штампы закаливают на воздухе. Сравнительно мелкие (до 300 мм) штампы отпускают при 460–540 °С на 40–44 HRC; средние – при 500–550 °С на 35–40 HRC; крупные (более 500 мм) – при 550–580 °С на 45–50 HRC. Структура – сорбитообразный троостит или сорбит. В последнем случае стали имеют следующие

характеристики: $\sigma_B = 350\text{--}430$ МПа, $KCU = 500\text{--}700$ кДж/м² при пластичности $\psi = 40\text{--}80$ %. Они обладают высокой термостойкостью (разгаростойкостью) – сопротивлением возникновению разгарных трещин, возникающих при циклическом нагреве и охлаждении рабочей поверхности штампа (расширение и сжатие поверхностных слоев).

Теплостойкие стали сохраняют свои свойства до 550–650 °С. Их объединяют в группу так называемых быстрорежущих сталей, маркируемых по ГОСТ 19265–73 буквой Р. После буквы Р в марке следует число, указывающее среднее содержание (в процентах) вольфрама (буква В – его условное обозначение – пропускается), затем после соответствующих букв М, Ф и К – число, указывающее содержание молибдена, ванадия (если содержание его больше 1–2 %) и кобальта. В состав всех быстрорежущих сталей непременно входят углерод (0,8–1,25 %), хром (около 4 %) и ванадий (1–2 %), содержание которых в марке не указывается.

Инструмент из этих сталей (резцы, сверла, фрезы, шеверы, метчики, плашки, развертки, зенкеры, пилы, напильники) работает при скоростях, в 3–5 раз превышающих скорости работы инструмента из углеродистых сталей.

Быстрорежущие стали относят к ледебуритному классу, так как в структуре литых сталей присутствует карбидная эвтектика (ледебурит) скелетообразного типа (рис. 10.2) из аустенита и карбидов, вторичных карбидов, выделяющихся из аустенита вследствие уменьшения растворимости углерода и легирующих элементов в нем при понижении температуры, сорбитообразного эвтектоида (темные поля) из феррита и карбидов. При ковке разбиваются карбиды эвтектические, затем сталь (Р18) отжигается при температуре 860–880 °С с медленным охлаждением до температуры 500–600 °С или изотермической выдержкой при температуре 730–750 °С. Закалка изделий из стали Р18 производится на воздухе (крупные изделия – в масле) с температуры 1280 °С (см. табл. 10.1).

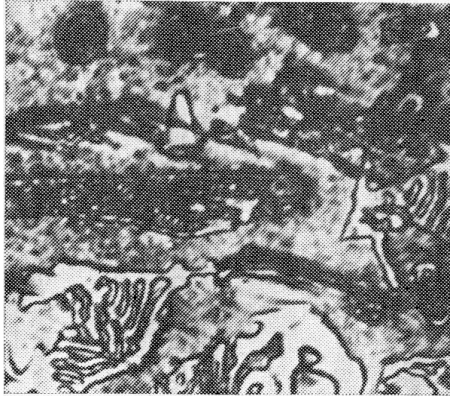


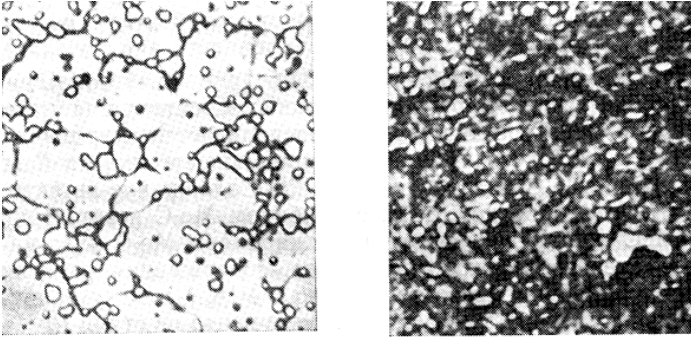
Рис. 10.2. Микроструктура литой стали P18:
ледебуритная эвтектика скелетного типа, сорбитообразный перлит,
вторичные карбиды, аустенит, $\times 500$

Сталь в закаленном состоянии (рис. 10.3а) состоит из K_I и небольшой доли K_{II} , мартенсита и аустенита остаточного (до 30 %), которые, будучи высоколегированными, при травлении шлифа в 5–6%-м растворе HNO_3 в спирте не окрашиваются и выглядят светлыми.

Карбиды вторичные при нагреве стали до температур закаливания в значительной мере растворяются в аустените, легируя его хромом, вольфрамом, ванадием и обеспечивая тем самым теплостойкость стали.

После закалки обычно проводится трехкратный отпуск стали при 560 °С, в результате в ее структуре уменьшается массовая доля аустенита остаточного (до 2 %), микроструктура (рис. 10.3б) – мелкоигльчатый мартенсит отпуска, сильно травящийся в указанном реактиве, карбиды $Me_6C [Fe (W, Mo)_3]C$, $(W, Fe)_6C$, легированные ванадием. Возможно присутствие карбидов другого состава (Me_2C) в небольших долях.

В настоящее время широкое распространение находят вольфрамомолибденовые быстрорежущие стали с пониженным содержанием вольфрама (вольфрам частично заменен молибденом). Например, сталь P6M5 с несколько повышенным содержанием углерода (0,81–0,85 % вместо 0,7–0,8 % в стали P18).



а

б

Рис. 10.3. Микроструктура стали Р18:

а – закаленная (мартенсит закалки, аустенит остаточный, обе фазы светлые, карбиды первичные и вторичные); б – закаленная и трижды отпущенная (мартенсит отпуска, карбиды первичные и вторичные), Γ 500

В структуре литой стали Р6М5 (рис. 10.4) по границам дендритов ферритокарбидного эвтектоида (темная структурная составляющая) располагается карбидная эвтектика (аустенит, карбид) преимущественно на базе карбида Me_2C пластинчатого типа. Содержание эвтектики скелетообразного типа с карбидом Me_6C и эвтектики с MeC очень мало. Эвтектика с карбидом Me_2C пластичнее скелетообразной. Суммарное содержание эвтектик существенно ниже по сравнению с Р18. Поэтому появилась возможность получения инструмента из стали Р6М5 самым дешевым способом – литьем.

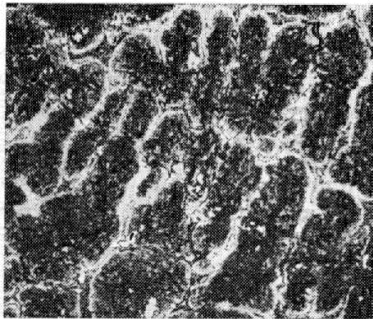


Рис. 10.4. Микроструктура литой стали Р6М5:

дендриты сорбитообразного перлита, карбиды вторичные, ледебуритная эвтектика и аустенит по границам дендритных ячеек, Γ 200

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.
2. Изучить классификацию инструментальных сталей.
3. Зарисовать и объяснить микроструктуру сталей, предложенных преподавателем, на различных этапах их термической обработки.
4. Указать режимы термической обработки, свойства и области применения изучаемых сталей.
5. Написать отчет о работе в соответствии с вышеуказанными пунктами.

Контрольные вопросы

1. Классификация инструментальных сталей.
2. Основные требования, предъявляемые к инструментальным сталям.
3. Влияние легирующих элементов на фазовые превращения, структуру и свойства инструментальных сталей.
4. Нетеплостойкие стали пониженной и повышенной прокаливаемости: марки, термообработка, структура, свойства, применение.
5. Полутеплостойкие стали: марки, термообработка, структура, свойства, применение.
6. Теплостойкие (быстрорежущие) стали: марки, термообработка, структура, свойства, применение.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Результаты микроструктурного анализа сталей, выполненного в соответствии с заданиями.
4. Выводы.

Лабораторная работа № 11

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Цель работы: изучение режимов термической обработки алюминиевых сплавов (закалка и искусственное старение), структурных превращений, которые протекают при термической обработке, и изменений свойств сплавов в зависимости от этих превращений.

Теоретические сведения

Изделия из алюминиевых сплавов подвергаются в большинстве случаев термической обработке: отжигу, закалке, старению. Структура и свойства сплавов существенно зависят от режимов термической обработки, которые для алюминиевых сплавов достаточно разнообразны. Они имеют условные обозначения: **T1** – закалка с температур кристаллизации литых сплавов и искусственное старение; **T2** – отжиг; **T3** – закалка; **T4** – закалка и естественное старение; **T5** – закалка и неполное (кратковременное) искусственное старение; **T6** – закалка и полное искусственное старение; **T7** – закалка и стабилизирующий отпуск; **T8** – закалка и смягчающий отпуск; **T9** – обработка холодом простая и циклическая; **T10** – термомеханическая обработка.

Изделия и полуфабрикаты из алюминиевых сплавов изготавливаются либо методом литья (силумины, **Al – Cu** – сплавы и др.), либо путем пластического деформирования (дуралюмины **Al – Cu – Mg**, сплавы **Al – Mg – Si** и др.). При холодном деформировании, как известно, происходит наклеп (нагартовка). Поэтому в марке алюминиевых сплавов при необходимости оговаривается, каким способом рекомендуется изготавливать изделия и какова (%) остаточная нагартовка: **M** – мягкий отожженный сплав; **H** – нагартованный (**AMцH**); **Π** – полунагартованный (обычно проволочный сплав **AMцΠ**); **H1** – условно нагартованный на 15–20 % (**AMцH1**).

Отжигу подвергаются сплавы, находящиеся в неравновесном состоянии: литые, холоднодеформированные или предвари-

тельно термически обработанные с целью получения в них равновесной структуры.

Гомогенизирующий отжиг слитков устраняет химическую неоднородность (ликвацию) твердого раствора. **Отжиг для стабилизации размеров** литых изделий (режим **T2**) проводится в случае, если изделия при работе не испытывают больших нагрузок, но требуется сохранение их размеров в процессе эксплуатации (например, детали приборов из сплава **АЛ9**). Отжиг при температуре 290 °С обеспечивает в изделиях стабильно равновесную структуру, в которой никаких превращений затем не протекает.

Рекристаллизационный отжиг пластически деформированных изделий устраняет текстуру сплава и снижает наклеп. В результате образуется равноосная высокопластичная структура. **Разупрочняющий отжиг** термически обработанных изделий разупрочняет упрочненные предшествующей термической обработкой сплавы, возвращая их к исходной, более равновесной структуре. Отжиг, за исключением режима **T2**, для алюминиевых сплавов является не окончательной операцией, а промежуточной или подготовительной в технологическом процессе производства изделий.

Закалка алюминиевых сплавов производится с целью получения в них путем быстрого охлаждения неравновесной структуры – пересыщенного твердого раствора легирующих элементов в алюминии. Закачивают сплавы систем, в которых наблюдается переменная растворимость хотя бы одного из элементов в основном растворе, увеличивающаяся при повышении температуры (рис. 11.1).

Сплавы со структурой пересыщенного твердого раствора характеризуются сравнительно высокими пластичностью и прочностью. В большинстве случаев прочность их может быть дополнительно повышена за счет последующего старения. Однако ряд сплавов системы **Al – Mg**, например, **АЛ8 (9,5–11,5 % Mg)** и особенно сплавы **Al – Si** и **Al – Mn**, упрочняются в основном не в результате дисперсного твердения, а при закалке за счет легирования основного раствора. Поскольку в таких сплавах при последующем старении прочность повышается незначительно, а пластичность существенно снижается, то в качестве

окончательной упрочняющей термической обработки для них применяется закалка (режим *T3*). В этом случае нагрев под закалку ведется до сравнительно низких температур (например, для *Д20* – до температуры 230–250 °С) с охлаждением на воздухе или в подогретом масле в зависимости от размеров и конфигурации изделий. Охлаждение с такими скоростями обеспечивает достаточную прочность сплавов (но не максимальную) при высокой пластичности и предупреждает образование закалочных трещин.

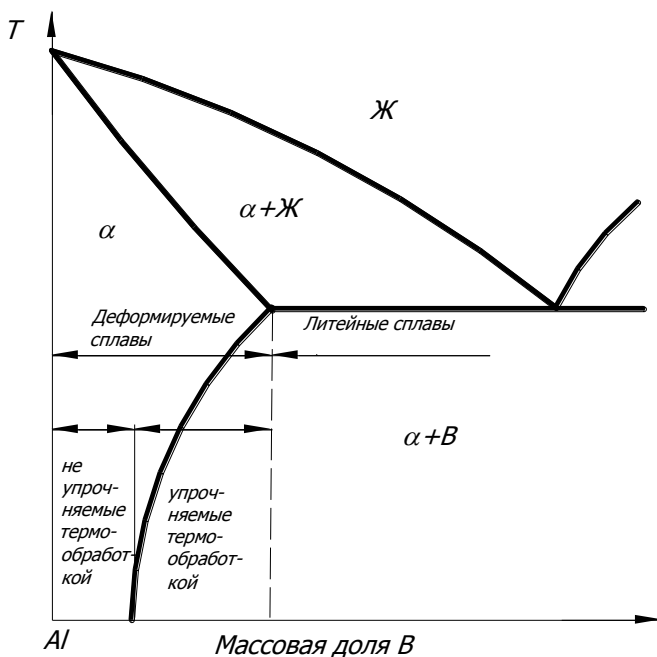


Рис. 11.1. Схема диаграммы состояния системы *Al* – основной легирующий элемент (*B*)

Нагрев сплавов под закалку в случае их последующего старения производится в однофазную область твердого раствора до допустимо высокой температуры, близкой к началу оплавления, что необходимо для полного растворения фаз упрочнителей (см. рис. 11.1).

Охлаждение ведется с максимальной скоростью для фиксации атомов элементов, растворившихся в решетке алюминия. Например, дуралюмин *Д20* (6,5 % *Cu*, 1,6 % *Mg*, 0,4 % *Mn*) закаливается в воде или в масле с температуры (535±5) °С. Дуралюмин *Д16* (4,4 % *Cu*, 1,5 % *Mg*, 0,6 % *Mn*), имеющий в литом состоянии структуру α -твердого раствора и фазы упрочнителей θ ($CuAl_2$), S (Al_2MgCu), входящих в эвтектику, нагревают до температуры 495–602 °С. Температура плавления эвтектики равна 506 °С.

Старение, или **дисперсионное твердение**, – процесс распада нестабильного пересыщенного твердого раствора, полученного закалкой, путем диффузионного перераспределения атомов и постепенного приближения структуры к равновесному состоянию. В одних сплавах он начинается при комнатной температуре сразу же после охлаждения и усиливается с течением времени. Этот процесс, протекающий при сравнительно низких температурах, называется **естественным старением (низкотемпературное старение)**. В других сплавах распад возможен при повышенных температурах – **искусственное старение (высокотемпературное старение)**. Эти процессы чрезвычайно сложны. К настоящему времени достаточно полно изучен процесс искусственного распада пересыщенного твердого раствора меди в алюминии (сплавы системы $Al - Cu$), который условно можно разделить на несколько стадий.

Первая стадия включает структурные изменения, которые протекают без нагрева сплава. В этих условиях в пересыщенном твердом растворе меди в алюминии (рис. 11.2а) атомы меди, диффузионно перемещаясь по решетке, группируются между атомными плоскостями с индексами {100} алюминиевой матрицы. Образуются так называемые зоны Гинье – Престона I (**зоны Г.–П.1**, рис. 11.2б) – области скопления атомов меди пластинчатой (дискообразной) формы субмикроскопических размеров. Их толщина не превышает 0,5–1,0 нм, диаметр равен 3,0–8,0 нм. Концентрация атомов меди в зонах **Г.–П.1** выше, чем в матричном твердом растворе, но ниже, чем в фазе $CuAl_2$, которая является упрочняющей в сплавах системы $Al - Cu$.

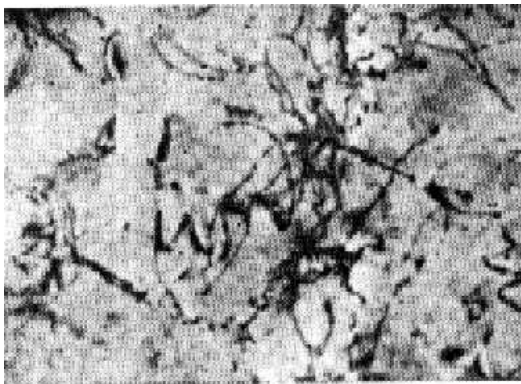


Рис. 11.2а. Электронная микрофотография сплава Al + 4,1 % Cu (г 2500г 2): пересыщенный α -твердый раствор, в структуре наблюдаются единичные дислокации

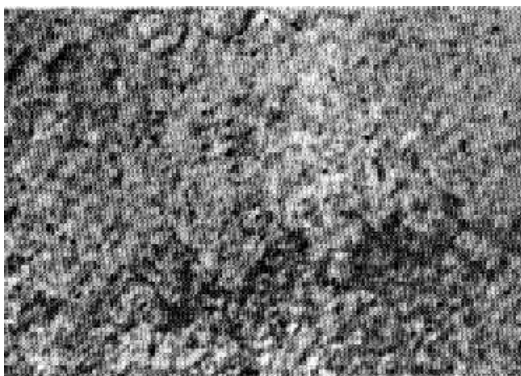


Рис. 11.2б. Электронная микрофотография сплава Al + 4,1 % Cu (г 2500г 2): зонная стадия распада α -твердого раствора (зоны Г.-П.И)

В зонах сохраняется тот же тип кристаллической структуры, что и в окружающем твердом растворе. Из-за разницы размеров атомов меди и алюминия, которая составляет около 10 %, решетка в зонах несколько деформирована, но упруго сопряжена (когерентно связана) с решеткой исходного твердого раствора. В результате сопряжения решеток вокруг зон Г.-П.И решетка твердого раствора также деформируется, в растворе создаются

поля упругих искажений. Это приводит к изменению свойств сплава. В частности, возрастает его твердость и тем сильнее, чем больше количество зон $G.-II$.

2. На второй стадии распада при некотором повышении температуры образуются зоны Гинье – Престона типа II (рис. 11.2в), часто называемые переходной θ' -фазой. Зоны $G.-II$ отличаются от зон $G.-II$ большей протяженностью (до 30–40 нм) и толщиной (до 2–3 нм), повышенным содержанием меди, приближающимся к ее содержанию в $CuAl_2$. Кроме того, в зонах $G.-II$ наблюдается упорядоченное расположение атомов меди, близкое к расположению в $CuAl_2$. Однако зоны $G.-II$ по-прежнему не представляют собой самостоятельной фазы, они когерентны с матрицей. Увеличение размеров зон $G.-II$, их еще большее пересыщение атомами меди и упорядочение приводят к значительным искажениям кристаллической решетки твердого раствора в областях сопряжения и, как следствие, к существенному повышению твердости сплава и падению его пластичности.

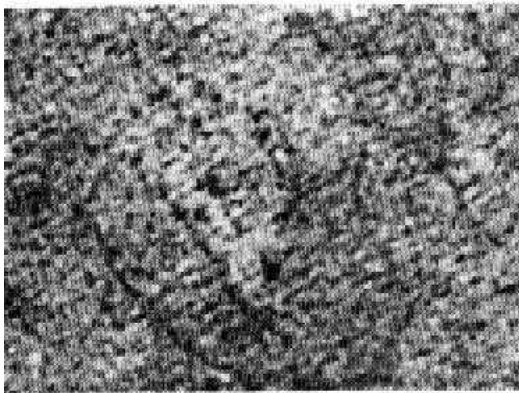


Рис. 11.2, в. Электронная микрофотография сплава Al + 4,1 % Cu (τ 2500г 2): зонная стадия распада α -твердого раствора (зоны $G.-II$)

Образование зон $G.-II$ и $G.-II$ еще не представляет собой процесса распада пересыщенного твердого раствора. Поэтому две названных стадии можно объединить в одну – стадию

предвыделения или латентный (скрытый) период распада, поскольку зоны *Г.–П.* весьма малы и не всегда обнаруживаются даже с помощью электронного микроскопа.

3. При повышенных температурах (≈ 200 °С) процесс распада пересыщенного твердого раствора происходит путем образования метастабильной промежуточной θ' фазы (рис. 11.2з), которая также когерентно связана с матрицей по плоскостям $\{100\}$. Ее химический состав соответствует составу $CuAl_2$. θ' -фаза образуется либо непосредственно из твердого раствора путем самопроизвольного (спонтанного) зарождения в нем центров кристаллизации θ' -фазы, либо когда центрами кристаллизации этой фазы являются существующие при данных температурах зоны *Г.–П.П.* Образование θ' -фазы с кристаллическим строением, отличающимся от решетки твердого раствора, и ее существование в твердом растворе приводит к дальнейшему упрочнению искусственно состаренного сплава.

Размеры зон и θ' -фазы возрастают по мере развития процесса старения, например, с увеличением выдержки сплава при заданной температуре (см. рис. 11.2з), и достигают определенной величины. Между все еще пересыщенным твердым раствором и θ' -фазой устанавливается метастабильное или коллоидное равновесие (равновесие дисперсных структур).

Если в искусственно состаренном сплаве пересыщенный твердый раствор находится в равновесии с образованными зонами *Г.–П.* или дисперсными выделениями θ' -фазы, он может быть частично или полностью возвращен (возврат) в исходное свежезакаленное состояние путем кратковременного нагрева. Возврат возможен потому, что твердый раствор на всех стадиях искусственного старения по отношению к выделившимся образованиям является ненасыщенным медью, и эти образования при нагреве растворяются в нем.

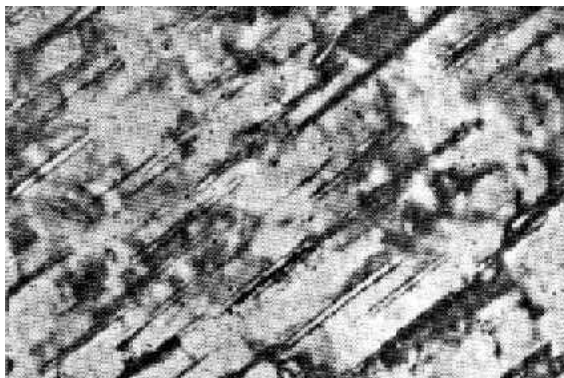


Рис. 11.2з. Электронная микрофотография сплава $\text{Al} + 4,1\% \text{Cu}$ (τ 2500г 2): $\alpha + \theta'$ – фаза, расположенная по плоскостям $\{100\}$ решетки Al

На рис. 11.2 приведены электронные микрофотографии сплава $\text{Al} + 4,1\% \text{Cu}$ в закаленном состоянии на всех этапах искусственного старения при $200\text{ }^\circ\text{C}$. В пересыщенном α -твердом растворе меди в алюминии хорошо видны единичные дислокации (рис. 11.2а). Заметна (рис. 11.2з) ориентированность выделений θ' -фазы: направления $\langle 110 \rangle$ матрицы параллельны направлениям $\langle 100 \rangle$ θ' -фазы. Видно, что дисперсность θ' -фазы уменьшается с увеличением длительности старения.

4. Повышение температуры до $300\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$ вызывает срыв когерентной связи (срыв когерентности) и образование самостоятельной стабильной θ -фазы (CuAl_2) в виде включений.

5. Более высокий нагрев приводит к коагуляции образовавшихся частиц θ -фазы. Срыв когерентности и коагуляции частиц (4-я и 5-я стадии) вызывает разупрочнение искусственно состаренного сплава.

Первые две стадии распада пересыщенного твердого раствора, связанные с образованием зон Г.–П., называют **зонным старением**, последующие стадии – **фазовым старением**.

Таким образом, последовательность процесса искусственного старения сплавов системы $\text{Al} - \text{Cu}$ следующая:

α -пересыщенный твердый раствор \rightarrow Г.– П. \rightarrow θ' \rightarrow θ \rightarrow θ (CuAl_2).

В данном случае процесс *α -пересыщенный \rightarrow α -нормальный раствор* протекает через две промежуточные фазы. Количество промежуточных фаз при старении зависит от степени несоответствия кристаллических структур исходного α -раствора и конечной упрочняющей фазы. Последовательность и характер процесса искусственного старения для сплавов различных систем своеобразны. Например, в промышленных сплавах типа дуралюмина, которые содержат медь, магний и кремний, выделяется упрочняющая фаза S (Al_2MgCu) по схеме:

α -пересыщенный твердый раствор \rightarrow Г.– П. с ориентацией по $\{021\} \rightarrow S' \rightarrow S$.

Схема старения сплавов различных систем одинакова. Форма зон Г.–П., их ориентация в матричном растворе, число переходных фаз и, наконец, состав фаз, и их строение неодинаковы.

Искусственное и естественное старение – два различных процесса. При естественном старении имеют место только две первые стадии – образование зон Гинье – Престона. Скорость их образования в этом случае очень мала, что объясняется замедленной диффузией атомов меди в связи с низкой температурой старения.

При искусственном старении возможны все пять стадий. Скорость упрочнения сплавов растет с повышением температуры старения (рис. 11.3). Для максимального упрочнения закаленных сплавов (режим **Т6**) процесс искусственного старения заканчивают до стадий их разупрочнения, т. е. длительность процесса старения ограничивают образованием θ' -фазы.

Четвертая и пятая стадии (300–400 °С), по сути дела являются отжигом алюминийно-медных сплавов, в результате которого образуется гетерогенная равновесная структура – твердый раствор α и выделения упрочняющей фазы.

Большое технологическое значение имеет период времени, в течение которого закаленные алюминиевые сплавы сохраняют свою пластичность. В это время проводятся такие окончательные операции, как расклепка заклепок, гибка и правка изделий и т. п.

Период времени может быть удлинен перенесением закаленных изделий в контейнеры с отрицательной температурой.

Длительность процесса старения закаленных алюминиевых сплавов может быть различной в зависимости от требуемых механических свойств – прочности и пластичности.

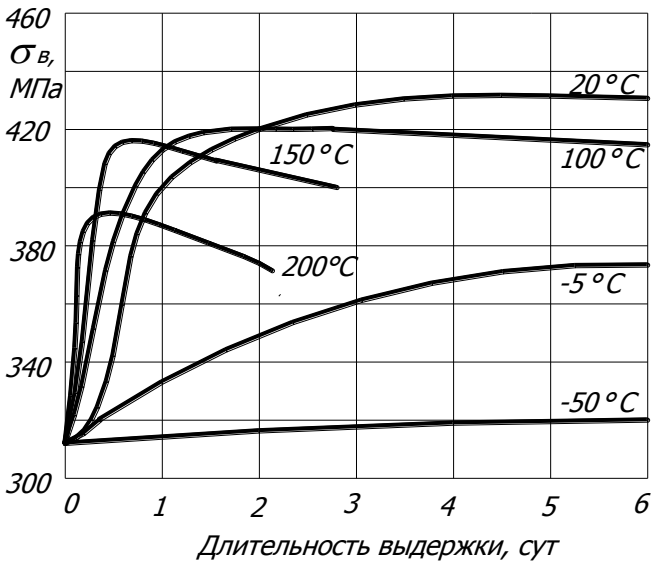


Рис. 11.3. Изменение предела прочности закаленных дуралюминов в зависимости от длительности выдержки и температуры старения

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с теоретическими сведениями и в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.
2. Привести краткое изложение основных теоретических положений термической обработки алюминиевых сплавов.

3. Изучить, зарисовать и объяснить микроструктуру отожженного сплава Д16, указать его химический состав и область применения.

4. Провести закалку образцов сечением 10г 15 мм; температура нагрева 495 ± 5 °С, выдержка 20–30 мин, охлаждение в воде.

5. Измерить твердость образцов после закалки.

6. Провести искусственное старение закаленных образцов при температурах 100, 200, 300 °С с выдержками в 10, 20 и 30 мин.

7. Измерить твердость искусственно состаренных образцов.

8. Составить таблицу твердости закаленных и состаренных образцов.

9. Построить графические зависимости твердости от длительности старения при всех исследованных температурах (за исходную принять твердость закаленного образца).

10. Описать микроструктуру состаренных образцов и структурные превращения, которые вызвали изменение их твердости.

11. Сформулировать выводы и написать отчет о проделанной работе в соответствии с вышеуказанными пунктами задания.

Контрольные вопросы

1. Основные виды термической обработки алюминиевых сплавов.

2. Связь вида диаграммы состояния *Al – легирующий элемент* с возможностью проведения упрочняющей термической обработки.

3. Старение (дисперсионное твердение) на примере сплавов системы *Al – Cu*. Зонный механизм старения. Структура состаренных сплавов системы *Al – Cu*.

4. Влияние температуры и продолжительности старения на механические свойства сплавов системы *Al – Cu*.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Результаты исследования твердости образцов сплава Д16 после закалки и искусственного старения.
4. График зависимости твердости сплава Д16 от длительности старения при заданных температурах.
5. Результаты микроструктурного анализа дуралюмина, выполненного в соответствии с заданиями.
6. Выводы.

Лабораторная работа № 12

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС

Цель работы: изучить структуру, физико-механические свойства и применение пластмасс (термо- и реактопласты); провести сравнение свойств металлов и пластмасс.

Теоретические сведения

Пластические массы (пластики, пластмассы) – важные конструкционные материалы, широко применяемые в машиностроении, электро- и радиотехнике, строительстве, пищевой промышленности и других отраслях народного хозяйства и в быту.

Незначительная трудоемкость изготовления пластмассовых деталей (по сравнению с металлическими), их малая себестоимость, технологичность (легко формуются, склеиваются, свариваются, обрабатываются резанием), специфические физико-механические свойства обуславливают эффективность применения и зачастую незаменимость пластмасс в машиностроении.

Основными достоинствами пластмасс являются: малая плотность и возможность ее изменения, хорошие тепло-, электро- и звукоизоляционные характеристики, высокая химическая стойкость в ряде сред и неподверженность коррозии, высокие оптические свойства (бесцветность и прозрачность органических стекол), хорошие фрикционные и антифрикционные свойства, достаточно высокая прочность (прочность некоторых пластиков сопоставима с прочностью стали), хорошие декоративные свойства, бесшумность в работе (применительно к зубчатым передачам) и некоторые другие. Недостатки пластмасс – невысокая теплостойкость, низкие ударная вязкость и модуль упругости, склонность некоторых пластмасс к старению.

Пластмассы – это материалы на основе природных, а чаще всего искусственных (синтетических) полимеров, которые под действием нагревания и давления способны формоваться в изделия заданной формы и затем устойчиво сохранять ее. Кроме

основного компонента – связующего вещества, в состав пластмасс могут входить наполнители, пластификаторы, отвердители, красители, стабилизаторы, порообразователи, ингибиторы и некоторые другие добавки. Соотношение названных компонентов в пластмассах может быть, например, таким (массовая доля): связующее вещество – 30–60 %, наполнители – 40–65 %, пластификаторы – около 1 %, красители – 1–1,5 %, смазывающие вещества – 1–2 %.

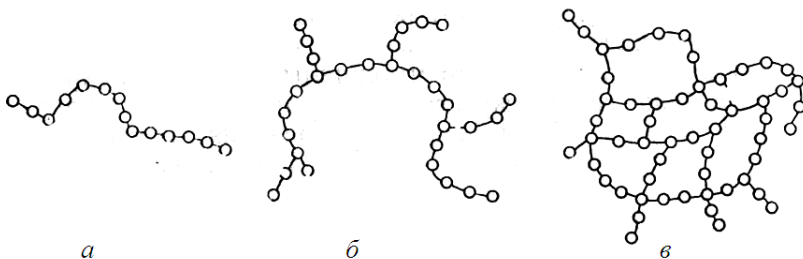
Связующие вещества, от которых в наибольшей степени зависят свойства пластмасс, – это природные или синтетические полимеры. Под полимерами понимают высокомолекулярные вещества, молекулы которых (макромолекулы) состоят из многочисленных элементарных звеньев (мономеров). Молекулярная масса их может составлять от 5000 до 1000000.

Природные полимеры – белки и нуклеиновые кислоты, из которых построены клетки живых организмов, природные смолы (янтарь, копал, шеллак), натуральный каучук, целлюлоза, слюда, асбест, природный графит и др.

Синтетические полимеры – это полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, полиамиды, поликарбонаты, фторопласты, фенопласты, полиметилметакрилат, фенолоформальдегидные смолы, эпоксидные смолы и др. В отдельных случаях пластмасса, например, полиэтилен, может целиком состоять из связующего вещества – полимера. Полимеры, преимущественно синтетические, получаемые химическим синтезом простых органических веществ (мономеров) в макромолекулы методами полимеризации или поликонденсации, являются основой не только пластмасс, но и резины, химических волокон, лаков, красок, клеев и т. д. Так, полиэтилен синтезируют путем полимеризации газа – этилена, получаемого из природного газа или нефтепродуктов. Макромолекулы полимера представляют собой цепочки из звеньев мономера, атомы в которых связаны прочной химической (ковалентной) связью.

Различие структур макромолекул (линейные, разветвленные, сетчатые – рис. 12.1) обуславливает неодинаковость свойств полимеров. Так, линейные (полиэтилены, полиамиды и др.) и разветвленные (полиизобутилен и др.) полимеры характеризуются способностью образовывать анизотропные волокна и

пленки и находиться в высокоэластичном состоянии; редкосетчатые полимеры (резины) обладают упругостью, густосетчатые (смолы) – хрупкие.



12.1. Форма строения макромолекул полимеров:
а – линейная; б – разветвленная; в – сетчатая (схемы)

По фазовому состоянию полимеры могут быть аморфными или кристаллическими. В большинстве случаев реальные полимеры содержат аморфную и кристаллическую фазы. Содержание в полимере (в процентах) веществ в кристаллическом состоянии называют степенью кристалличности. Кристаллическую структуру имеют полимеры с макромолекулами строго регулярной линейной или редкосетчатой формы. Кристаллические полимеры имеют более высокие теплостойкость и механические свойства.

По полярности различают неполярные (например, полиэтилен, полипропилен, фторопласт-4) и полярные (например, поливинилхлорид) полимеры. Неполярные полимеры, в отличие от полярных, обладают более высокими морозостойкостью и диэлектрическими свойствами.

В зависимости от поведения при нагреве различают термопластичные (термопласты) и терморезистивные (реактопласты) полимеры. Соответственно называют и пластмассы на основе этих связующих веществ.

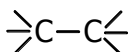
Термопластичными называют полимеры или пластмассы, которые с повышением температуры размягчаются, плавятся, при формовании не претерпевают никаких химических из-

менений, по мере охлаждения затвердевают и сохраняют способность пластически деформироваться при повторном нагреве. Такие полимеры (полиэтилен, полистирол, капрон и др.) имеют линейную или разветвленную структуру макромолекул.

Термореактивные полимеры и пластмассы при нагреве и формовании претерпевают существенные химические изменения, затвердевают и, теряя способность пластически деформироваться, остаются твердыми. Линейная структура таких полимеров при нагреве преобразуется в пространственную.

Физико-механические свойства полимеров зависят как от их структуры, температуры, так и от физического состояния. Из-за высокой молекулярной массы полимеры не способны образовывать низковязкие жидкости или переходить в газообразное состояние. Они могут находиться в одном из трех физических состояний – стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем. Полимеры в стеклообразном состоянии характеризуются пространственной структурой макромолекул, отличаются твердостью и аморфностью.

Атомы находятся в равновесном положении, и макромолекулы не перемещаются. Высокоэластическое состояние макромолекул характерно для высокополимеров и выражается в их способности к большим обратимым изменениям формы при небольших нагрузках. Атомы колеблются, а макромолекулы способны изгибаться. Макромолекулы в целом не перемещаются, но их отдельные сегменты подвижны за счет вращения групп атомов вокруг связи



в мономерных звеньях цепи. Полимеры в вязкотекучем состоянии (линейные или разветвленные) отличаются от жидких веществ большей вязкостью. При этом подвижной является вся макромолекула.

На рис. 12.2 приведены зависимости степени деформации полимеров с различной структурой от температуры их нагрева (термомеханические кривые). По этим кривым можно судить о характере изменения механических и технологических свойств

полимеров при различных температурах. Так, полимеры или пластмассы на их основе эксплуатируются при температурах ниже температуры стеклования t_c , когда они находятся в твердом состоянии.

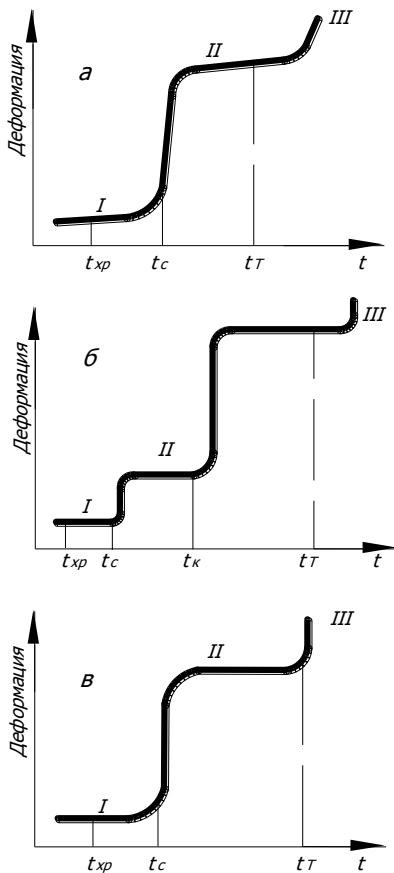


Рис. 12.2. Термомеханические кривые для полимеров:
 а – аморфного; б – кристаллического; в – редкосетчатого для различных состояний: I – стеклообразного; II – высокоэластичного; III – вязкотекучего; IV – химического разложения

Формование изделий из полимеров или пластмасс ведут в области их вязкотекучего состояния. Температура t_{xp} (ниже t_c) соответствует переходу полимеров в хрупкое состояние (для полистирола $t_c = 100$ °С и $t_{xp} = 90$ °С, для полиметилметакрилата $t_c = 100$ °С и $t_{xp} = 10$ °С). В кристаллизующихся полимерах при температуре t_k их кристаллическая часть плавится и далее, от t_k до t_T , полимер находится в высокоэластичном состоянии. Свыше температур t_T аморфные и кристаллизующиеся полимеры переходят в вязкотекучее состояние. Для редкосетчатых полимеров температура t_x – начало химического разложения полимера.

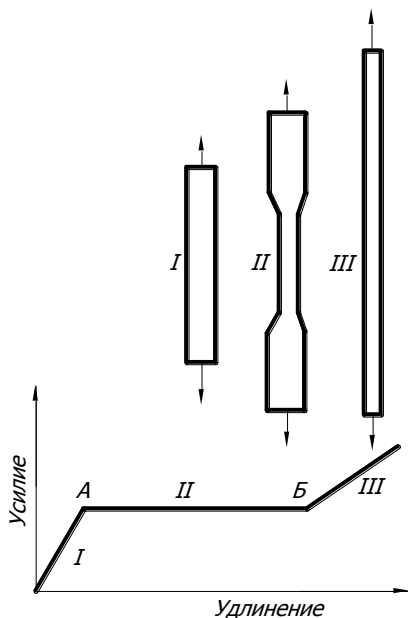


Рис. 12.3. Зависимость удлинения от усилия при деформации кристаллического полимера

Зависимость степени деформации кристаллических полимеров (полиэтилен, полиамиды, полиэтилентерефталат и др.) от напряжения выражается линией, состоящей из трех участков (рис. 12.3).

Первоначально (участок *I*) удлинение прямо пропорционально усилию. По достижении некоторого усилия (точка *A*) удлинение полимера увеличивается при неизменном усилии (участок *II*). Это вызвано резким местным сужением образца, образованием «шейки», распространяющейся на всю его длину. Затем наблюдается растяжение тонкого, но ориентированного образца вплоть до разрыва (участок *III*). Деформация полимера зависит также от скорости и температуры нагружения.

Недостаток полимеров, а следовательно, и пластмасс – склонность к старению, т. е. необратимому самопроизвольному изменению важнейших характеристик при эксплуатации и хранении.

Важным компонентом пластмасс являются **наполнители**. Они повышают механическую прочность пластмасс, уменьшают их усадку при формовании изделий, влияют на вязкость, водостойкость пластмасс, придают им специальные свойства, (фрикционные, антифрикционные и др.). Наполнители могут быть органическими или минеральными в виде порошков, волокон, листов (сажа, древесная мука, сульфидная целлюлоза, асбест, тальк, очесы хлопка или льна, стекловолокно, бумага, ткани, древесный шпон и др.). Органические наполнители повышают прочность, снижают хрупкость, но ухудшают термо- и водостойкость пластмасс. Минеральные наполнители повышают прочность, водостойкость, химическую стойкость, тепло- и электроизоляционные свойства пластмасс, но часто повышают и их хрупкость и плотность. В зависимости от вида наполнителя различают порошковые (карболиты), волокнистые (волокниты), слоистые (содержащие листовые наполнители) и некоторые другие пластмассы.

Пластификаторы способствуют повышению пластичности пластмасс или расширению температурного интервала их вязкотекучего состояния. В качестве пластификаторов широко используют органические вещества с высокой температурой кипения и низкой температурой замерзания (стеарин, дибутилфталат, олеиновую кислоту и др.).

Отвердители (различные амины) или **катализаторы** (перекисные соединения), вводят в терморезактивные пластмассы для ускорения процессов отверждения пластмасс.

Красители органического или минерального происхождения придают пластмассам желаемый цвет.

Стабилизаторы, например, сажа, препятствуют старению полимерных материалов.

Порообразователи, переходя при формовании в газообразное состояние, способствуют образованию пор в таких пластмассах, как пенополистирол, пенополивинилхлорид, поролон, пенополиуретан и др.

Смазывающие вещества вводят для уменьшения прилипаемости пластмассовых изделий к металлическим частям прессформы.

Кроме названных, в пластмассы вводятся с различными целями и другие добавки.

Дадим краткую характеристику свойств и областей применения некоторых пластмасс. К термопластичным пластмассам, основой или связующим веществом в которых являются полимеры с макромолекулами линейной или разветвленной структуры, относятся неполярные: полиолефины (полиэтилен, полипропилен и полиизобутилен), полистирол, фторопласт-4; полярные: полиметилметакрилат, поливинилхлорид, полиамиды и др.

Полиэтилен – кристаллизующийся полимер, который производят полимеризацией этилена ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$). Различают полиэтилен низкой плотности, получаемый при высоком давлении (**ПЭВД**) и содержащий 35–65 % кристаллической фазы, а также полиэтилен высокой плотности, получаемый при низком давлении (**ПЭНД**) и содержащий 60–95 % кристаллической фазы. Полиэтилен химически стоек, нерастворим в воде, ацетоне, спирте, морозостоек до -70°C (чем выше плотность, тем выше теплоустойчивость и механическая прочность), но склонен к старению. Из него изготавливают несилевые детали (контейнеры, емкости, вентили, детали химических насосов, трубы для транспортирования агрессивных жидкостей), защитные покрытия на металлах, пленку для различных целей (электроизоляционную, парниковую).

Полипропилен ($-\text{CH}_2-\text{CHCH}_2-$) получают полимеризацией из пропилена в присутствии металлоорганических катализаторов. Он более теплостоек (до 150°C), чем полиэтилен,

но менее морозостоек (до $-10...-20^{\circ}\text{C}$). Из полипропилена изготавливают некоторые конструкционные детали автомобилей, мотоциклов, корпуса насосов, трубы для транспортирования агрессивных сред, пленки, емкости.

Полистирол ($-\text{CH}_2 - \text{C}(\text{H}_5) -$) – прозрачный, аморфный полимер, диэлектрик, химически стоек, нерастворим в растворителях, но склонен к старению и имеет низкую теплостойкость (до 80°C). Применяется для изготовления деталей машин и приборов (ручек, корпусов и т. д.), емкостей и сосудов для химикатов, пленки и т. д.

Фторопласт-4, или **политетрафторэтилен** ($-\text{CF}_2 - \text{CF}_2 -$) $_n$, – полимер, имеющий макромолекулы в виде спиралей, диэлектрик, химически стоек. Из него изготавливают уплотнительные прокладки, трубы для транспортирования агрессивных сред, сильфоны, антикоррозионные покрытия на металлах. По химической стойкости он превосходит все известные пластмассы.

Полиметилметакрилат (органическое стекло, или **плексиглас**) – полярный, прозрачный, аморфный полимер на основе сложных эфиров акриловой и метакриловой кислот. В отличие от минерального стекла, органическое значительно легче (более чем в два раза) пропускает ультрафиолетовые лучи, технологично (хорошо обрабатывается резанием, склеивается, сваривается, полируется), но обладает меньшей твердостью, прочностью и теплостойкостью. Идет на остекление и изготовление оптики, светотехнических деталей, емкостей. На основе полиметилметакрилата изготавливают самоотверждающиеся пластмассы типа стиракрила, которые применяют в производстве штампов, литейных моделей, абразивного инструмента.

Полиамиды (капрон, нейлон и др.) – полярные пластмассы на основе кристаллизующегося полимера, содержащего группы CO , NH и CH_2 . Они характеризуются высокой прочностью, теплостойкостью, износостойкостью и низким коэффициентом трения ($f < 0,05$), способностью погашать вибрации. Недостатки полиамидов – склонность к старению и некоторая гигроскопичность. Введение наполнителей (графит, тальк, дисульфид молибдена) обеспечивает повышение антифрикционных и некоторых других их свойств. Полиамиды применяют в машиностроении, электротехнике, медицине.

Поливинилхлорид – полярный, аморфный полимер состава $(-CH_2-CHCl-)$. Непластифицированный поливинилхлорид называют винипластом и применяют для изготовления различных деталей химического оборудования, труб, деталей вентиляционных и теплообменных установок, муфт, элементов насосов, вентиляторов, защитных покрытий на металлах, облицовочной плитки. Пластикат (полихлорвинилхлорид с пластификатором) используют для изготовления труб, конвейерных лент, печатных валиков, линолеума и т. д.

Наиболее крупнотоннажный по производству вид реактопластов – **фенопласты**, т. е. пластмассы, получаемые на основе фенолоформальдегидных смол. Различают следующие виды фенопластов: ненаполненные, порошковые (наполнители – древесная мука, тальк, графит и др.), волокнистые (волокниты, асбо- и стекловолокниты), слоистые (гетинакс, текстолит и др.).

Волокниты получают пропиткой очесов льна или хлопка фенолоформальдегидным связующим и применяют для изготовления деталей, работающих на изгиб и кручение и устойчивых к ударным нагрузкам (шкивы, фланцы, стойки, направляющие втулки, маховики и т. д.).

Асбоволокниты получают пропиткой асбеста фенолоформальдегидной смолой. Они обладают высокими ударопрочностью, химической стойкостью, фрикционными свойствами и применяются для изготовления элементов тормозов (накладки, колодки, диски подъемно-транспортных устройств, автомобилей и т. д.), кислотоупорных конструкций.

Из слоистых пластмасс значительный интерес представляет **текстолит**, получаемый из связующего (фенолоформальдегидная смола) и наполнителя (хлопчатобумажные ткани - шифон, миткаль, бязь и др.). Текстолит отличается прочностью, способностью поглощать шумы и гасить вибрации, однако он может работать только при невысоких температурах (до 90 °С). Из текстолита изготавливают зубчатые колеса, вкладыши подшипников, шкивы, втулки, прокладки в машиностроении, распределительные щиты и монтажные панели в электротехнике и т. д.

В табл. 12.1 приведены основные физико-механические свойства некоторых названных пластмасс. Механические свойства пластмасс определяют при проведении лабораторных ста-

тических испытаний на растяжение (ГОСТ 11262–80) или сжатие, изгиб, посредством динамических испытаний по определению ударной вязкости (ГОСТ 4647–80), путем измерения твердости (по Бринеллю ГОСТ 4670–77 с помощью твердомера ТММ-2 или по Роквеллу, Виккерсу, Шору).

При назначении материалов для использования в конструкциях, узлах машин и аппаратов пищевой промышленности, тары и упаковки необходимо также учитывать и ограничения, налагаемые спецификой взаимодействия материала с пищевыми средами.

Краткие сведения о взаимодействии пластмасс с технологическими и пищевыми средами, а также об областях их использования, разрешенных органами Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации, приведены в табл. 12.2 и 12.3.

Таблица 12.1

Некоторые физико-механические свойства пластмасс

Характеристика	Полиэтилен		Полипропилен	Полистирол	Фторопласт	Полиметилметакрилат	Полиамиды	Поливинилхлорид	Текстолит
	ПЭВД	ПЭНД							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Плотность, кг/м ³	918–940	950–955	500–910	1050–1080	2150–2350	1200	1100–1160	1400	1300–1400
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	10–17	22–30	25–40	37–45	14–32	65–70	50–100	40–60	65–100
Относительное удлинение при разрыве, %	500–600	300–800	200–800	1,5–3	250–350	2,5–4	50–150	10–50	1
Твердость по Бринеллю, МПа	14–25	45–60	60–65	140–150	30–40	200	-	100–160	-
Ударная вязкость, МДж/м ²	Не ломается	Не ломается	3,3–3,8	1–2,2	10	1,2–1,3	8–13	до 15	3,5

Окончание табл. 12.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Рабочая температура, °С: максимальная минимальная	105–108 –40–70 и ниже	120–125 –70 и ниже	150 –15	80 –20	250 –269	60 –60	60–110 –20–60	65–80 –40	125 –50
Диэлектрическая проницаемость при частоте тока 10^6 Гц	2,2–2,3	2,1–2,4	2,2	2,5–2,7	1,9–2,2	3	3–4	3–5	7

Таблица 12.2

Коррозионная стойкость пластмасс в технологических и пищевых средах

Среда	t, °С	Тип полимера								
		Фено- но- пласт	Поли- амид	Вини- ни- пласт	Поли- винил- хлорид	Поли- стирол	ПЭВД	Фторо- пласт-3	Фторо- пласт-4	Поли- метил- метак- рилат
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Эксплуатационная среда										
Ацетон	20	ОС	ОС	НС	НС	ОС	ОС	С	С	НС
Бензол	35	С	С	НС	НС	НС	НС	ОС	С	НС
Химические среды										
Аммоний углекислый (насыщенный)	60	–	–	С	С	–	С	С	С	С
Глюкоза насыщенная	60	–	–	ОС	–	–	ОС	С	С	С
Жиры расти- тельные и жи- вотные	20	–	С	–	–	–	С	–	С	С

Продолжение табл. 12.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Серная кислота	20	–	–	С	–	–	С	–	–	ОС
Муравьиная кислота (50 %)	60	–	–	С	–	–	–	–	С	–
Уксусная кислота (25 %)	40	–	НС	С	–	–	НС	–	С	НС
Соляная кислота (20 %)	70	–	НС	С	–	НС	С	–	–	С
Соляная кислота (20 %)	20	–	С	–	–	–	–	–	–	–
Соли										
Натрий углекислый (насыщенный)	60	–	–	С	–	–	С	–	С	–
Натрий хлористый (3 %)	22	НС	–	С	–	С	С	–	С	–
Натрий хлористый (20 %)	60	–	С	С	–	С	С	–	С	С

Окончание табл. 12.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Агрессивные среды пищевой промышленности										
Молочнокислые продукты	30	–	–	С	–	С	С	–	–	–
Сахарный сироп (22 %)	24	–	НС	С	–	С	–	–	–	–
Продукты переработки мяса (рН = 5,5–7,4)	20	–	–	С	–	–	С	–	–	С
Соки плодово-ягодные (кислотность по серной кислоте)	–	–	–	ОС	НС	–	С	–	С	НС
Продукты переработки рыбы	85	–	С	–	–	–	–	–	–	С

Таблица 12.3

Использование полимерных материалов,
разрешенных для изготовления деталей технологического оборудования,
работающих в непосредственном контакте с пищевыми средами

Материал	Назначение
1	2
Винипласт	Детали машин и аппаратов, контактирующих с пищевыми средами, трубопроводы в молочной промышленности и молочная тара (марки 449, 450, 468), емкости под растительное масло (марки П-73, П-74 и др.)
Капролон, капролактам	Детали машин и аппаратов, контактирующих непосредственно с мясными и молочными продуктами
Пенопласт ФПП-1-УС	Материал для теплоизоляции в конструкции судовых трюмов
Пенопласт ФПП-1	Для изоляции холодильных камер на предприятиях мясомолочной и рыбной промышленности, в фургонах для перевозки продуктов
Полиамид-6, ПА6-110, № 21	Детали машин, имеющие контакт с мукой и манной крупой, детали фильтров мельничного оборудования и др.
Полипропилен модифицированный марки 02П, 03П, 04П	Изделия для аппаратов пищевой промышленности, работающие при температурах до 80 °С (жесткие емкостные изделия) и до 100 °С (пленочные изделия)
Полистирол ударнопрочный	Тара в кондитерской, рыбоперерабатывающей промышленности, при переработке хлебопродуктов, для изделий, соприкасающихся с сухими сыпучими пищевыми продуктами

1	2
Полистирол общего назначения	Для изделий, испытывающих многократные контакты при комнатной температуре с сухими сыпучими продуктами, фруктами, овощами, ягодами; упаковочный материал
Полиуретан листовой, термопластичный	Для различных материалов мельничного оборудования (сепараторов, шлюзовых затворов и др.)
Фторопласт	Изготовление различных деталей при производстве пива, безалкогольных напитков (сильфоны, прокладки и др.), детали тесторазделочных линий, транспортеров в хлебопекарной промышленности, уплотнительных колец в центробежных в насосах молочной промышленности, различной тары для упаковки рыбных продуктов и колбасных изделий

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с теоретическими сведениями и, в случае необходимости, определяемой преподавателем, сдать теоретический зачет по теме.
2. Изучить коллекцию образцов пластмасс.
3. Сравнить свойства пластмасс и металлических материалов (по справочнику).
4. Сделать выводы и составить отчет о работе в соответствии с заданиями.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение пластмасс. Назовите их состав и общие свойства. Как классифицируют пластмассы по связующему и наполнителю?
2. Какова структура полимеров, их фазовое состояние?
3. Возможные виды физического состояния полимеров.
4. Каковы механические свойства полимеров и как они зависят от температуры?
5. Назовите основные термопластичные пластмассы, их состав, разновидности, свойства и применение.
6. Назовите основные термореактивные пластмассы, их состав, разновидности, свойства и применение.
7. Особенности применения пластмасс в пищевой промышленности.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткие ответы на контрольные вопросы.
3. Выводы.

Практическая работа № 13

Обоснование и выбор материалов для изготовления деталей машин пищевого и холодильного машиностроения

Цель работы: научиться выбирать и обосновывать выбор материала, режим термической или химико-термической обработки для заданных деталей машин пищевого и холодильного машиностроения.

Примечание. Для выполнения ситуационных задач требуется изучить следующие разделы курса «Материаловедение»: 1. Углеродистые стали. 2. Чугуны. 3. Легированные стали. 4. Термическая обработка. 5. Химико-термическая обработка. 6. Цветные металлы и сплавы. 7. Неметаллические материалы. Кроме того, необходимы знания технологии пищевых производств.

Материалы, применяемые в пищевом и холодильном машиностроении

Специфические условия пищевых производств: повышенная влажность, высокая и низкая (до $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$) температура, большие перепады температуры, непосредственный контакт с пищевыми продуктами и агрессивными средами, абразивное воздействие некоторых продуктов предъявляют особые требования к выбору материалов для пищевого и холодильного оборудования.

Материалы, применяемые в пищевом и холодильном машиностроении, должны отвечать общим требованиям, предъявляемым к материалам, находящимся в контакте с пищевыми продуктами. Материалы не должны содержать вредных для здоровья элементов или вступать в реакцию химического взаимодействия с продуктами, разрушаться под действием пищевых сред, моющих или дезинфицирующих средств и смазочных материалов.

Одним из основных требований к материалам, применяемым в пищевом машиностроении, является их высокая коррозионная стойкость. Продукты коррозии, смешиваясь с пищевыми

продуктами, снижают их качество и нередко делают их совершенно непригодными для питания. При наличии коррозии скорость ее должна быть минимальной. Продукты коррозии не должны быть токсичными и не должны влиять на органолептические свойства пищевых продуктов (вкус, запах, цвет и т. п.).

Пищевые машины и холодильные аппараты изготавливают из разнообразных материалов. Для изготовления станин и корпусных деталей пищевых машин используют серый чугун марок СЧ15 и СЧ18 (ГОСТ 1412–79). Ответственные и высоконагруженные детали сложной конфигурации (цилиндры, головки матриц макаронных прессов и т. д.) изготавливают из серого чугуна марок СЧ20 и СЧ30. В отдельных случаях применяют износостойкий легированный чугун ИЧХ (детали насосов и других деталей оборудования сахарного производства), отбеленный чугун (мукомольные валки и др.).

Углеродистые и легированные конструкционные стали находят широкое применение для изготовления пищевого оборудования. Рабочие органы измельчителей, ножи шпигорезок, кондитерского и другого оборудования изготавливают из углеродистых и легированных сталей. Лучшим материалом с точки зрения износостойкости и режущих свойств для решеток измельчителей мяса являются стали ШХ15 и ШХ15СГ.

Детали пищевого оборудования, непосредственно контактирующие с перерабатываемыми пищевыми продуктами и подвергаемые санитарной обработке агрессивными моющими средствами, работающие при высоких температурах, изготавливают из коррозионно-стойких высоколегированных и жаростойких сталей и сплавов 12Х18Н10Т, 40Х13, 12Х17, 20Х13Н4Г9 и других (ГОСТ 5632–72). Для экономии никельсодержащих сталей рекомендуют заменять их безникелевыми сталями марок 08Х18ФТ1, 10Х14АГ15, 12Х13Г18Д или сталями с пониженным содержанием никеля типа 04Х25Н5М2, а также широко использовать пластмассы.

Для изготовления пищевого и холодильного оборудования используют цветные металлы и сплавы: медь марки М3 (маслопроводы, испарители, перегонные трубы и т. п.); медные сплавы (латуни Л63, ЛК80-3Л, бронзы оловянные литейные БрО5Ц5С5, БрО3Ц7С5Н1 (ГОСТ 613–79), бронзы безоловянные БрА9Ж3Л,

БрА10Ж4Н4Л, БрА9Мц2Л (ГОСТ 493–79) для теплообменной аппаратуры, арматуры, шестерен и деталей насосов, сварных котлов и резервуаров и др.); алюминий марок А7, А5, А10 (для изготовления емкостей, трубопроводов, посуды); деформируемые алюминиевые сплавы марок АД0, АД1, АМц, Д1, Д16 и др. (поплавки молочных сепараторов, стаканы центрифуг, детали рассевов, тестомесильных дежей и т. п.), литейные алюминиевые сплавы марок АЛ2, АЛ4, АЛ9 и др. (корпуса насосов и редукторов, арматура, кронштейны, мешалки и т. п.). Пищевое олово марок О1 и О2 (ГОСТ 860–75), цинк марки Ц3 (ГОСТ 3640–79) используют в качестве защитных покрытий пищеварочных котлов, арматуры молокопроводов и других деталей, контактирующих с пищевыми средами.

В последнее время для изготовления деталей пищевых машин и холодильных аппаратов успешно применяют титан и сплавы на его основе марок ВТ1-0, АТ3, ВТ3-1, ОТ4 и др. в виде отливок, листов, штамповок. Достоинствами титана и его сплавов являются малая плотность, высокие прочностные характеристики, высокая коррозионная стойкость, жаропрочность. Это дает возможность применять титан и его сплавы в конструкциях варочных котлов, змеевиков, теплообменников и другой нагревательной аппаратуры, центрифуг и насосов, емкостей и аппаратов тепловой обработки виноматериалов и т. п.

Из неметаллических материалов в пищевом и холодильном машиностроении нашли применение различные полимеры и пластмассы на их основе: полиэтилен низкой плотности (футеровочный материал для трубопроводов, шестерен и т. п.), полипропилен, полистирол, пенопласт (теплоизоляционный материал), винилпласт (трубы, стержни, бункеры, арматура и т. д.), фторопласт-4 (матрицы к тесторазделочным и макаронным прессам, облицовка валов для раскатки теста и формования конфет), фенопласты, текстолит и стеклотекстолит (шестерни, втулки, подшипники и т. п.), пищевая резина и др.

Для изготовления основных частей пищевых сосудов и аппаратов, работающих под давлением, применяют, главным образом, стали марок Ст3, Ст4, 20К.

В последнее время в пищевых и холодильных аппаратах стали использовать коррозионно-стойкие двухслойные стали

(биметаллы) с основным слоем из углеродистой стали обыкновенного качества ВСтЗкп или стали 20К. В качестве плакирующего слоя, контактирующего с агрессивной технологической средой, используют нержавеющие стали марок 08Х13, 08Х17Т, 15Х25Т, 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, причем толщина плакирующего слоя составляет в среднем 20 % от общей толщины биметалла, что ведет к снижению его стоимости, по сравнению с монолитной нержавеющей сталью при равной толщине листа, и сокращению расхода дефицитных никельсодержащих сталей.

Отраслевыми стандартами (ОСТ 27-00-223-75 и др.) установлены ограничения на марки и ассортимент материалов, применяемых в пищевом и холодильном машиностроении, что способствует повышению уровня унификации и технологичности пищевых машин и аппаратов.

Оборудование, предназначенное для переработки пищевого сырья, имеет свои особенности, заключающиеся в воздействии на поверхность деталей перерабатываемого сырья (зерно, мясо, овощи и др.) или моюще-дезинфицирующих растворов при санитарной обработке машин и аппаратов. В ряде случаев большое значение имеет и среда, в которой работают трущиеся детали машин (например, оборудование сахарных заводов подвержено воздействию абразивных частиц).

Известно также, что в состав продуктов растительного и животного происхождения входят в большом количестве сильные поверхностно-активные вещества (олеиновая, стеариновая кислоты и др.), которые оказывают большое влияние на механизм и интенсивность изнашивания поверхностного слоя.

Таким образом, при выборе материала для изготовления тех или иных деталей машин пищевого и холодильного машиностроения необходимо хорошо представлять условия их эксплуатации.

Методические указания

При конструировании машин, их узлов и деталей инженер-конструктор, инженер-механик для обеспечения нормальной и длительной работы машин должен уметь выбрать материал для деталей и инструмента с учетом условий их эксплуатации.

Эксплуатационная надежность деталей находится в зависимости от их прочностных свойств, износостойкости, жаростойкости и коррозионной стойкости. Для изготовления различных деталей и инструментов используют широкую номенклатуру сталей и сплавов, иногда применяют неметаллические материалы.

Главной задачей высшей школы является подготовка студентов к выполнению определенной профессиональной деятельности. Предлагаемые ситуационные задачи по выбору материалов и назначению режимов их термической или химико-термической обработки должны привить будущему конструктору и механику некоторые навыки в указанном направлении, научить самостоятельно пользоваться технической, в том числе справочной, литературой.

В процессе работы предполагается определить причины выхода из строя деталей машин и инструмента, обосновать выбор состава сплавов из числа применяемых в современном машиностроении и назначить необходимые режимы термической и химико-термической обработки с тем, чтобы обеспечить получение свойств, указанных в задаче.

Основанием для выбора материала должна быть экономическая целесообразность: прежде всего надо рассмотреть возможность применения наиболее дешевого материала, например, детали машин могут быть изготовлены из углеродистой стали или серого чугуна.

Если по свойствам эти материалы окажутся непригодными, то следует воспользоваться, например, качественной углеродистой сталью с повышением ее свойств соответствующей термической или химико-термической обработкой.

Если же при выборе более дешевых материалов не обеспечиваются предъявляемые к детали требования, то тогда нужно рассмотреть возможность использования легированных сталей, цветных сплавов или неметаллических материалов.

При выборе материала необходимо учитывать также, соприкасается ли непосредственно указанная деталь с пищевыми продуктами, нужно ли применить антикоррозионное покрытие или, может быть, выбрать такой режим химико-термической обработки, применение которого решало бы одновременно задачи упрочнения и повышения коррозионной стойкости.

Сделанный выбор материала и режимов обработки необходимо обосновать.

Примеры выполнения заданий, а также некоторые справочные данные приведены в конце данного лабораторного практикума.

Приведенные ниже задачи решаются самостоятельно (отведено 4 часа на лабораторные занятия и 6 часов на внеаудиторные занятия).

В тексте каждой задачи приведены требования к выполнению задания. Если в задаче указано: «Выполнить п. 1–6 задания», то это означает, что надо ответить на нижеследующие пункты контрольных заданий.

Контрольные задания к ситуационным задачам

1. Описать назначение и условия работы данной детали или инструмента. Определить возможные причины выхода из строя детали или причины возникновения дефектов и установить характер разрушения.

2. Выбрать материал для изготовления вышедшей из строя детали. Обосновать сделанный выбор.

3. Привести химический состав выбранного материала, указать его марку и основные свойства.

4. Рекомендовать режим термической и (или) химико-термической обработки, необходимой для обеспечения требуемых свойств изделия с учетом условий его эксплуатации.

5. Объяснить назначение каждой примененной операции термической или химико-термической обработки и рассмотреть ее влияние на микроструктуру и свойства материала.

6. Описать твердость материала в поверхностном слое и в сердцевине детали, а также основные механические и эксплуатационные свойства готовой детали.

Ситуационные задачи

Пищевое машиностроение производит оборудование для различных отраслей и подотраслей, таких как пищевая, мясная, рыбная, мельнично-элеваторная, сахарная, хлебопекарная, консервная, винодельческая, мясо – и птицеперерабатывающая, цельномолочная, сыродельная, мукомольно-крупяная и др.

Холодильное машиностроение производит оборудование, как для перечисленных отраслей, так и для химической, нефтяной, нефтехимической, металлургической и других отраслей промышленности.

При существующем разнообразии видов производств применяемое технологическое оборудование также разнообразно. По характеру воздействия на обрабатываемый продукт его принято подразделять на машины и аппараты. Характерной особенностью машин является наличие движущихся рабочих органов, механически воздействующих на продукт; для аппаратов характерно наличие определенного реакционного пространства (рабочей камеры), в которой протекают физико-механические, тепловые, диффузионные, химические, биохимические, электрические и другие процессы, вызывающие изменение физических или химических свойств продукта либо его агрегатного состояния.

В машинах и аппаратах всех отраслей много сходных сборочных единиц, поэтому ситуационные задачи сформированы в следующие группы:

1. Валы, оси, пальцы.
2. Втулки, барабаны, диски.
3. Шнеки, зубчатые колеса, шестерни.
4. Рычаги, шатуны, вилки, пружины.

Валы, оси, пальцы

В машинах и аппаратах применяют валы и оси разнообразных конструктивных форм и размеров: гладкие, ступенчатые с двусторонним и односторонним расположением ступеней, коленчатые, фланцевые, кривошипные, кулачковые, эксцентриковые, рифленые. Некоторые валы, как валы эмульгаторов и агре-

готов тонкого измельчения мяса, изготавливают полыми из труб.

Материалом для деталей типа валов в основном служат стали, марки которых выбирают в зависимости от условий эксплуатации, от конструкционных углеродистых сталей (ГОСТ 1050–74) до высоколегированных хромистых, хромоникелевых, хромомолибденовых, хромоникелевольфрамовых и других сталей (ГОСТ 4543–71), удовлетворяющих особо высоким требованиям, когда валы передают большие нагрузки, эксплуатируются при высоких скоростях, подвергаются повышенному износу и т. п.

Задача 1.1

На кондитерском комбинате, на ирисозаверточной машине ИЗМ-1 разрушился вал диаметром 40 мм, работающий с большими знакопеременными нагрузками. Излом имел две зоны: гладкую, притертую с поверхности и с волокнистым строением в сердцевине. Проведенный расчет показал, что предел прочности должен быть не ниже 450 МПа.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.2

На кондитерском комбинате, на ирисозаверточной машине ИЗМ-1 разрушился вал диаметром 40 мм. В зоне разрушения наблюдается бархатистый мелкокристаллический излом; твердость поверхности HRC 58–62.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.3

На хлебокомбинате произошла поломка вала диаметром 70 мм редуктора тестоделительной машины ХДФ. Излом имел кристаллическое строение. Приведенный расчет показал, что предел прочности материала должен быть не ниже 350 МПа.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.4

На хлебокомбинате произошла поломка вала диаметром 70 мм редуктора тестоделительной машины ХДФ. Проведенный расчет показал, что предел прочности материала должен быть не ниже 350 МПа, вязкость разрушения КСЧ не ниже 0,7 МДж/м².

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.5

В результате износа вышел из строя коленчатый вал горизонтального вакуум-насоса диаметром 50 мм.

В результате исследований установлено, что партия коленчатых валов изготовлена из стали 50 и закалена на твердость HRC 35–40.

Описать микроструктуру изношенного вала; дать предложения на повторную термическую обработку партии коленчатых валов для увеличения износостойкости, не изменяя геометрические размеры детали и исключив обезуглероживание.

Задача 1.6

В результате поломки вышел из строя коленчатый вал горизонтального вакуум-насоса диаметром 50 мм. Излом имел волнообразное строение, форма и размеры зерен сильно искажены. По расчетам предел прочности материала должен быть не ниже 750 МПа.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.7

На сахарном заводе разрушился вал дезинтегратора для изготовления сахарной пудры диаметром 70 мм, работавший с большими ударными нагрузками. Излом имел крупнокристаллическое строение без заметной пластической деформации. Согласно расчетам, предел прочности материала должен быть не

ниже 700 МПа, а вязкость разрушения КСЧ не ниже 0,9 МДж/м².

Требуется: выполнить п. 1–6 задания. На заводе имеются стали Ст.4сп, 45, 20ХНЗА. Обосновать, какую из этих сталей следует выбрать.

Задача 1.8

Палец ролика делительно-закаточной машины ДЗБ-4М вышел из строя в результате сильного износа поверхности. Исследования показали, что микроструктура стали феррито-перлитная, содержит около 70 % феррита. По техническим условиям твердость поверхности пальца должна быть HRC 40–45.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.9

При эксплуатации разрушилась ось тележки, используемой на складе готовой продукции. Ось диаметром 70 мм была изготовлена из стали Ст.5. Излом имел волокнистое строение, форма и размер зерен сильно искажены. Установлено, что, не изменяя диаметра оси, чтобы не менять конструкцию тележки, необходимо увеличить прочность материала в 1,5 раза.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.10

На молокозаводе вышел из строя ступенчатый вертикальный вал (веретено) сепаратора Г9-ОЦМ-5 (максимальный диаметр 60 мм, минимальный диаметр 25 мм, длина 650 мм). Частота вращения вала 5000 мин⁻¹. Исследование зоны излома показало, что вал имеет структуру мелкоигольчатого мартенсита с множеством закалочных трещин. Закалка сквозная, твердость HRC 62–65.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.11

На молочном комбинате произошла поломка веретена (ступенчатый вертикальный вал) сепаратора ВСЖ-2 (максимальный диаметр 52 мм, минимальный диаметр 21 мм, длина 720 мм). Частота вращения вала 7000 мин^{-1} . Излом имел две зоны: гладкую притертую с поверхности и с характерными ручьи-стыми узорами в сердцевине. Исследования показали, что твердость стали изменяется от поверхности к сердцевине от 65 до 48 HRC.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.12

На хлебокомбинате вышел из строя в результате износа зубьев рифленый валок вальцового мукомольного станка. Валки изготавливают сборными, состоящими из бочки диаметром 250 мм с рифлениями и цапфы диаметром 65 мм. Длина валка 1850 мм.

Проведенные исследования показали, что зубья валка были подвергнуты закалке ТВЧ. Валки изготовлены из стали 45. Твердость поверхности HRC 40–45.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.13

На мясокомбинате вышла из строя вал-шестерня в результате поломки вала. Диаметр шестерни 98 мм, диаметр вала 35 мм, длина 304 мм.

Исследования показали, что твердость поверхности HRC 62–65, сердцевины HRC 28–32. Микроструктура поверхностного слоя – мелкоигольчатый мартенсит. Излом усталостный с множеством мелких трещин.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.14

На молочном комбинате вышел из строя в результате изменения геометрических параметров эксцентриковый вал машины К6-ФОК2 (диаметр эксцентрика 30 мм, диаметр вала 18 мм, длина 760 мм). Исследования показали, что микроструктура поверхностного слоя вала состоит из мартенсита и 30–35 % остаточного аустенита. Изготовлен вал из стали 18ХНВА и подвергнут нитроцементации. Твердость поверхности HRC 52–56.

Требуется объяснить причину изменения геометрических параметров вала; расшифровать марку стали; назначить режим термической или химико-термической обработки, исключающей изменение размеров детали. Назначить твердость сердцевины и поверхности вала, согласно условиям эксплуатации.

Марку стали не менять.

Задача 1.15

В результате износа вышел из строя коленчатый вал мездрильной машины. Диаметр колена 120 мм, диаметр вала 40 мм, длина вала 1015 мм. Твердость поверхности вала HRC 40–45.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.16

На молочном комбинате в результате усталостного разрушения вышел из строя шток компрессора большой хладопроизводительности АО-1200 (максимальный диаметр 90 мм, минимальный диаметр 40 мм, длина 840 мм). Необходимо изготовить шток, причем трущаяся о сальник часть поверхности диаметром 60 мм должна иметь твердость HRC 52–56 на глубину 1,2–1,7 мм; торцы малого буртика, несущие всю осевую нагрузку должны иметь твердость HRC 48–56.

Требуется: выполнить п.п. 1–6 задания.

Задача 1.17

В результате усталости при кручении произошел излом коленчатого вала компрессора АУ200 у масляного отверстия. Вал изготовлен из стали 40Х, подвергнут индукционной закалке; твердость поверхности HRC 45–50.

Требуется: выполнить п 1–6 задания.

Задача 1.18

В результате появления поверхностных трещин вышел из строя тяжелый тихоходный вал с лопастями; масса вала 1 000 кг.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.19

На молочном комбинате в компрессорном отделении вышел из строя поршневой палец диаметром 30 мм и длиной 50 мм компрессора АО-1200. Излом имел крупнокристаллическое строение. Пальцы работают в условиях знакопеременных нагрузок и износа.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.20

На сахарном заводе вышли из строя пальцы втулочно-роликовой цепи свеклоэлеватора, работающие в коррозионно-абразивной среде.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.21

На машиностроительном заводе крепежные детали (болты, шпильки, винты и т. д.) пищевых машин изготавливают на быстроходных станках-автоматах. Однако применяемая для их изготовления сталь Ст.3 не обеспечивает высокого качества поверхности, большой производительности резания и высокой

стойкости режущего инструмента. При работе эти детали не испытывают значительных нагрузок.

Требуется: 1. Выбрать материал для изготовления крепежных деталей на станках-автоматах, отвечающий заданным условиям, обосновать сделанный выбор. 2. Выполнить п. 3–6 задания.

Задача 1.22

Машиностроительный завод выпускал компрессоры со штоком 60 мм из стали с пределом текучести 200–240 МПа и относительным удлинением 20–22 %. Получен заказ на изготовление двух типов более мощных компрессоров. Штоки такого же диаметра в первом типе компрессора должны иметь $\sigma_T \geq 800$ МПа и $KCU \geq 0,8$ МДж/м², а во втором типе компрессора – $\sigma_T \geq 600$ МПа и $KCU \geq 0,6$ МДж/м².

Требуется: 1. Определить, из какого материала изготавливали штоки в серийном компрессоре. 2. Выполнить п. 2–6 для штоков двух новых типов.

Задача 1.23

На машиностроительном заводе приступили к выпуску компрессоров с давлением более 30 МПа. В таких условиях штоки диаметром 120 мм из стали 45 работать не могут. Предел прочности материала должен быть не ниже 800 МПа и поверхностная твердость HV 8 500–10 000 МПа.

Требуется: выполнить п. 2–6 задания.

Задача 1.24

Вышел из строя трансмиссионный вал диаметром 45 мм. Исследования показали, что твердость вала по сечению HRC 52–58; микроструктура – мартенсит отпуска. В изломе просматриваются микротрещины, края которых обезуглерожены.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 1.25

На молочном комбинате в результате износа шатунных шеек вышел из строя коленчатый вал компрессора АУ-200 ($d_{max} = 100$ мм, $d_{min} = 60$ мм, $l = 1028$ мм), изготовленный из серого чугуна СЧ14. Принято решение изготовить коленчатый вал из стали, предел прочности которой должен быть не менее 350 МПа, твердость шатунных шеек не ниже HRC 48–50.

Требуется: выполнить п. 2–6 задания.

Задача 1.26

На пивоваренном заводе при капитальном ремонте компрессора АУ-200 обнаружили, что поршневые пальцы диаметром 30 мм, длиной 50 мм имеют повышенный износ; микроструктура сердцевины – сорбитообразный перлит, поверхностная твердость РКС 38–43, микроструктура поверхностного слоя – мартенсит отпуска.

Требуется: выполнить п. 2–6 задания.

Задача 1.27

На кондитерском комбинате в результате среза вышел из строя палец откидного ножа ротационной карамелережущей машины, работающий на изгиб и срез. Необходимо изготовить палец, обладающий более высокой износостойкостью поверхности и высокой вязкостью сердцевины.

Исследования места среза показали, что он изготовлен из стали 45; микроструктура – мартенсит; твердость HRC 40–45, $KC = 50$ Дж · м/см².

Требуется: выполнить п. 2–6 задания.

Задача 1.28

Для изготовления анкерных болтов двухступенчатого компрессора выбрана сталь 08 кп. В процессе эксплуатации компрессора несколько болтов оказались срезанными.

Требуется: выполнить п. 2–6 задания.

Втулки, барабаны, диски

Детали типа втулок, барабанов и дисков находят широкое применение в пищевом и холодильном машиностроении. Основной конструктивной и технологической особенностью деталей этого типа является то, что они имеют общую ось наружных и внутренних поверхностей.

Втулки изготавливают из чугунов, бронз, латуней и сталей различных марок в зависимости от назначения и условий их работы, фланцы – из серого чугуна СЧ15 или конструкционных сталей 35 и 40, шкивы и маховики из серого чугуна. Материал для цилиндров выбирают из условий эксплуатации деталей: для цилиндров, непосредственно соприкасающихся с пищевыми продуктами (формовка ветчинных изделий, колбасные шприцы, прессы для сыра и др.), применяют нержавеющие стали типа 12Х18Н10Т, а в других случаях – обычные конструкционные углеродистые и малоуглеродистые стали. Перфорированные решетки измельчителей изготавливают из инструментальных сталей, закаливаемых на высокую твердость (HRC 58–64) марок У8А, У10, ХВГ, ШХ15, ШХ15СГ и др.

Задача 2.1

На машиностроительном заводе гильзы сборных цилиндров компрессора АУ-200 со временем изменили геометрические параметры (внутренний диаметр 150 мм) на 0,015–0,025 мм.

Исследования показали, что цилиндры изготовлены из стали 18ХНВА и подвергались нитроцементации и закалке; твердость поверхностного слоя HRC 62–64, толщины нитроцементованного слоя 1,5 мм.

Необходимо описать микроструктуру бракованных цилиндров; расшифровать марку применяемой стали; описать влияние легирующих элементов на эксплуатационные характеристики; разработать режим термической обработки, исключая деформацию цилиндров в процессе вылеживания и эксплуатации.

Задача 2.2

На молокозаводе произошла остановка компрессора из-за износа гильзы цилиндров. Гильза длиной 385 мм с толщиной стенки 46 мм была изготовлена из стали 20 с последующей цементацией. С целью повышения износостойкости было принято решение подобрать материал и обработку, чтобы создать на поверхности твердость не ниже HV 9500–10000 МПа, которая должна сохраняться при нагреве до температуры 300–400 °С.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.3

На молочном комбинате вышло из строя основание барабана сепаратора Г9-ОСП диаметром 370 мм, высотой 136 мм. Частота вращения барабана $n = 6000$ об/мин; деталь контактирует с пищевыми продуктами.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.4

На мясокомбинате вышел из строя гидроцилиндр с фланцем (диаметр 112 мм, $L = 526,5$ мм) шпигорезки ГПШМ-1 для гидравлического привода ножевых рамок, изготовленной из стали Ст.3кп.

В результате микроструктурного анализа установлено наличие фосфидной эвтектики, продольных микротрещин, отмечен повышенный износ по внутренней поверхности.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.5

На мясокомбинате вышел из строя в результате износа гидроцилиндр гидравлического подъемника для фаршемешалок К6-ФПГ-500 (диаметр 89 мм, $l = 1050$ мм), изготовленный из стали 20 с последующей цементацией; твердость поверхности HRC 52–55. На поверхности цилиндра видны следы коррозии.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания, совместив химико-термическую обработку с антикоррозионным покрытием.

Задача 2.6

На сыроваренном заводе в результате износа вышел из строя пневмоцилиндр пресса Е8-ОПГ для дозирования и наполнения сыров. Происходит контакт с пищевыми продуктами.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.7

На молочном комбинате вышел из строя центробежный насос для перекачки молочных продуктов в результате эрозийного повреждения дискового колеса диаметром 185 мм, высотой 51 мм. Дисковое колесо изготовлено литьем из стали 25Л.

Необходимо: произвести ремонт колеса – мест подверженных эрозии; выполнить п. 3–6 задания.

Задача 2.8

На мясокомбинате на машине М1-160 (волчок) решетка измельчителя мяса и нож, изготовленные из стали У8А, до переточки работают 1–2 дня. Размеры решетки: $D = 160$ мм, $d = 32$ мм, $t = 14$ мм. Необходимо повысить стойкость решетки и ножа.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания для решетки и ножа.

Задача 2.9

На сахарном заводе вышла из строя защитная втулка вала жомомешалки. Необходимо изготовить новую втулку. Исследования показали, что втулка разрушилась вследствие пониженной твердости HRC 40–45; микроструктура – малоуглеродистый крупноигльчатый мартенсит.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.10

В цех мясокомбината поступила партия крестовидных ножей для измельчителей мяса – волчков (30 шт.). При эксплуа-

тации режущая кромка ножа быстро затупляется; нож не режет, а сминает мясо.

При исследовании микроструктуры установлено: микроструктура ножа – мартенсит, твердость HRC 30–35. После отжига в микроструктуре содержится около 40 % перлита и 60 % феррита.

Требуется:

1. Определить марку стали.
2. Дать рекомендации по устранению брака партии ножей. Назначить режим упрочняющей термической обработки.
3. Для изготовления новой партии ножей подобрать марку стали, назначить твердость и режим термической обработки.

Задача 2.11

Гайка горловины измельчителя мяса – волчка изготовлена из стали 10кп с твердостью HB = 1600 МПа. Корпус волчка и горловины изготовлены из серого перлитного чугуна с твердостью HB = 2500 МПа.

Во время эксплуатации резьба гайки сминается; волчок выходит из строя.

Необходимо описать структуру и свойства материала гайки и горловины корпуса; обосновать выбор материала для изготовления гайки корпуса (горловины) волчка; назначить режим термической или химико-термической обработки.

Задача 2.12

В цехе мясокомбината вышел из строя измельчитель мяса – волчок из-за появления трещин между отверстиями ножа-решетки (ножи-решетки поступили на мясокомбинат большой партией).

Исследованием установлено следующее:

решетка изготовлена из стали 70, твердость HRC 62–64; структура стали – мартенсит закалки и остаточный аустенит; в месте излома по трещинам металл мелкозернистый, бархатистый, неокисленный.

Необходимо определить причину появления трещин, дать рекомендации; назначить режим термической обработки для исправления дефектов структуры запасных ножей-решеток.

Задача 2.13

В цех мясокомбината поступила партия ножей для измельчителей мяса – волчков. При работе волчка нож сломался.

Исследования структуры показали, что излом ножа крупнокристаллический; структура – крупноигольчатый мартенсит отпуска, твердость HRC 58–60.

Необходимо определить причину разрушения ножа; дать рекомендации по исправлению брака партии ножей, назначить для них соответствующую термическую обработку.

Задача 2.14

На машиностроительном заводе поршни компрессора, имеющие тонкие стенки, изготавливают из серого литейного чугуна марки СЧ 21. В ряде случаев получали отливки с поверхностным слоем повышенной твердости, что затрудняло механическую обработку.

Требуется:

1. Указать причины получения повышенной твердости в поверхностном слое отливок. В результате каких процессов возникает этот слой?

2. Указать структуру и механические свойства поверхностного слоя отливок.

3. Указать режимы термической обработки для снижения твердости таких отливок.

4. Указать структуру и свойства окончательно обработанной детали.

Задача 2.15

На макаронной фабрике вышел из строя цилиндр и головка матрицы макаронного пресса. Необходимо изготовить новый

цилиндр и головку, учитывая имеющийся контакт с пищевыми продуктами.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.16

На пивоваренном заводе произошла остановка компрессора АУ-200 из-за значительного износа чугунной гильзы цилиндров. Принято решение изготовить гильзу из стали (предел текучести должен быть не менее 750 МПа, твердость поверхности HV = 9500–10000 МПа).

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.17

На мясокомбинате решетки измельчителя мяса мешалок-измельчителей ФФЗМ большого диаметра и малой толщины ($D = 247$ мм, $t = 10$ мм), изготовленные из стали У8А, при закалке подвергаются значительному короблению.

Требуется:

1. Указать марку стали для решеток, рекомендовать способы закалки, обеспечивающие минимальную деформацию.
2. Выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.18

На молочном комбинате произошла поломка полосовой пластины компрессора АУ-200. Пластина длиной 101,8 мм, шириной 10 мм, толщиной 1 мм была изготовлена из ленты стали У10А.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.19

На молочном комбинате произошла поломка большой пластины двухпроводного клапана холодильного компрессора 4АУ15. Размеры пластины клапана: $d_{нар.} = 107$ мм, $d_{внутр.} = 83$ мм,

$t = 1,5$ мм. Изготовлена пластина из стали У10А. Необходимо изготовить новую пластину, причем особое внимание обратить на методы, исключаяющие коробление детали при закалке.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.20

На машиностроительном заводе, выпускающем гидронасосы для перекачивания воды в пищевой промышленности, приступили к изготовлению более мощных насосов. При этом скорость движения потока жидкости резко возросла, поэтому поверхность капана из стали 40Х стала быстро разрушаться.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.21

На сахарном заводе быстро, иногда в течение 10–15 дней, выходят из строя, изготовленные из серого чугуна СЧ-21, колеса центробежных насосов работающих при перекачке сред свекло-сахарного производства.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.22

На сахарном заводе после 15 дней работы вышли из строя, изготовленные из стали 35, крышки центробежного насоса работающего на перекачке сред свеклосахарного производства.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.23

Поршни быстроходных компрессоров изготавливают из качественных среднеуглеродистых сталей сварными. В процессе эксплуатации или вылеживания из-за напряжений сварного шва изменяются геометрические параметры поршня.

Требуется: обеспечить повышенную износостойкость поршней быстроходного компрессора, постоянство геометрических параметров и выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.24

На молочном комбинате покрывается коррозией рабочее колесо молочного центробежного насоса. Колесо изготовлено путем литья из стали 45Л.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.25

На кондитерском комбинате вышел из строя диск дробилки.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания, назначив для изготовления износостойкую сталь. Описать инструмент и его термическую обработку для обработки износостойкой стали.

Задача 2.26

На хлебокомбинате разрушился поршень тестоделительной машины ХТД. Поршень изготовлен из стали 45. Исследования показали, что микроструктура поршня – крупно-игольчатый мартенсит; в структуре просматриваются трещины, окисленные по краям.

Требуется: определить причину возникновения трещин и выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.27

На сахарном заводе вышел из строя бронзовый вкладыш подшипника транспортера сахара.

Необходимо: описать материалы, применяемые для изготовления вкладышей подшипников скольжения, их микроструктуру, примерную твердость. Изложить кратко теорию износа. Подобрать материал для вкладыша с учетом условий эксплуатации и экономической целесообразности.

Задача 2.28

На молочном комбинате у компрессора АУ-200 гильзы цилиндров были изготовлены из серого чугуна СЧ-21. Однако эксплуатационная стойкость гильз была низка. Необходимо повысить износостойкость и прочность гильз цилиндров.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 2.29

На молочном комбинате вышел из строя распылительный диск сушилки при производстве сухого молока, яичного порошка.

Диск изготовлен из стали 20.

Требуется: выполнить п. 1–6. При выборе марки стали и химико-термической обработки руководствоваться экономической целесообразностью.

Задача 2.30

В результате поломки седла клапана высокого давления вышел из строя компрессор.

Седло изготовлено из стали 40ХН; HRC 40–45. На заводе имеются стали 35ХГСА и 30Х13.

Требуется: выполнить п. 3–6 задания, при условии если поверхностная твердость HRC 60–62.

Задача 2.31

В холодильных машинах применяют горизонтальные и вертикальные кожухотрубные конденсаторы, которые состоят из медных (иногда) стальных труб, заключенных в цилиндрический кожух. На наружной поверхности труб конденсируются горячие пары аммиака, внутри труб протекает охлаждающая вода.

Требуется:

1. С учетом эксплуатации для изготовления труб назначить марку цветного металла, описать ее свойства, кристаллическую решетку, микроструктуру.

2. Назначить марку материала стальных труб; расшифровать ее, привести химический состав, свойства, микроструктуру.

3. Объяснить экономическую целесообразность применения меди или стали для изготовления труб конденсатора 300КГГ.

Задача 2.32

В цилиндрических емкостях для заливки жидкого азота, возникающие температурные напряжения в зоне сварки патрубков, превышают предел текучести металла, что приводит к преждевременному усталостному разрушению при ограниченном цикле теплосмен.

Цилиндрические емкости диаметром 1,0–1,5 м и длиной 1,82–2,73 м изготавливают из листовой стали толщиной 2–4 мм.

Требуется:

1. Описать требования к стали для изготовления емкостей, работающих при температурах 20–269 °С.

2. Выбрать для изготовления марку стали, описать ее химический состав, механические свойства, влияние элементов на свойства стали с учетом ее эксплуатации.

3. Произвести замену стали одним из цветных металлов или его сплава.

4. Обосновать экономическую целесообразность применения выбранного сплава или стали.

Задача 2.33

Для изготовления сварных емкостей для перевозки, сжиженных хладагентов на большие расстояния, наряду с листовыми сталями, используют блоки из алюминиевых сплавов с толщиной стенки 50–70 мм. Интервал рабочих температур от 20–269 °С. Разрушение обычно транскристаллитное.

Требуется:

1. Подобрать не менее двух марок алюминиевых сплавов для изготовления указанных емкостей, обосновать экономическую целесообразность выбора.

2. Представить химический состав и описать влияние легирующих элементов на свойства сплава.

3. С учетом транскристаллитного разрушения назначить термическую обработку и свойства сплава при низких температурах.

4. Описать способ сварки для соединения алюминиевых сплавов.

Задача 2.34

Цилиндрические емкости для транспортировки сжиженных хладагентов, изготовленные из сталей X18H10T и X25H18, испытывают температурные напряжения, иногда превышавшие предел текучести.

Требуется:

1. Расшифровать указанные марки стали, привести химический состав, режимы термической обработки и назначение ее, описать микроструктуру.

2. Описать влияние никеля и хрома на предел прочности, ударную вязкость и относительное удлинение указанных сталей.

3. Рекомендовать один из видов поверхностного упрочнения наклепом, указанных выше емкостей, обосновать его выбор.

4. Описать (кратко) все виды упрочнения поверхностей наклепом (поверхностным пластическим деформированием).

Задача 2.35

Во фреоновых машинах переохладение жидкости перед регулирующим вентилем совершается в специальных теплообменниках холодными парами фреона. Одновременно с переохладением жидкости в теплообменнике происходит осушение и значительный перегрев всасываемого пара. Теплообменник представляет собой стальную трубу с приваренным днищем, внутри которой имеется змеевик с накатанными ребрами. По змеевику течет жидкий фреон, а в кожухе в противоположном направлении – паробразный. Материал змеевика испытывает напряжения, возникающие на внутренней и внешней поверхно-

сти в результате разности температур и химического воздействия жидкого и парообразного фреона.

Требуется:

1. Назначить марку материала для изготовления кожуха, змеевика, описать химический состав.
2. Описать влияние легирующих элементов на эксплуатационные характеристики.
3. Объяснить конструктивную необходимость на змеевиках накатанных ребер.
4. Предложить и описать способы химико-термического покрытия для повышения коррозионной стойкости внутренней и внешней поверхности змеевика и внутренней поверхности кожуха.

Шнеки, зубчатые колеса, шестерни

В механизмах современного технологического и транспортирующего оборудования пищевых производств применяют разнообразные зубчатые колеса: одновенцовые цилиндрические с прямыми и косыми зубьями, цилиндрические с внутренним зацеплением, конические с прямыми и криволинейными зубьями, червячные; многовенцовые цилиндрические; шестерни – валы цилиндрические и конические. Кроме того, используют зубчатые рейки, зубчатые секторы и звездочки цепных передач.

Перечисленные типы зубчатых колес применяют в приводах подвесных ленточных конвейеров, конвейерных стоках, винтовых конвейерах, лебедках, цепных элеваторах, волчках, сепараторах, центрифугах, расфасовочных автоматах и т. д.

Основным критерием при назначении материала и вида термической обработки для зубчатых колес являются условия их нагружения, характер среды, необходимая точность и габаритные размеры. В большинстве случаев зубчатые колеса изготавливают из конструкционных углеродистых и легированных сталей различных марок. Стальные зубчатые колеса в зависимости от назначения и требований к несущей способности и долговечности подвергаются следующим видам термической и химико-термической обработки: улучшению до HB 240–320; по-

верхностной закалке до HRC 48–52; цементации и закалке до HRC 58–62; азотированию до HRC 52–58.

Улучшенные колеса в основном изготавливают из стали 40X, поверхностно закаливаемые колеса – из сталей 40X и 40XH (при более высоких прочностных требованиях). Существует несколько видов поверхностной закалки: закалка венца с нагревом ТВЧ может производиться в кольцевом индукторе (для колес с модулем < 6 мм) с последующим охлаждением в воде или масле; в индукторе для каждого зуба (для колес с модулем > 8 мм). Такая закалка производится в масле.

Цементируемые колеса изготавливают из сталей 20X, 18ХГТ, 25ХГТ и других сталей, а особо нагруженные – из сталей 12ХН3А, 20ХН3А и др. Лучшие результаты получают при нитроцементации.

Азотируемые колеса изготавливают из сталей 40ХФА, 40X, 38Х2Ю, 38Х2МЮА и др. При азотировании возникают небольшие деформации, что позволяет применять ее для тонкостенных деталей. Для улучшения механических свойств азотированных деталей перед азотированием целесообразно производить улучшение заготовки до HRC 26–28, (на сорбит).

Чугун марок СЧ18, СЧ20, СЧ25 и других марок и стальное литье используют для крупномодульных и слабонагруженных зубчатых колес.

Для коптильного производства цепные звездочки выполняют из жаропрочного чугуна, так как введение легирующих элементов (Cr, Ni, Si, V, Mo) повышает его химическую стойкость к коррозионному разрушению под действием горячих газов (воздух, коптильный газ).

Зубчатые передачи, работающие в агрессивных средах, изготавливают из нержавеющей сталей.

Для изготовления зубчатых колес в пищевом машиностроении применяют также цветные металлы (бронза, латунь) и полимерные материалы (текстолит, полиамиды, древесно-слоистые пластики и др.). Зубчатые колеса, имеющие прямой контакт с пищевыми продуктами (например, в шестеренных насосах для перекачки молока, творога и других жидких пищевых и маловязких продуктов), должны быть изготовлены из материалов, разрешенных Министерством здравоохранения и со-

циального развития Российской Федерации для данных условий эксплуатации.

В пищевых машинах широко применяют шнеки различных типов и размеров. Основными общими конструкционными и технологическими признаками деталей этого типа является наличие витков, расположенных по винтовой поверхности в продольном направлении с большим шагом.

Шнеки изготавливают из конструкционных и нержавеющей сталей, в зависимости от назначения и условий работы, например, литые шнеки – из серого чугуна СЧ20, стали 45Л, цветных сплавов (бронза БрА9Мц2Л, алюминиевые сплавы и др.).

Для экономии нержавеющей стали на рабочие поверхности шнеков, применяемых для транспортирования, смешивания или прессования влажных и тестообразных пищевых продуктов, наносят коррозионно-стойкие покрытия, производится лужение пищевым оловом О1 и О2 (ГОСТ 860–75) или твердое хромирование Х60 и др.

Задача 3.1

Шестерня диаметром 250 мм, модулем 8 мм закалена с нагревом токами высокой частоты и твердостью зубьев HRC 57–60, разрушилась вследствие образования усталостных трещин у основания многих зубьев. Исследования микроструктуры показали отсутствие зоны закалки по впадинам.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.2

Промежуточная вал-шестерня изготовлена из стали, содержащей 0,33 % S. В процессе эксплуатации разрушилась шлицевая часть вала. Излом хрупкий, с блестящими вкраплениями и темными участками, что говорит о наличии ликвации примесей. Твердость рабочих поверхностей HRC 45–47.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.3

Излом шестерни зубчатой передачи постоянного зацепления возник под действием усталости при изгибе. Исследования показали, что вначале возникла трещина на основной контактной поверхности зуба. Твердость поверхности шестерни HRC 57–60, сердцевины HRC 48–52.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.4

Вышел из строя винт автоматически-сокового агрегата КТСА-30/3. Конструктивно он выполнен в виде литого винта; изготовлен из бронзы Бр.А9Мц2Л. Устанавливается на валу с помощью шпонки и винта. Разрушению предшествовало образование усталостных трещин в углах шпоночного паза. Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.5

Хвостовик рабочего шнека измельчителя мяса – волчка во время передачи вращения от электродвигателя сломался. Исследования показали, что хвостовик изготовлен из стали У8, закален на HRC 60–64; микроструктура по всему сечению – отпущенный мартенсит.

Определить предполагаемую причину поломки хвостовика, дать рекомендацию по замене материала хвостовика, описать режим термической обработки для обеспечения соответствующей твердости с учетом того, что муфта сцепления имеет твердость HRC 58–60. Описать микроструктуру.

Задача 3.6

Червяк для перемещения мяса в измельчителе-волчке изготовлен из стали 18ХНВА.

В сложившейся ситуации червяк покрылся следами коррозии, что недопустимо при эксплуатации в пищевых средах.

Необходимо:

1. Расшифровать марку стали, из которой изготовлен червяк. Определить, относится ли она к нержавеющей стали.
2. Обеспечить червяку коррозионную стойкость, твердость поверхности на глубине 0,04–0,06 мм HRC 65–70, применив для этого прогрессивный процесс химико-термической обработки.
3. Описать микроструктуру и свойства диффузионного слоя.

Задача 3.7

В результате поломки зуба вышла из строя шестерня передачи редуктора измельчителя-волчка.

Исследования показали, что на зубьях шестерни произведена сквозная закалка, наблюдается крупноигльчатый мартенсит. Шестерня изготовлена из стали 40X, твердость HRC 40–45.

Необходимо, исходя из условий эксплуатации, подобрать марку стали, назначить твердость и описать режим термической обработки, обеспечивающий поверхностную твердость на глубине 3–5 мм. Описать микроструктуру.

Задача 3.8

В результате питтингового износа вышла из строя шестерня быстроходной передачи редуктора измельчителя мяса – волчка. Исследования показали, что в микроструктуре зуба шестерни, наряду с основной структурой мелкоигльчатого мартенсита, присутствует до 20–25 % феррита; шестерня изготовлена из стали 30; HRC 56–58.

Необходимо:

1. Определить причину износа зуба шестерни.
2. Назначить режим термической обработки и твердость, обеспечивающие высокую износостойкость шестерни. При необходимости изменить марку стали. Описать микроструктуру.

Задача 3.9

При переработке подсолнечных семян на масло в зерной камере шнек-пресса зерный нож после трех месяцев работы подвергся значительному износу (линейный износ достиг 7 мм).

Нож изготовлен из малоуглеродистой стали, легированной хромом 20X, подвергнут цементации на глубину 1,0 мм и закален на HRC 55–65.

Проанализируйте причины столь большого износа, принимая во внимание, что в подсолнечном масле присутствуют в значительном количестве сильные поверхностно-активные кислоты, такие как пальмитиновая, олеиновая, стеариновая, линолевая, что вызывает химико-механическое изнашивание.

Назначьте марку стали для изготовления новой партии деталей и упрочняющую термическую или химико-термическую обработку.

Задача 3.10

Звено шнек-пресса ЕП изготовлено из стали 20X; по заводской технологии шнек-пресс был подвергнут цементации на глубину 1,0 мм и закален на твердость HRC 55–65. Исследования показали, что за 4 месяца работы износ детали превышает 5 мм.

Описать микроструктуру на поверхности износа и предполагаемую твердость НВ.

Назначить более прогрессивный процесс химико-термической обработки, задать твердость для новой партии шнека-пресса, не изменяя марку стали.

Описать микроструктуру поверхностного слоя после проведения упрочнения по новой технологии.

Задача 3.11

На кондитерском комбинате у шестерни для колесоротно-го насоса для перекачки вязких начинок большинство зубьев сломалось после непродолжительной эксплуатации. Шестерня

диаметром 50 мм была изготовлена из стали У8 и после объемной термической обработки имела твердость HRC 60.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.12

В результате износа вышло из строя цилиндрическое зубчатое колесо одноцепного автоматического элеватора ОАЭ-4 для междуэтажной транспортировки бутылок. Диаметр колеса 60 мм, ширина 80 мм. По расчетам предел прочности должен быть более 550 МПа.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.13

На машиностроительном заводе, выпускающем бутылкоукупорочные автоматы типа А1-ВУМ-3, приступили к выпуску новой модели машины. В машине имеются зубчатые колеса сложной формы диаметром 50 мм и высотой 100 мм. По техническим условиям они должны иметь твердость на поверхности не ниже HRC 58–60, а в сердцевине предел прочности не ниже 400 МПа и ударную вязкость не ниже 0,5–0,6 МДж/м². Завод изготовил первую партию зубчатых колес из углеродистой цементуемой стали, однако некоторые зубчатые колеса при закалке получили деформацию.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.14

В результате увеличения мощности тестоделительной машины ХДФ произошла поломка червячного колеса диаметром 150 мм, изготовленного из серого чугуна, с перлитной металлической основой, излом имел кристаллическое строение без значительной пластической деформации. В результате расчетов было установлено, что прочность изделия должна быть в 1,5 раза выше, а относительное удлинение – не менее 2–3 %.

Требуется: зарисовать структуру и указать примерный предел прочности чугуна.

Выполнить п. 1–6 задания. Описать способ получения выбранного чугуна.

Задача 3.15

Вышел из строя шнек шнекового пресса непрерывного действия ПНД-5 для прессования измельченных плодов и ягод и получения сока. Излом шнека крупнокристаллический, изготовлен из стали 45. Твердость на поверхности и по сечению HRC 40–47.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания

Задача 3.16

Планетарная шестерня из стали 20X, в которой большинство вершин зубьев сломалось после непродолжительной эксплуатации. Шестерня была цементирована и термически обработана на твердость HRC 60–62. Толщина цементированного слоя была более 1,5 мм, что способствовало созданию высоких напряжений на поверхности раздела между этим слоем и сердцевиной. При эксплуатации дополнительные нагрузки вызвали образование трещин в упрочненном слое.

Требуется: выполнить п. 2–6 задания.

Задача 3.17

Установлен большой износ ленточного шнека диаметром 354 мм и длиной 994 мм машины Л5-ФМУ-335. Материал – Ст08кп с покрытием пищевым оловом. На изношенной поверхности видны следы коррозии.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания, при условии исключить возможность образования в процессе эксплуатации коррозии.

Задача 3.18

Вышел из строя шнек диаметром 130 мм и длиной 130 мм волчка МП-160 в цехе мясокомбината.

Установлено, что шнек был изготовлен путем литья; материал АЛ5. В микроструктуре просматривается оплавление по границам зерен, крупное зерно.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания, заменив алюминиевый сплав сталью.

Задача 3.19

На макаронной фабрике вышел из строя шнек пресса ЛПЛ-2М для формования макаронных изделий диаметром 102 мм, длиной 1400 мм. Рабочая поверхность покрылась коррозией, что запрещено при работе с пищевыми продуктами. Шнек изготовлен из стали 20.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.20

На пивоваренном заводе вышел из строя в связи с большим износом рабочих поверхностей шнек пневматической барабанной солодовни. Исследование микроструктуры показало, что шнек изготовлен из листовой стали 20 путем сварки. В листах сварки обнаружено крупное зерно и микротрещины.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Предусмотреть термическую обработку изделия после сварки для снятия сварочных напряжений.

Задача 3.21

В практике изготовления зубчатых пар большое влияние имеют на решение проблемы долговечности и нагрузочной способности зубчатых передач отклонения в размерах рабочих поверхностей, вызванные деформациями зубьев в процессе экс-

плуатации. Подбор пары зубчатых колес по удовлетворительному пятну контакта в этом случае теряет смысл.

Требуется:

с учетом эксплуатации быстроходной пары, работающей в химической среде, выполнить следующее:

1. Назначить марку стали для изготовления зубчатой пары и их термическую или химико-термическую обработку.
2. Расшифровать выбранные марки стали; привести механические свойства до термообработки.
3. Обосновать выбор твердости на поверхности изделий после термообработки. Привести значение механических свойств деталей после термообработки.
4. Описать микроструктуру стали зубчатой пары и выбор режимов термообработки с учетом требований постоянства геометрических параметров.

Задача 3.22

Упрочнение зубьев рассматривается как основной резерв повышения несущей способности зубчатых пар. Экономическая целесообразность упрочнения зубчатых колес заключается в том, что уменьшается металлоемкость сборочных единиц и машин в целом – снижение в 2–8 раз массы редуктора.

На предприятии в результате смятия зубьев ведущего колеса вышел из строя редуктор. Исследования показали, что пара изготовлена из стали 40ХН и 45 с последующим термоулучшением и нормализацией соответственно.

Требуется:

1. Назначить для изготовления зубчатой пары марки стали термическую или химико-термическую обработку, повысив их износостойкость в 2–5 раз.
2. Расшифровать выбранные марки стали, указать их механические свойства и микроструктуру в состоянии поставки и в готовой детали.
3. Дать рекомендации по подбору марок сталей для изготовления ведущих, ведомых колес и вала, исходя из условий их работы, сложности изготовления и монтажа.

Задача 3.23

По данным исследований, наибольшая сопротивляемость нанесу цементированных шестерен, изготовленных из стали 12Х2Н4А, наблюдается при твердости зубьев HRC 57–59. Повышение твердости слоя до HRC 60–62 также ведет к появлению шлифовочных трещин в связи с фазовыми превращениями, происходящими в поверхностных слоях диффузионного слоя на глубину 0,02–0,08 мм.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.24

Шестерни приборов диаметром 40 мм, ширина венца 10 мм изготовлены из стали 38ХМЮА и термообработаны до HRC 66–67.

Требуется:

1. Описать микроструктуру и твердость сердцевины шестерен.
2. Определить, какой вид химико-термической или термической обработки произведен на обозначенную поверхностную твердость, указать примерно, на какую глубину, привести режим.
3. Описать микроструктуру поверхностного слоя.
4. Привести режимы термической обработки сердцевины изделия; указать, для какой цели и когда она производится.

Задача 3.25

В тяжело нагруженной зубчатой паре ведомая шестерня изготовлена из стали пониженной прокаливаемости 55ПІ и имеет твердость HRC 50–55. В процессе эксплуатации произошло смятие зубьев.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 3.26

Зубчатая пара установлена на тихоходном валу; изготовлена из стали 18ХНВА, твердость поверхности HRC 60–62. Технологи цеха считают, что использование указанной относительно дорогой стали для изготовления указанной зубчатой пары нецелесообразно. Почему?

Требуется: выполнить п. 1–6 задания

Задача 3.27

На величину износа шестерен влияет также шероховатость поверхности.

1. Исследуйте микроструктуру и свойства шестерен, изготовленных из стали 40X с твердостью поверхности HRC 45–50.

2. Примените вид химико-термической обработки для указанных шестерен, повышающий степень точности изготовления их на 1–2 единицы и увеличивающий сопротивление износу в 2–5 раз.

3. Опишите микроструктуру и фазовый состав диффузионного слоя.

Задача 3.28

При одинаковых условиях эксплуатации шестерни, изготовленные из сталей 12Х2Н4ВА и 18ХГТ, изнашиваются по-разному.

Требуется:

1. Назначить режим термической или химико-термической обработки для указанных шестерен и оптимальную твердость сердцевины и поверхности детали.

2. Описать микроструктуру сердцевины и поверхности, указать фазовый состав.

3. Показать, почему износ деталей, изготовленных из стали 12Х2Н4А, значительно ниже, чем из стали 18ХГТ.

4. Описать влияние легирующих элементов указанных сталей на эксплуатационные характеристики.

Задача 3.29

При закалке с нагревом ТВЧ в поверхностном слое при оптимальном охлаждении возникают сжимающие остаточные напряжения, которые, как правило, не являются причиной появления трещин.

При резком охлаждении нагретого слоя наступает момент, когда температура поверхности достигает 500–550 °С, при которой сталь непластична и в охлаждаемом слое возникают растягивающие напряжения.

На заводе изготовлены шестерни из сталей 45, 40Х, 38ХМЮА, 30ХГТ.

Требуется:

1. Рекомендовать для указанных шестерен режимы термической или химико-термической обработки.

2. Описать структуру, механические свойства в состоянии поставки и после соответствующей термообработки.

3. С учетом сказанного пояснить, шестерни из каких (какой) сталей более склонны к образованию закалочных трещин и почему. Привести режимы закалки с нагревом ТВЧ.

Задача 3.30

При исследовании микроструктуры вышедшей из строя шестерни диаметром 360 мм, шириной венца 100 мм оказалось, что с поверхности просматривается обезуглероженный слой на глубину до 0,2 мм, что явилось причиной выхода из строя шестерни, микроструктура сердцевины шестерни феррит + 50 % перлита.

Требуется:

1. Определить примерно марку углеродистой стали бракованной шестерни и причину обезуглероживания.

2. Выполнить п. 1–6 задания.

Рычаги, шатуны, вилки, пружины

Рычаги и вилки, пружины и шатуны применяют в механизмах управления пищевых машин и автоматов. Основное их назначение состоит в перемещении, включении или выключении отдельных механизмов. К рычагам относятся вилки, тяги, серьги, поводки и рукоятки. Все они в процессе эксплуатации испытывают циклические и ударные нагрузки.

Особую группу деталей этого типа представляют шатуны, которые широко применяют в поршневых холодильных компрессорах для передачи усилия с шатунной шейки коленчатого вала на поршень.

Поверхности рычагов, имеющие в процессе работы большой износ, можно подвергать нитроцементации на глубину 0,2–0,4 мм и закалке до HRC 56 или выполнять с бронзовыми накладными пластинами. Материалом для изготовления рычагов служат стали 20, 30 и 35, серый или ковкий чугун, а для рычагов, имеющих большую нагрузку, легированные стали 18ХМНА, 18ХГН4ВА и др.

Для изготовления пружин используют стали, обладающие высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и высоким пределом выносливости при достаточных пластичности и сопротивлении хрупкому разрушению; они должны также иметь повышенную релаксационную стойкость. Пружинные стали в основном содержат 0,5–0,6 % С; имеют $\sigma_s \approx 800$ МПа.

В промышленности наиболее часто применяют кремнистые стали типа 55С2, 70С3; марганцовистые и хромомарганцовистые стали 65Г, 50ХГА; хромованадиевые стали 50ХФА, 50ХГФА и патентированная холоднотянутая лента и проволока высокоуглеродистых сталей У8, У10, 65, 70 и др.

Задача 4.1

Вышел из строя шатун компрессора 2УП. В результате исследований установлено, что микроструктура шатуна – крупноигльчатый мартенсит с твердостью HRC 40–45.

В отожженном образце, вырезанном из шатуна, микроструктура содержит 50 % феррита и 50 % перлита.

Требуется:

1. Определить марку стали, из которой изготовлен бракованный шатун и причину возникновения крупноиглочатого мартенсита.
2. Выполнить п. 1–6 задания.

Задача 4.2

На автомате Д5-В3Е для резки и завертывания дрожжей поломался рычаг механизма простановки даты.

Исследованиями установлено, что микроструктура – мелкоиглочатый мартенсит закалки.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 4.3

Шатун компрессора АУ-200 изготовлен из стали 40Х. Износ шатуна произошел в верхней неразъемной головке.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания с учетом конструкции неразъемной головки шатуна.

Задача 4.4

При работе компрессора установлен сильный нагрев верхней части цилиндра и нагнетательной стороны крышки цилиндров. Установлена поломка пластины нагнетательного клапана.

Исследования показали, что пластина изготовлена из стали 65Г, микроструктура – троостит; твердость HRC 44–48.

Пластина сломалась из-за наличия надрезов режущим инструментом при изготовлении, что явилось концентратором напряжения.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 4.5

Деталь работает в условиях высоких циклических и динамических нагрузок.

Сталь 65Г

В результате поломки вышел из строя рычаг механизма калибрования брикета пресованных дрожжей автоматической линии Д5-8ЛЕ.

Исследованиями установлены закалочные трещины в отверстиях крепления рычага.

Требуется:

Выполнить п. 1–6 задания, если известно, что рычаг выполнен из стали 45 со структурой крупноигольчатого мартенсита.

По какому признаку установлено, что трещины закалочного характера?

Задача 4.6

Вилка этикетировочного автомата Б-12 при работе согнулась.

Установлено, что микроструктура вилки феррит с 20 % перлита, твердость НВ 1900 МПа.

Требуется: выполнить п. 1.–6 задания.

Задача 4.7

В результате усталостного изнашивания вышел из строя молоток молотковой мельницы МД-300 для размола зерна. Твердость поверхности молотка НВ 2100 МПа.

Требуется: выполнить п. 1–6 задания.

Задача 4.8

Закручивающая губка узла завертки ирисозаверточной машины ИЗМ-1 изнашивалась. Износ имеет вид смятия насечек.

Установлено, что губка изготовлена из стали 20.

Требуется:

1. Описать структуру изношенной детали и предполагаемую твердость.
2. Выполнить п. 1–6 задания.

Задача 4.9

В результате возникновения больших динамических нагрузок от переменного давления произошло изнашивание фаски тарелки клапана высокого давления.

Клапан изготовлен из стали 40ХНМА. Структура – сорбит.

Требуется:

1. Выявить причину изнашивания тарелки клапана.
2. Привести химический состав стали 40ХНМА; описать влияние легирующих элементов на эксплуатационные характеристики детали; указать характеристики механических свойств стали со структурой сорбит.
3. Выбрать новую марку стали или использовать существующую, назначив соответствующую термическую обработку.

Задача 4.10

Седло клапана высокого давления изготовлено литым из чугуна СЧ 24. Металлическая основа чугуна – перлит.

Можно ли увеличить срок службы детали термической обработкой? Если это возможно, то необходимо описать режим и назначить твердость.

Зарисовать схему микроструктуры чугуна.

Описать кратко все, что вы знаете о серых чугунах.

Задача 4.11

Клапанные пружины компрессоров изготавливают из пружинной стали 50ХФА путем холодной навивки отожженной проволоки. Последующая термическая обработка: нормализация

при температуре 820–830 °С; затем закалка от температуры 820–840 °С в масло и отпуск при температуре 400–420 °С.

Требуется:

1. Описать микроструктуру после каждого вида термической обработки и механические свойства.
2. Описать назначение каждого вида термической обработки.
3. Расшифровать химический состав стали и описать влияние легирующих элементов на механические свойства.
4. Можно ли применить для изготовления указанной детали следующие марки сталей: 45, 40ХН, 65Г, 60С2, 12Х2Н4ВА? Почему?

Задача 4.12

Самопружинящие пластины полосовых и прямоточных клапанов компрессоров изготавливают из ленты стали У10А.

Требуется:

1. Доказать возможность изготовления самопружинящих элементов из сталей 20, ХВГ, 18ХНВА, 50ХФМА.
2. Описать микроструктуру пружинящих деталей, твердость. Назначить режим термической обработки для стали У10А.
3. Расшифровать приведенные марки сталей по химическому составу.
4. Определить экономическую целесообразность изготовления пластин из выбранной вами стали.

Задача 4.13

Под действием больших усилий, возникших в процессе эксплуатации, произошла поломка витковой пружины (диаметр проволоки 4,8 мм) кольцевого клапана компрессора.

Пружина изготовлена из углеродистой стали.

Требуется: выполнить п. 2–6 задания.

Задача 4.14

Вследствие усталостного разрушения вышел из строя шатун восьмицилиндрового компрессора АУ-400. Известно, что шатун подвержен знакопеременным нагрузкам при 3000 об/мин.

Основным требованием к структуре стали шатуна является наличие сорбита без включений феррита.

Требуется: выполнить п. 2–6 задания.

Задача 4.15

Вилка переключения скоростей редуктора разрушилась вследствие поломки по отверстию. В результате исследований установлено, что в зоне поломки просматривается невооруженным глазом трещина со следами цветов побежалости. Твердость в зоне разрушения HRC 40–45.

Микроструктура отожженного образца состоит из феррита и 50–55 % перлита.

Требуется:

1. Выяснить причину образования трещины.
2. Выполнить п. 2–6 задания.

Пример выполнения задания

Задача 1

В механическом цехе обрабатывают резанием отливки из стали Г13 с аустенитной структурой. Резцы из быстрорежущих сталей быстро изнашиваются; затупляется режущая кромка.

1. Указать химический состав стали Г13, ее структуру и механические свойства после литья и после термической обработки.
2. Подробно объяснить, почему эта сталь плохо обрабатывается резанием.
3. Указать, какие сплавы надо применить для режущих инструментов при обработке стали Г13; описать химический

состав и структуру этих сплавов, а также способ их изготовления из них пластин для токарных резцов.

Решение:

1. Химический состав стали Г13:

$C = 0,9-1,4 \%$; $Mn = 11-14 \%$; $Si = 0,2-0,6 \%$;

S до $0,03 \%$; P до $0,12 \%$.

Следовательно, главная легирующая примесь в стали – *Mn*. Известно, что марганец расширяет область γ -твердого раствора, понижает критические точки A_{C3} и A_{C1} и увеличивает устойчивость аустенита.

Структура стали Г13 в литом состоянии состоит из аустенита с карбидами, располагающимися по границам зерен.

Такое распределение карбидов понижает прочность и пластичность ($\sigma_s = 1000$ МПа, $\delta = 45 \%$), $HB = 2200-2500$ МПа.

Закалка стали Г13, вследствие получения однородной аустенитной структуры, повышает прочность и пластичность ($\sigma_s = 1000-1150$ МПа и пластичность $\delta = 50-55 \%$), не увеличивая твердости ($HB = 2200-2500$ МПа).

Для растворения карбидов закалка производится с нагревом до температуры 1000°C и охлаждением в воде.

2. Сталь Г13, как и все стали с аустенитной структурой, имеет низкий предел текучести и повышенную способность к наклепу: при повышенных давлениях и ударных нагрузках происходит наклеп рабочих поверхностей, возрастает прочность и сопротивление износу.

Все указанное выше ухудшает обрабатываемость резанием стали Г13.

Кроме этого, аустенитная структура, будучи однофазной, имеет пониженную теплопроводность по сравнению с двухфазной (например, перлитом). Это затрудняет отвод тепла в процессе резания, приводит к концентрации тепла в зоне резания, где развиваются температуры до 1000°C и ухудшает стойкость режущего инструмента. Быстрорежущая сталь теплостойка до температуры $600-650^\circ\text{C}$ и непригодна для изготовления резцов для обработки высокомарганцевистой стали. Резцы быстро тупятся.

3. Для обработки резанием сталей Г13 целесообразно применять инструменты из твердых сплавов.

Твердые сплавы (табл. 13.1) состоят из карбидов *W* или карбидов *Ti* (или вместе взятых), связанных металлическим кобальтом. Изготавливаются металлокерамическим способом (прессование порошков карбидов и спекание).

Твердость составляет *HRC* 70–74, что значительно превосходит твердость быстрорежущей стали. Высокая твердость обеспечивает их высокую износостойчивость.

При температурах резания 900–1000 °С твердые сплавы сохраняют достаточную твердость и быстро не затупляются.

Таблица 13.1

Химический состав твердых сплавов и их применение

Вид сплава	Состав, %			Применение
	<i>WC</i>	<i>TiC</i>	<i>Co</i>	
Вольфрамкобальтовые	88–97	–	3–12	Обработка чугуна и цветных сплавов
Вольфрамтитанкобальтовые	71–86	5–21	6–10	Обработка сталей

Согласно ГОСТу на твердые сплавы,

1) для обдирочной обработки стали Г13 применяется твердый сплав марки *T5K10* (85 % *WC*, 5 % *TiC*, 10 % *Co*);

2) для чистовой обработки – *T21K8* (71 % *WC*, 21 % *TiC*, 8 % *Co*).

Для режущих инструментов твердые сплавы применяются в виде пластинок стандартных размеров, которые припаиваются к державке резца. Такой способ применяют по следующим причинам:

1. Твердые сплавы отличаются значительной хрупкостью и плохо воспринимают ударные и изгибающие нагрузки. Поэтому изготовление резцов полностью из твердых сплавов нецелесообразно и державки для них следует делать из конструкционной стали марок 55 или 60; реже применяется чугун как мате-

риал, хорошо поглощающий вибрационные нагрузки без передачи их на пластину твердого сплава.

2. Резание выполняет только головка резца, она и должна обладать режущими свойствами. Поэтому изготовление всего резца из дорогостоящего твердого сплава нецелесообразно.

Процесс пайки пластинок.

Порошок меди или тонкую медную фольгу укладывают между предварительно тщательно обработанным гнездом державки и пластинкой, посыпают флюсом (обезвоженной бурой).

Конец резца нагревают ТВЧ до температуры 1150–1200 °С до плавления меди. Затем достают резец из печи и слегка прижимают пластинку к державке. Затем медленно охлаждают в песке или в нагретой печи.

Пластинка твердого сплава термической обработке не подвергается. Заточку резцов ведут на кругах из зеленого карборунда или анодно-механическим способом.

Задача 2

Вал, работающий в тяжелых динамических условиях, разрушился. Расчеты показали, что вал должен иметь $\sigma_b > 900$ МПа, $KCU > 0,9$ МДж/м², твердость поверхности **HRC** 60–64, твердость сердцевины **HRC** 35–40.

На заводе имеются стали: Ст.4, 45 и 20ХНЗА.

Необходимо решить два вопроса:

1. какую из этих сталей следует применить для изготовления вала, чтобы обеспечить требуемые свойства;

2. нужно ли применять термическую обработку; если нужно, то указать режимы обработки, описать микроструктуру и привести механические свойства после окончательной термической обработки.

Решение:

1. Выписываем из соответствующих ГОСТов химический состав сталей (табл.13.2).

Таблица 13.2

Химический состав сталей

Марка стали	ГОСТ	Химический состав, %						
		<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>S</i>	<i>P</i>
Ст.4	380–71	0,18–0,27	0,4–0,7	0,12–0,3	–	–	До 0,055	До 0,050
45	1050–74	0,42–0,50	0,5–0,8	0,17–0,37	0,3	0,3	До 0,045	До 0,040
20ХН3А	4543–71	0,17–0,25	0,3–0,6	0,15–0,5	0,6–0,9	2,75–3,25	До 0,030	До 0,035

Из табл. 13.3 видно, что все стали в состоянии поставки не отвечают требованиям задачи по пределу прочности и ударной вязкости.

Таблица 13.3

Механические свойства сталей

Марка стали	Состояние поставки	Механические свойства			Рекомендуемая термическая обработка
		σ_b , МПа	<i>KCU</i> , МДж/м ²	<i>HB</i> , МПа	
Ст.4	Прокат отожженный	420–520	0,5	1500	Не подвергается
45	Прокат отожженный	550–620	0,4	1700–2170	Нормализация или улучшение
20ХН3А	То же	600–650	1,1	2550	Цементация + закалка + низкий отпуск

Следовательно, необходимо рассмотреть для данных сталей возможность применения упрочняющей термической обработки.

2. Сравниваем механические свойства сталей и ответим на 1-й вопрос задачи (см. табл. 13.3).

При учете тяжелой работы вала в динамических условиях (знакопеременное нагружение) необходимо получить после термической обработки хорошее сочетание прочности, вязкости сердцевины и износостойкости поверхности:

а) Ст.4, имея в своем составе мало углерода ($C = 0,18-0,27 \%$), после закалки будет иметь на поверхности твердость **HRC** 25;

б) Сталь 45 является качественной конструкционной углеродистой сталью, содержит $0,42-0,50 \%$ С. Температура закалки $840-860 \text{ }^\circ\text{C}$, охлаждающая среда – вода. Микроструктура после закалки: мартенсит с твердостью **HRC** 45–50. Низкий отпуск уменьшает твердость на 1–2 единицы твердости: ударная вязкость – $0,2-0,3 \text{ МДж/м}^2$. После высокого отпуска твердость **HRC** 28–32, ударная вязкость – $0,6-0,7 \text{ МДж/м}^2$. Прокаливаемость этой стали 12–14 мм.

в) Сталь 20ХНЗА легирована *Cr* и *Ni* – элементами, увеличивающими прокаливаемость и ударную вязкость. При малом содержании углерода после закалки с температуры $800-840 \text{ }^\circ\text{C}$ в масле и низкотемпературного отпуска **HRC** 35–40. Микроструктура – отпущенный мартенсит, ударная вязкость **KCU** = $1,0 \text{ МДж/м}^2$.

Путем вышеуказанной термической обработки мы не получили твердости поверхности **HRC** 60–62. Для того чтобы повысить поверхностную твердость, вал после механической обработки необходимо подвергнуть цементации с целью увеличения содержания углерода в поверхностном слое.

Цементацию производят при температуре $920-950 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для получения толщины цементованного слоя $0,8-1,0 \text{ мм}$ выдержка при цементации составляет 8–10 часов.

После цементации необходимо провести термическую обработку: закалку с температуры $820-840 \text{ }^\circ\text{C}$ в масле и низкий отпуск при $160-180 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате такой обработки: (цементация + закалка + низкий) отпуск мы получаем требуемые свойства согласно условию задачи:

твердость поверхности **HRC** 60–62;

твёрдость сердцевины **HRC** 35–40;
предел прочности $\sigma_g = 950$ МПа;
ударная вязкость **KCU** = 1,0 МДж/м².

Следовательно, только сталь 20ХН3А из трех предложенных обеспечивает выполнение условия задачи. Микроструктура поверхностного цементованного и закаленного слоя после окончательной термообработки – отпущенный мартенсит + карбиды + остаточный аустенит. Микроструктура сердцевины вала – малоуглеродистый мартенсит с переходом в феррит + перлит. Такое сочетание механических свойств по сечению вала обеспечивает сопротивление знакопеременным нагрузкам без разрушения при хорошей износостойкости поверхностного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
2. Лахтин, Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов: учебник для вузов / Ю.М. Лахтин. – 4-е изд. – М.: Металлургия, 1993. – 447 с.
3. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для вузов / А.П. Гуляев. – 6-е изд. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
4. Лейкин, А.Е. Материаловедение: учебник для машиностроительных специальностей вузов / А.Е. Лейкин, Б.И. Родин. – М.: Высшая школа, 1971. – 414 с.: ил.
5. Солнцев, Ю.П. Оборудование пищевых производств. Материаловедение: учебник для вузов / Ю.П. Солнцев, В.Л. Жавнер, С.А. Вологжанина, Р.В. Горлач. – СПб.: Изд-во «Профессия», 2003. – 526 с.
6. Арзамасов, Б.Л. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Л. Арзамасов, И.Л. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
7. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: Металлургия, 1986. – 456 с.
8. Супрунчук, В.К. Конструкционные материалы и покрытия в продовольственном машиностроении: справочник / В.К. Супрунчук, Э.В. Островский. – М.: Машиностроение, 1984. – 328 с.
9. Тищенко, Г.П. Повышение долговечности пищевого оборудования / Г.П. Тищенко, А.В. Трофимович. – М.: Агропромиздат, 1985. – 386 с.
10. Шевченко, М.Г. Гигиенические требования к полимерным материалам, применяемым в пищевой промышленности / М.Г. Шевченко, С.В. Генель. – М.: Медицина, 1972. – 196 с.
11. Агеева, Г.Н. Металловедение и термическая обработка / Г.Н. Агеева, Н.С. Журавлева, Г.А. Корольков. – М.: МИСиС, 1984. – 136 с.
12. Новиков, И.И. Металловедение, термообработка и рентгенография / И.И. Новиков, Г.Б. Строганов, А.И. Новиков. – М.: МИСиС, 1994. – 480 с.

13. Конструкционные материалы: справочник / под ред. Б.Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 687 с.
14. Марочник сталей и сплавов: справочник / под ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 634 с.
15. Международный транслятор современных сталей и сплавов: справочник / под ред. В.С. Кершенбаума. – М.: ИНТАК, 1992. – 623 с.
16. Казаков, Н.Б. Технология пищевого машиностроения / Н.Б. Казаков, Г.А. Мартынов. – М., 1982. – 298 с.
17. Троицкий, Б.С. Материаловедение: Курс лекций в 2-х ч. / Б.С. Троицкий. – Кемерово, 2007.

14. ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Оптовые цены на сталь и прокат черных металлов

Наименование и марка стали	Оптовая цена в относительных единицах*
Углеродистая сталь обыкновенного качества. ГОСТ 5781–61 Ст.3кп, ВСт.3пс, ВСт.6пс, ВСт.8пс	1–1,3
ГОСТ 19854–74 БСт.1кп, БСт.3сп, БСт.4сп	1,5–2,2
Углеродистая сталь качественная ГОСТ 1577–70 08кп, 25, 45, 55, 60, 70	1,3–1,5
Углеродистая сталь инструментальная ТУ 14-1-776-73 У7, У7А, У11, У11А	2–2,3
ГОСТ 1435-54 У7...У13	3–20
Легированная инструментальная сталь ТУ 14-1-717-73 9Х, ХВГ, ХГ, 9ХФ, Х6ВФ, Х12, Х12Ф, Х12Ф1	3,4–23,5
Быстрорежущая инструментальная сталь ТУ 14-1-3508-82 (листовая)	
Р9, Р6М5	38–45
Р18, Р9К5	58–68
Р18К5Ф	72–75
Хромистая сталь ГОСТ 1542–71 (листовая) 20Х, 30Х, 38Х, 40Х	1,6–2,6
ГОСТ 5950–63 9Х, 7Х3	3,3–24
Марганцовистая сталь ГОСТ 1542–71 (листовая) 12Г2, 60Г, 65Г	1,6–2,5
Хромокремнемарганцовистая сталь ГОСТ 1542–71 30ХГС, 35ХГСА	2,8–3
30ХГСА, 35ХГСА	3–22
Хромоалюминиевая сталь с молибденом ГОСТ 4543–71 38ХЮА, 38Х2МЮА	3,8–26
Хромомарганцевотитановая сталь ТУ 14-1-1930-77 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ	3,3–20,4
Хромоникелевая сталь ТУ 14-1-546-72 12ХН2, 40ХН	2,7
ТУ 14-1-1409-75 12ХН3А, 12Х2Н4А,	2,8–3
ГОСТ 4543–71 12Х2Н3А, 20Х2Н4А, 20ХН3А	3,8–28

Наименование и марка стали	Оптовая цена в относительных единицах*
Автоматная сталь ТУ 14-1-395-72	
А12, А20, А30, А40Г	4,3–12,2
Рессорно-пружинная легированная сталь ТУ 14-1-1986-77	
55С2, 60С2, 55С2А, 70С2ХА	2,8–2,9
ГОСТ 14959–69	
65Г, 60С2А, 65С2ВА, 50ХФА-Ш	2,7–2,9
Шарикоподшипниковая сталь ТУ 14-1-396-72	
ШХ15, ШХ6 (листы)	3,7–3,8
Коррозионно-стойкая и жаростойкая сталь ГОСТ 5582–75	
08Х13, 20Х13, 30Х13, 40Х13, 15Х28	5–5,3
12Х19Н9, 08Х18Н10, 12Х18Н10Т	9,7–12
Магнитные стали ТУ 14-1-1054-74	
ЕХ3, ЕХ5К5	3–19,5
Сплав с высоким омическим сопротивлением – нихром	
ГОСТ 12766–67	
Х20Н80	86–185
Магнитомягкие сплавы с высокой магнитной проницаемостью ТУ 14-1-309-72	
78Н (слитки)	33
79НМ (листы)	59
Электротехническая сталь ГОСТ 21427–75	
1211 (Э11), 1311 (Э21), 1411 (Э31)	2,4–3,7
1521 (Э44), 1561 (Э45)	6,9–9

* За относительную единицу стоимости принята стоимость единицы массы (кг, т) среднесортowego проката из горячекатанной стали обыкновенного качества марки СтЗкп.

Оптовые цены на цветные металлы и сплавы

Марка сплава	Оптовая цена в относительных единицах*
Алюминий (в чушках) А999	13,5
Алюминиевые сплавы:	
Силумины АЛ-9, АЛ-4, АЛ-2	18,5–27
Высокопрочные В95, В96	9–24
Дуралюмины Д1, Д16, ДЗП	8,5–19,5
Деформируемые не упрочняемые термообработкой	
АМг5, АМг6, АМц	12,5
Медь (в слитках) М1, М0	12,5
Медные сплавы	
Латуни ЛС59-1, Л62, Л96, ЛАЖ60-1-1	14,5–21,5
Бронзы БрОФ4,0-0,25	28–34,5
БрОЦ4-3	10,5–15,5
БрБ2	131–195,5
Магний (в чушках) Мг96, Мг90	11,8
Магниеые сплавы:	
Деформируемые МЛ5, МЛ6, МЛ10	14,5–42,5
Деформируемые МА1, МА2, МА14	22,9–61
Титан (в губке) ТГ90А	29
Титановые сплавы:	
ОТ5, ВТ5-1	29–77,7
ОТ4-0	145–373
ВТ14	48–80
ВТ16	322
Свинец С 0000	1600
Олово ОВ4-0000	1100
Баббиты:	
БК2	13,9
БКА	10,6
Б16	30,7
Б83	181

* За относительную единицу стоимости принята стоимость единицы массы (кг, т) среднесортowego проката из горячекатанной стали обыкновенного качества марки СтЗкп.

Оптовые цены на спеченные твердые сплавы

Характеристика	Марка сплава	Оптовая цена в относительных единицах			
		1-я гр. сложности	2-я гр. сложности	3-я гр. сложности	4-я гр. сложности
Изделия из металло-керамических твердых сплавов для режущего инструмента с неперетачиваемыми пластинками	ВКЗМ	410	853	1080	2300
	ВК6	338	806	830	2170
	ВК6-ОМ	713	1480	1520	4000
	T30K4	391	829	820	2180
	T15K6	521	1050	1100	2850
	T5K10	614	1210	1280	3290
	TT7K12	875	1500	1720	4060
	TT8K6	1130	1680	2180	4740
	TT20K9	1780	2120	2580	5770
Пластины сменные многогранные Заготовки пластин сменных многогранных Заготовки изделий	КНТ-16	401	478	697	850
	КНТ-16	179	200	240	395
	ТН-50	200	—	—	—

* За относительную единицу стоимости принята стоимость единицы массы (кг, т) среднесортového проката из горячекатанной стали обыкновенного качества марки СтЗкп.

Механические свойства и назначение сталей и сплавов

Марка стали	Термо- обра- ботка	Механические свойства			Назначение
		σ_s , МПа	KCU , МДж/м ²	Твердость	
1	2	3	4	5	6
Ст3сп, МСт3сп, ВСт3сп ГОСТ 380–71	Н	370	0,80	НВ 1400	Сварные конструкции, корпуса сосудов, аппаратов и теплообменников, резервуары, газгольдеры, патрубки, фланцы, оси, втулки, шестерни, рычаги, болты, гайки, червяки, поршневые пальцы
Ст6, МСт6, ВСт6 ГОСТ 380–71	Н	600	–	НВ 1500– 2100	Шпиндели, червяки, кулачковые муфты, оси, валы, шестерни, поршневые пальцы
20 ГОСТ 1050–74	Н	400	0,50	НВ 1100– 1600	Серьги, муфты, цилиндры, штоки, трубопроводы, корпуса аппаратов, косынки, башмаки, стаканы, детали насосов для жидкого кислорода, поршневые пальцы, болты, винты, шестерни
45 ГОСТ 1050–74	Н 3+НО	600 1200	 0,35	НВ 1700– 2100 HRC 40–50	Валы-шестерни, коленчатые и распределительные валы, зубчатые колеса, оправки, арматура насосов, храповики, стопоры, фиксаторы, пальцы, втулки
70 ГОСТ 1050–74	Н 3+СО	700 1000		HRC 40–45	Рессоры, пружины, фрикционные диски, кольца амортизаторов
У7, У7А ГОСТ 1435–74	О 3+СО 3+НО	600 1400	 0,38	НВ 1800 HRC 48–51 HRC 61–63	Деревообрабатывающий инструмент, штампы кузнечные, слесарно-монтажный инструмент

Продолжение табл. П4

1	2	3	4	5	6
У8А ГОСТ 1435–74	О З+СО З+НО	750		НВ 1850 HRC 48–51 HRC 61–65	Деревообрабатывающий инструмент, штампы кузнечные, слесарно-монтажный инструмент, плиты и формы для литья под давлением, пружины
У10А ГОСТ 1435–74	О З+СО З+НО	650 1700	0,02	НВ 1900 HRC 50–53 HRC 62–65	Деревообрабатывающий инструмент, штампы кузнечные, калибры, шаберы, ходовые винты, втулки
У12А ГОСТ 1435–74	О З+НО	700 1700	0,30 0,02	НВ 2000 HRC 62–65	Метчики, напильники, штампы кузнечные, холодновысодочный инструмент, калибры, пресс-формы
20Х, 20ХФ ГОСТ 4543–71	Н Ц+З+НО	600 650– 800	0,60 0,50– 0,80	НВ 1700– 2100 HRC 56–62 Сердцевина НВ 2400– 3000	Валы, шестерни, обоймы, оси, червяки, тарелки регуляторов, плунжеры, муфты, штоки впускных клапанов, толкатели
40Х, 40ХН ГОСТ 4543–71	З+НО	1500	0,30	HRC 45–50	Оси, валы, шестерни, штоки, плунжеры, пальцы, детали насосов
65Г ГОСТ 1542–71	З+СО	1500		HRC 43–48	Цанги, пружины, рессоры, шайбы, ножи
18ХГТ ГОСТ 4543–71	Н Ц+З+НО	700 1000	1,00 0,80	НВ 1600– 2000 HRC 56–62 Сердцевина НВ 2400– 3000	Шестерни, червяки, валы, втулки, муфты, шкворни, пальцы, ответственные нагруженные детали

1	2	3	4	5	6
30ХГТ ГОСТ 4543–71	Н Ц+3+НО	1500	0,50	НВ 1600– 2000 HRC 56–62 Сердцевина НВ 2400– 3000	Сильно нагруженные детали, работающие при больших скоростях, шестерни, валы, торсионные валы, червяки
12ХН3А ГОСТ 4543–71	Ц+3+НО Ц+3 ₁ +3 ₂ +НО	850 950	0,80 0,90	HRC 56–62 Сердцевина НВ 2500 Сердцевина НВ 3000	Зубчатые колоса, венцы, поршневые, шаровые пальцы, распределительные валы, муфты, цилиндры двигателей, корпуса клапанов, арматура насосов
20Х2Н4А ГОСТ 4543–71	Ц+3+НО Ц+3 ₁ +3 ₂ +НО	1100 1300	0,80 0,80	HRC 56–63 Сердцевина НВ 3200 Сердцевина НВ 3200	Зубчатые колеса, валы-шестерни, оси, пальцы, валы, ответственные тяжело нагруженные детали
35ХГСА ГОСТ 1542–71	Н 3+НО	750 1700		НВ 1900– 2000 HRC 48–50	Валы, шестерни, корпуса, лопатки компрессорных машин, рычаги, толкатели, ответственные сварные конструкции, работающие при знакопеременном нагружении, крепежные детали, работающие при низких температурах
38ХМЮА ГОСТ 4543–71	3+ВО 3+ВО+А	700 800	1,20 0,60	НВ 2200 НВ 8500– 10000 Сердцевина НВ 2600– 3000	Штоки клапанов, гильзы цилиндров, иглы форсунок, шестерни, плунжеры, детали насосов, валы, распределительные валы

1	2	3	4	5	6
50ХФА ГОСТ 14959–78	3+СО 3+НО	1500		HRC 42–48 45–50	Пружины плунжеров топливных насосов, форсунок, сальниковые и другие тяжело нагруженные пружины
60С2А 60С2 ГОСТ 14959–78	3+СО ИЗ+СО	1300 1800	0,60	HRC 47–50	Пружины спиральные тяжело нагруженные, пружины кислородных установок, компенсационные шайбы, торсионные валы
ШХ9, ШХ15 ГОСТ 801–60	О 3+НО	730 2200	0,45 0,05	HB 1800– 2200 HRC 62–65	Концевые меры длины, резьбовые калибры, токарные и др. резцы, шариковые и роликовые подшипники
9ХС ГОСТ 5950–73	О 3+НО	700 2200	 0,075	HB 1900– 2400 HRC 62–65	Сверла, развертки, плашки, клейма, гребенки, цанги
ХВГ ГОСТ 5950–73	О 3+НО			HB 2000– 2500 HRC 62–65	Протяжки, матрицы штампов холодного деформирования, измерительный инструмент
ХВ5 ГОСТ 5950–73	О 3+НО	 2200		HB 2200– 2500 HRC 62–67	Резцы, фрезы, зубоорудный инструмент
Х12Ф1 ГОСТ 5950–73	О 3+НО	 1500	 0,30	HB 2000– 2500 HRC 62–64	Плашки, накатные ролики, штампы для холодной деформации, деревообрабатывающий инструмент
3Х2В8Ф ГОСТ 5950–73	3+НО 3+ВО			HRC 49–54 42–45	Тяжело нагруженный штамповый инструмент для работы с нагревом до температуры 600 °С, пресс-формы для литья под давлением, ножи для резки металла

Продолжение табл. П4					
1	2	3	4	5	6
5XHM, 5XHB, 5XGM ГОСТ 5950–73	3+НО 3+ВО 3+СО			HRC 56 HB 2400 HRC 38–44	Штамповый инструмент для горячей деформации (до температуры 400–500 °С)
4X5B2ФС ГОСТ 5950–73	3+НО 3+ВО			HRC 50 HRC 41–45	Тяжело нагруженный штамповый инструмент для горячей деформации (до 600–700 °С), матрицы, вставки
P9 ГОСТ 19265–73	О 3+3 ^x кр.О	900 1900	 0,05	HB 2000–2500 HRC 62–64	Сверла, фрезы, резцы, зенкеры, пилы, резьбонарезной инструмент (до температуры 600 °С)
P6M5 ГОСТ 19265–73	О 3+3 ^x кр.О		 0,05	HB 2000–2500 HRC 63–65	Червячные фрезы, резцы, протяжки, метчики
СЧ 12 ГОСТ 1412–70	Отливка	120		HB 1400–2200	Слабонагруженные детали, крышки, кожухи
СЧ 32 ГОСТ 1412–70	Отливка	320		HB 1900–2500	Станины, зубчатые колеса, муфты, кулачки, гидроцилиндры, корпуса гидроцилиндров, компрессоров и др.
ВЧ 38-17 ВЧ 70-3 ВЧ 120-3 ГОСТ 7293–70	Отливка Отливка Отливка	380 700 1200	 0,06 δ = 17 % 0,03 δ = 3 % 0,03 δ = 3 %	HB 1400–1700 HB 2200–2700 HB 3500	Отливки сложной конфигурации, зубчатые колеса, картеры, гидроцилиндры компрессоров, золотники
ЖЧХ	Отливка	180		HB 2000–2800	Детали повышенной коррозионной стойкости, жаростойкости до 500 °С, детали двигателей внутреннего сгорания, компрессоров

1	2	3	4	5	6
ЖЧХ30	Отливка	300		НВ 2600–5500	Детали химической аппаратуры кислотостойкие, жаростойкие до температуры 1100 °С, стойкие против абразивного износа
АС-1	Отливка			НВ 1800–2600	Для работы в паре с закаленными деталями
ВВ-1 ГОСТ 1585–70	Отливка			НВ 2600	Для работы в паре с закаленными деталями
1Х18Н9Т ГОСТ 5632–72	3	540	1,00		Жаропрочные до температуры 600 °С, выхлопные коллекторы, арматура для турбокомпрессоростроения, детали, работающие в агрессивных средах
Х5МЛ ГОСТ 20072–74	ВО	600	0,40	НВ 1900–2400	Фланцы, патрубки, детали трубопроводов, арматура насосов, работающих при температуре от –40 до +550 °С под давлением
20Х3МВ ГОСТ 20072–74		900	0,60		Трубы пароперегревателей, детали котлоагрегатов
1Х13, 2Х13, 3Х13 ГОСТ 5632–72		500–850	0,7–1,00	НВ 1800–2200	Детали паровых турбин, жаропрочные стали
БрКМц3-1 ГОСТ 18175–78	С	800–900	$\delta = 3 \%$		Пружины, контакты
БрБ2 ГОСТ 493–54	3+С	1150–1500	$\delta = 2 \%$	НВ 3300	Пружины, контакты
БрОЦ4-3	С	600–800	$\delta = 2-5 \%$		Пружины

1	2	3	4	5	6
АЛ4 АЛ11 ГОСТ 2685–75	С 3+С	200 200	$\delta = 1,5\%$ $\delta = 2\%$	НВ 700 НВ 800	Фасонные отливки Фасонные отливки
Д1 Д16 В95 АК4 АК8 АВ ГОСТ 21631–76	3+С 3+С 3+С 3+С 3+С 3+С	380 430 540 400 440 400	$\delta = 12\%$ $\delta = 10\%$ $\delta = 6\%$ $\delta = 6\%$ $\delta = 10\%$ $\delta = 14\%$		Листовой материал
Л60 ЛС59–1 Л90 ГОСТ 931–70		480 500 360	$\delta = 9\%$ $\delta = 5\%$ $\delta = 3\%$		

*Условные обозначения: Н – нормализация, З – закалка, НО – низкий отпуск, СО – средний отпуск, ВО – высокий отпуск, О – отжиг, Ц – цементация, С – старение, ИЗ – изотермическая закалка, Л – литье, А – азотирование.

**Схемы типичных структур
некоторых металлических материалов**

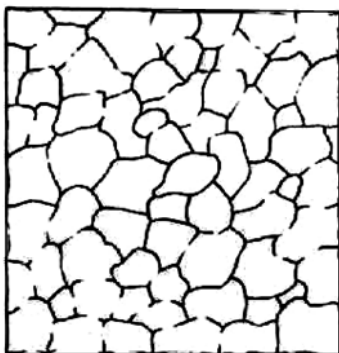


Рис. П2.1. Феррит текстурованный

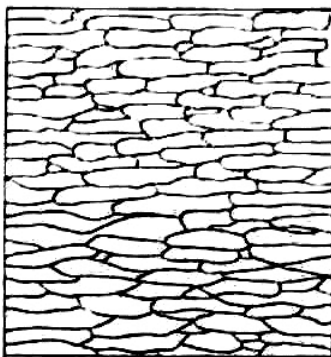


Рис. П2.2. Феррит рекристаллизованный

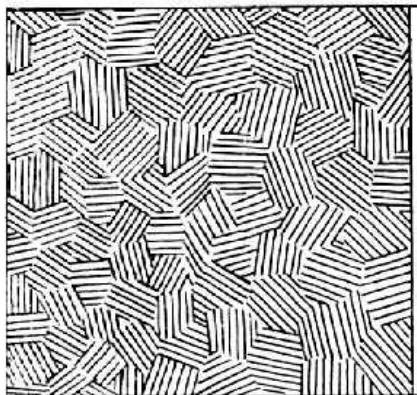


Рис. П2.3. Перлит пластинчатый

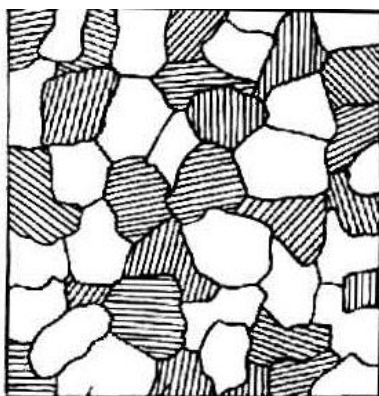


Рис. П2.4. Феррит + перлит

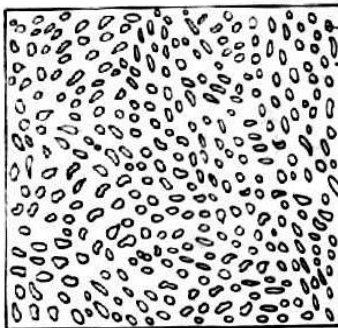


Рис. П2.5. Перлит зернистый

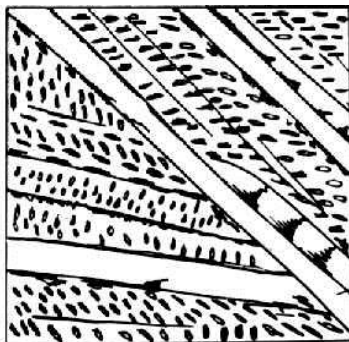


Рис. П2.6. Цементит + ледебурит

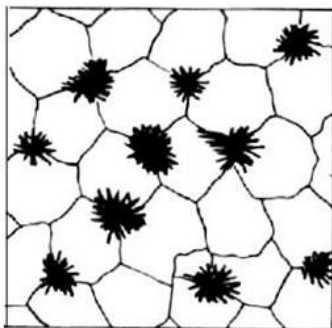


Рис. П2.7. Феррит + хлопьевидный графит

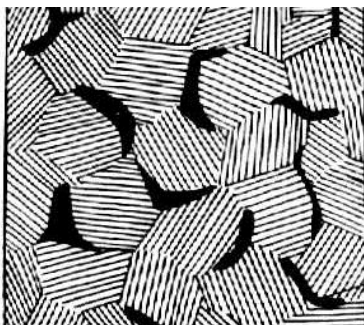


Рис. П2.8. Перлит + пластинчатый графит

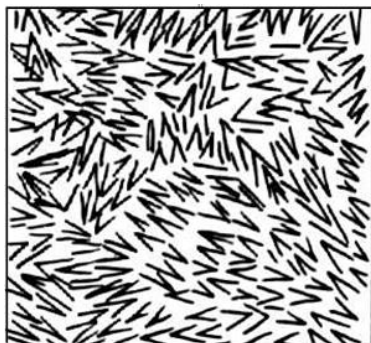


Рис. П2.9. Мартенсит (иглы) + аустенит остаточный

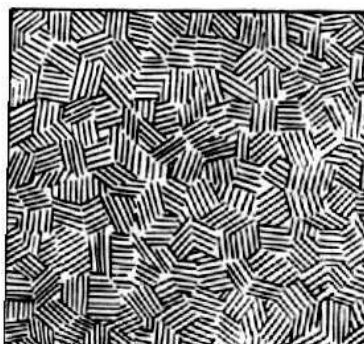


Рис. П2.10. Троостит закалки

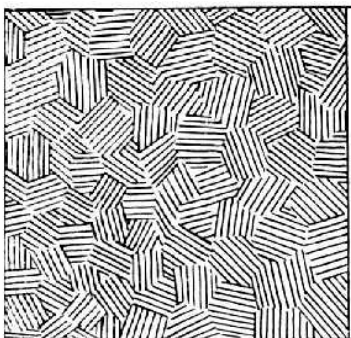


Рис. П2.11. Сорбит закалки

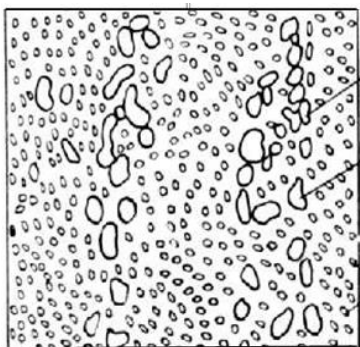


Рис. П2.12. Перлит зернистый +
K₁ + K_{II} (карбидная ликвация).
Сталь X12Ф1

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Лабораторная работа № 1. Макроанализ металлов и сплавов.....	4
2. Лабораторная работа № 2. Микроанализ металлов и сплавов.....	19
3. Лабораторная работа № 3. Определение твердости металлов.....	35
4. Лабораторная работа № 4. Диаграмма состояния сплавов системы железо – углерод.....	60
5. Лабораторная работа № 5. Структура и свойства углеродистых сталей в равновесном состоянии.....	75
6. Лабораторная работа № 6. Структура и свойства чугунов.....	86
7. Лабораторная работа № 7. Термическая обработка сталей.....	99
8. Лабораторная работа № 8. Структура сталей в неравновесном состоянии.....	113
9. Лабораторная работа № 9. Легированные конструкционные стали и методы их упрочнения.....	121
10. Лабораторная работа № 10. Инструментальные стали.....	139
11. Лабораторная работа № 11. Термическая обработка алюминиевых сплавов.....	151
12. Лабораторная работа № 12. Физико-механические свойства пластических масс.....	163
13. Практическая работа № 13. Обоснование и выбор материалов для изготовления деталей машин пищевого и холодильного машиностроения.....	182
Список литературы.....	233
14. Приложение.....	235

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском отделе
Кемеровского технологического института пищевой промышленности
650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Троицкий Борис Сергеевич
Майтаков Анатолий Леонидович

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум

Для студентов вузов

Редактор *А.В. Проскурина*
Технический редактор *Е.В. Кадочникова*
Художественный редактор *Н.Н. Турова*

ЛР № 020524 от 02.06.97
Подписано в печать 10.10.2012. Формат 60×84^{1/16}
Бумага типографская. Гарнитура Times
Уч.-изд. л. 15,75. Тираж 1000 экз.
Заказ № 85

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском отделе
Кемеровского технологического института пищевой промышленности
650056, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

ПЛД № 44-09 от 10.10.99
Отпечатано в лаборатории множительной техники
Кемеровского технологического института пищевой промышленности
650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 7