



СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY

Е. А. Астафьева, Ф. М. Носков, С. И. Почекутов  
ТЕХНОЛОГИИ  
МАТЕРИАЛОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

УДК 621.7/.9  
ББК 34.5  
А910

**Р е ц е н з е н т ы:**

*В. А. Меновщиков*, доктор технических наук, профессор Красноярского государственного аграрного университета;

*А. С. Тюриков*, кандидат технических наук, доцент Красноярского института железнодорожного транспорта

**Астафьева, Е. А.**

А910 Технологии материалов : учеб. пособие / Е. А. Астафьева, Ф. М. Носков, С. И. Почкутов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2019. – 224 с.

ISBN 978-5-7638-4125-1

Рассмотрены строение и свойства металлов и металлических сплавов, основные виды промышленных сплавов, способы их получения и очистки. Представлены способы получения заготовок литьем и обработкой давлением, способы изготовления сварных соединений, а также механические, электрофизические и электрохимические способы обработки. Приведены краткие теоретические сведения об этих видах обработки и их материаловедческие аспекты. Изложены технологии обработки неметаллических материалов на полимерной основе.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению бакалавриата 29.03.04 «Технологии художественной обработки материалов».

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

УДК 621.7/.9  
ББК 34.5

ISBN 978-5-7638-4125-1

© Сибирский федеральный университет, 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ</b> .....	7
1.1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ .....	7
1.2. СВЕДЕНИЯ О СПЛАВАХ .....	8
1.3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ .....	10
1.4. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ .....	13
1.4.1. Механические свойства материалов .....	14
1.5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ .....	19
1.5.1. Сплавы на основе железа .....	19
1.5.2. Инструментальные материалы .....	31
1.5.3. Алюминиевые сплавы .....	33
1.5.4. Медные сплавы .....	35
<b>2. МЕТАЛЛУРГИЯ СТАЛИ</b> .....	36
2.1. СПОСОБЫ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ .....	36
2.1.1. Производство стали в кислородных конверторах .....	37
2.1.2. Производство стали в электродуговых печах .....	40
2.2. МЕТОДЫ РАЗЛИВКИ СТАЛИ .....	43
2.2.1. Разливка стали в изложницы .....	44
2.2.2. Непрерывная разливка стали .....	46
2.3. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАЛИ .....	48
2.3.1. Обработка стали синтетическим шлаком .....	48
2.3.2. Вакуумирование стали .....	49
2.3.3. Продувка стали инертным газом .....	51
2.3.4. Переплавные процессы .....	51
<b>3. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО</b> .....	55
3.1. СУЩНОСТЬ И ЗНАЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ .....	55
3.2. ТРЕБОВАНИЯ К ЛИТЕЙНЫМ СПЛАВАМ И ИХ СВОЙСТВА .....	56
3.3. ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ФОРМЫ .....	57
3.3.1. Формовочные и стержневые смеси .....	58
3.3.2. Изготовление песчано-глинистых форм .....	59
3.3.3. Ручная и машинная формовки .....	64
3.4. ПЛАВКА ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ. СБОРКА И ЗАЛИВКА ФОРМ .....	69
3.5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТЬЯ .....	71
3.5.1. Литье в оболочковые формы .....	71
3.5.2. Литье по выплавляемым моделям .....	73
3.5.3. Литье в кокиль .....	75

3.5.4. Литье под давлением .....	78
3.5.5. Центробежное литье .....	82
3.6. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ДЕФЕКТОВ ОТЛИВОК И КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ОТЛИВОК .....	84
<b>4. ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ .....</b>	<b>87</b>
4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	87
4.2. ПОЛУЧЕНИЕ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛА, ТРУБ И ПРОФИЛЕЙ ОБЩЕГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ .....	91
4.2.1. Прокатка .....	91
4.2.2. Прессование и волочение .....	96
4.3. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН .....	97
4.3.1. Ковка .....	97
4.3.2. Объемная штамповка .....	99
4.3.3. Листовая штамповка .....	103
<b>5. ОСНОВЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....</b>	<b>110</b>
5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	110
5.2. ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА .....	111
5.2.1. Особенности электродуговой сварки .....	111
5.2.2. Ручная дуговая сварка .....	113
5.2.3. Автоматическая сварка под слоем флюса .....	115
5.2.4. Дуговая сварка в атмосфере защитных газов .....	116
5.2.5. Сварка плазменной дугой .....	118
5.3. ГАЗОВАЯ СВАРКА .....	120
5.3.1. Основные сведения о процессе .....	120
5.3.2. Оборудование для газовой сварки .....	122
5.3.3. Газокислородная резка металлов .....	124
5.4. ЛУЧЕВЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ .....	126
5.5. МЕТОДЫ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ .....	130
5.5.1. Электродуговая сварка. Сущность и разновидности процесса .....	130
5.5.2. Диффузионная сварка .....	138
5.5.3. Сварка трением .....	140
5.6. СТРОЕНИЕ И ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ .....	142
5.6.1. Структура сварного шва, полученного при электродуговой сварке .....	142
5.6.2. Дефекты сварных швов и причины их возникновения .....	145
5.6.3. Контроль качества сварных соединений .....	149
<b>6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ МАШИН ...</b>	<b>151</b>
6.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....	151
6.2. ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ .....	152
6.2.1. Режим резания .....	154
6.2.2. Геометрия инструмента и ее влияние на процесс резания и качество обработки .....	156

6.2.3. Физические основы процесса резания металлов. Стружкообразование...	159
6.2.4. Сила резания и ее составляющие .....	161
6.2.5. Явление нароста. Износ и стойкость режущего инструмента. Смазывающе-охлаждающие технологические среды .....	163
<b>6.3. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ТОЧЕНИЕМ .....</b>	<b>166</b>
6.3.1. Характеристика метода .....	167
6.3.2. Инструмент для точения.....	168
6.3.3. Рабочие приспособления для токарной обработки .....	170
6.3.4. Станки токарной группы. Устройство универсального токарно-винторезного станка .....	171
<b>6.4. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА СВЕРЛИЛЬНЫХ СТАНКАХ.....</b>	<b>174</b>
6.4.1. Характеристика метода .....	174
6.4.2. Виды, элементы и геометрия осевого инструмента .....	176
6.4.3. Станки сверлильной группы .....	178
<b>6.5. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК НА ПРОТЯЖНЫХ СТАНКАХ.....</b>	<b>179</b>
6.5.1. Характеристика метода .....	179
6.5.2. Элементы, геометрия инструмента .....	180
6.5.3. Протяжные станки .....	182
<b>6.6. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ФРЕЗЕРОВАНИЕМ .....</b>	<b>183</b>
6.6.1. Характеристика метода .....	183
6.6.2. Виды фрез, их элементы и геометрия .....	184
6.6.3. Станки фрезерной группы .....	186
<b>6.7. СТРОГАНИЕ И ДОЛБЛЕНИЕ .....</b>	<b>187</b>
6.7.1. Характеристика методов строгания и долбления .....	187
6.7.2. Строгальные и долбежные станки.....	188
<b>6.8. ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ НА СТАНКАХ .....</b>	<b>190</b>
6.8.1. Характеристика методов шлифования.....	190
6.8.2. Особенности процесса резания при шлифовании.....	192
6.8.3. Состав абразивного инструмента .....	193
6.8.4. Станки шлифовальной группы .....	194
6.8.5. Отделочная обработка.....	195
<b>6.9. ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК.....</b>	<b>200</b>
6.9.1. Электрофизические методы обработки .....	201
6.9.2. Электрохимическая обработка.....	205
<b>7. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ОБРАБОТКИ.....</b>	<b>209</b>
7.1. СОСТАВ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛАСТМАСС .....	209
7.1.1. Полимеры.....	209
7.1.2. Пластмассы.....	211
7.1.3. Методы получения изделий из пластмасс.....	212
7.2. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ .....	217
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....</b>	<b>222</b>

## ВВЕДЕНИЕ

---

Дисциплина «Технологии материалов» содержит материал о традиционных и новых технологиях обработки материалов в металлургической, машиностроительной, химической промышленности и др.

Анализируя последовательность этапов выбора материала и технологии получения деталей, конструкций и инструмента из него, можно представить возможности изделий при эксплуатации.

Эти сведения необходимы при проектировании и создании художественных изделий из металлических, полимерных и других материалов, а для этого нужно знать диапазон технологических процессов обработки.

В пособии приведены сведения об основах атомно-кристаллического строения металлов и сплавов, их свойствах, классификации и области применения, чтобы студенты ориентировались в номенклатуре материалов.

Описаны способы производства стали, уделено внимание сущности процессов ее выплавки, разливки и рафинирования.

Далее изложены основы *технологий получения заготовок* деталей машин и конструкций, к которым относятся:

- различные виды литья: специальные и в песчано-глинистые формы со сведениями об их возможностях и недостатках;
- виды обработки металлов давлением, сущность процессов горячего и холодного деформирования металлов, методы получения листов, профилей, труб и заготовок деталей машин;
- основы сварки металлов электродуговой, контактной, газовой и лучевые способы сварки, а также резки металлов.

Рассмотрены *способы обработки заготовок* деталей машин:

- процессы, происходящие при различных методах обработки резанием, применяемый инструмент, краткие сведения о конструкции станков;
- электрофизические, электрохимические и электромеханические методы обработки заготовок, позволяющие даже трудно обрабатываемым материалам предавать сложную конфигурацию и высокую чистоту поверхности.

Приведены также способы получения изделий из полимерных и некоторых видов композиционных неметаллических материалов.

Основная цель изучения дисциплины «Технологии материалов» – сформировать у студентов знания о структуре технологических процессов производства и свойствах выпускаемых изделий.



# 1. СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

## 1.1. КРИСТАЛЛИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

В твердом состоянии металлы имеют кристаллическое строение. Атомы в металле располагаются закономерно, образуя правильную кристаллическую решетку (рис. 1.1), что соответствует минимальной энергии взаимодействия атомов.

Кристаллическая решетка состоит из воображаемых линий и плоскостей, проходящих через точки расположения атомов в пространстве.

Наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла в любом объеме, получил название *элементарной кристаллической ячейки* (рис. 1.1). Расстояния (ребра)  $a$ ,  $b$ ,  $c$  между центрами ближайших атомов в элементарной ячейке называются *периодами решетки*. Период решетки выражается в нанометрах ( $1 \text{ нм} = 10^{-8} \text{ мм}$ ).

Для однозначной характеристики ячейки необходимо знать и три угла  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  между осями (рис. 1.1,  $a$ ).

Большинство металлов образует одну из следующих высоко-симметричных решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемно-центрированную, кубическую гранецентрированную и гексагональную плотноупакованную (рис. 1.1).

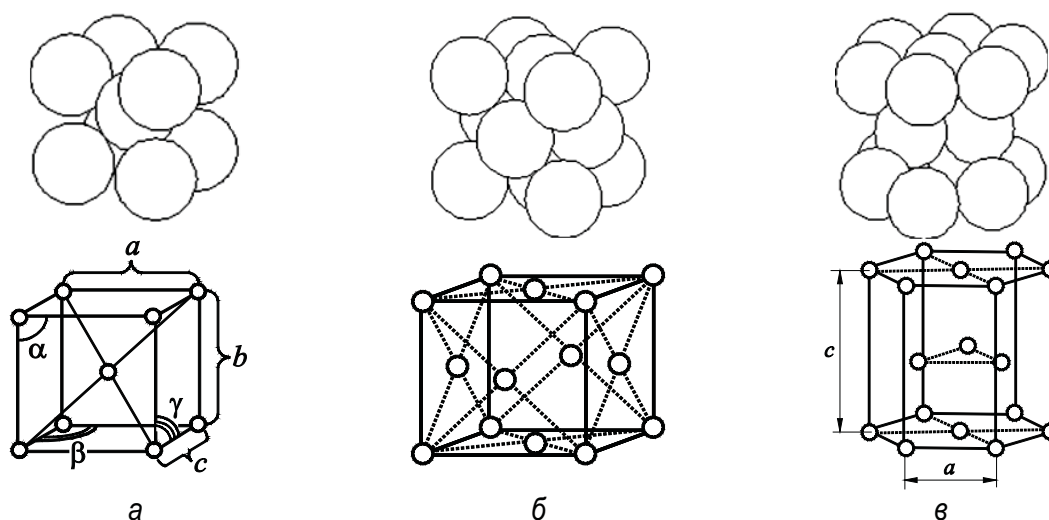


Рис. 1.1. Кристаллические решетки металлов:  $a$  – объемно-центрированная кубическая (ОЦК);  $b$  – гранецентрированная кубическая (ГЦК);  $c$  – гексагональная плотноупакованная (ГПУ)

Некоторые металлы могут изменять свою структуру (форму кристаллической решетки) и свойства под действием определенных факторов, это называется *полиморфизмом* или *аллотропией*.

## 1.2. СВЕДЕНИЯ О СПЛАВАХ

Наиболее распространенными материалами в технике являются металлические сплавы. *Металлический сплав* образуется в результате взаимодействия двух или нескольких химических элементов (компонентов). Он обладает металлическими свойствами, отличающимися от свойств исходных компонентов.

Сплавы можно получить методом сплавления, порошковой металлургией, электролизом, осаждением из газовой среды различных металлов и неметаллов.

В связи с изучением сплавов необходимо дать определение некоторым металлографическим понятиям.

*Фаза* – это однородная часть системы (сплава), имеющая одинаковый состав, строение, агрегатное состояние, отделенная от остальных частей системы поверхностью раздела.

*Системой* называется совокупность фаз в сплаве, находящихся в состоянии стабильного или метастабильного равновесия.

Система может быть однофазной (однородной), подобно воде (жидкости), и неоднородной, состоящей из двух или трех фаз, например вода, лед (жидкость + твердое тело) или пар – вода – лед (жидкость + + твердое тело + газ).

Система может быть простой или сложной. Простая система состоит из одного компонента. Сложная система включает в себя два или более компонента. Например, система Pb–Sb является двойной, а система Al–Cu–Mn – тройной и т. д.

*Структурная составляющая* – это однородная составляющая системы, состоящая из одной или нескольких фаз, имеющая характерное регулярное строение, форму и одинаковый средний химический состав.

Выделение из кристаллов твердой фазы других твердых фаз по мере охлаждения сплава называется *вторичной кристаллизацией*.

В сплаве в твердом состоянии могут образовываться кристаллические фазы двух видов: твердые растворы и промежуточные фазы.

*Твердые растворы* – это кристаллы, образовавшиеся при распределении атомов одного компонента в кристаллической решетке другого.



Один компонент (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, другой (растворяемый) отдает свои атомы в решетку растворителя. Вокруг атома растворенного элемента возникают местные искажения пространственной решетки, это приводит к изменению ее периода и свойств.

Твердые растворы обозначают буквами греческого алфавита  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

Различают твердые растворы замещения и внедрения (рис. 1.2, *а*, *б*). Образование твердых растворов *замещения* сопровождается заменой атомов растворителя в его кристаллической решетке на атомы растворенного компонента. Это происходит, если размеры атомов обоих компонентов различаются незначительно.

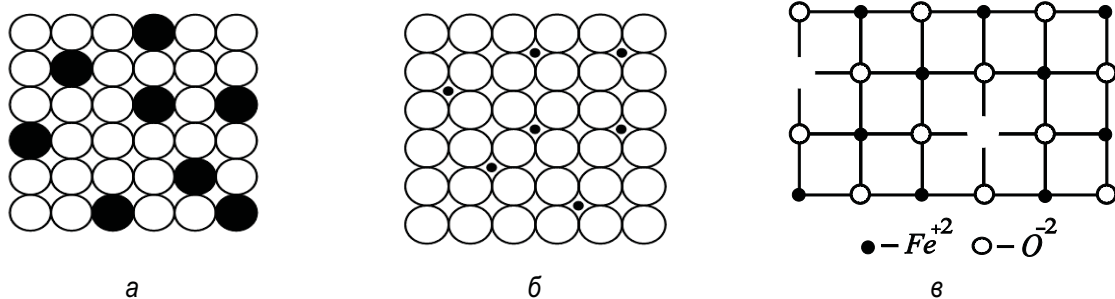


Рис. 1.2. Схемы кристаллического строения твердых фаз сплавов:  
*а* – твердого раствора замещения; *б* – твердого раствора внедрения;  
*в* – промежуточной фазы переменного состава, FeO

Твердые растворы *внедрения* образуются при размещении атомов растворенного компонента в межузельном пространстве кристаллической решетки растворителя между атомами основного металла.

Размеры атомов растворенного компонента (азота, водорода, углерода) значительно меньше атомов растворителя (металла).

Состав твердого раствора может меняться. Растворимость элементов с понижением температуры часто уменьшается. Твердые растворы внедрения имеют ограниченную растворимость (рис. 1.2, *б*), а твердые растворы замещения могут быть с ограниченной и с неограниченной растворимостью (рис. 1.2, *а*).

Кристаллы, образованные различными элементами и имеющие собственный тип кристаллической решетки, отличающийся от решеток составляющих их элементов, называют *промежуточной фазой* или химическим соединением (рис. 1.2, *в*). Их свойства резко отличаются от свойств исходных компонентов.

### 1.3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Процесс перехода металлов и сплавов из жидкого состояния в твердое с образованием кристаллической структуры называется первичной кристаллизацией.

Кристаллизация начинается с образования кристаллических зародышей (центров кристаллизации) и продолжается в процессе роста их числа и размеров. Вокруг образовавшихся центров начинают расти кристаллы (рис. 1.3, *а*). Каждый из растущих новых кристаллов ориентирован в пространстве произвольно (рис. 1.3, *б, в*). При уменьшении количества жидкости поверхности растущих кристаллов соприкасаются друг с другом, их правильная внешняя форма нарушается и получается произвольной (рис. 1.3, *г*). Кристаллы с неправильной внешней формой называются *зернами* или *кристаллитами* (рис. 1.3, *г*). Твердые тела, в том числе и металлы, состоящие из большого количества зерен, называют *поликристаллическими*.

Чем больше центров кристаллизации, тем больше образуется кристаллов в данном объеме и тем мельче результирующий размер кристаллов.

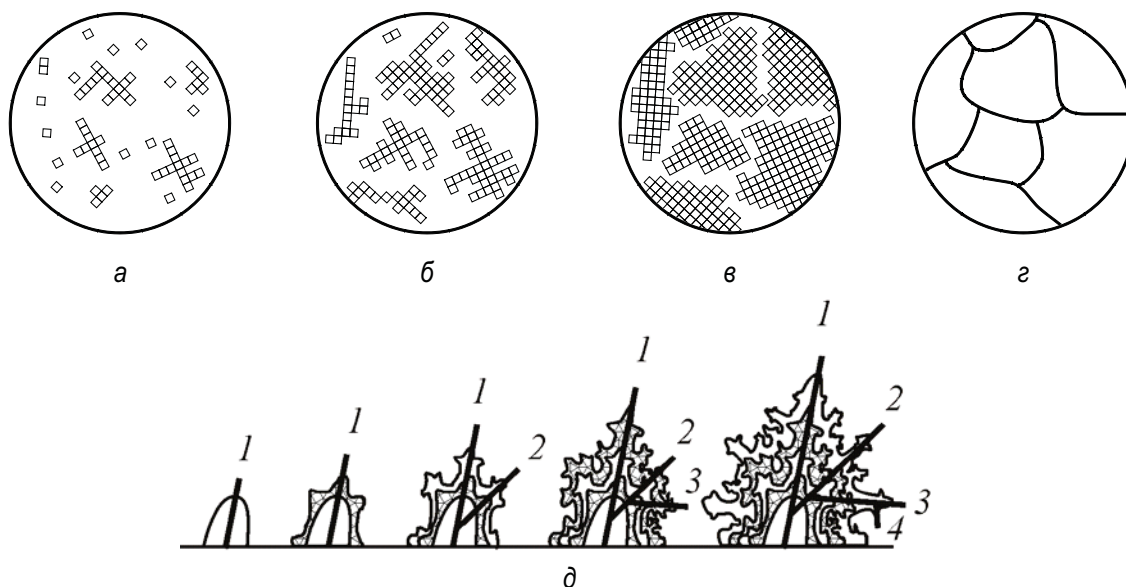


Рис. 1.3. Схемы процесса кристаллизации металла: *а* – образование центров кристаллизации; *б, в* – рост кристаллов вокруг этих центров; *г* – образование зернистого строения; *д* – последовательность образования дендрита: 1, 2, 3, 4 – оси кристаллизации

В технических металлах в качестве центров кристаллизации часто выступают инородные включения (шлаковые включения, частички футеровки печи, оксиды металлов). В большинстве случаев кристаллизация

металлов происходит с большой скоростью (кристаллизация расплава при литье в металлические формы). При ускоренном охлаждении металла кристаллы не растут равномерно во все стороны. Рост зародышей по одной из осей (в направлении наибольшего градиента температур) значительно опережает рост по другим осям, это явление называется дендритной кристаллизацией.

Русский ученый металлург Д. К. Чернов, описывая рост дендрита (рис. 1.3, *д*), ввел понятие «порядок осей кристаллизации». После образования зародыша *1* его развитие идет в направлении наибольшего градиента температур (ось первого порядка). Увеличение размеров осей первого порядка идет одновременно в длину и ширину. В дальнейшем от осей первого порядка под определенными углами начинают расти новые оси, называемые осями второго и третьего порядков. По мере роста осей более высокого порядка постепенно заполняются все промежутки, ранее занятые жидким металлом. Дендритная кристаллизация замедляется. Дендритная кристаллизация отчетливо выражена в условиях недостатка жидкого металла для заполнения пространства, а также при наличии примесей и посторонних атомов в расплаве.

**Дефекты кристаллической решетки металлов.** Регулярное расположение атомов в их кристаллических решетках зерен нарушается дефектами. Дефекты кристаллографического строения подразделяются по геометрическим признакам на *точечные* (нульмерные), *линейные* (одномерные), *поверхностные* (двумерные) и *объемные*.

**Точечные дефекты.** Эти дефекты малы во всех трех направлениях, и размеры их не превышают нескольких атомных диаметров. К точечным дефектам относятся вакансии, дислоцированные атомы и атомы примесей.

**Вакансии** – это отсутствие атомов в узлах кристаллической решетки, «дырки», которые образовались в силу различных причин (рис. 1.4, *а*).

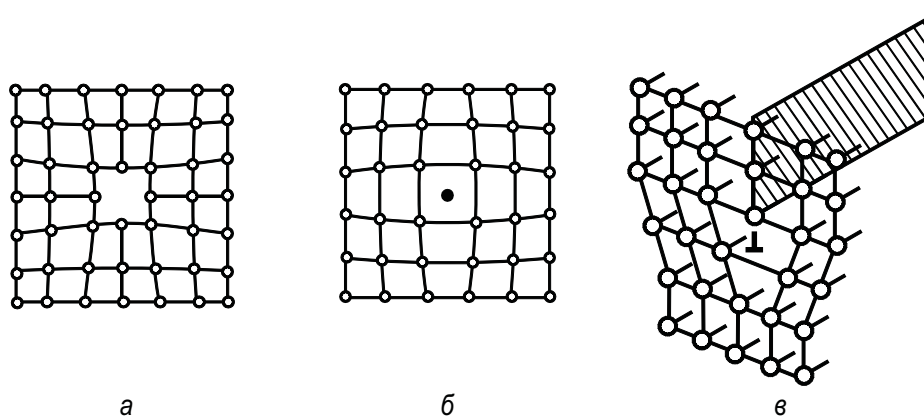


Рис. 1.4. Точечные и линейные несовершенства: *а* – вакансии; *б* – дислоцированный атом; *в* – схема краевой дислокации

*Дислоцированные атомы*, – это атомы, занявшие место где-то в междоузлии (рис. 1.4, б). Поскольку практически невозможно выплавить металл химически чистым, в любом объеме металла всегда присутствует какое-то количество чужеродных атомов примесей.

**Линейные дефекты.** Имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении. Важнейшие виды линейных несовершенств – краевые и винтовые *дислокации*. Краевая дислокация в сечении представляет собой край «лишней» полуплоскости в решетке (рис. 1.4, в).

Плотность дислокаций – это суммарная длина всех линий дислокаций в единице объема. В полупроводниковых кристаллах она равна  $10^4$ – $10^5$  см<sup>-2</sup>, у отожженных металлов –  $10^6$ – $10^8$  см<sup>-2</sup>. При холодном пластическом деформировании плотность дислокаций возрастает до  $10^{11}$ – $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Попытка увеличить плотность свыше  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> быстро приводит к появлению трещин и разрушению металла.

**Поверхностные дефекты.** Поликристаллический сплав содержит огромное число зерен. В соседних зернах решетки ориентированы различно (рис. 1.5, а), и граница между зернами представляет собой переходный слой 1–5 нм. В нем нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций, повышена концентрация примесей. Границы между зернами называются *большеугловыми* (рис. 1.5, а), так как соответственные кристаллографические направления в соседних зернах образуют углы в десятки градусов.

Каждое зерно, в свою очередь, состоит из субзерен (блоков). Субзерно представляет собой часть кристалла относительно правильного строения, а его границы – стенки из дислокаций, которые разделяют зерно на отдельные субзерна (рис. 1.5, б).

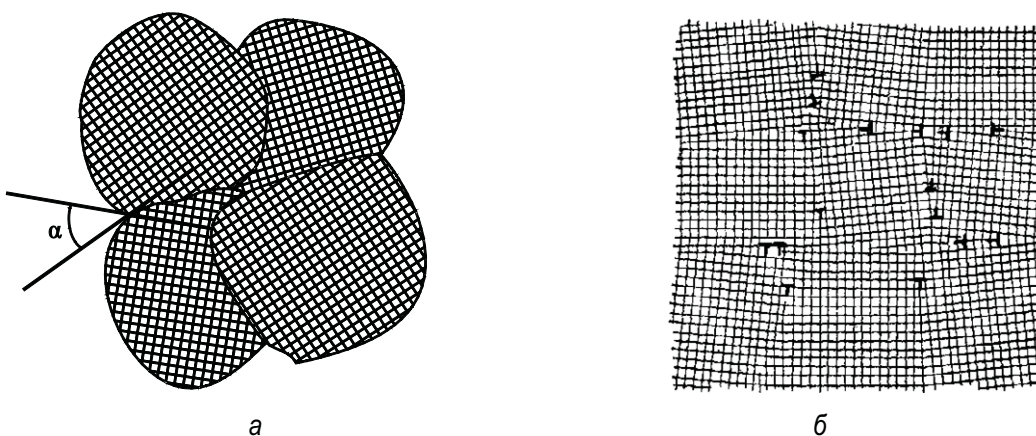


Рис. 1.5. Схема строения поликристалла: а – большеугловые границы между зернами; б – схема блочной (мозаичной) структуры зерен

Угол взаимной разориентации между соседними субзернами невелик. Там возникают малоугловые границы, на которых также скапливаются примеси. Поверхностные дефекты влияют на механические и физические свойства материалов. Особенно большое значение имеют границы зерен. Чем мельче зерно, тем выше предел текучести, вязкость и меньше опасность хрупкого разрушения. Вдоль границ зерен и субзерен быстро протекает диффузия, во много раз быстрее, чем сквозь кристалл, особенно при нагреве.

Взаимодействие между дефектами, перемещение их в кристаллах, изменение концентрации дефектов – все это отражается на свойствах и имеет большое практическое значение.

## 1.4. СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

*Свойства* – это количественная или качественная характеристика материала, определяющая его общность или различие с другими материалами.

Выделяют три основные группы свойств: эксплуатационные, технологические и стоимостные, которые лежат в основе выбора материала, определяют техническую и экономическую целесообразность его применения. Первостепенное значение имеют эксплуатационные свойства.

*Эксплуатационными* называют свойства материала, которые определяют работоспособность деталей машин, приборов или инструментов, их силовые, скоростные, стойкостные и другие технико-эксплуатационные показатели.

Работоспособность большинства деталей машин и изделий обеспечивает уровень *механических* свойств, которые характеризуют поведение материала под действием внешней нагрузки. Так как условия нагружения деталей машин чрезвычайно разнообразны, то механические свойства включают большую группу показателей.

Работоспособность отдельной группы деталей машин зависит не только от механических свойств, но и от сопротивления воздействию химически активной рабочей среды. Если такое воздействие значительно, то определяющими становятся *физико-химические свойства* материала – жаростойкость и коррозионная стойкость.

При обработке материалов и эксплуатации изделий из них большое значение имеют *физические свойства*, к которым относятся температура плавления, плотность, электросопротивление, теплопроводность и т. д.

Среди *технологических свойств* главное место занимает технологичность материала – его пригодность для изготовления деталей машин, приборов и инструментов требуемого качества при минимальных трудовых затратах. Она оценивается обрабатываемостью резанием или давлением, свариваемостью, способностью к литью, склонностью к деформации и короблению при термической обработке.

*Литейные свойства* определяются жидкотекучестью, усадкой и склонностью к ликвации.

*Деформируемость* – это способность принимать необходимую форму под влиянием внешней нагрузки без разрушения и при наименьшем сопротивлении нагрузке, она определяет способность металла к обработке давлением.

*Свариваемость* – это способность металлов и сплавов образовывать неразъемные соединения требуемого качества.

Технологичность материала имеет важное значение, так как от нее зависят производительность и качество изготовления деталей.

### 1.4.1. Механические свойства материалов

Механические свойства материалов определяют их поведение под воздействием приложенных внешних нагрузок. К механическим свойствам относятся:

*прочность* – свойство материала в определенных условиях и пределах, не разрушаясь, воспринимать те или иные воздействия;

*упругость* – свойство материала восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки;

*пластичность* – способность металла или сплава, не разрушаясь, изменять форму под действием нагрузки и сохранять эту форму после ее снятия;

*твердость* – сопротивление твердого тела местной пластической деформации (внедрению в него другого более твердого тела);

*хрупкость* – свойство материала разрушаться после незначительной (или без) пластической деформации;

*вязкость* – способность материала поглощать механическую энергию внешних сил за счет пластической деформации;

*изнашиваемость* – свойство материала подвергаться поверхностному разрушению или повреждению под воздействием внешнего трения;

*выносливость* – свойство материала выдерживать, не разрушаясь, большое число повторно-переменных напряжений;



*усталость* – изменение механических и физических свойств материала в результате многократных нагрузок, приводящее к его прогрессирующему разрушению;

*ползучесть* – медленное непрерывное пластическое деформирование материала под действием постоянной нагрузки или механического напряжения.

Количественные (числовые) характеристики прочностных параметров определяются стандартными испытаниями, среди которых различают: статические: на растяжение, сжатие, изгиб, кручение; динамические: на ударную вязкость, на усталость при циклических нагрузках.

К механическим свойствам, определяемым при статических нагрузках, относятся *прочность, пластичность, твердость*.

Динамические нагрузки изменяются во времени с большими скоростями, например при ударном нагружении. Материалы испытываются на ударную вязкость.

Под действием внешних нагрузок и структурно-фазовых превращений в материале конструкции возникают внутренние силы – *напряжения*. Внешние нагрузки, действующие на элементы конструкций и детали машин, распределены по площади или объему.

Разработаны различные методы испытаний, с помощью которых определяются механические свойства металлов при динамических и циклических нагрузках. В необходимых случаях производят испытания на выносливость (усталость), ползучесть и износ, которые дают более полное представление о свойствах материалов.

***Механические свойства, определяемые при статических нагрузках.*** Для определения прочностных, упругих и пластических свойств металлов проводятся *испытания на растяжение*.

Прочность определяют с помощью специальных образцов, изготовленных из исследуемого материала.

При статических испытаниях на растяжение (ГОСТ 1497–84) образец находится в равновесии под действием растягивающих сил, вызывающих в материале напряжение.

Для статических испытаний изготавливают обычно круглые образцы испытываемого металла (рис. 1.6, *a*) или плоские для листовых материалов. Образцы состоят из рабочей части и головок, предназначенных для закрепления их в захватах разрывной машины. Размеры образцов стандартизованы. Для круглых образцов отношение расчетной начальной длины  $l_0$  к начальному диаметру  $d_0$  называется кратностью образца. На практике применяются образцы с кратностью 2,5; 5; 10.

Большинство современных машин автоматически записывает диаграмму растяжения и демонстрирует ее на мониторе компьютера.

Растягивающее усилие создает напряжение в испытуемом образце и вызывает его удлинение; когда напряжение превзойдет прочность образца, он разрывается.

На рис. 1.6, б приведена диаграмма растяжения низкоуглеродистой стали. По оси ординат откладывается усилие  $P$ , МН, по оси абсцисс – деформация (абсолютное удлинение) образца  $\Delta l$ , мм. Эта диаграмма получается при медленном увеличении растягивающего усилия вплоть до разрыва испытуемого образца.

Напряжение  $\sigma$ , МПа, определяется как отношение усилия  $P$  к площади поперечного сечения образца  $F_0$ , мм<sup>2</sup>:

$$\sigma = P / F_0.$$

На диаграмме можно отметить несколько характерных точек. Участок  $OA$  является отрезком прямой и показывает, что до точки  $A$  удлинение образца пропорционально нагрузке: каждому приращению нагрузки соответствует и одинаковое приращение деформации. Такая зависимость между удлинением образца и приложенной нагрузкой  $P_A$  соответствует пределу пропорциональности  $P_{\text{пц}}$ .

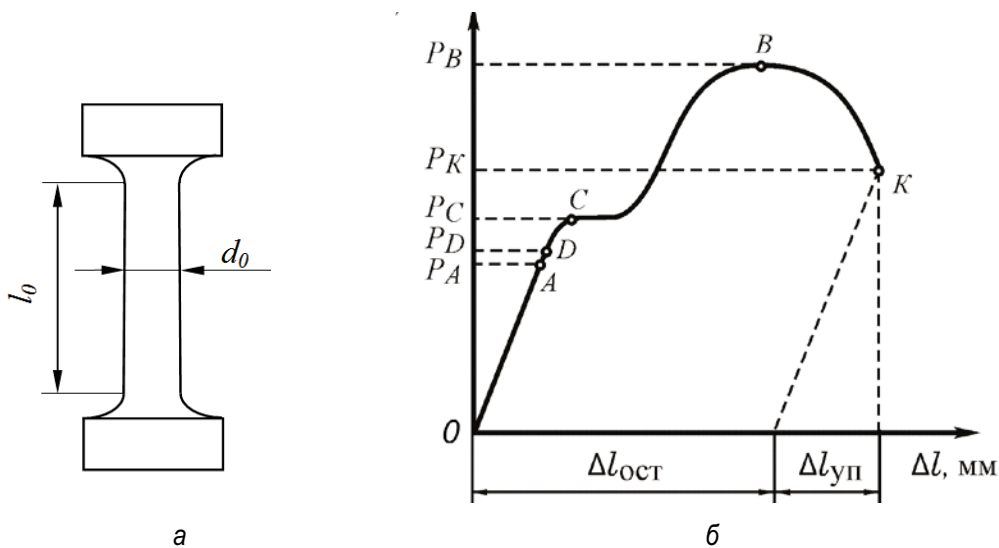


Рис. 1.6. Образец для испытаний (а) и диаграмма растяжения пластичного металла (б)

При дальнейшем нагружении образца наблюдается отклонение от закона пропорциональности: на диаграмме появляется криволинейный участок, но до точки  $D$  деформации образца упругие. Напряжение, до которого образец получает только упругую деформацию, называется *пределом упругости*  $\sigma_{\text{упр}}$ , МПа.

Точкой *C* на диаграмме отмечено начало горизонтальной площадки, которая показывает, что образец удлиняется без увеличения нагрузки: металл как бы течет. Напряжение, при котором без заметного увеличения нагрузки продолжается деформация образца, называется физическим *пределом текучести*  $\sigma_T$ , МПа.

Текучесть характерна лишь для низкоуглеродистой отожженной стали и для латуни некоторых марок. Стали с большим массовым содержанием углерода и другие металлы не имеют площадки текучести на диаграмме растяжения. Для таких металлов определяют условный предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , при котором растягиваемый образец получает остаточное удлинение, равное 0,2 % своей расчетной длины.

Точка *B* показывает наибольшую нагрузку, которую может выдержать образец. Напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца, называется *временным сопротивлением разрыву*, или *пределом прочности*  $\sigma_B$ , МПа (рис. 1.6).

При разрыве в точке *K* упругая деформация  $\Delta l_{уп}$  исчезает (она в любой точке кривой соответствует отрезку, отсекаемому на оси абсцисс нормалью этой точки и прямой, проведенной из этой точки и параллельной отрезку *OA*). Длина образца увеличилась на абсолютное остаточное удлинение  $\Delta l_{ост}$ , значение которого указано на оси абсцисс диаграммы растяжения и определяет пластичность испытуемого материала (рис. 1.6).

*Пластичность* – это способность материала получать остаточное изменение формы и размера без разрушения.

Для оценки пластичности металла важно знать относительное удлинение  $\delta$  и относительное сужение площади поперечного сечения  $\Psi$ .

Относительное удлинение, %, определяют по формуле

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l_{ост}}{l_0} \cdot 100.$$

где  $l_k$  – длина образца после разрыва (конечная), мм;  $l_0$  – первоначальная длина образца, мм (рис. 1.6).

В отличие от прочностных характеристик материала определение твердости производится быстро и не требует специальных образцов.

*Твердость* – это способность материала сопротивляться внедрению в его поверхность другого, не получающего остаточных деформаций тела.

Показатели твердости позволяют в некоторых случаях судить о других механических свойствах металлов, например о прочности, поэтому испытания на твердость широко применяют на практике. Наибольшее распространение имеют методы *Бринелля*, *Роквелла*, *Виккерса*, когда вдавливается твердый наконечник (индентор) в исследуемый образец.

*Метод Бринелля* относится к стандартным методам измерения твердости (ГОСТ 9012–59). Стальной закаленный шарик диаметром  $D$  (10; 5; 2,5; 2 или 1 мм) вдавливают в испытуемый образец силой  $P$ . В результате на поверхности образца остается отпечаток в форме лунки диаметром  $d$ . Размер отпечатка будет тем меньше, чем тверже металл. Твердость по Бринеллю, НВ, вычисляют по таблицам или по формуле

$$НВ = P / F,$$

где  $P$  – нагрузка на шарик, Н;  $F$  – площадь поверхности отпечатка, мм<sup>2</sup>.

Число твердости по Бринеллю записывают без единиц измерения.

**Механические свойства, определяемые при динамических нагрузках.** При работе деталей машин возможны динамические нагрузки, при которых многие металлы проявляют склонность к хрупкому разрушению. Опасность разрушения усиливают надрезы – концентраторы напряжений. Для оценки склонности металла к хрупкому разрушению под влиянием этих факторов проводят динамические испытания на ударный изгиб на маятниковых копрах (рис. 1.7, а). Стандартный образец, выполненный в соответствии с ГОСТ 9454–78, устанавливают на две опоры и посередине наносят удар, приводящий к разрушению образца (рис. 1.7, б).

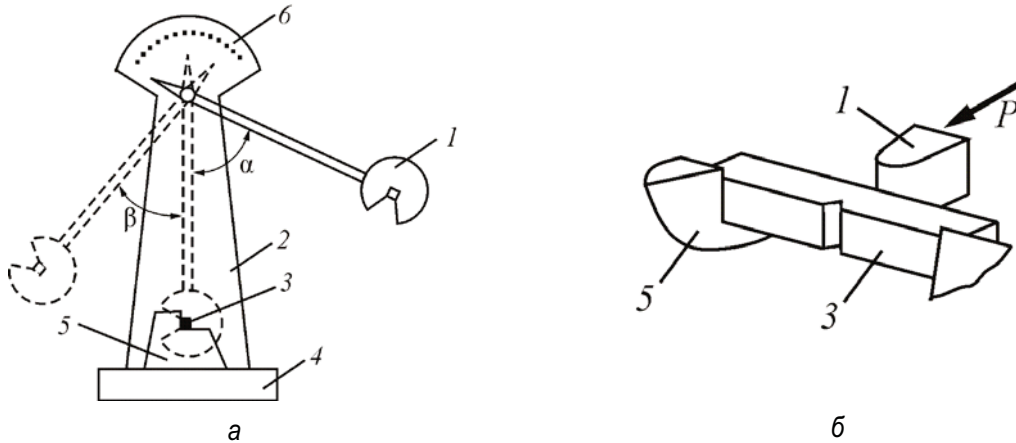


Рис. 1.7. Схема испытаний на ударную вязкость: а – маятниковый копер; б – испытание на ударный изгиб образца с V-образным надрезом: 1 – нож; 2 – стойка; 3 – образец; 4 – основание; 5 – опора образца; 6 – шкала

По шкале маятникового копра определяют работу  $K$ , затраченную на разрушение, и рассчитывают основную характеристику, получаемую в результате этих испытаний – *ударную вязкость*:

$$КС = K / S_0^1,$$

где  $S_0^1$  – площадь поперечного сечения образца в месте надреза.

Единица измерения ударной вязкости – мегаджоуль на квадратный метр (МДж/м<sup>2</sup>).

Предусмотрены испытания образцов с концентратором напряжений трех видов: *U*-образным (радиус надреза  $r = 1$  мм); *V*-образным ( $r = 0,25$  мм) и *T*-образным (трещина усталости, созданная в основании надреза). Соответственно ударную вязкость обозначают *KCU*, *KCV*, *KCT*.

Ударная вязкость из всех характеристик механических свойств наиболее чувствительна к снижению температуры. Поэтому испытания на ударную вязкость при пониженных температурах используют для определения *порога хладноломкости* – температуры или интервала температур, в котором происходит резкое снижение ударной вязкости (переход от вязкого разрушения к хрупкому). Порог хладноломкости обозначают интервалом температур либо одной температурой  $t_{50}$ , при которой *KCT* снижается наполовину.

## 1.5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ

Наиболее распространенными материалами в технике являются металлические сплавы, образующиеся в результате взаимодействия двух или нескольких химических элементов. Они обладают свойствами, отличающимися от свойств исходных компонентов.

### 1.5.1. Сплавы на основе железа

*Железо* – металл серебристо-белого цвета. Атомный номер 26, атомная масса 55,85. Технические сорта железа содержат 99,8–99,9 % Fe. Температура плавления железа 1539 °С. Известны две полиморфные модификации:  $\alpha$  и  $\gamma$ . Модификация Fe- $\alpha$  существует ниже 911 и выше 1392 °С, имеет решетку ОЦК с периодом 0,286 нм (при 20–25 °С). Для интервала температур 1392–1539 °С  $\alpha$ -железо нередко обозначают как  $\delta$ -железо.

До температуры 768 °С  $\alpha$ -железо магнитно (ферромагнитно). Критическую точку (768 °С), соответствующую магнитному превращению, т. е. переходу из ферромагнитного состояния в парамагнитное, называют точкой Кюри и обозначают  $A_2$ .

Модификация Fe- $\gamma$  существует в интервале температур от 911 до 1392 °С и имеет ГЦК-решетку, период которой при 911 °С равен 0,364 нм. ГЦК-решетка более компактна, чем ОЦК. В связи с этим при превращении  $\alpha$ -железа в  $\gamma$ -железо объем уменьшается приблизительно на 1 %.

Углерод является неметаллическим элементом II периода четвертой группы, атомный номер 6, плотность  $2,5 \text{ г/см}^3$ , атомная масса 12,011, температура плавления  $3500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Углерод полиморфен. В обычных условиях он находится в виде модификации графита, но может существовать и в виде метастабильной модификации алмаза.

Углерод растворим в железе, а также может быть в его сплавах в виде химического соединения – цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$  и в виде графита.

Диаграммой состояния называется графическое изображение, показывающее фазовый состав сплавов в зависимости от температуры и концентрации химических компонентов в условиях равновесия. На рис. 1.8 изображена диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов, имеющая большое практическое значение.

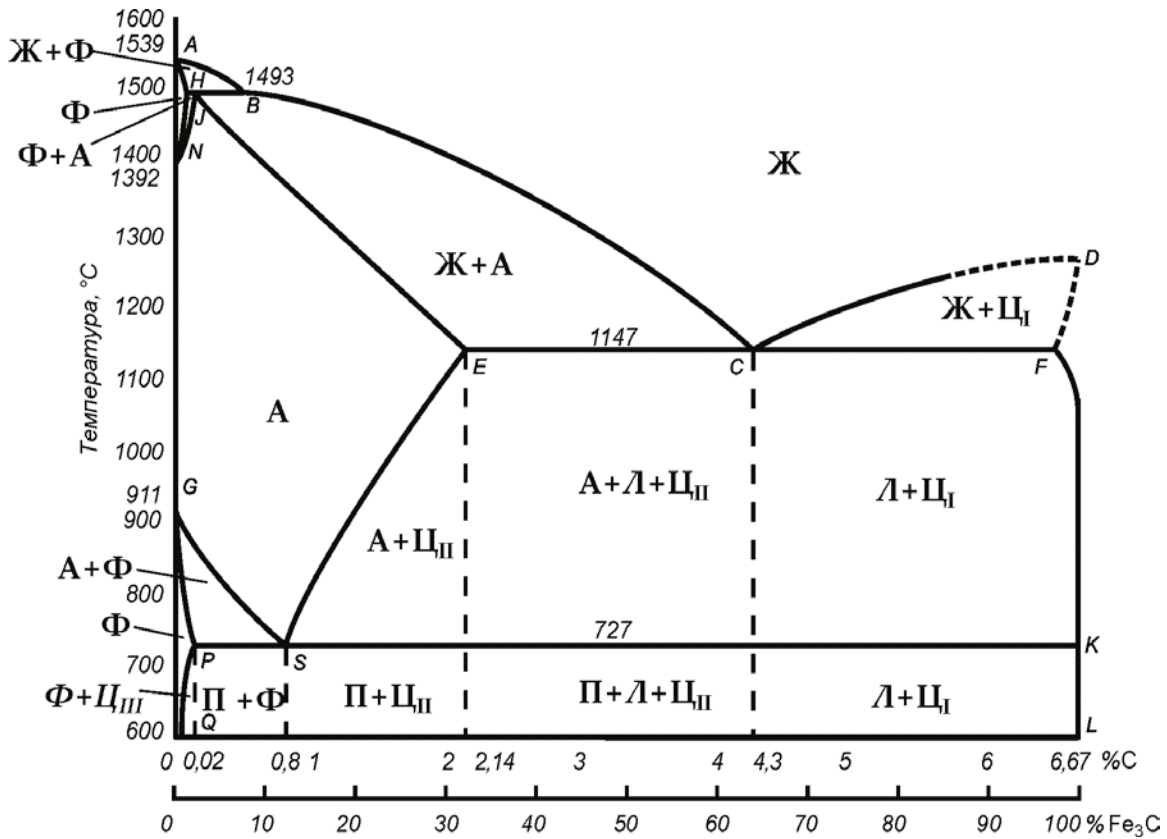


Рис. 1.8. Диаграмма состояния Fe–Fe<sub>3</sub>C

**Фазы и структурные составляющие железоуглеродистых сплавов.**

В зависимости от температуры и концентрации углерода железоуглеродистые сплавы имеют следующие составляющие.

Аустенит – твердый раствор углерода в  $\gamma$ -железе с предельной концентрацией углерода 2,14 % при температуре  $1147 \text{ }^\circ\text{C}$ ; с понижением температуры до  $727 \text{ }^\circ\text{C}$  концентрация углерода уменьшается до 0,8 %;



сплав со структурой аустенита имеет высокие пластичность и вязкость. Аустенит не магнитен.

Феррит – твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе с предельной концентрацией углерода 0,02 % при температуре 727 °С; сталь со структурой феррита ферромагнитна до температуры Кюри 770 °С имеет малую твердость и высокую пластичность.

Цементит – химическое соединение железа с углеродом  $\text{Fe}_3\text{C}$  (6,67 % С); ферромагнитен до температуры Кюри 210 °С, имеет высокие твердость и хрупкость.

Перлит – структурная составляющая, представляющая собой эвтектоидную смесь феррита и цементита, образующуюся при эвтектоидном распаде аустенита (0,8 % С). Сплав, имеющий структуру перлита, ферромагнитен, обладает повышенными прочностью и твердостью.

Ледебурит (4,3 % С) – структурная составляющая, представляющая собой эвтектическую смесь аустенита и цементита. Ниже температуры 727 °С аустенит превращается в перлит, при этом образуется смесь перлита и цементита – низкотемпературный ледебурит.

Графит – углерод в свободном состоянии, образующийся в результате распада цементита при медленном охлаждении. Графит мягок и обладает низкой прочностью.

Взаимодействие углерода с  $\alpha$ - или  $\gamma$ -модификациями железа приводит к образованию железоуглеродистых сплавов, различных по строению и свойствам. Построение диаграммы состояния «железо – цементит» дает представление о температурных и концентрационных границах существования этих сплавов.

На диаграмме состояния «железо – цементит» (рис. 1.8) линия  $ABCD$  – линия ликвидуса, выше нее сплав находится в жидком состоянии; линия  $AHJECF$  – линия солидуса, ниже нее сплав находится в твердом состоянии. При температурах, соответствующих линии солидуса, заканчивается первичная кристаллизация. В точке  $C$  при концентрации углерода 4,3 % образуется эвтектика (ледебурит). Линия  $PSK$  – линия эвтектоидного превращения, на которой заканчивается процесс вторичной кристаллизации. В точке  $S$  при концентрации углерода 0,8 % образуется эвтектоид – перлит. Линия  $PS$  – линия нижних критических точек часто обозначается  $A_1$ . Линия  $GSE$  – начало процесса вторичной кристаллизации твердого раствора. Линия  $GS$  показывает температуру начала выделения феррита из аустенита. Линия  $SE$  обозначается  $A_{cm}$  и показывает температуру начала выделения вторичного цементита и является линией, определяющей предельную растворимость углерода в аустените.

Сплавы, содержащие до 2,14 % С, называют *сталями*, более 2,14 % С – *чугунами*.