

Министерство сельского хозяйства РФ  
Мичуринский филиал  
ФГБОУ ВО Брянский ГАУ

Ивашкина Л. М.

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Учебное пособие*

Брянск, 2018

УДК 620.22 (07)  
ББК 30.34  
И 34

Ивашкина, Л. М. **Материаловедение:** учебное пособие / Л. М. Ивашкина. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. - 112 с.

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочей программой для обучающихся среднего профессионального образования, изучающих дисциплину Материаловедение, с целью оказания помощи при выполнении внеаудиторной самостоятельной работы. В учебном пособии в систематическом виде представлены конспекты лекций с планами, контрольными вопросами и заданиями.

Рецензент:

преподаватель общепрофессиональных дисциплин Мичуринского филиала Брянского ГАУ Демьянов А.В.

*Печатается по решению методического совета Мичуринского филиала Брянского ГАУ протокол № 5 от 10.04.2017 г.*

© Мичуринский филиал  
ФГБОУ ВО «Брянский  
государственный аграрный  
университет», 2018  
© Ивашкина Л.М., 2018

## Содержание

	Стр.
Введение .....	4
<b>Раздел 1. Физико-химические закономерности формирования структуры материалов</b>	7
Тема 1.1. Строение и свойства материалов .....	7
Тема 1.2. Формирование структуры литых материалов	15
Тема 1.3. Свойства металлов и методы их испытаний .....	19
Тема 1.4. Диаграммы состояния металлов и сплавов.....	25
Тема 1.5. Термическая и химико-термическая обработка металлов и сплавов.....	38
<b>Раздел 2. Материалы, применяемые в машино- и приборостроении</b>	59
Тема 2.1. Конструкционные материалы.....	59
Тема 2.2. Износостойкие материалы.....	75
Тема 2.3. Материалы с малой плотностью .....	79
Тема 2.4. Материалы с высокой удельной прочностью .....	84
Тема 2.5. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды.....	86
Тема 2.6. Неметаллические материалы.....	89
<b>Раздел 3. Инструментальные материалы</b>	95
Тема 3.1. Стали для режущих и измерительных инструментов...	95
Тема 3.2. Твердые сплавы.....	100
<b>Раздел 4. Порошковые и композиционные материалы</b> Тема	103
4.1. Порошковые материалы.....	103
Тема 4.2. Композиционные материалы.....	105
Темы рефератов для самостоятельной внеаудиторной работы обучающихся.....	109
Вопросы к промежуточной аттестации (экзамену).....	109
Список использованной литературы.....	111
Интернет - ресурсы.....	111

# ВВЕДЕНИЕ

План

1. Материаловедение и связь ее с другими дисциплинами
2. Значение материаловедения в решении важнейших технических проблем

## • 1

Для изготовления деталей машин, приборов, элементов конструкций оборудования требуются металлические материалы с различными свойствами: твердые и мягкие, способные работать при повышенных или отрицательных температурах, обладающие сопротивлением окислению в агрессивных средах, магнитные, немагнитные и др. Правильный выбор металла или сплава для практических целей основывается на знании свойств этих материалов. Свойства же в свою очередь зависят от природы металлов и сплавов и их внутреннего строения. Познание строения и свойств металлических материалов и связи между ними дает материаловедение.

Материаловедение - прикладная наука о связи состава, строения и свойств материалов. Как наука материаловедение насчитывает около 200 лет, несмотря на то, что человек начал активно использовать металлические и неметаллические материалы еще за несколько тысячелетий до нашей эры. Теоретической основой материаловедения являются соответствующие разделы физики и химии, однако, наука о материалах в основном развивается экспериментальным путем.

Изучение физических, механических, технологических и эксплуатационных свойств материалов позволяет определить области их рационального использования с учетом различных экономических требований.

Совокупность свойств, которыми должен обладать тот или иной материал, обобщает понятие «качество» – степень соответствия присущих характеристик требованиям. Материаловедение среди различных видов обеспечения качества промышленных материалов (информационного, материально-технического, организационного, метрологического и т. п.) играет роль научной основы.

Большой вклад в развитие науки о материалах внесли отечественные ученые. В России первым, кто начал научно осмысливать проблемы материаловедения и внедрять результаты в практику, был М.В. Ломоносов (1711–1765 гг.). П.П. Аносов (1799–1851 гг.) применил микроскоп и впервые установил связь между строением стали и ее свойствами. Горный инженер-металлург Обухов П.М. (1820–1869 гг.) и видный предприниматель Н.И. Путилов (1820–1880 гг.) в середине XIX в. на организованных ими в Санкт-Петербурге предприятиях наладили производство высококачественной стали, покончив с зависимостью в этом вопросе от Англии. А.С. Лавров и Н.В. Калакуцкий открыли в 1868 г. явление ликвации в сталях. Великий русский ученый Д.К. Чернов (1839–1921 гг.) открыл полиморфизм стали, развил теорию термической обработки и признан основоположником научного металловедения. Существенное значение в развитие физико-химических исследований и классификацию сложных фаз в металлических сплавах внесли работы Н.С. Курнакова (1860–1941 гг.) и его учеников. Значительный вклад в развитие металловедения и производства высококачественных сталей сделали С.С. Штейнберг, Н.А. Минкевич, С.Т. Конобеевский, А.А. Байков, И.А. Одинг, С.И. Губкин, М.А. Павлов, И.П. Бардин, Г.В. Курдюмов, В.Д. Садовский, А.А. Бочвар и многие др. советские ученые.

Над технологией получения алюминия во второй половине XIX в. работал физико-химик Н.Н. Бекетов (1827–1911 гг.). Мировое признание в области создания легких высокопрочных сплавов для авиации и ракетной техники получил И.Н. Фридляндер (р. в 1913 г.). А.М. Бутлеров (1828–1886 гг.) создал теорию химического строения органических соединений, послужившую научной основой для получения синтетических полимерных материалов. Величайший вклад в создание периодической системы элементов, а, следовательно, и в научное материаловедение внес Д.И. Менделеев (1834–1907 гг.). На основе работ С.В. Лебедева (1874–1934 гг.) впервые в мире было организовано промышленное производство синтетического каучука. Выдающиеся советские химики Н.Н. Семенов (1896–1986 гг.) и А.Н. Несмеянов (1899–1980 гг.) заложили научные основы создания многих полимерных материалов.

Среди известнейших зарубежных ученых и инженеров-металлургов, внесших существенный вклад в развитие теоретических исследований, создание и изучение различных материалов, необходимо отметить А. Ле-Шателье, Ф. Осмонда, П. Мартена (Франция), Г. Бессемера, У. Юм-Розери, Н. Мотта, У.Г. и У.Л. Брэггов (Англия), А. Мартенса, П. Геренса, М. Лауэ, П. Дебая и Ф. Вёлера (Германия), Дж. В. Гиббса, Э. Бейна, Р. Мейла и Ф. Зейтца (США).

• 2

Значение материаловедения в жизни человека трудно переоценить. На протяжении всей истории своего развития, поколение за поколением, человечество сначала очень медленно, а затем все быстрее наращивало свой технологический опыт в создании новых более эффективных материалов.

С доисторических времен, наряду с жизненно важной необходимостью удовлетворять потребность в пище и одежде, человек должен был искать и совершенствовать приспособления для расширения своих возможностей, усиления защиты от опасностей и непогоды. Достичь этих целей возможно, изучая и познавая окружающий мир, все многообразие материалов.

Наряду с традиционными, промышленность предлагает новые материалы с эффективными строительно-техническими и технологическими свойствами, которые представляют собой составы веществ, ранее не совмещаемых. Речь идет, в первую очередь, о композиционных материалах, используемых для отделочных работ, в ограждающих конструкциях, в декоративных, изоляционных целях. Производство материалов всегда было сопряжено с большими энерго- и трудозатратами, особенно в отдаленные века, когда применялся исключительно ручной малопроизводительный труд. Однако постепенно процессы производства материалов как средства обеспечения важных процессов человеческого общества совершенствовались, обеспечивая рост общественных потребностей. Производство и потребление неразрывно связаны между собой диалектическим законом: невозможно потребление без производства, а конечная цель производства - потребление. В соответствии с этим развитие технологической науки неразрывно связано со способами производства материальных благ, а технический прогресс в области материального производства связан с прогрессом прикладных, точных и естественных наук.

Развитие технологий производства материалов вскрывает связь между технологией и наукой и показывает, как под влиянием практических потребностей формируются научные положения и как затем наука создает необходимые условия для ин-

тенсивного развития технологии производства того или иного материала. Пользуясь периодизацией общественного строя по общественно-экономическим формациям, различающимся способом производства материальных благ, можно условно охарактеризовать технологические этапы производства материалов следующим образом:

а) первобытно-общинный строй – постепенное накопление производственного опыта; простейшие природные орудия труда и материалы; приспособление природных объектов и создание примитивных сооружений для жилья (пещеры, ямы, лесные завалы);

б) рабовладельческий способ производства – накопление производственного опыта и первые попытки его обобщения; элементарные приспособления при массовом использовании физической силы; природные материалы, полученные механической обработкой (распиливанием, окапыванием, шлифованием) горных пород и древесины; первые обжиговые материалы (кирпич и известь); создание монументальных и культовых зданий и сооружений, чаще всего символизирующих власть и богатство; простейшие постройки массового потребления;

в) феодальный способ производства – обобщение производственного опыта; появление первых теоретических трудов; простейшие классические механизмы, приводимые в действие человеком, животными или силами природы; все более усложняющиеся технологические приемы и схемы производства;

г) капиталистический способ производства – объединение науки с практикой производства; превращение науки в непосредственную производительную силу общества; вытеснение ручных процессов механизированными; улучшение условий труда и отдыха человека; автоматические компьютеризованные линии по производству материалов.

Таким образом, развитие технологии показывает, как развитие производства, техники и науки способствует формированию законов мышления и научных методов исследования. Именно промышленность и технология производства товарной продукции постоянно разрушают застаревшие представления и уклады, двигают общественную жизнь по пути прогресса и созидания. В тоже время, создание эффективных материалов, в составе которых максимально использовались бы отходы различных производств, является важной задачей с экологической точки зрения.

# РАЗДЕЛ 1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МАТЕРИАЛОВ

## Тема 1.1. Строение и свойства материалов

План

1. Элементы кристаллографии: кристаллические решетки, анизотропия, дефекты кристаллов
2. Влияние типа связи на структуру и свойства кристаллов
3. Фазовый состав сплавов
4. Диффузия в металлах и сплавах
5. Жидкие кристаллы

### • 1

**Кристаллические решетки.** Твердые тела делят на кристаллические и аморфные. Кристаллические тела при нагреве остаются твердыми до определенной температуры (температуры плавления), при которой они переходят в жидкое состояние. Аморфные тела при нагреве размягчаются в большом температурном интервале; сначала они становятся вязкими и лишь затем переходят в жидкое состояние.

Все металлы и их сплавы — тела кристаллические. Металлами называют химические элементы, характерными признаками которых являются непрозрачность, блеск, хорошая электро- и теплопроводность, пластичность, а для многих металлов также способность свариваться. Не потеряло своего научного значения определение металлов, данное более 200 лет назад великим русским ученым М. В. Ломоносовым: "Металлы суть светлые тела, которые ковать можно". Для металлов характерно то, что, вступая в химические реакции с элементами, являющимися неметаллами, они отдают последним свои внешние валентные электроны. Это объясняется тем, что у атомов металла внешние электроны непрочно связаны с его ядром. Металлы имеют на наружных оболочках всего 1—2 электрона, тогда как у неметаллов таких электронов много (5—8).

Чистые химические элементы металлов (например, железо, медь, алюминий и др.) могут образовывать более сложные вещества, в состав которых могут входить несколько элементов-металлов, часто с примесью заметных количеств элементов-неметаллов. Такие вещества называются металлическими сплавами. Простые вещества, образующие сплав, называют компонентами сплава.

Для описания кристаллической структуры металлов пользуются понятием кристаллической решетки. Кристаллическая решетка - это воображаемая пространственная сетка, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие металл. Частицы вещества (ионы, атомы), из которых построен кристалл, расположены в определенном геометрическом порядке, который периодически повторяется в пространстве. В отличие от кристаллов в аморфных телах (стекло, пластмассы) атомы располагаются в пространстве беспорядочно, хаотично.

Формирование кристаллической решетки в металле происходит следующим образом. При переходе металла из жидкого в твердое состояние расстояние между атомами сокращается, а силы взаимодействия между ними возрастают.

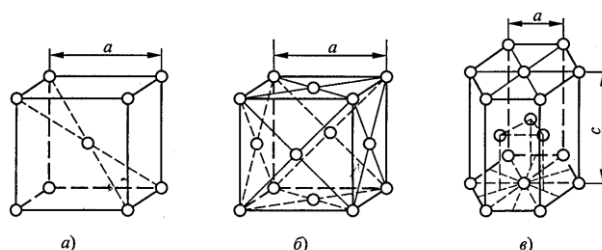
Характер взаимодействия атомов определяется строением их внешних электронных оболочек. При сближении атомов электроны, находящиеся на внешних

оболочках, теряют связь со своими атомами вследствие отрыва валентного электрона одного атома положительно заряженным ядром другого и т. д. Происходит образование свободных электронов, так как они не принадлежат отдельным атомам. Таким образом, в твердом состоянии металл представляет собой структуру, состоящую из положительно заряженных ионов, омываемых свободными электронами.

Связь в металле осуществляется электростатическими силами. Между ионами и свободными электронами возникают электростатические силы притяжения, которые стягивают ионы. Такую связь между частицами металла называют металлической.

Силы связи в металлах определяются силами отталкивания и силами притяжения между ионами и электронами. Ионы находятся на таком расстоянии один от другого, при котором потенциальная энергия взаимодействия минимальна. В металле ионы располагаются в определенном порядке, образуя кристаллическую решетку. Такое расположение ионов обеспечивает взаимодействие их с валентными электронами, которые связывают ионы в кристаллической решетке.

Типы кристаллических решеток у различных металлов различны. Наиболее часто встречаются решетки (рисунок 1): *объемно-центрированная кубическая (ОЦК), гранецентрированная кубическая (ГЦК) и гексагональная плотноупакованная (ГПУ).*



*Рисунок 1. Кристаллические решетки: а) объемно-центрированная кубическая (ОЦК); б) гранецентрированная кубическая (ГЦК); в) гексагональная плотноупакованная (ГПУ)*

Решетку *объемно-центрированного куба* имеют многие металлы, например К, V, Fe<sub>α</sub>, Cr, Mo, W; *гранецентрированную кубическую* - Fe<sub>γ</sub>, Al, Cu, Ni, Ag, Au, Pb и *гексагональную плотноупакованную* - Mg, Zn, Be, Co, Ti и др.

Некоторые металлы в твердом состоянии (железо, марганец, кобальт и др.) в зависимости от температуры нагрева могут иметь кристаллические решетки различного строения и, следовательно, обладать различными свойствами. Это явление называется аллотропией, или полломорфизмом. Кроме того, известен полиморфизм под влиянием температуры и давления. При нагреве до 2000°C и давлении ~ 10<sup>10</sup> Па углерод в форме графита перекристаллизовывается в алмаз. Аллотропические формы принято обозначать буквами греческого алфавита: α, β, γ, δ и т.д.

К металлам, не претерпевающим аллотропических превращений в твердом состоянии при нагревании и охлаждении, относятся алюминий, магний, медь и другие.

Большое число технически важных металлов (олово, цинк, никель, кобальт и другие) подвержено аллотропическим изменениям.

*Дефекты кристаллов.* Строение реальных кристаллов отличается от идеальных, в реальных кристаллах всегда содержатся дефекты, которые подразделяются на: точечные, линейные, поверхностные и объемные.



Размеры *точечного дефекта* близки к межатомному расстоянию, самые простые - *вакансии* - пустой узел кристаллической решетки и наличие *межузельного атома*, появляются из-за тепловых колебаний атомов. Каждой температуре соответствует равновесная концентрация вакансий и межузельных атомов, пересыщение точечными дефектами достигается при резком охлаждении после высокотемпературного нагрева, при пластическом деформировании и при облучении нейтронами. Ускоряют все процессы, связанные с перемещением атомов - диффузия, спекание порошков и т.д., повышают электросопротивление, но почти не влияют на механические свойства чистых металлов. На рисунке 2 представлены разновидности точечных дефектов в кристаллической решетке.

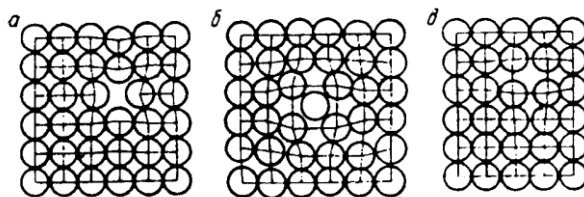


Рисунок 2. Дефекты кристаллов: а – вакансия; б – межузельный атом; в – примесный атом внедрения

*Линейные дефекты* характеризуются малыми размерами в двух измерениях, но имеют значительную протяженность в третьем измерении. Важнейший вид *линейных дефектов* - *дислокации*. Вокруг дислокаций решетка упруго искажена. Плотность дислокаций - суммарная длина всех линий дислокаций в единице объема. Дислокации значительно влияют на свойства материалов, участвуют в фазовых превращениях, рекристаллизации, служат готовыми центрами при выпадении второй фазы из твердого раствора, влияют на прочность кристаллов, увеличивая ее в несколько раз по сравнению с отожженным состоянием. В кристаллах всегда имеются дефекты (несовершенства) строения, обусловленные нарушением правильного расположения

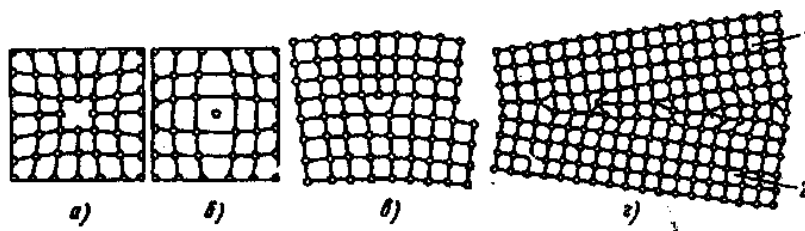


Рисунок 3. Дефекты в кристаллах: а — вакансия, б — внедренный атом, в — краевая линейная дислокация, г — неправильное расположение атомов на границе зерен 1 и 2 атомов кристаллической решетки

Дефекты кристаллического строения подразделяют по геометрическим признакам на точечные, линейные и поверхностные.

Атомы совершают колебательные движения возле узлов решетки, а с повышением температуры амплитуда этих колебаний увеличивается. Большинство атомов данной кристаллической решетки имеют одинаковую (среднюю) энергию и ко-

леблются при данной температуре с одинаковой амплитудой. Однако отдельные атомы обладают энергией значительно большей средней энергии и перемещаются из одного места в другое.

Наиболее легко перемещаются атомы поверхностного слоя, выходя на поверхность. Место, где находился такой атом, называется *вакансией* (рисунки 3, а). На это место через некоторое время перемещается один из атомов соседнего слоя и т. д. Таким образом вакансия перемещается в глубь кристалла. С повышением температуры количество вакансий увеличивается и они чаще перемещаются из одного узла в другой.

В диффузионных процессах, протекающих в металлах, вакансии играют определяющую роль, к *точечным дефектам* относят также атом, внедренный в междоузлие кристаллической решетки (рисунки 3, б), и замещенный атом, когда место атома одного металла замещается в кристаллической решетке другим, чужеродным атомом. Точечные дефекты вызывают местное искажение кристаллической решетки.

*Линейные дефекты* являются другим важнейшим видом несовершенства кристаллической решетки, когда в результате сдвига на одно межатомное расстояние одной части решетки относительно другой вдоль какой-либо плоскости число рядов атомов в верхней части решетки на один больше, чем в нижней. В данном случае в верхней части решетки появилась как бы лишняя атомная плоскость (экстра-плоскость). Край экстра-плоскости, перпендикулярный направлению сдвига, называется краевой или *линейной дислокацией* (рисунки 3, в), длина которой может достигать многих тысяч межатомных расстояний. Ширина дислокации мала и составляет несколько атомных расстояний.

Кристаллическая решетка в зоне дислокаций упруго искажена, поскольку атомы в этой зоне смещены относительно их равновесного состояния. Для дислокаций характерна их легкая подвижность. Это объясняется тем, что атомы, образующие дислокацию, стремятся переместиться в равновесное состояние. Дислокации образуются в процессе кристаллизации металлов, а также при пластической деформации, термической обработке и других процессах.

*Поверхностные дефекты* представляют собой границы раздела между отдельными кристаллами (рисунки 3, г). На границе раздела атомы расположены менее правильно, чем в его объеме. Кроме того, по границам раздела скапливаются дислокации и вакансии, а также концентрируются примеси, что еще больше нарушает порядок расположения атомов. При этом сами кристаллы разориентированы, т. е. могут быть повернуты относительно друг друга на десятки градусов. Прочность металла может либо увеличиваться вследствие искажений кристаллической решетки вблизи границ, либо уменьшаться из-за наличия примесей и концентрации дефектов. Дефекты в кристаллах существенно влияют на свойства металлов.

*Анизотропия.* Кристаллические тела обладают свойством *анизотропии*. *Анизотропия* - это зависимость свойств кристаллических тел от направления, возникающая в результате разных расстояний между атомами (ионами, молекулами) в различных кристаллографических направлениях. Анизотропия присуща всем свойствам кристаллов: температурному коэффициенту линейного расширения, удельному электрическому сопротивлению, магнитным свойствам, модулю упругости. Но это все характерно для монокристаллов, которые получают в основном искусственным путем. В природе кристаллические тела - поликристаллы, т.е. состоят из множества различно ориентированных кристаллов. В этом случае анизотропии нет, их считают

мнимоизотропными. В процессе обработки давлением наблюдается параллельная ориентация различных кристаллов, такие структуры называют текстурованными и они анизотропны. Неодинаковость физических свойств среды в разных направлениях называют *анизотропией*. Анизотропия кристаллов обусловлена различием плотности упаковки атомов в решетке в различных направлениях. Все кристаллы анизотропны, аморфные тела (стекло, смола) изотропны, т. е. имеют одинаковую плотность атомов в различных направлениях. Анизотропия свойств важна при использовании *монокристаллов* — одиночных кристаллов, частицы которых расположены единообразно по всему их объему. Монокристаллы имеют правильную кристаллическую огранку (в форме естественных многогранников), анизотропны по механическим, электрическим и другим физическим свойствам. Так, для монокристалла меди предел прочности изменяется от 120 до 360 МПа в зависимости от направления приложения нагрузки. Металлы и сплавы, применяемые в технике, обычно имеют поликристаллическую структуру, т.е. состоят из множества мелких и различно ориентированных кристаллов, не имеющих правильной кристаллической огранки и называемых *кристаллитами (или зернами)*. В каждом зерне поликристалла наблюдается анизотропия. Однако впоследствии разнообразной, беспорядочной ориентировки кристаллографических плоскостей в различных зернах поликристалл может иметь одинаковые свойства по разным направлениям и не обнаруживать анизотропию (когда размеры зерен значительно меньше размеров поликристалла и количество их весьма велико).

• 2

Между частицами в кристалле могут существовать различные *типы связи*. *Тип связи* определяется электронным строением атомов, вступающих во взаимодействие. Элементарные частицы сближаются на определенное расстояние, которое обеспечивает наибольшую термодинамическую стабильность - минимум энергии связи. Энергия связи определяет физические свойства материалов.

Все кристаллы по характеру связи условно подразделяют на: молекулярные, ковалентные, металлические и ионные, но такое деление условно, т.к. может действовать и несколько типов связи.

*Молекулярные кристаллы* - это кристаллы, в которых преобладает связь Ван-дер-Ваальса. Например, в кристаллах инертных газов при очень низких температурах и больших давлениях (твердое состояние) при сближении атомов обмен электронами невозможен, силы притяжения между ними объясняются мгновенной поляризацией атомов при сближении. При нормальных условиях к молекулярным относятся кристаллы  $J_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ . Для этих кристаллов характерна наиболее компактная кристаллическая решетка - ГЦК. Энергия связи невелика, поэтому кристаллические тела с молекулярным типом связи имеют низкие температуры плавления и испарения, большие температурные коэффициенты линейного расширения, обладают диэлектрическими свойствами.

*Ковалентные кристаллы* – это кристаллы, у которых преобладает ковалентный тип связи. Такие кристаллы образуют элементы 4, 5, 6 подгруппы. Материалы с ковалентным типом связи обладают низкой пластичностью и высокой твердостью, имеют высокую температуру плавления, по электрическим свойствам относятся к полупроводникам и диэлектрикам.

*Металлические кристаллы* – это кристаллы, у которых преобладает металли-

ческий тип связи. Их образуют элементы всех подгрупп А и 1 - 3 подгрупп В. Валентные энергетические зоны перекрываются, образуя общую зону со свободными электронами в объеме всего кристалла.. Для элементов с металлическим типом связи имеет место явление *полиморфизма* - способность в твердом состоянии при различных температурах (или давлении) иметь различные типы кристаллических структур, которые называются *аллотропическими формами* или *модификациями*.

*Ионные кристаллы* – характерны для сложных кристаллов, состоящих из элементов различной валентности. Между элементами происходит перераспределение электронов, электроположительный элемент теряет свои валентные электроны и превращается в положительный ион, а электроотрицательный - приобретает, достраивая свою валентную зону до устойчивой конфигурации, как у инертных газов. Пример - кристалл оксида железа FeO, решетка которого состоит из отрицательно заряженных ионов кислорода и положительно заряженных ионов железа. Величина энергии связи кристаллов с ионным типом связи близка к ковалентным кристаллам и превышает металлические и тем более молекулярные. Имеют высокую температуру плавления и испарения, высокий модуль упругости и низкий коэффициент линейного расширения.

• 3

Чистые металлы обычно имеют низкую прочность и невысокие технологические свойства. В технике применяют сплавы. *Сплавами* называют сложные материалы, полученные сплавлением нескольких компонентов. Компонентами сплавов могут быть металлы, неметаллы и химические соединения. В зависимости от числа компонентов сплавы могут быть двойные, тройные и т.д. При физико-химическом взаимодействии компоненты образуют фазы, число и тип которых характеризуют состояние сплава.

*Фаза* – однородная часть сплава, характеризующаяся определенным составом, типом кристаллической решетки и отделенная от других частей поверхностью раздела. В зависимости от количества фаз сплавы могут одно- двух- и многофазными. В жидком состоянии компоненты сплава обычно неограниченно растворяются друг в друге, образуя жидкие растворы. В твердом состоянии компоненты могут образовывать: твердые растворы, механические смеси, химические соединения.

*Механические смеси*. Если элементы, входящие в состав сплава, при затвердевании из жидкого состояния не растворяются друг в друге и не взаимодействуют, то образуется механическая смесь (олово – свинец, алюминий – медь). В механических смесях существуют два типа кристаллических решеток. *Химические соединения* по структуре представляют однородные твердые тела, свойства их отличаются от свойств элементов их образующих, имеют постоянную температуру плавления, их состав выражается стехиометрической пропорцией в виде простой формулы  $A_mB_n$ . Различают химические соединения двух типов: металл – неметалл и металл – металл. К химическим соединениям *металлов с неметаллами* относят фазы с ионным типом связи: сульфиды, оксиды, фосфиды, и фазы внедрения: карбиды, нитриды, бориды и гидриды. К системе *металл – металл* относятся электронные соединения. Электронные соединения образуются между одновалентными металлами (медь, серебро, литий) или металлами переходных групп (железо, марганец, кобальт), с одной стороны, и металлами с валентностью от 2 до 5 (алюминий, бериллий, магний,

цинк) с другой стороны. Электронные соединения характерны для медных сплавов (латуней и бронз).

*Твердые растворы* – один из компонентов (растворитель) сохраняет свою кристаллическую решетку, а атомы других (растворяемых) компонентов располагаются в его решетке искажая ее. Твердые растворы могут быть двух типов: замещения и внедрения. Твердые растворы замещения имеют более упорядоченную структуру и по своим свойствам ближе к химическим соединениям; могут быть неограниченной растворимости. В твердых растворах внедрения растворимость ограничена.

*Правило фаз Гиббса.* Закономерности существования устойчивых фаз в условиях равновесия определяются правилом фаз Гиббса. Правило фаз, устанавливая количественную зависимость между числом фаз  $\Phi$ , количеством компонентов  $K$  и числом степеней свободы  $S$ , дает возможность предсказать процессы, проходящие в сплавах при нагреве и охлаждении, и определить число фаз в системе при данных условиях. Правило фаз выражается следующим уравнением:  $S = K + P - \Phi$ .

Под числом степеней свободы, или вариантноностью системы, понимают число внешних  $P$  (температура, давление) и внутренних (концентрация) факторов, которые можно изменять без изменения числа фаз, находящихся в равновесии.

Для металлических сплавов внешним фактором является только температура, поэтому правило фаз:  $S = K + 1 - \Phi$ . Вариантность не может быть отрицательной, поэтому для равновесия металлических сплавов необходимо, чтобы в их структуре число фаз не превышало число компонентов более, чем на 1.

В случае кристаллизации чистого металла, когда имеются две фазы (жидкая и твердая), число степеней свободы равно 0, т.е. система инвариантна и обе фазы находятся в равновесии при строго определенной температуре. Чистый металл в жидком состоянии имеет число степеней свободы 1 (моновариантная система) т.е. имеется возможность изменять в определенных пределах температуру без изменения числа фаз.

Из правила фаз следует, что в двойных системах число одновременно существующих фаз не может быть более 3. При большем сплав не будет находиться в равновесном состоянии. Любое фазовое превращение сплава отмечается изменением физикомеханических свойств (электросопротивления, удельного объема и т.д.) либо тепловым эффектом. Переход сплава из жидкого состояния в твердое сопровождается значительным выделением теплоты, поэтому, измеряя температуру при нагреве или охлаждении в функции времени, можно по перегибам или остановкам на кривых охлаждения определить критические температуры, при которых происходят фазовые превращения.

Диаграммы состояния строят в координатах температура - химический состав сплава. Для экспериментального построения диаграммы состояния сплавов, образованных компонентами А и В, необходимо изготовить серию сплавов с различным содержанием компонентов А и В. Для каждого сплава экспериментально определяют критические точки, т.е. температуры фазовых превращений. Полученные значения температуры откладывают на вертикальных линиях в соответствии с химическим составом сплавов. Соединяя критические точки, получают линии диаграммы состояния.

Многие процессы, протекающие в металлах и сплавах, особенно при повышенных температурах, связаны с самодиффузией или диффузией. *Диффузия* - перенос разнородных атомов, который сопровождается изменением концентрации компонентов в отдельных зонах сплава. При этом атомы, находящиеся в узлах кристаллической решетки, непрерывно колеблются около положения равновесия. Некоторые из них приобретают столь большую энергию, что уходят со своего места в межузельное пространство, меняются местами со своими соседями, занимают находящиеся рядом вакансии и т. д. *Самодиффузия* - переход атома металла из узла кристаллической решетки в соседний или в междоузлие под действием теплового возбуждения.

Существует несколько механизмов диффузии: обменный, циклический, вакансионный, межузельный и др. При обменном механизме два соседних атома обмениваются местами (рисунок 4, а). При циклическом механизме диффузия протекает совместным перемещением группы атомов (рисунок 4, б). Для металлов наиболее вероятным является вакансионный механизм диффузии (рисунок 4, в), при котором вакансии кристаллической решетки занимают расположенными рядом атомами.

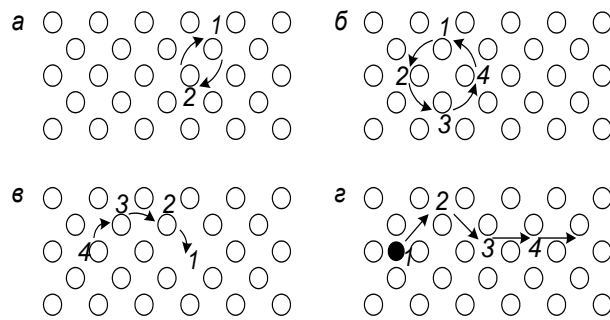


Рисунок 4. Механизмы диффузии атомов: а – обменный; б – циклический; в – вакансионный; г – межузельный

При межузельном механизме диффузии (рисунок 4, г) наблюдается переход атома из одного межузлия в соседнее. Такой механизм характерен для компонентов с малым атомным радиусом. Например, диффузия атомов углерода, азота, водорода в железоуглеродистых сплавах.

Наиболее легко диффузия протекает по границам и на поверхности зерен, где сконцентрированы дефекты кристаллического строения. Существенно увеличивает скорость диффузии повышение температуры. Так, при повышении температуры, начиная от комнатной, на каждые 10–15 °С коэффициент диффузии возрастает примерно в два раза.

Диффузионные процессы лежат в основе кристаллизации и рекристаллизации, фазовых превращений и насыщения поверхности сплавов другими элементами. Элементы, образующие сплав называют компонентами. Свойства сплава определяются составом компонентов и их количественным соотношением. Наглядное представление дают диаграммы состояния сплава. Зная диаграмму состояния, можно представить полную картину формирования структуры любого сплава, определить оптимальную температуру заливки, оценить жидкотекучесть и возможность получения химической неоднородности, определить режим термической обработки, необходимый для данного сплава.

*Жидкие кристаллы* - это жидкости с упорядоченной молекулярной структурой. Занимают промежуточное место между кристаллами и жидкостями с беспорядочным расположением молекул. Они обладают анизотропией свойств: показатель преломления света, удельное электрическое сопротивление, диэлектрическая проницаемость, вязкость и т.д. Жидкие кристаллы текучи, как обычные жидкости, но в то же время обладают анизотропией свойств, как кристаллы. При переходе из-за усилившихся тепловых колебаний упорядоченная молекулярная структура полностью исчезает, *увеличивается прозрачность вещества*, и поэтому верхнюю температурную точку существования жидкого кристалла часто называют *точкой просветления*.

Структура жидких кристаллов легко изменяется под действием давления, электрического поля, нагрева. Это явление дает возможность управлять их свойствами путём слабых воздействий и делает жидкие кристаллы незаменимыми материалами для изготовления особо чувствительных индикаторов, а в смеси с красителями в цветовых устройствах.

По структуре жидкие кристаллы разделяют на три класса:

1) нематические – молекулы выстроены в цепочки; 2) смектические – молекулы образуют параллельные слои; 3) холестерические – молекулы размещаются по пространственной спирали.

На основе жидких кристаллов изготавливают медицинские термометры для контроля перегрева узлов и деталей, преобразователи невидимого инфракрасного излучения в видимый свет. В последнем случае поглощение инфракрасного излучения нагревает жидкий кристалл так, что изменяется окраска отражённого света.

Жидкие кристаллы применяют в модуляторах, системах отображения информации – калькуляторах, ручных часах, измерительных приборах автомобилей, устройствах для отклонения светового потока и др.

#### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Какой материал называется металлом? Каковы его отличительные свойства?
2. Что называется элементарной кристаллической ячейкой?
3. Назовите основные типы кристаллических решеток.
4. Какие превращения металлов называются полиморфными?
5. Каково практическое значение полиморфизма?
6. Назовите наиболее распространенные дефекты металлов.

### **Тема 1.2. Формирование структуры литых материалов**

План

1. Кристаллизация металлов и сплавов
2. Форма кристаллов и строение слитков. Получение монокристаллов
3. Аморфное состояние материалов

• 1

Переход металлов и сплавов из жидкого состояния в твердое (кристаллическое) называют *кристаллизацией*. Процессы кристаллизации зависят от температуры и протекают во времени. Процесс кристаллизации состоит из двух стадий: зарождения кристаллов (зародышей или центров кристаллизации) и роста кристаллов из этих центров. Рост кристалла продолжается только в тех направлениях, где есть свободный доступ жидкого металла.

В результате кристаллы, имевшие сначала геометрически правильную форму, после затвердевания получают неправильную форму, их называют кристаллитами или зернами. Величина зерен зависит от числа центров кристаллизации и скорости роста кристаллов. Чем больше центров кристаллизации, тем мельче зерно металла.

Величина зерен, образующихся при кристаллизации, зависит не только от количества самопроизвольно зарождающихся центров кристаллизации, но также и от количества нерастворимых примесей, всегда имеющихся в жидком металле. Такие нерастворимые примеси являются готовыми центрами кристаллизации. Ими являются оксиды (например,  $Al_2O_3$ ), нитриды, сульфиды и другие соединения. Центрами кристаллизации в данном металле или сплаве могут быть только такие твердые частицы, которые соизмеримы с размерами атомов основного металла. Кристаллическая решетка таких твердых частиц должна быть близка по своему строению и параметрам решетке кристаллизующегося металла. Чем больше таких частичек, тем мельче будут зерна закристаллизовавшегося металла.

На образование центров кристаллизации влияет и скорость охлаждения. Чем выше скорость охлаждения, тем больше возникает центров кристаллизации и, следовательно, мельче зерно металла.

Чтобы получить мелкое зерно, создают искусственные центры кристаллизации. Для этого в расплавленный металл (расплав) вводят специальные вещества, называемые *модификаторами*. Так, при модифицировании магниевых сплавов зерно уменьшается от 0,2—0,3 до 0,01–0,02 мм, т.е. в 15–20 раз. Модифицирование отливок проводят введением в расплав добавок, которые образуют тугоплавкие соединения (карбиды, оксиды). При модифицировании, например, стали применяют алюминий, титан, ванадий; алюминиевых сплавов — марганец, титан, ванадий.

Иногда в качестве модификаторов применяют поверхностно-активные вещества. Они растворяются в жидком металле. Эти модификаторы осаждаются на поверхности растущих кристаллов, образуя очень тонкий слой. Этот слой препятствует дальнейшему росту кристаллов, придавая металлу мелкозернистое строение.

• 2

В реальных условиях процессы кристаллизации и характер образующейся структуры в значительной мере зависят от имеющихся центров кристаллизации. Такими центрами являются частицы тугоплавких неметаллических включений, оксидов, интерметаллических соединений, образуемых примесями. При кристаллизации атомы металла откладываются на активированные поверхности примеси как на готовом зародыше. Наличие готовых центров кристаллизации приводит к уменьшению размеров кристалла при затвердевании. Рост зерна чаще всего происходит по дендритной схеме.

Дендриты представляют собой древовидные кристаллы, образование которых объясняется неодинаковым отводом теплоты в разных направлениях и неодинаковым их ростом (рисунок 5).



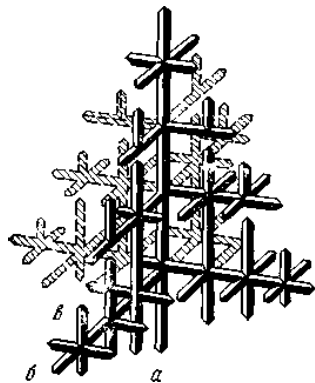


Рисунок 5. Схема дендрита: а — ствол кристалла, б, в — ветки кристалла

Развитие зародышей протекает главным образом в тех направлениях решетки, которые имеют наибольшую плотность упаковки атомов и минимальное расстояние между ними.

Условия отвода теплоты при кристаллизации значительно влияют на форму зерен. Кристаллы растут преимущественно в направлении, обратном отводу теплоты. Поэтому при направленном теплоотводе образуются вытянутые (столбчатые) кристаллы. Если теплота от растущего кристалла отводится во всех трех направлениях с приблизительно одинаковой скоростью, формируются равноосные кристаллы.

Структура слитка зависит от многих факторов, основные из которых следующие: количество и свойство примесей в чистом металле или легирующих элементов в сплаве; температура разливки; скорость охлаждения при кристаллизации, а также конфигурация; температура; теплопроводность; состояние внутренней поверхности литейной формы. Типичная структура литого слитка состоит из трех основных зон (рисунок 6).

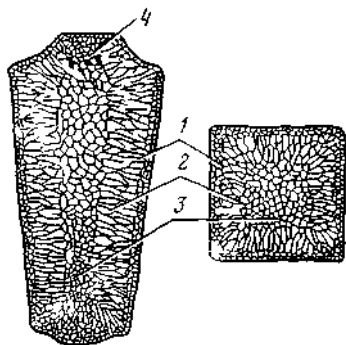


Рисунок 6. Схема стального слитка: 1 — мелкие кристаллы, 2 — столбчатые кристаллы 3 — крупные кристаллы, 4 — усадочная раковина

Зона мелких кристаллов 1 образуется у холодной стенки изложницы. Затем по направлению отвода тепла, перпендикулярно стенкам изложницы, растут столбчатые кристаллы 2. В центре слитка скорость охлаждения небольшая, и там образуются крупные неориентированные кристаллы 5. Вследствие уменьшения объема металла при кристаллизации в слитке образуется усадочная раковина 4. При охлаждении сплава растворенные в металле газы могут образовывать в слитке газовые раковины и пузыри.

Применяя различные технологические приемы, можно изменить количественные соотношения зон или исключить из структуры слитка какую-либо зону

вообще. В верхней части слитка, которая затвердевает в последнюю очередь, концентрируется усадочная раковина. Под усадочной раковиной металл получается рыхлым, в нем содержится много усадочных форм. Часть слитка с усадочной раковиной и рыхлым металлом отрезают.

Слитки сплавов имеют неоднородный состав. Неоднородность сплава по химическому составу, структуре и неметаллическим включениям, образующаяся при кристаллизации слитка, называется *ликвацией*.

Химическая неоднородность по отдельным зонам слитка называется *зональной ликвацией*. Она отрицательно влияет на механические свойства. В реальных слитках помимо зональной встречаются и другие виды ликвации: внеосевая, дендритная, карбидная, подусадочная, угловая, гравитационная.

Так, гравитационная ликвация образуется в результате разницы в удельных весах твердой и жидкой фаз, а также при кристаллизации несмешивающихся жидких фаз.

Жидкий металл имеет больший объем, чем закристаллизовавшийся, поэтому залитый в форму металл в процессе кристаллизации сокращается в объеме, что приводит к образованию пустот, называемых *усадочными раковинами*. Усадочные раковины могут быть сконцентрированы в одном месте, либо рассеяны по всему объему слитка или по его части. Они могут быть заполнены газами, растворимыми в жидком металле, но выделяющимися при кристаллизации.

В хорошо раскисленной, так называемой *спокойной стали*, отлитой в изложницу с утепленной подложкой, усадочная раковина образуется в верхней части слитка и в объеме всего слитка содержится малое количество газовых пузырей и раковин. Недостаточно раскисленная, так называемая *кипящая сталь*, содержит раковины и пузыри во всем объеме. Поэтому спокойный металл более плотный, чем кипящий.

*Монокристалл* — твердое тело, частицы которого образуют единую кристаллическую решетку (одионочный кристалл). Одним из главных свойств монокристаллов, которым они отличаются от жидкостей и газов, является анизотропия их физических свойств. Монокристаллы отличаются минимальными структурными несовершенствами. Получение монокристаллов позволяет изучать свойства металлов, исключив влияние границ зерен.

Применение в монокристаллическом состоянии германия и кремния высокой чистоты дает возможность использовать их полупроводниковые свойства и свести к минимуму неконтролируемые изменения электрических свойств. Монокристаллы можно получить, если создать условия для роста кристалла только из одного центра кристаллизации. Существует несколько методов, в которых использован этот принцип. Важнейшими из них являются методы Бриджмена и Чохральского.

### • 3

Кроме кристаллических, к твердым телам относят также аморфные тела. Аморфный в переводе с греческого означает «бесформенный». Аморфные тела — это твердые тела, для которых характерно неупорядоченное расположение частиц в пространстве.

В этих телах молекулы (или атомы) колеблются около хаотически расположенных точек и, подобно молекулам жидкости, имеют определенное время оседлой жизни. Но, в отличие от жидкостей, время это у них очень велико.

К аморфным телам относятся стекло, янтарь, различные другие смолы, пластмассы. Хотя при комнатной температуре эти тела сохраняют свою форму, но при повышении температуры они постепенно размягчаются и начинают течь, как жидкости: у аморфных тел нет определенной температуры, плавления. Этим они отличаются от кристаллических тел, которые при повышении температуры переходят в жидкое состояние не постепенно, а скачком (при вполне определенной температуре — температуре плавления).

Все аморфные тела изотропны, т. е. имеют одинаковые физические свойства по разным направлениям. При ударе они ведут себя как твердые тела — раскалываются, а при очень длительном воздействии — текут.

В настоящее время есть много веществ в аморфном состоянии, полученных искусственным путем, например, аморфные и стеклообразные полупроводники, магнитные материалы и даже металлы.

Из стекол специального состава при помощи контролируемой кристаллизации получают *ситаллы* или *стеклокристаллические материалы*. Структура их представляет смесь очень мелких беспорядочно ориентированных кристаллов и остаточного стекла (по химическому составу отличается от исходного). Для образования кристаллов вводят  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Имеют применение фотоситаллы - фоточувствительные материалы и термоситаллы - износостойкие материала (узлы трения, защитные эмали, стабильные диэлектрики, платы).

#### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. От чего зависят процессы кристаллизации металлов и сплавов?
2. Какие примеси являются готовыми центрами кристаллизации?
3. Из каких зон состоит типичная структура литого слитка?
4. Что называется степенью переохлаждения металлов? Какое практическое значение она имеет?
5. Что называется раскислением стали? Какова его основная цель?
6. Какие стали называются спокойными, полуспокойными, кипящими?
7. Как можно получить монокристаллы?

### **Тема 1.3. Свойства металлов и методы их испытаний**

#### План

1. Механические свойства металлов
2. Диаграмма растяжения металлов
3. Механические характеристики металлов

#### • 1

Под механическими свойствами материалов понимают их способность к сопротивлению различным факторам внешнего воздействия. К механическим свойствам материалов относятся следующие:

1. *Прочность* – это способность материала без разрушения сопротивляться действию внешних сил, вызывающих деформацию. Минимальная сила, при прило-

жении которой наступает нарушение целостности материала и является показателем прочности. Отношение показателя прочности к площади поперечного сечения испытываемого образца называется пределом прочности этого материала.

2. *Твердость* характеризует свойства тела противостоять пластической деформации при проникновении в него другого твердого тела. По твердости судят о способности материала сопротивляться силам износа.

3. *Вязкость* (внутреннее трение) – это способность газов и жидкостей оказывать сопротивление действию внешних сил, вызывающих их течение. Ударная вязкость – это работа, израсходованная на ударный излом образца.

4. *Упругость* – это способность материала восстанавливать свою форму после прекращения действия внешних сил, вызвавших изменение его формы (деформацию). Пределом упругости называется максимальная сила, действующая на единицу поперечного сечения образца, после снятия которой исследуемый образец еще может возвратиться в первоначальное положение. Если применить силу, превышающую предел упругости, материал разрушится. Высокой упругостью обладает стальная проволока; слабо выражены упругие свойства у алюминиевой и медной проволоки.

5. *Пластичность* – это свойство материала деформироваться без разрушения под действием внешних сил и сохранять новую форму после прекращения из действия (пластичность – свойство, обратное упругости).

6. *Деформация* – это изменение размеров и формы тела под действием приложенных к нему сил. Деформация может быть упругой и пластической (остаточной). Первая исчезает после снятия нагрузки. Она не вызывает изменений структуры, объема и свойств материала. Вторая не устраняется после снятия нагрузки и вызывает изменения структуры, объема, а порой и свойств материала.

7. *Усталость* – свойство материала разрушаться под влиянием часто повторяющихся знакопеременных сил. Разрушение может наступить под воздействием самых минимальных нагрузок, которые гораздо меньше предела упругости этого материала.

8. *Износостойкость* — это способность материала сопротивляться поверхностному разрушению под действием внешнего трения.

9. *Ползучесть* — это способность материала медленно и непрерывно пластически деформироваться (ползти) при постоянном напряжении (особенно при высоких температурах). Свойства зависят от химического состава, структуры и характера технологической обработки материала.

По механическим свойствам определяют: конструкционную прочность материала; технологическое поведение материала при его обработке; однородность и стандартность материала

• 2

С целью изучения механических свойств материалов применяют статические и динамические методы испытаний. При статических испытаниях материал подвергается медленному, но постоянному воздействию силы. При динамических методах силовые воздействия носят быстрый кратковременный характер типа удара.

Рассмотрим *диаграмму растяжения*, которая показывает зависимость между растягивающей силой  $P$ , действующей на образец, и вызываемой ею деформацией  $\Delta l$  (рисунок 7).

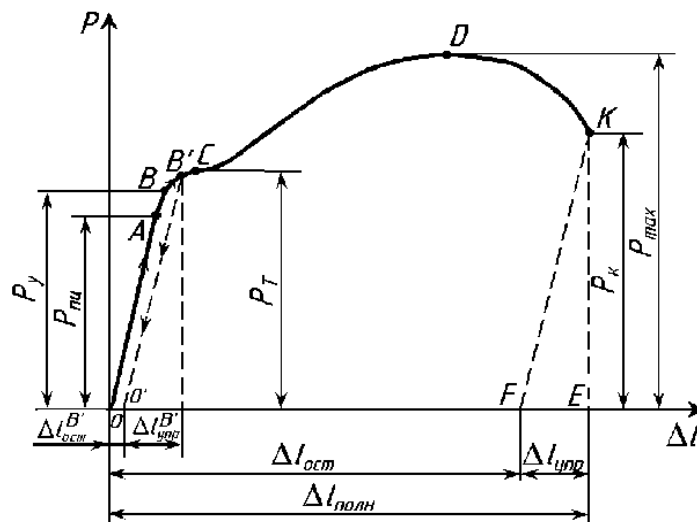


Рисунок 7. Диаграмма растяжения малоуглеродистой стали

На диаграмме можно указать пять характерных точек. Прямолинейный участок диаграммы  $OA$  указывает на *пропорциональность* между нагрузкой  $P$  и удлинением  $\Delta l$ . (Эта пропорциональность впервые была замечена в 1670 г. Робертом Гуком и получила в дальнейшем название закона Гука).

Величина силы  $P_{пл}$  (точка  $A$ ), до которой остается справедливым закон Гука, зависит от размеров образца и физических свойств материала. Если испытуемый образец нагрузить растягивающей силой, не превышающей величину ординаты точки  $B$  (силы  $P_y$ ), а потом разгрузить, то при разгрузке деформации образца будут уменьшаться по тому же закону, по которому они увеличивались при нагружении. Следовательно, в этом случае в образце возникают только *упругие деформации*.

В случае, если растягивающее усилие выше  $P_y$ , при разгрузке образца деформации полностью не исчезают и на диаграмме линия разгрузки будет представлять собой прямую  $B'O'$ , уже не совпадающую с линией нагружения, а параллельную ей. В этом случае деформация образца состоит из упругой  $\Delta l_{упр}^{B'}$  и остаточной (пластической)  $\Delta l_{ост}^{B'}$  деформации.

Таким образом, характерной особенностью точки  $B$  является то, что при превышении нагрузки  $P_y$  образец испытывает *остаточные деформации* при разгрузении.

Выше точки  $B$  диаграмма растяжения значительно отходит от прямой (деформация начинает расти быстрее нагрузки, и диаграмма имеет криволинейный вид), а при нагрузке, соответствующей  $P_T$  (точка  $C$ ), переходит в горизонтальный участок. В этой стадии испытания в материале образца по всему его объему распространяются пластические деформации. Образец получает значительное остаточное удлинение практически без увеличения нагрузки.

Свойство материала деформироваться при практически постоянной нагрузке называется *текучестью*. Участок диаграммы растяжения, параллельный оси абсцисс, называется площадкой текучести.

В процессе текучести на отшлифованной поверхности образца можно наблюдать появление линий (полос скольжения), наклоненных примерно под углом  $45^\circ$  к оси образца (рисунок 8а). Эти линии являются следами взаимных сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями.

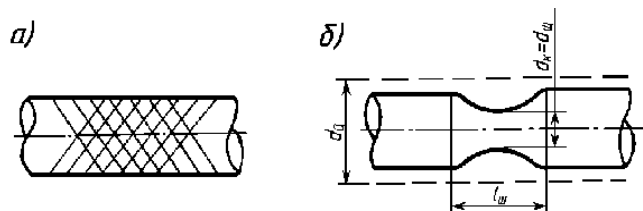


Рисунок 8. Образование линий сдвига (а) и местного сужения—шейки (б)

Линии сдвига называются линиями Чернова по имени знаменитого русского металлурга Д. К. Чернова (1839 - 1921), впервые обнаружившего их. Удлинившись на некоторую величину при постоянном значении силы, т.е. претерпев состояние текучести, материал снова приобретает способность *сопротивляться растяжению* (упрочняться), и диаграмма поднимается вверх, хотя гораздо более полого, чем раньше. В точке  $D$  усилие достигает максимального значения  $P_{max}$ .

Наличие участка упрочнения (от конца площадки текучести до наивысшей точки диаграммы растяжения) объясняется микроструктурными изменениями материала: когда нагрузка на образец возрастает, микроскопические дефекты (линейные и точечные) группируются так, что развитие сдвигов кристаллов, вызванных касательными напряжениями, затрудняется, а потому сопротивление материала сдвигу начинает возрастать и приближаться к его сопротивлению отрыву.

При достижении усилия  $P_{max}$  на образце появляется резкое местное сужение, так называемая шейка (рисунок 8б), быстрое уменьшение площади сечения которой вызывает падение нагрузки, и в момент, соответствующий точке  $K$  диаграммы, происходит *разрыв образца* по наименьшему сечению шейки.

До точки  $D$  диаграммы, соответствующей  $P_{max}$ , каждая единица длины образца удлинилась примерно одинаково; точно так же во всех сечениях одинаково уменьшались поперечные размеры образца. С момента образования шейки вся деформация образца локализуется на малой длине в области шейки, а остальная часть образца практически не деформируется.

Абсциссы диаграммы растягивания  $OE$ ,  $OF$  и  $FE$ , характеризующие способность образца деформироваться до наступления разрушения, соответствуют полному абсолютному удлинению образца  $\Delta l_{полн}$ , остаточному абсолютному удлинению  $\Delta l_{ост}$  и абсолютному упругому удлинению образца  $\Delta l_{упр}$ .

Для определения упругой деформации в момент разрыва необходимо из точки  $K$  диаграммы провести прямую  $KF$ , параллельную прямолинейному участку  $OA$ , так как упругие деформации при разрыве также подчиняются закону Гука.

Хрупкие материалы, типичным представителем которых является чугун, дают диаграмму растяжения иного характера (рисунок 9).

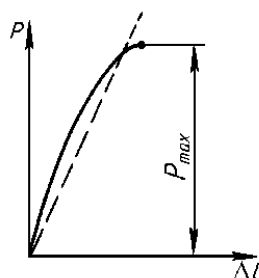


Рисунок 9. Диаграмма растяжения чугуна

Чугун разрушается внезапно при весьма малых деформациях, составляющих порядка (0,5-0,6)% от расчетной длины образца  $l_0$ , и без образования шейки. Диаграмма при этом не имеет явно выраженного прямолинейного участка (отклонение от закона Гука начинается очень рано), площадки текучести и зоны упрочнения.

При испытании на растяжение хрупких материалов определяют, как правило, только максимальную нагрузку  $P_{max}$ .

Обычно при практических расчетах для хрупких материалов отклонение от закона Гука не учитывают, т. е. криволинейную диаграмму заменяют условной прямолинейной диаграммой.

Испытанием на ударную вязкость определяют степень сопротивления материала разрушению при ударной нагрузке.

Данное испытание является важным для сталей, из которых изготавливают детали, работающие при знакопеременных нагрузках (коленчатые валы, вагонные оси и др.). Для определения ударной вязкости применяют маятниковый копер, который разрушает стандартный образец (ГОСТ 9454—78) одним ударом (рисунок 10).

Работу удара  $A$  после разрушения образца 2 определяют по шкале или по углу взлета маятника 1.

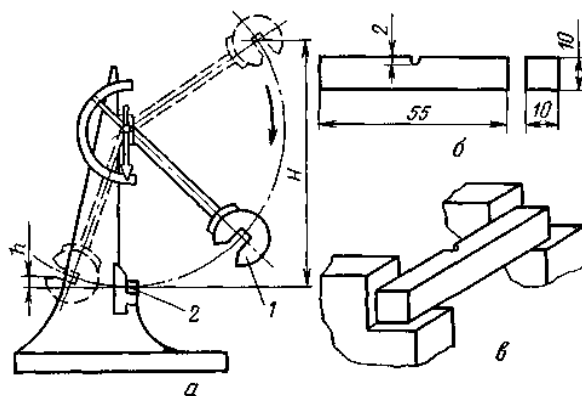


Рисунок 10. Маятниковый копер; а — схема прибора; б — эскиз образца; в — установка образца в приборе

Ударная вязкость материала  $a_n$  (Дж/м<sup>2</sup>) характеризуется отношением работы, затраченной на разрушение, к площади поперечного сечения образца  $F$  в месте удара  $a_n = A/F$ .

### • 3

Напряжения по точкам диаграммы растяжения малоуглеродистой стали характеризуют следующие величины.

Точка А соответствует пределу пропорциональности.

Предел пропорциональности  $\sigma_{пц}$  (МПа) — то наибольшее напряжение, до которого деформации растут пропорционально нагрузке (для стали Ст3  $\sigma_{пц} \sim 200$  МПа).

$$\sigma_{пц} = P_p / F_0,$$

где  $P_p$  — нагрузка, при которой нарушена пропорциональность,  $F_0$  — площадь поперечного сечения образца до разрыва.

Точка А практически соответствует и другому пределу, который называется пределом упругости. *Предел упругости*  $\sigma_e$  (МПа) – то наибольшее напряжение, до которого деформации практически остаются упругими.

$$\sigma_e = P_e / F_0,$$

где  $P_e$  — нагрузка при пределе упругости.

Точка С соответствует пределу текучести. *Предел текучести*  $\sigma_T$  (МПа) – то напряжение, при котором в образце появляется заметное удлинение без увеличения нагрузки (для стали Ст3  $\sigma_T \sim 240$  МПа).

$$\sigma_T = P_T / F_0,$$

где  $P_T$  — нагрузка, при которой наблюдается текучесть (удлинение образца без увеличения нагрузки).

Предел текучести является основной механической характеристикой при оценке прочности пластичных материалов.

Точка D соответствует временному сопротивлению или пределу прочности.

Временным сопротивлением  $\sigma_b$  называется условное напряжение, равное отношению максимальной силы, которую выдерживает образец, к первоначальной площади его поперечного сечения (для стали Ст3  $\sigma_b \sim 400$  МПа).

*Предел прочности*  $\sigma_b$  (МПа) — условное напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке, предшествовавшей разрушению образца.

$$\sigma_b = P_b / F_0,$$

где  $P_b$  — наибольшая нагрузка.

Предел прочности является основной механической характеристикой при оценке прочности хрупких материалов.

Кроме приведенных выше величин, при испытании на растяжение определяют пластичность материала, характеризуемую относительным удлинением  $\sigma$  (%) и относительным сужением  $\psi$  (%) площади поперечного сечения.

Относительное удлинение определяется по формуле

$$d = [(l_1 - l_0) / l_0] 100\%$$

$$\psi = [(A_0 - A_{ш}) / A_0] 100\%$$

где  $l_1$  - длина образца после разрыва;  $l_0$  - длина образца до испытания;  $A_0$  - первоначальная площадь поперечного сечения образца;  $A_{ш}$  - площадь наименьшего поперечного сечения шейки образца после разрыва.



## *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Какими механическими свойствами характеризуются конструкционные материалы?
2. Что такое прочность?
3. Что называется деформацией?
4. Что называется упругой деформацией?
5. Что называется пластической деформацией?
6. Как влияет холодная пластическая деформация на прочность и пластичность?
7. Какие характерные участки можно выделить на диаграмме растяжения?
8. Почему пластическая деформация идет при возрастающей нагрузке?

## **Тема 1.4. Диаграммы состояния металлов и сплавов**

### План

1. Понятие о сплавах
2. Классификация и структура металлов и сплавов
3. Основные равновесные диаграммы состояния двойных сплавов
4. Свойства железа и углерода
5. Структурные составляющие железоуглеродистых сталей
6. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов
7. Влияние легирующих элементов на равновесную структуру сталей

### • 1

Характерной особенностью металлов является их способность образовывать друг с другом или с неметаллами сплавы. Сплавы имеют более разнообразные свойства по сравнению с металлами, поэтому в промышленности редко используют чистые металлы. Сплавы являются главными конструкционными материалами. Современная техника использует огромное число сплавов, причем в подавляющем большинстве случаев они состоят не из двух, а из трех, четырех и большего числа металлов. Интересно, что свойства сплавов часто резко отличаются от свойств индивидуальных металлов, которыми они образованы. Так, сплав, содержащий 50% висмута, 25% свинца, 12,5% олова и 12,5% кадмия, плавится всего при 60,5 градусах Цельсия, в то время как компоненты сплава имеют соответственно температуры плавления 271, 327, 232 и 321 градус Цельсия. Твердость оловянной бронзы (90% меди и 10% олова) втрое больше, чем у чистой меди, а коэффициент линейного расширения сплавов железа и никеля в 10 раз меньше, чем у чистых компонентов.

Среди свойств сплавов наиболее важными для практического применения являются жаропрочность, коррозионная стойкость, механическая прочность и др. Для авиации большое значение имеют легкие сплавы на основе магния, титана или алюминия, для металлообрабатывающей промышленности - специальные сплавы, содержащие вольфрам, кобальт, никель. В электронной технике применяют сплавы, основным компонентом которых является медь. Сверхмощные магниты удалось получить, используя продукты взаимодействия кобальта, самария и других редкоземельных элементов, а сверхпроводящие при низких температурах сплавы - на осно-

ве интерметаллидов, образуемых ниобием с оловом и др. В наше время создаются сплавы с заранее заданными необходимыми свойствами.

Чтобы получить сплав, смесь металлов обычно подвергают плавлению, а затем охлаждают с различной скоростью, которая определяется природой компонентов и изменением характера их взаимодействия в зависимости от температуры. Иногда сплавы получают спеканием тонких порошков металлов, не прибегая к плавлению (порошковая металлургия). Итак, *сплавы* - это продукты химического взаимодействия металлов.

Кристаллическая структура сплавов во многом подобна чистым металлам, которые, взаимодействуя друг с другом при плавлении и последующей кристаллизации, образуют: а) химические соединения, называемые интерметаллидами; б) твердые растворы; в) механическую смесь кристаллов компонентов.

Тот или иной тип взаимодействия определяется соотношением энергии взаимодействия разнородных и однородных частиц системы, то есть соотношением энергий взаимодействия атомов в чистых металлах и сплавах.

По своей внутренней кристаллической структуре сплавы бывают разными: растворами, смесями или соединениями. Если атомы одного металла замещают атомы другого в узлах кристаллической решетки, то образуются твердые растворы. Это возможно, если размеры атомов отдельных металлов были близки, а типы кристаллических решеток совпадают. Примером такого сплава является мельхиор - сплав меди и никеля.

Механические смеси состоят из кристаллов металлов. Если при сплавлении металлы взаимодействуют друг с другом, то образуются интерметаллические соединения. Большинство сплавов по своей структуре являются неоднородными, некоторые сплавы являются однородными (например, латунь - сплав меди и цинка).

## • 2

*Металлами* называются вещества, атомы которых располагаются в определенном геометрическом порядке, образуя при этом кристаллы. Им присущ специфический металлический блеск. Кроме того, металлы обладают хорошей пластичностью, высокой теплопроводностью и электропроводностью. Это дает возможность обрабатывать их под давлением (прокатка, ковка, штамповка, волочение). Металлы обладают хорошими литейными свойствами, а также свариваемостью, способны работать при низких и высоких температурах. Металлические изделия и конструкции легко соединяются с помощью болтов, заклепок и сварки. Наряду с этим металлы обладают и существенными недостатками: имеют большую плотность, при действии различных газов и влаги корродируют, а при высоких температурах значительно деформируются.

Существует такое определение как «чистый металл» оно весьма условно. Так как любой чистый металл содержит примеси, а потому его следует рассматривать как сплав. Под термином «чистый металл» всегда понимается металл, содержащий примеси 0,01–0,001 %. Современная металлургия позволяет получать металлы высокой чистоты (99,999 %). Однако примеси даже в малых количествах могут оказывать существенное влияние на свойства металла.

Чистые металлы обладают высокой пластичностью и низкой прочностью, что не обеспечивает требуемых физико-химических и технологических свойств. Поэто-

му их применение в строительстве и технике в качестве конструкционных материалов сильно ограничено. Наиболее широко используют сплавы, обладающие более высокой прочностью, твердостью и износостойкостью и т. д.

*Сплавы* – это системы, состоящие из нескольких металлов или металлов и неметаллов. Все металлы и образованные из них сплавы делят на две группы: черные и цветные (рисунок 11).

К *черным металлам* относятся железо и сплавы на его основе – стали и чугуны, остальные металлы являются цветными. В строительстве в основном применяют черные металлы – чугуны и стали для каркасов зданий, мостов, труб, кровли, арматуры в бетоне и для других металлических конструкций и изделий.

К *цветным металлам* относятся все металлы и сплавы на основе алюминия, меди, цинка, титана. Цветные металлы являются более дорогостоящими и дефицитными.

Чугун получают в ходе доменного процесса, основанного на восстановлении железа из его природных оксидов коксом при высокой температуре. Процесс восстановления железа оксидом углерода в верхней части доменной печи можно представить по обобщенной схеме:  $Fe_2O_3 > Fe_3O_4 > FeO > Fe$ . Опускаясь в нижнюю часть печи, расплавленное железо соприкасается с коксом и превращается в чугун.

Чугуны в зависимости от состава и структуры подразделяются на серые (углерод в виде цементита и свободного графита) и белые (углерод в виде цементита). В зависимости от формы графита и условий его образования различают: серый, высокопрочный и ковкий чугуны. Стали можно подразделить на две основные группы – углеродистые и легированные.

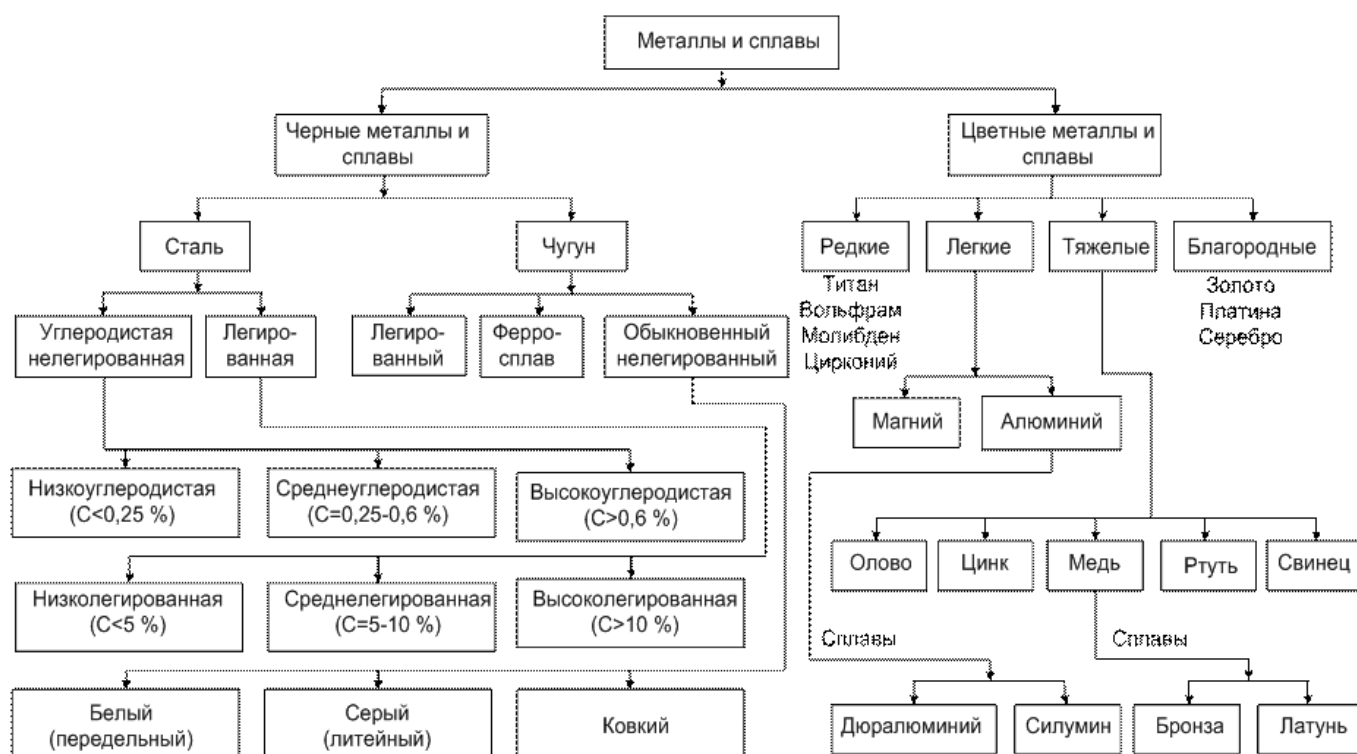


Рисунок 11. Классификация металлов и сплавов

Углеродистые стали – основной конструкционный материал, который используется в различных областях промышленности. Они дешевле легированных и проще в производстве. В углеродистой стали свойства зависят от количества угле-

рода, поэтому эти стали классифицируются на низкоуглеродистые, средне- и высокоуглеродистые.

Легированные стали содержат специально вводимые элементы для получения заданных свойств. По степени легированности стали подразделяются на низколегированные, средне- и высоколегированные.

Классификация сталей по качеству основывается на содержании вредных примесей серы и фосфора. Различают углеродистую сталь обыкновенного качества, сталь качественную конструкционную и сталь высококачественную.

По назначению стали подразделяются на три группы: конструкционные, инструментальные и с особыми свойствами. Конструкционные углеродистые стали содержат углерод в количестве 0,02 – 0,7 мас.%, к ним относятся и строительные стали, содержащие до 0,3 мас.% углерода. Низкое содержание углерода обусловлено тем, что строительные конструкции соединяются сваркой, а углерод ухудшает свариваемость. Стали, содержащие углерод в пределах 0,7 – 1,5 мас.%, используют для изготовления режущего и ударного инструмента. К группе сталей и сплавов с особыми свойствами относятся коррозионностойкие, нержавеющие и кислотоупорные, жаропрочные и жаростойкие стали и т.д.

Различают черные и цветные сплавы. *Черными сплавами* называют сплавы на основе железа. К ним относятся чугун и сталь. Чугуном называют сплав железа с углеродом с массовой долей углерода больше 1,7%. Чаще чугун содержит от 2,6% до 3,6% углерода. Кроме углерода, в чугуне является кремний, марганец, сера, фосфор и другие компоненты. Чугун - твердый и хрупкий материал. Его широко применяют в машиностроении для изготовления различных деталей. Сталь содержит менее 1,7% углерода. В отличие от чугуна сталь ковкая.

По назначению различают машиностроительную (конструкционную) и инструментальную стали. Сталь и чугун являются важнейшими сплавами современной техники. Объемы производства этих железоуглеродистых сплавов превышают производство всех других металлов вместе взятых более чем в десять раз. Алюминиевые сплавы легкие, имеют высокие электро-и теплопроводность, коррозионную стойкость, прочность. Их применяют как конструкционные материалы в авиации, строительстве, машиностроении, электротехнике. Сплавам на основе магния присущи легкость, прочность, коррозионная стойкость, поэтому их используют в автомобилестроении, для изготовления штампованных изделий сложной формы. Титановые сплавы применяют в авиации, ракетостроении для изготовления химической аппаратуры, а также в медицине. Медные сплавы прочны, имеют высокую электропроводность, коррозионную стойкость, пластичность. Из них изготавливают трубы, различные аппараты и детали, художественные изделия и скульптуры.

• 3

Диаграмма состояния представляет собой графическую зависимость между фазовым составом, температурой и концентрацией составляющих сплав компонентов. Она позволяет определять температуры плавления и затвердевания, структуры сплавов при разных температурах в условиях равновесия и те процессы, которые претерпевают сплавы при охлаждении и нагревании. По вертикальной оси диаграммы откладывают температуру, по горизонтальной — концентрацию компонентов в сплаве.

Диаграммы состояния металлических сплавов строят на основании изучения их методами термического, микроскопического, рентгеноструктурного анализа.

Термический анализ является основным методом для определения температур начала и конца затвердевания сплавов и превращений, происходящих в твердом состоянии. Этот метод позволяет проследить изменения температуры охлаждаемого сплава во времени.

При помощи термопары через определенные промежутки времени отмечают наблюдаемую температуру сплава. На основании полученных данных строят кривые охлаждения и нагревания в координатах температура — время и по перегибам и остановкам на них, вызванным тепловым эффектом превращения, определяют температуры превращения — критические точки.

По диаграммам состояния можно установить связь структуры сплава с его механическими и технологическими свойствами, а также назначить режим термической обработки и температурный интервал проведения горячей обработки металлов давлением.

В качестве примера рассмотрим диаграмму состояния первого типа, характеризующую такие сплавы, компоненты которых в жидком состоянии полностью взаимно растворимы, а в твердом — нерастворимы и при этом образуют механические смеси.

*Диаграмма состояния первого типа.* По этому типу диаграммы состояния кристаллизуются такие двойные сплавы, как свинец — сурьма (Pb—Sb), олово — цинк (Sn—Zn). Температура плавления свинца равна  $327^{\circ}\text{C}$ , то есть при этой температуре свинец из твердого состояния переходит в жидкое. Температура плавления сурьмы равна  $631^{\circ}\text{C}$ . Если взять сплавы Pb—Sb различного состава с постепенно увеличивающимся содержанием сурьмы (5% Sb — 95% Pb, 13% Sb — 87% Pb, 40% Sb — 60% Pb) и медленно их охлаждать, то получатся кривые охлаждения, представленные на рисунке 12.

Кривые охлаждения показывают, что сплавы в отличие от чистых металлов имеют две критические точки: температуру начала и температуру конца кристаллизации.

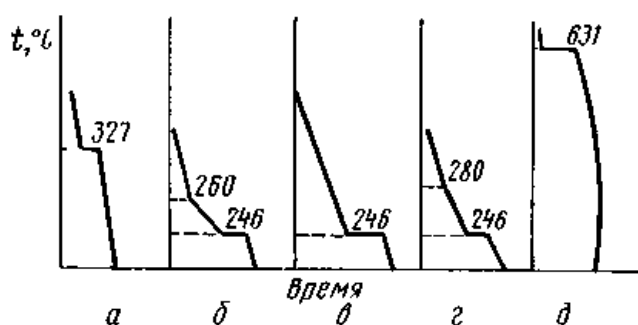


Рисунок 12. Кривые охлаждения: а — чистого свинца, б — сплава, содержащего 5 % сурьмы и 95 % свинца; в — сплава, содержащего 13% сурьмы и 87% свинца, г — сплава, содержащего 40 % сурьмы и 60 % свинца, д — чистой сурьмы

При нижней критической температуре ( $246^{\circ}\text{C}$ ) все сплавы Pb — Sb окончательно затвердевают. При верхних критических температурах, которые для разных по составу сплавов неодинаковы, происходит только начало затвердевания сплава (начало перехода из жидкого состояния в твердое).

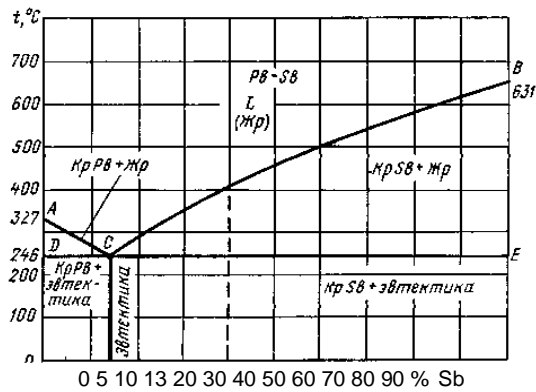


Рисунок 13. Диаграмма состояния сплавов свинец-сурьма

При этом в зависимости от процентного содержания Pb и Sb в сплавах в момент начала затвердевания начинает кристаллизоваться либо Pb, либо Sb (это зависит от того, каким из указанных металлов пересыщен сплав данного состава при соответствующей температуре).

При соединении точек начала и конца затвердевания кривых охлаждения получается диаграмма состояния сплавов свинца и сурьмы (рисунок 13).

Выше линии *ACB* все свинцово-сурьмистые сплавы находятся в жидком состоянии. Линия *ACB* соответствует началу затвердевания сплавов и называется линией ликвидуса (ликвидус — «жидкий»). Линия *OCE* соответствует концу затвердевания сплавов и называется линией солидуса (солидус — «твердый»). Ниже этой линии все сплавы находятся в твердом состоянии.

По линии *AC* из сплавов, содержащих менее 13% сурьмы, начинает кристаллизоваться чистый свинец, по линии *CB* из сплавов, содержащих более 13% сурьмы, начинает кристаллизоваться чистая сурьма.

В точке *C*, отвечающей составу 13% Sb и 87% Pb, одновременно кристаллизуются и свинец и сурьма с образованием тонкой механической смеси кристаллов Sb и Pb. Такая структура называется эвтектикой. Сплав, соответствующий точке *C*, называется *эвтектическим* и характеризуется самой низкой температурой плавления по сравнению со всеми сплавами Pb—Sb. Сплавы, по составу лежащие левее точки *C*, называются *доэвтектическими*, а правее — *заэвтектическими*.

Рассмотрим процессы кристаллизации доэвтектического сплава, содержащего 5% Sb, и заэвтектического, содержащего 40% Sb.

Доэвтектический сплав выше линии ликвидуса *AC* находится в жидком состоянии. Когда сплав при охлаждении достигает линии *AC*, начинают образовываться кристаллы чистого свинца. Процесс продолжается до температуры 246 °C (линия *DCE*). При этом в жидкой части сплава будет возрастать содержание сурьмы и при достижении эвтектической температуры 246 °C жидкая часть сплава, соответствующая по составу точке *C* (13% Sb + 87% Pb), затвердевает, образуя эвтектику, состоящую из кристаллов Sb и Pb. Аналогично происходит затвердевание всех доэвтектических сплавов. Ниже линии солидуса (246°C) сплавы имеют структуру, которая состоит из кристаллов свинца, выделившегося в интервале температур от линии ликвидуса до линии солидуса, и эвтектики, образовавшейся при окончательном затвердевании сплавов на линии солидуса.

Заэвтектический сплав с содержанием 40% Sb выше линии ликвидуса *CB*

находится в жидком состоянии, и, когда он при охлаждении достигает линии  $CB$ , образуются кристаллы сурьмы, которые продолжают выделяться до линии  $CE$  ( $246^\circ\text{C}$ ). В интервале температур между линиями ликвидус и солидус количество кристаллов  $Sb$  непрерывно растет, а жидкая часть сплава меняет свой состав; при температуре  $246^\circ\text{C}$  жидкая часть сплава имеет состав, соответствующий точке  $C$  ( $13\% Sb + 87\% Pb$ ), и кристаллизуется с образованием эвтектики. Аналогично затвердевают все заэвтектические сплавы. Только один сплав этой системы — сплав с эвтектической концентрацией ( $13\% Sb + 87\% Pb$ ) затвердевает при одной и той же температуре ( $246^\circ\text{C}$ ) с образованием структуры, состоящей только из эвтектики без избыточных кристаллов чистого компонента.

*Диаграмма состояния второго типа.* К диаграмме состояния второго типа относятся сплавы, которые характеризуются полной взаимной растворимостью компонентов как в жидком, так и в твердом состоянии. Полной взаимной растворимостью обладают такие сплавы системы: медь — никель, железо — никель, кобальт — хром.

На рисунке 14 показана диаграмма состояния сплавов  $Cu-Ni$ . Температура плавления чистой меди  $1083^\circ\text{C}$ , а никеля —  $1455^\circ\text{C}$ . При температурах, лежащих выше кривой  $ACB$  (линия ликвидуса), все сплавы находятся в жидком состоянии, при температурах ниже кривой  $AOB$  (линия солидуса) — в твердом. Между линиями ликвидуса и солидуса сплавы находятся частично в виде твердых кристаллов и частично в виде жидкого сплава.

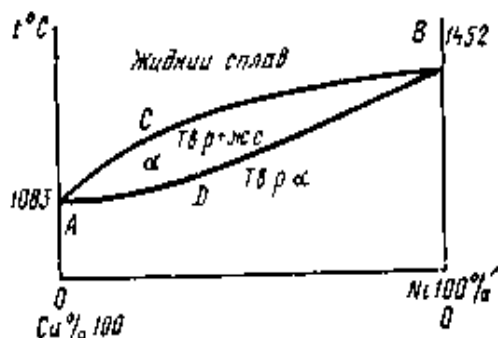


Рисунок 14. Диаграмма состояния сплавов медь-никель

В процессе охлаждения образовавшиеся в начале кристаллизации кристаллы богаты тугоплавким элементом никеля. При дальнейшем охлаждении в эти кристаллы диффундирует из жидкого сплава медь, а вновь образовавшиеся кристаллы содержат больше меди и меньше никеля. В результате диффузии концентрация сплава выравнивается. Диффузия происходит тем полнее, чем медленнее охлаждение.

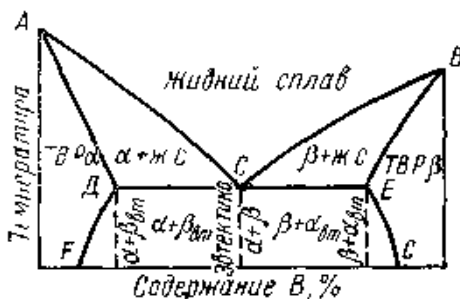


Рисунок 15. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной растворимостью

В практических условиях, если сплавы охлаждаются довольно быстро и состав кристаллов не успевают выравниваться, различные места кристалла имеют неодинаковый состав. Такая химическая неоднородность называется *дендритной*, или *внутрикристаллической, ликвацией*. Установлено, что чем больше интервал между ликвидусом и солидусом сплава, тем больше дендритная ликвация сплава. Ликвацию можно устранить отжигом при температуре 0,8...0,9 температуры плавления.

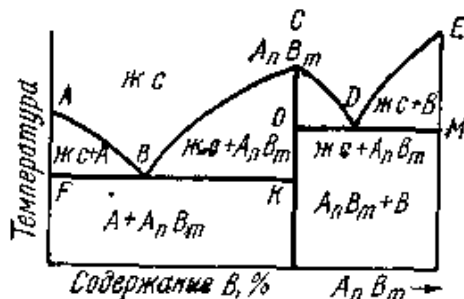


Рисунок 16. Диаграмма состояния сплавов с образованием химических соединений

Диаграмма состояния третьего типа. Она характеризует сплавы, в которых два металла в жидком состоянии обладают полной растворимостью, а в твердом состоянии — ограниченной (рисунок 15). К этим сплавам относятся: медь — серебро, олово — свинец, алюминий — кремний и др.

*Диаграмма состояния четвертого типа.* Она характеризует сплавы, в которых компоненты неограниченно растворимы в жидком состоянии, совершенно нерастворимы в твердом и при затвердевании образуют химические соединения. Это сплавы магний — кальций, магний — олово, марганец — кремний (рисунок 16).

• 4

Железо — серебристый металл с температурой плавления 1539 °С. Химически чистое железо, без примесей, получить чрезвычайно трудно. Техническое железо всегда содержит ряд элементов, которые попадают в него непроизвольно при производстве или вводятся специально для придания особых свойств.

В твердом состоянии железо может находиться в двух модификациях: Fe $\alpha$  (объемно-центрированная кубическая решетка) и Fe $\gamma$  (граноцентрированная кубическая решетка). Кристаллические решетки, приведенные на кривой охлаждения железа (рисунок 17), характеризуют аллотропические превращения. Остановка при 1539 °С связана с первичной кристаллизацией железа. При этом образуется  $\delta$ -железо с кристаллической решеткой объемно-центрированного куба (высокотемпературную  $\alpha$ -модификацию обозначают буквой  $\delta$ ). При 1392 °С решетка объемно-центрированного куба превращается в граноцентрированную решетку, период которой при 911 °С (образуется  $\gamma$ -железо). В интервале 1392...911 °С железо находится в аллотропической форме Fe $\gamma$ . При температуре 911 °С граноцентрированная решетка Fe $\gamma$  превращается в объемно-центрированную решетку Fe $\alpha$ . Ниже этой температуры решетка железа объемно-центрированная. Площадка на кривой охлаждения при 768 °С (точка Кюри) указывает не на перестройку решетки, а на возникновение магнитных свойств в железе: выше 768 °С железо немагнитно, ниже 768 °С магнитно.



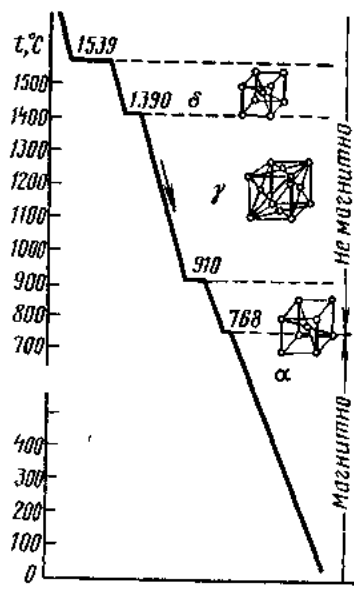


Рисунок 17. Кривая охлаждения железа

Изменение строения кристаллической решетки железа влечет за собой изменение некоторых его свойств (например,  $Fe\alpha$  почти не растворяет углерод, а  $Fe\gamma$  растворяет до 2,14 %). Аллотропические превращения всегда сопровождаются выделением теплоты при охлаждении и поглощением скрытой теплоты при нагревании.

Углерод в природе существует в двух модификациях — в виде графита и алмаза.

При нормальных условиях стабилен графит, алмаз представляет собой его метастабильную модификацию.

Углерод в железоуглеродистых сплавах присутствует или в виде графита в структуре чугунов, или в виде химического соединения карбида железа  $Fe_3C$  (цементит). Углерод является неметаллическим элементом.

• 5

Важным свойством железоуглеродистых сплавов является то, что они в зависимости от содержания углерода, температуры нагрева и скорости охлаждения способны иметь разные структуры. Изменяя структуру, можно получить самые различные физико-механические свойства сплавов.

Способность сплавов образовывать различные структуры основана на том, что твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе, называемый аустенитом, весьма неустойчив и может существовать преимущественно при высоких температурах. При охлаждении аустенит распадается и в зависимости от скорости охлаждения превращается в иные структуры.

При медленном охлаждении в результате распада аустенита образуются феррит, цементит, из которых получают перлит, ледебурит. При особых условиях, например при высоком содержании кремния, образуется свободный графит (углерод отжига).

*Аустенит* — твердый раствор внедрения углерода в  $\gamma$ -железе с гранецентрированной кубической решеткой. Максимальная растворимость углерода при  $1147^\circ C$  составляет 2,14%. С понижением температуры растворимость углерода уменьшается и при  $727^\circ C$  составляет 0,8%. Под микроскопом он имеет вид светлых зерен с двойными линиями. Аустенит обладает большой вязкостью, хорошей сопро-

тивляемостью истиранию, химической стойкостью и твердостью HB 170...220.

*Феррит* — твердый раствор внедрения углерода в  $\alpha$ -железе с предельной концентрацией 0,02% при 727°C и 0,006% — при нормальной температуре. Он имеет объемно-центрированную кубическую решетку и ферромагнитен до 768 °С. Микроструктура состоит из светлых зерен различного размера. Феррит имеет твердость HB 80, он пластичен. Пластичность феррита зависит от размера зерна: чем мельче зерна, тем пластичность выше.

*Цементит* — химическое соединение железа с углеродом ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), содержащее 6,67% С. Он имеет сложную орторомбическую решетку и обладает высокой твердостью (HB 800) и хрупкостью, пластичность его близка к нулю. До температуры 217°C (точка Кюри) цементит ферро-магнитен, а при более высоких температурах парамагнитен. Под микроскопом цементит обнаруживается в виде светлых округлых скоплений, залегающих на стыке ферритовых зерен, или в виде сетки. При медленном нагревании и выдержке при высокой температуре он распадается, выделяя свободный углерод в виде графита по реакции  $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}$ . Температура плавления цементита — около 1250°C.

*Перлит* — эвтектоидная смесь зерен цементита и феррита, соответствующая полному распаду твердого раствора аустенита и содержащая 0,8% С. Цементит в перлите может находиться в виде зерен и пластинок, его механические свойства зависят от степени измельчения и формы.

*Ледебурит* — эвтектическая смесь, состоящая в момент образования из цементита и аустенита, предельно насыщенного углеродом. Аустенит при 727 °С превращается в перлит, и при нормальной температуре ледебурит состоит из смеси перлита и цементита. Твердость ледебурита HB 700, он очень хрупкий и содержит 4,3 % С. Ледебурит характерен для структуры белых чугунов.

## • 6

Железо и углерод при определенных концентрациях и температурах способны образовывать механические смеси, химические соединения и твердые растворы, поэтому диаграмма железоуглеродистых сплавов имеет сложный характер. В ней одновременно встречаются комбинации из ранее рассмотренных типов диаграмм двойных сплавов.

На диаграмме состояния (рисунок 18) представлены две системы сплавов. Система Fe— $\text{Fe}_3\text{C}$  называется неустойчивой (метастабильной) в связи с тем, что цементит представляет собой неустойчивое соединение, способное при нагреве распасться. Она показана сплошными линиями и характеризует стали и белые чугуны — сплавы «со связанным» углеродом.

Система Fe—C (стабильная) показана пунктирными линиями и характеризует сплавы, в которых углерод находится в свободном состоянии (графит).

При изучении превращений, происходящих в сталях и белых чугунах, пользуются диаграммой Fe— $\text{Fe}_3\text{C}$ , а при изучении серых чугунов — обеими диаграммами (Fe— $\text{Fe}_3\text{C}$  и Fe—C). В практике термообработки черных, металлов пользуются диаграммой Fe— $\text{Fe}_3\text{C}$ .

На диаграмме по оси ординат отложены температуры, а по оси абсцисс — содержание углерода в сплавах в процентах до 6,67%, то есть до концентрации второго компонента системы — цементита. Рассматриваемая диаграмма охватывает

только сплавы, содержащие до 6,67%, так как сплавы с большим содержанием углерода в практике применения не находят.

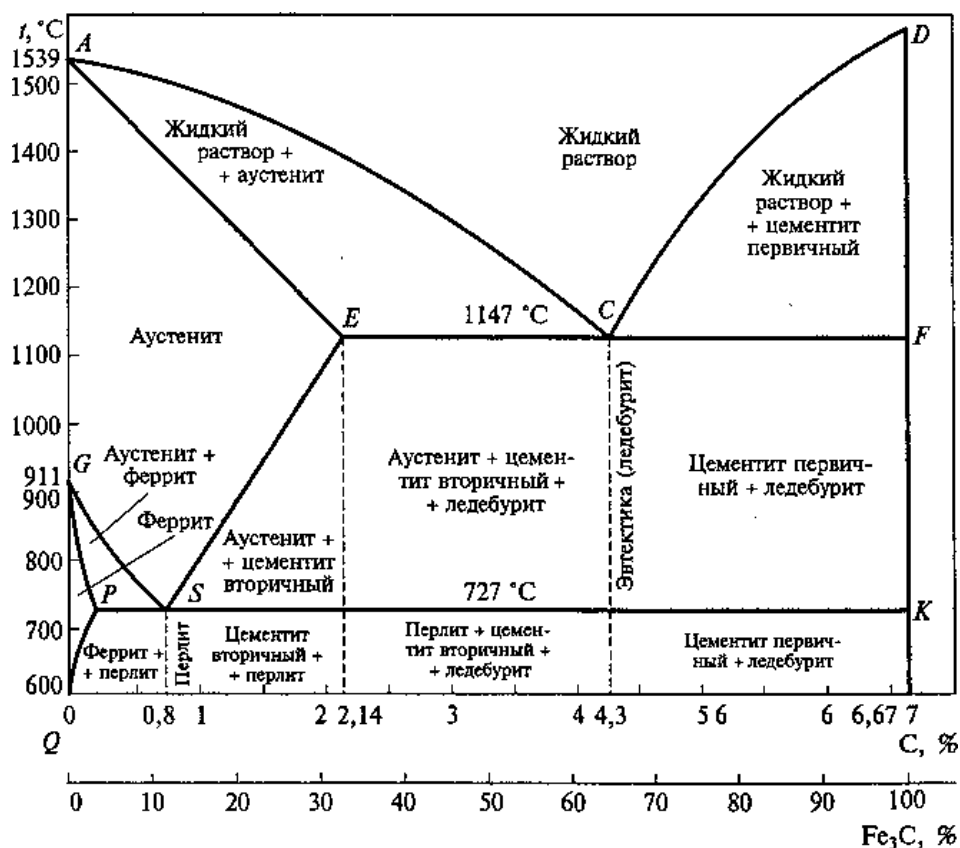


Рисунок 18. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов (в упрощенном виде)

Точка *A* соответствует температуре плавления (затвердевания) чистого железа (1539°C), точка *D* — температуре плавления цементита (~1250°C).

По характеру превращения сплавов с изменением температуры всю диаграмму можно разбить на две части: верхнюю, охватывающую первичную кристаллизацию сплавов, от линии ликвидуса *ACD* до линии солидуса *AECF*; нижнюю, охватывающую вторичную кристаллизацию сплавов и образование определенных структур, от линии солидуса до полного охлаждения.

Выше линии ликвидуса *ACD* сплавы любой концентрации находятся в жидком состоянии. Линия солидуса *AECF* показывает температуру затвердевания сплавов, на ней заканчиваются процессы первичной кристаллизации. Между линией солидуса и линией *PSK* проходят процессы вторичной кристаллизации сплавов.

**Первичная кристаллизация сплавов.** Область *ACE* охватывает сплавы, содержащие до 4,3% *C*. По линии *AC* из жидкого расплава выделяются кристаллы твердого раствора углерода в  $\gamma$ -железе (аустенит). На линии *AE* заканчивается кристаллизация сплавов, содержащих до 2,14% *C*, и образуется только аустенит. Между линиями *AC* и *AEC* сплавы имеют двухфазное состояние: кристаллы  $Fe_\gamma$ , изменяющие свой состав по линии *AE*, и жидкий сплав, изменяющий свой состав по линии *AC*. При температуре 1147°C в аустените содержится 2,14% *C* (точка *E*), а в жидкой части сплава — 4,3% *C* (точка *C*).

Сплав, содержащий 4,3% *C*, выделяется среди других сплавов системы: он затвердевает не в интервале температур (ликвидус и солидус), как другие сплавы, а

при одной температуре ( $1147^{\circ}\text{C}$ , точка  $C$ ), образуя только эвтектику (ледебурит) без избыточных фаз.

Линия  $DC$  показывает начало выделения из жидкого сплава кристаллов первичного цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$  в интервале от линии ликвидуса  $D C$  до линии солидуса  $CF$  сплавы имеют двухфазное состояние: кристаллы цементита и жидкий сплав, состав которого изменяется по линии  $D C$  до концентрации  $4,3\%$   $C$ . На линии  $CF$  кристаллизация сплавов заканчивается образованием эвтектики.

По структурным составляющим, полученным в результате первичной кристаллизации, все сплавы системы  $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$  делятся на стали — сплавы, содержащие до  $2,14\%$   $C$ , в которых не образуется ледебурита, и чугуны (белые) — сплавы, содержащие от  $2,14$  до  $6,67\%$   $C$ , в которых образуется ледебурит.

*Вторичная кристаллизация сплавов.* Превращения, происходящие в сплавах в твердом состоянии при температурах ниже линии солидуса, называются вторичной кристаллизацией. В сталях на участке между линиями  $AE$  и  $GSE$  все сплавы находятся в однофазном состоянии и имеют структуру аустенита.

Сталь, содержащая  $0,8\%$   $C$ , при температуре  $727^{\circ}\text{C}$  (точка  $S$ ) претерпевает эвтектоидное превращение: из аустенита образуется смесь феррита и цементита (перлит). При нормальной температуре сталь имеет перлитную структуру. Эвтектоидное превращение называется аллотропическим ( $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$ ). Эвтектоидная сталь ( $0,8\%$   $C$ ) стоит на границе между доэвтектоидными сталями (до  $0,8\%$   $C$ ) и заэвтектоидными ( $0,8...2,14\%$   $C$ ). В доэвтектоидных сталях при охлаждении линия показывает начало выделения из аустенита кристаллов феррита вследствие превращения  $\text{Fe}_\gamma$  в  $\text{Fe}_\alpha$ . В результате вторичной кристаллизации и полного охлаждения доэвтектоидные стали имеют структуру, состоящую из феррита и перлита. В заэвтектоидных сталях по линии  $ES$  из аустенита выделяются кристаллы вторичного цементита  $\text{Fe}_3\text{C}_{II}$ . На линии  $SK$  ( $727^{\circ}\text{C}$ ) аустенит превращается в перлит и структура состоит из перлита и свободных кристаллов вторичного цементита.

Сплавы, содержащие  $2,14...6,67\%$   $C$ , ниже линии  $ECF$  ( $1147^{\circ}\text{C}$ ) находятся в двухфазном состоянии: аустенит и цементит. Аустенит по линии  $ESP$  имеет максимальную концентрацию углерода —  $2,14\%$ . При охлаждении ниже линии  $ECF$  вследствие понижения растворимости углерода из аустенита выделяется вторичный цементит. При температуре  $727^{\circ}\text{C}$  в аустените остается  $0,8\%$   $C$  и он превращается в перлит.

По диаграмме состояния различают белые чугуны трех типов: эвтектический чугун, содержащий  $4,3\%$   $C$ , со структурой из эвтектики (ледебурит) без наличия избыточных фаз; доэвтектические чугуны, содержащие  $2,14...4,3\%$   $C$ , со структурой ледебурита, перлита и  $\text{Fe}_3\text{C}_{II}$

Заэвтектические чугуны, содержащие  $4,3...6,67\%$   $C$ , со структурой ледебурита и  $\text{Fe}_3\text{C}_{I}$ .

Цементит, находящийся в чугуне, придает излому характерный белый цвет, отсюда и произошло название чугунов. Они обладают высокой твердостью, хрупкостью и поэтому редко применяются, за исключением доэвтектических белых чугунов, содержащих  $2,5...3,2\%$   $C$ , которые используют для получения ковких чугунов.

На механические, физические и химические свойства стали большое влияние оказывают присадки легирующих элементов: хрома, вольфрама, молибдена, ванадия, титана и др. Большинство специальных примесей и углерод повышают прокаливаемость стали, так как увеличивают устойчивость аустенита и замедляют процесс распада его при охлаждении. Легирующие элементы по-разному влияют на свойства стали.

*Кремний* в пределах 0,3...0,5 % является полезной примесью. Он раскисляет сталь и, растворяясь в феррите, повышает его упругость и жесткость. *Кремний* способствует получению более однородной структуры, положительно сказывается на упругих характеристиках стали. Кремний способствует магнитным превращениям, а при содержании его в количестве 15...20 % придает стали кислотоупорность.

*Марганец* в пределах 0,25...0,8 % тоже полезен. Он, растворяясь в феррите, упрочняет его, образуя карбид  $Mn_3C$ , повышает механические свойства стали, увеличивает ее прокаливаемость и устраняет вредное действие серы. *Марганец* повышает прочность, износостойкость, а также глубину прокаливаемости стали при термической обработке. *Хром* повышает твердость, прочность, а при термической обработке увеличивает глубину прокаливаемости, положительно сказывается на жаропрочности, жаростойкости, повышает коррозионную стойкость. *Никель* действует так же, как и марганец. Кроме того, он повышает электросопротивление и снижает значение коэффициента линейного расширения.

*Вольфрам* уменьшает величину зерна, повышает твердость и прочность, улучшает режущие свойства при повышенной температуре.

*Молибден* действует аналогично вольфраму, а также повышает коррозионную стойкость.

Концентрация некоторых легирующих элементов может быть очень малой. В количестве до 0,1 % вводят Nb, Ti, а содержание бора обычно не превышает 0,005 %. Легирование стали, когда концентрация элемента составляет около 0,1 % и менее называют микролегированием.

*Сера* — вредная примесь, так как сернистое железо FeS образует с железом легкоплавкую (988°C) эвтектику и приводит к красноломкости стали, то есть повышенной хрупкости в горячем состоянии при ковке и прокатке. Она понижает сопротивляемость стали истиранию и усталостному разрушению, а также химическую стойкость. Содержание серы в сталях обыкновенного качества не более 0,05%, а в высококачественных — 0,03%.

*Фосфор* — вредная примесь, которая резко увеличивает хрупкость стали при нормальной температуре. Это явление, называемое хладноломкостью, возникает в результате того, что фосфор, растворяясь в феррите, существенно увеличивает его хрупкость. Он также снижает ударную вязкость стали. Содержание фосфора в сталях обыкновенного качества не должно превышать 0,05 %, а в высококачественных — 0,03 %. *Азот и кислород* образуют в сталях неметаллические включения (нитриды, оксиды), которые уменьшают ударную вязкость стали и резко повышают порог хладноломкости. *Водород* не образует соединений с железом, поэтому он может выделяться из металла. Однако если водорода много в стали, то это может привести к чрезвычайно опасным внутренним надрывам в металле (флокенам).

Основное влияние большинства специальных примесей и углерода заключа-

ется в том, что они снижают критическую скорость охлаждения и при определенном содержании могут вызвать закалку даже при охлаждении на воздухе.

При сварке большинства легированных сталей вероятность образования мартенсита в наплавленном металле и в зоне термического влияния весьма высока, потому что отвод тепла от металла шва к металлу зоны термического влияния происходит значительно быстрее, чем отвод тепла в окружающий воздух. Это является одним из основных затруднений при сварке легированных сталей.

### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Какие сплавы называют двойными?
2. Что называют системой сплавов данных компонентов?
3. В каких координатах строится диаграмма состояния двойных сплавов?
4. Какое практическое значение имеет знание критических точек всех сплавов данной системы?
5. Что характеризуют линии ликвидуса и солидуса и как они строятся?
6. Какой сплав называют эвтектическим? Особенности кристаллизации этого сплава, его структура после затвердевания.
7. Какую структуру и свойства имеют двойные сплавы - механические смеси, твёрдые соединения и химические соединения?
8. Как строятся диаграммы состояния двойных сплавов?
9. В каких модификациях может находиться железо в твердом состоянии?
10. Когда железо магнитно?
11. В каких модификациях существует углерод в природе?
12. Что является важным свойством железобуглеродистых сплавов?

## **Тема 1.5. Термическая и химико-термическая обработка металлов и сплавов**

### План

1. Превращения в металлах и сплавах при нагреве и охлаждении
2. Классификация видов термической обработки стали
3. Основное оборудование для термической обработки металлов
4. Поверхностная закалка сталей
5. Дефекты термической обработки и методы их предупреждения и устранения
6. Определение и классификация основных видов химико-термической обработки металлов и сплавов
7. Диффузионное насыщение сплавов металлами и неметаллами

### • 1

Превращения в металлах и сплавах в твердом состоянии по своей физической сущности во многом напоминают кристаллизацию жидких металлов. Эти превращения называют фазовой перекристаллизацией, а при их исследованиях используют те же подходы в отношении механизмов и кинетики формирования новой фазы, включая образование зародышей и последующий их рост.

В чистых металлах основными превращениями в твердом состоянии являются аллотропические (полиморфные), а также магнитные превращения. В сплавах

превращения в твердом состоянии дополняются целым рядом превращений, таких как эвтектоидное, перитектоидное, растворение и выделение избыточных фаз и др.

*Аллотропическим* (полиморфным) превращением называют изменение пространственной решетки кристаллического тела. Аллотропическое превращение заключается в том, что атомное строение кристаллического тела изменяется при нагреве и охлаждении при переходе через критическую точку. Сам процесс перестройки кристаллической решетки происходит изотермически при постоянной температуре, кривая охлаждения сплава претерпевающая аллотропические превращения, аналогична кривой, наблюдаемой при затвердевании жидкого металла. Температура перехода называется критической точкой превращения.

Аналогично процессу кристаллизации аллотропическое превращение идет с поглощением тепла при нагреве и выделением его при охлаждении. Аллотропическое превращение (также по аналогии с процессом кристаллизации) происходит путем образования зародышей и их последующего роста, в связи с чем оно протекает всегда с наличием переохлаждения (при охлаждении) и перенагрева при нагреве.

В процессах кристаллизации основным препятствием образования твердых кристаллов являются затраты энергии на образование границы раздела фаз. Это вызывает необходимость переохлаждения для начала процесса кристаллизации.

При аллотропическом превращении кроме энергии, затрачиваемой на образование границы раздела фаз, необходимы дополнительные затраты энергии на преодоление упругого сопротивления твердой фазы, связанные с тем, что полиморфные превращения всегда приводят к изменением объема. Поскольку затраты энергии для образования зародышей при аллотропическом превращении больше, чем при кристаллизации из жидкого состояния, то переохлаждение при превращениях в твердом состоянии должны быть гораздо больше, чем при кристаллизации. Аллотропические превращения могут протекать по двум механизмам:

- 1) диффузионным (нормальным) путем;
- 2) бездиффузионным (мартенситным) путем.

В отдельных металлах эти превращения могут протекать как по одному, так и по другому механизму, что будет зависеть от скорости охлаждения.

*Диффузионный* механизм аллотропического превращения заключается в том, что атомы, располагающиеся в решетке высокотемпературной модификации путем диффузионного перемещения, занимают новые места, характерные для новой аллотропической формы: низкотемпературной модификации.

Следовательно, развитие диффузионного механизма аллотропического превращения наиболее благоприятно при высоких температурах, обеспечивающих большую скорость диффузионного перемещения атомов. Кроме того, если температура превращения настолько высока, что обеспечивает высокую пластичность, то затраты энергии на преодоление упругого сопротивления тела образованию и росту новой фазы, отличающейся от старой фазы удельным объемом становятся меньше, в связи с чем аллотропическое превращение протекает при минимальном переохлаждении. Зародыши новой фазы появляются на границах зерен старой фазы и на других дефектах кристаллов. В дальнейшем происходит рост этих зародышей за счет перехода атомов из старой фазы в новую. Наряду с этим наблюдается продолжение зарождения новых зародышей образующейся фазы.

При переходе металла из одного кристаллографического состояния в другое происходит не только изменение кристаллической структуры, но и имеет место

полный процесс фазовой перекристаллизации, при которой на месте старых зерен образуются совершенно новые зерна с новым расположением границ. Причем на месте старого одного зерна могут возникнуть несколько новых или на месте нескольких старых - одно новое зерно.

Этот процесс зависит, главным образом, от скорости охлаждения и степени переохлаждения, которые в основном определяют количество образующихся в единицу времени центров кристаллизации и скорость роста новой фазы. Чем выше скорость охлаждения и выше степени переохлаждения, тем больше количество центров кристаллизации, тем более дисперсными являются зерна новой фазы.

Кроме того, на развитие аллотропии может оказывать влияние наличие примесей, которые могут играть роль дополнительных зародышевых центров. Все эти дополнительные параметры могут оказать влияние на окончательную структуру и свойства металла, претерпевшего аллотропическое превращение. В результате собирательной рекристаллизации, сопутствующей аллотропическому превращению, происходит укрупнение зерна, причем тем больше, чем выше температура нагрева. В случае же нагрева до температур, лежащих выше критической точки, когда происходит образование зерен новой фазы, но не успевает начаться укрупнение зерна, обычно получается очень маленькое зерно.

*Бездиффузионный или мартенситный* механизм аллотропического превращения осуществляется при низких температурах, при которых диффузия или самодиффузия почти не осуществляется. Это превращение происходит или в металлах с низкой температурой аллотропического перехода или при сильном переохлаждении высокотемпературной аллотропической формы в металлах с высокой температурой превращения. Так у кобальта, у которого  $T_0 = 420$  °С, аллотропическое превращение идет только бездиффузионным путем. В железе, титане, цирконии и других металлах с высокой температурой  $T_0$  при большом переохлаждении превращение идет бездиффузионным путем, а при малом переохлаждении - диффузионным путем. При мартенситном аллотропическом превращении новая фаза образуется путем кооперативного и закономерного перемещения атомов таким образом, что они сохраняют своих соседей и смещаются по отношению один к другому на расстояния, не превышающие межуатомные. Основное предположение мартенситного превращения заключается в том, что в процессе перехода старой фазы в новую сохраняется сопряженность (когерентность) их пространственных решеток. При наличии когерентности двух фаз поверхностная энергия границы очень мала, что способствует интенсивному росту образовавшихся кристаллов.

При развитии мартенситного механизма аллотропического превращения участки новой фазы располагаются вдоль определенных кристаллографических плоскостей старой фазы и выглядят под микроскопом в виде иголок или пластин. Это является результатом структурного и размерного соответствия, устанавливающегося между решетками старой и новой фаз.

Важной особенностью мартенситного превращения является то, что в изотермических условиях превращения только часть старой фазы переходит в новую. Дальнейшее превращение может протекать только при понижении температуры. Мартенситное превращение происходит в интервале температур. Различают точки  $M_n$  и  $M_k$  - начало и конец мартенситного превращения. Во многих случаях превращение не доходит до конца даже при очень низких температурах. Установлено, что мартенситное превращение, как и нормальное - диффузионное обратимо. Образова-



ние высокотемпературной формы из низкотемпературной при достаточной степени перенагрева может происходить бездиффузионным путем.

*Магнитное превращение*, наблюдаемое в ферромагнитных материалах, не является обычным фазовым превращением. Оно не связано с перемещением диффузией атомов, а вызывается только изменением взаимодействия магнитно нескомпенсированных  $d$  или  $f$  - электронов, обуславливающих возникновение ферромагнетизма. Характер изменения магнитных свойств зависит от физической природы металла. Температура потери магнитных свойств, называемая точкой Кюри, не зависит от скорости нагрева или охлаждения. Эта температура постоянна для каждого металла. Для железа она равна  $768^{\circ}\text{C}$ , никеля -  $365-370^{\circ}\text{C}$ , кобальта -  $1050^{\circ}\text{C}$ .

• 2.

Термическую обработку применяют на различных стадиях производства деталей машин и металлоизделий. В одних случаях она может быть промежуточной операцией, служащей для улучшения обрабатываемости сплавов давлением, резанием, в других – является окончательной операцией, обеспечивающей необходимый комплекс показателей механических, физических и эксплуатационных свойств изделий или полуфабрикатов. Полуфабрикаты подвергают термической обработке для улучшения структуры, снижения твердости (улучшения обрабатываемости), а детали – для придания им определенных, требуемых свойств (твердости, износостойкости, прочности и других).

В результате термической обработки свойства сплавов могут быть изменены в широких пределах. Возможность значительного повышения механических свойств после термической обработки по сравнению с исходным состоянием позволяет увеличить допускаемые напряжения, уменьшить размеры и массу машин и механизмов, повысить надежность и срок службы изделий. Улучшение свойств в результате термической обработки позволяет применять сплавы более простых составов, а поэтому более дешевые. Сплавы приобретают также некоторые новые свойства, в связи с чем расширяется область их применения.

Термической (тепловой) обработкой называются процессы, сущность которых заключается в нагреве и охлаждении изделий по определенным режимам, в результате чего происходят изменения структуры, фазового состава, механических и физических свойств материала, без изменения химического состава.

Назначение термической обработки металлов – получение требуемой твердости, улучшение прочностных характеристик металлов и сплавов. Термическая обработка подразделяется на термическую, термомеханическую и химико-термическую. Термическая обработка – только термическое воздействие, термомеханическая – сочетание термического воздействия и пластической деформации, химико-термическая – сочетание термического и химического воздействия. Термическая обработка, в зависимости от структурного состояния, получаемого в результате ее применения, подразделяется на отжиг (первого и второго рода), закалку и отпуск.

*Отжиг* – термическая обработка заключающаяся в нагреве металла до определенных температур, выдержка и последующего очень медленного охлаждения вместе с печью. Применяют для улучшения обработки металлов резанием, снижения твердости, получения зернистой структуры, а также для снятия напряжений, устраняет частично (или полностью) всякого рода неоднородности, которые были внесе-

ны в металл при предшествующих операциях (механическая обработка, обработка давлением, литье, сварка), улучшает структуру стали.

*Отжиг первого рода.* Это отжиг при котором не происходит фазовых превращений, а если они имеют место, то не оказывают влияния на конечные результаты, предусмотренные его целевым назначением. Различают следующие разновидности отжига первого рода: гомогенизационный и рекристаллизационный.

Гомогенизационный – это отжиг с длительной выдержкой при температуре выше 950°C (обычно 1100–1200°C) с целью выравнивания химического состава.

Рекристаллизационный – это отжиг наклепанной стали при температуре, превышающей температуру начала рекристаллизации, с целью устранения наклепа и получение определенной величины зерна.

*Отжиг второго рода.* Это отжиг, при котором фазовые превращения определяют его целевое назначение. Различают следующие виды: полный, неполный, диффузионный, изотермический, светлый, нормализованный (нормализация), сфероидизирующий (на зернистый перлит). Полный отжиг производят путем нагрева стали на 30–50 °C выше критической точки, выдержкой при этой температуре и медленным охлаждением до 400–500 °C со скоростью 200 °C в час углеродистых сталей, 100 °C в час для низколегированных сталей и 50 °C в час для высоколегированных сталей. Структура стали после отжига равновесная, устойчивая.

Неполный отжиг производится путем нагрева стали до одной из температур, находящейся в интервале превращений, выдержкой и медленным охлаждением. Неполный отжиг применяют для снижения внутренних напряжений, понижения твердости и улучшения обрабатываемости резанием. Диффузионный отжиг. Металл нагревают до температур 1100–1200°C, так как при этом более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания химического состава.

Изотермический отжиг заключается в следующем: сталь нагревают, а затем быстро охлаждают (чаще переносом в другую печь) до температуры, находящейся ниже критической на 50–100°C. В основном применяется для легированных сталей. Экономически выгоден, так как длительность обычного отжига (13 – 15) ч, а изотермического отжига (4 – 6) ч. Сфероидизирующий отжиг (на зернистый перлит) заключается в нагреве стали выше критической температуры на 20 – 30 °C, выдержке при этой температуре и медленном охлаждении. Светлый отжиг осуществляется по режимам полного или неполного отжига с применением защитных атмосфер или в печах с частичным вакуумом. Применяется с целью защиты поверхности металла от окисления и обезуглероживания.

*Нормализация* – заключается в нагреве металла до температуры на (30–50) °C выше критической точки и последующего охлаждения на воздухе. Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали. Вместо отжига низкоуглеродистые стали подвергают нормализации. Для среднеуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо закалки и высокого отпуска. Высокоуглеродистые стали подвергают нормализации с целью устранения цементитной сетки. Нормализацию с последующим высоким отпуском применяют вместо отжига для исправления структуры легированных сталей. Нормализация по сравнению с отжигом – более экономичная операция, так как не требует охлаждения вместе с печью.

*Закалка* – это нагрев до оптимальной температуры, выдержка и последующее быстрое охлаждение с целью получения неравновесной структуры. В результате закалки повышается прочность и твердость и понижается пластичность стали. Основ-

ные параметры при закалке – температура нагрева и скорость охлаждения. Критической скоростью закалки называется скорость охлаждения, обеспечивающая получение структуры – мартенсит или мартенсит и остаточный аустенит.

В зависимости от формы детали, марки стали и требуемого комплекса свойств применяют различные способы закалки.

*Закалка в одном охладителе.* Деталь нагревают до температуры закалки и охлаждают в одном охладителе (вода, масло).

*Закалка в двух средах* (прерывистая закалка) – это закалка при которой деталь охлаждают последовательно в двух средах: первая среда – охлаждающая жидкость (вода), вторая – воздух или масло.

*Ступенчатая закалка.* Нагретую до температуры закалки деталь охлаждают в расплавленных солях, после выдержки в течении времени необходимого для выравнивания температуры по всему сечению, деталь охлаждают на воздухе, что способствует снижению закалочных напряжений.

*Изотермическая закалка* так же, как и ступенчатая, производится в двух охлаждающих средах. Температура горячей среды (соляные, селитровые или щелочные ванны) различна: она зависит от химического состава стали, но всегда на 20–100 °С выше точки мартенситного превращения для данной стали. Окончательное охлаждение до комнатной температуры производится на воздухе. Изотермическая закалка широко применяется для деталей из высоколегированных сталей. После изотермической закалки сталь приобретает высокие прочностные свойства, то есть сочетание высокой вязкости с прочностью.

*Закалка с самоотпуском* имеет широкое применение в инструментальном производстве. Процесс состоит в том, что детали выдерживаются в охлаждающей среде не до полного охлаждения, а в определенный момент извлекаются из нее с целью сохранения в сердцевине детали некоторого количества тепла, за счет которого производится последующий отпуск.

*Отпуск* стали является завершающей операцией термической обработки, формирующей структуру, а следовательно, и свойства стали. Отпуск заключается в нагреве стали до различных температур (в зависимости от вида отпуска, но всегда ниже критической точки), выдержке при этой температуре и охлаждении с разными скоростями. Назначение отпуска – снять внутренние напряжения, возникающие в процессе закалки, и получить необходимую структуру.

В зависимости от температуры нагрева закаленной детали различают три вида отпуска: высокий, средний и низкий.

*Высокий* отпуск производится при температурах нагрева выше 350–600 °С, но ниже критической точки; такой отпуск применяется для конструкционных сталей.

*Средний* отпуск производится при температурах нагрева 350 – 500 °С; такой отпуск широко применяется для пружинной и рессорной сталей.

*Низкий* отпуск производится при температурах 150–250 °С. Твердость детали после закалки почти не изменяется; низкий отпуск применяется для углеродистых и легированных инструментальных сталей, для которых необходимы высокая твердость и износостойкость. Контроль отпуска осуществляется по цветам побежалости, появляющимся на поверхности детали.

Оборудование для термической обработки металлов состоит из накаливальных приспособлений и контрольных устройств, что позволяют регулировать температурный режим в процессе осуществления рабочих операций с металлами. Также, используются измерительные приборы для фиксирования результата термического воздействия на сплав.

Контрольные приспособления в комплексе термообрабатывающих устройств называют термоэлектрическими пирометрами. Такие измерительные механизмы состоят термических пар и специального гальванометра, на котором установлена градусная шкала Цельсия. Конечный результат воздействия на металл проверяется напильниковой пробой, и испытывают вязкие свойства ударным способом. Печи для термической обработки металлов, на металлообрабатывающих предприятиях, используют пламенного типа и с электрическим принципом смены температурного режима. Для печей пламенного типа применяется в качестве топливного ресурса жидкие, твердые, газообразные горючие средства.

Электрические печные установки для работы со стальными сплавами делят на два вида: печи сопротивления и приспособления, работающие на индукционном способе нагревания. Индукционное нагревание образуется под воздействием высокочастотного тока. Печи для термической обработки металлов могут работать в непрерывном режиме и с прерывающимся функциональным циклом.

Топливная масса заполняет устройство через специальный кран, а нагретая воздушная масса запускается через воздухопроводную камеру. Металлическое сырье разогревается в рабочей зоне приспособления. Образовавшиеся при этом накалинные газовые компоненты убираются при помощи рекуператора, который выполняет функцию постоянного подогрева воздушной массы. В случае периодической эксплуатации камерного приспособления для нагревания стали, в рабочем секторе устройство температурный режим поддерживается на едином уровне.

К термическому способу обработки, чаще всего, прибегают при работе со сталью. Но также, для улучшения технических характеристик и технологических свойств, в отдельных случаях, такой способ могут использовать в работе с чугунными изделиями и конструкциями, выполненными из цветных металлов. Для охлаждения уже прошедших обработку изделий используют специальные емкости, которые наполняют жидкостной массой (расплавленные свинцовые компоненты, масляные средства, водные наполнители).

■ 4.

Поверхностной закалкой называют процесс термической обработки, представляющий собой нагрев поверхностного слоя стали до температуры выше критической и последующее охлаждение с целью получения в поверхностном слое структуры мартенсита.

Многие ответственные детали работают на истирание и одновременно подвергаются действию ударных нагрузок. Такие детали должны иметь высокую поверхностную твердость, хорошую износостойкость и в то же время не быть хрупкими, т.е. не разрушаться под действием ударов. Высокая твердость поверхности деталей при сохранении вязкой и прочной сердцевины достигается методом поверхностной закалки.

Из современных методов поверхностной закалки наибольшее распространение в машиностроении находят следующие: закалка при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ); пламенная закалка и закалка в электролите.

Выбор того или иного метода поверхностной закалки обуславливается технологической и экономической целесообразностью.

*Закалка при нагреве токами высокой частоты.* Такой метод является одним из самых высокопроизводительных методов поверхностного упрочнения металлов. Открытие этого метода и разработка его технологических основ принадлежит талантливому русскому ученому В. П. Вологдину. Высокочастотный нагрев основан на следующем явлении. При прохождении переменного электрического тока высокой частоты по медному индуктору вокруг последнего образуется магнитное поле, которое проникает в стальную деталь, находящуюся в индукторе, и индуцирует в ней вихревые токи Фуко. Эти токи и вызывают нагрев металла.

Особенностью нагрева ТВЧ является то, что индуцируемые в стали вихревые токи распределяются по сечению детали не равномерно, а отесняются к поверхности. Неравномерное распределение вихревых токов приводит к неравномерному ее нагреву: поверхностные слои очень быстро нагреваются до высоких температур, а сердцевина или совсем не нагревается или нагревается незначительно благодаря теплопроводности стали. Толщина слоя, по которому проходит ток, называется глубиной проникновения и обозначается буквой  $\delta$ . Толщина слоя в основном зависит от частоты переменного тока, удельного сопротивления металла и магнитной проницаемости.

При выборе частоты тока, кроме нагреваемого слоя, необходимо учитывать форму и размеры детали с тем, чтобы получить высокое качество поверхностной закалки и экономно использовать электрическую энергию высокочастотных установок.

Большое значение для качественного нагрева деталей имеют медные индукторы.

Наиболее распространены индукторы, имеющие с внутренней стороны систему мелких отверстий, через которые подается охлаждающая вода. Такой индуктор является одновременно нагревательным и охлаждающим устройством. Как только помещенная в индуктор деталь нагреется до заданной температуры, ток автоматически отключится и из отверстий индуктора поступит вода и спреем (водяным душем) охладит поверхность детали.

Детали можно также нагревать в индукторах, не имеющих душирующих устройств. В таких индукторах детали после нагрева сбрасываются в закалочный бак.

Закалка ТВЧ в основном производится одновременным и непрерывно-последовательным способами. При одновременном способе закаливаемая деталь вращается внутри неподвижного индуктора, ширина которого равна закаливаемому участку. Когда заданное время нагрева истекает, реле времени отключает ток от генератора, а другое реле, заблокированное с первым, включает подачу воды, которая небольшими, но сильными струями вырывается из отверстий индуктора и охлаждает деталь.

При непрерывно-последовательном способе деталь неподвижна, а вдоль нее перемещается индуктор. В этом случае пропоследовательный нагрев закаливаемого участка детали, после чего участок попадает под струю воды душирующего устройства, расположенного на некотором расстоянии от индуктора.

Плоские детали закаливают в петлевых и зигзагообразных индукторах, а зубчатые колеса с мелким модулем - в кольцевых индукторах одновременным спосо-

бом. Макроструктура закаленного слоя мелко модульного зубчатого колеса автомобиля, изготовленного из стали марки ППЗ-55 (сталь пониженной прокаливаемости). Микроструктура закаленного слоя представляет собой мелкоигольчатый мартенсит.

Для повышения прочности сердцевины детали перед закалкой ТВЧ подвергают улучшению или нормализации.

Применение нагрева ТВЧ для поверхностной закалки машинных деталей и инструмента позволяет резко сократить продолжительность технологического процесса термической обработки. Кроме того, этот метод дает возможность изготавливать для закалки деталей механизированные и автоматизированные агрегаты, которые устанавливаются в общем потоке механообрабатывающих цехов. В результате этого отпадает необходимость транспортирования деталей в специальные термические цехи и обеспечивается ритмичная работа поточных линий и сборочных конвейеров.

*Пламенная поверхностная закалка.* Этот метод заключается в нагреве поверхности стальных деталей ацетилено-кислородным пламенем до температуры, превышающей на 50-60°C верхнюю критическую точку  $A_{C3}$ , с последующим быстрым охлаждением водяным душем.

Сущность процесса пламенной закалки состоит в том, что тепло, подводимое газовым пламенем от горелки к закаливаемой детали, концентрируется на ее поверхности и значительно превышает количество тепла, распространяемого в глубь металла. В результате такого температурного поля поверхность детали сначала быстро нагревается до температуры закалки, затем охлаждается, а сердцевина детали практически остается незакаленной и после охлаждения не изменяет свою структуру и твердость.

Пламенную закалку применяют для упрочнения и повышения износостойкости таких крупных и тяжелых стальных деталей, как коленчатые валы механических прессов, крупномодульные зубчатые колеса, зубья ковшей экскаваторов и т. п. Кроме стальных деталей, пламенной закалке подвергают детали, изготовленные из серого и перлитного чугуна, например направляющие станин металлорежущих станков.

Пламенная закалка разделяется на четыре вида:

а) последовательную, когда закалочная горелка с охлаждающей жидкостью перемещается вдоль, поверхности обрабатываемой неподвижной детали;

б) закалку с вращением, при которой горелка с охлаждающей жидкостью остается неподвижной, а закаливаемая деталь вращается;

в) последовательную с вращением детали, когда деталь непрерывно вращается и вдоль нее перемещается закалочная горелка с охлаждающей жидкостью;

г) местную, при которой неподвижная деталь нагревается до заданной температуры закалки неподвижной горелкой, после чего охлаждается струей воды.

Способ пламенной закалки катка, который вращается с определенной скоростью, а горелка остается неподвижной. Температура нагрева контролируется при помощи миллископа. В зависимости от назначения детали глубина закаленного слоя обычно берется равной 2,5-4,5 мм.

Основными факторами, влияющими на глубину закалки и структуру закаливаемой стали, являются: скорость передвижения закалочной горелки относительно закаливаемой детали или детали относительно горелки; скорость выхода газов и температура пламени.

Выбор закалочных машин зависит от формы деталей, способа закалки и заданного количества деталей. Если нужно закалить разнообразные по форме и раз-

мерам детали и в небольших количествах, то целесообразнее применять универсальные закалочные машины. На заводах обычно используют специальные установки и токарные станки.

Для закалки применяют два вида горелок: модульные с модулем от М10 и до М30 и многопламенные со сменными наконечниками, имеющими ширину пламени от 25 до 85 мм. Конструктивно горелки устроены таким образом, что отверстия для газового пламени и охлаждающей воды расположены в один ряд, параллельно. Вода в горелки подается от водопроводной сети и служит одновременно для закалки деталей и охлаждения мундштука.

В качестве горючих газов применяются ацетилен и кислород. После пламенной закалки микроструктура в различных зонах детали различная. Закаленный слой получает высокую твердость и остается чистым, без следов окисления и обезуглероживания.

Переход структуры от поверхности детали к сердцевине происходит плавно, что имеет большое значение для повышения эксплуатационной стойкости деталей и полностью устраняет вредные явления - растрескивание и отслоение закаленных слоев металла.

Твердость изменяется в соответствии со структурой закаленного слоя. На поверхности детали она равна 56-57 HRC, а затем понижается до твердости, которую имела деталь до поверхностной закалки. Для обеспечения высокого качества закалки, получения равномерной твердости и повышенной прочности сердцевины литые и кованные детали перед пламенной закалкой подвергаются отжигу или нормализации в соответствии с обыкновенными режимами.

*Поверхностная закалка в электролите.* Сущность этого явления состоит в том, что если постоянный электрический ток пропускать через электролит, то на катоде образуется тонкий слой, состоящий из мельчайших пузырьков водорода. Благодаря плохой электрической проводимости водорода сопротивление прохождению электрического тока сильно возрастает и катод (деталь) нагревается до высокой температуры, после чего закаливается. В качестве электролита обычно применяют водный 5-10-процентный раствор кальцинированной соды.

Процесс закалки несложен и заключается в следующем. Закаливаемую деталь опускают в электролит и присоединяют к отрицательному полюсу генератора постоянного тока напряжением 200-220 в и плотностью 3-4 а/см<sup>2</sup>, в результате чего она становится катодом. В зависимости от того, какая часть детали подвергается поверхностной закалке, деталь погружают на определенную глубину. Деталь нагревается за несколько секунд, и ток выключают. Охлаждающей средой является тот же электролит. Итак, ванна с электролитом служит и нагревательной печью и закалочным баком.

## Дефекты отжига и нормализации углеродистой и легированной конструкционной стали

Наименование и характеристика дефекта	Основные причины образования дефекта	Основные мероприятия по исправлению дефекта
Недогрев — неполный отжиг или неполная нормализация. Низкие пластические свойства	Отжиг или нормализация при температуре ниже $A_{c3}$	Повторный отжиг или нормализация при нормальной температуре ( $A_{c3} + 30—50^{\circ}C$ )
Перегрев. Крупнозернистая микроструктура, иногда видманштетова строения (игольчатая). Крупнокристаллический излом. Низкие пластические свойства, особенно ударная вязкость	Длительный отжиг или нормализация при температуре выше нормальной	При небольшом перегреве мелких изделий — повторный отжиг или нормализация при нормальной температуре ( $A_{c3} + 30—50^{\circ}C$ ) с продолжительной выдержкой. При небольшом перегреве крупных изделий — повторные двухкратный отжиг или нормализация при нормальной температуре с нормальной выдержкой. При большом перегреве мелких изделий — повторные двухкратный отжиг или нормализация (первые отжиг или нормализация — при температуре $A_{c3} + 100—150^{\circ}C$ ), вторые — при нормальной температуре)
Камневидный (раковистый) излом легированной стали. Наличие по границам зёрен неметаллических включений. Низкие пластические свойства, особенно ударная вязкость	Перегрев до температуры $1200—1350^{\circ}C$ легированной стали, загрязнённой легкоплавкими неметаллическими и шлаковыми включениями	Перековка при нормальной температуре трёхкратным или более обжатием
Пережог. Наличие по границам зёрен: а) обогащенных углеродом участков — 1-я стадия пережога; б) неокислённых пустот и пузырей — 2-я стадия; в) включений окислов железа — 3-я стадия	Нагрев стали в окислительной среде при высокой температуре или нагрев до температуры, близкой к температуре начала плавления	При 1-й стадии пережога — гомогенизация при температуре $1100—1200^{\circ}C$ с длительной выдержкой и последующим отжигом по режиму для исправления структуры сильно перегретой стали; при 2-й стадии — перековка при нормальной температуре; при 3-й стадии — неисправимый брак
Высокая твёрдость горячедеформированной отожжённой стали	Повышенная скорость охлаждения	Повторный отжиг с охлаждением по установленному графику
Высокая твёрдость и низкие пластические свойства холоднодеформированной пружин-	Нагрев выше $A_{c1}$	Дефект неисправим для данного размера и профиля изделия. Материал может быть использован по-



ной и высокоуглеродистой стали после промежуточного или окончательного отжига		сле холодной деформации на новый размер с последующим отжигом при температуре ниже $A_{c1}$ ( $690—710^{\circ}\text{C}$ )
Структурно свободный цементит в литой горяче- или холоднодеформированной малоуглеродистой стали. Пониженные пластические свойства, особенно ударная вязкость	Медленное охлаждение в интервале температур $720—670^{\circ}\text{C}$ при отжиге стали или длительная выдержка малоуглеродистой стали при температуре $670-720^{\circ}\text{C}$	Повторный отжиг при нормальной температуре ( $900—920^{\circ}\text{C}$ ) с ускоренным охлаждением или нормализация с этой же температуры

### Дефекты отжига углеродистой и легированной инструментальной и быстрорежущей стали

Наименование и характеристика дефекта	Основные причины образования дефекта	Основные мероприятия по исправлению дефекта
Высокая твёрдость углеродистой, легированной и быстрорежущей стали после	1. Недогрев (отжиг при температуре ниже $A_{c1}$ при недостаточной выдержке). 2. Перегрев (отжиг при температуре выше нормальной). 3. Повышенная скорость охлаждения при обычном отжиге или недостаточная выдержка при изотермическом отжиге	Повторный отжиг при нормальной температуре с охлаждением по установленному графику
сетка в углеродистой и легированной стали	Перегрев выше $A_{cm}$	Нормализация или закалка в масле с последующим отпуском при температуре $670—700^{\circ}\text{C}$ с выдержкой не менее 2 час.
Стабильные карбиды в быстрорежущей стали. Уменьшение чувствительности к закалке	Длительная выдержка (свыше 10 час.) при отжиге	Дефект неисправим
Чёрный излом (включение свободного графита в углеродистой стали)	Медленное охлаждение с температуры $1000^{\circ}\text{C}$ при отжиге или длительная выдержка при температуре $760—780^{\circ}\text{C}$	Тщательная проковка при высокой температуре

## Дефекты отжига серого и ковкого чугуна

Наименование и характеристика дефекта	Основные причины образования дефекта	Основные мероприятия по исправлению дефекта
Пониженная твёрдость серого чугуна после отжига для снятия внутренних напряжений	Распад цементита при нагреве выше 550—650° С	Дефект исправим для деталей сравнительно простой конструкции путём нормализации с температуры 900-950° С и последующим отпуском для снятия внутренних напряжений
Высокая твёрдость после отжига отбелённого чугуна	Недостаточные температура или выдержка при отжиге	Повторный отжиг при температуре 850—870°С с достаточной выдержкой
Структурно свободный цементит в ковком чугуне	Низкая температура или недостаточная выдержка в 1-й стадии графитизации	Повторный отжиг по установленному графику
Пластинчатый перлит в ферритном ковком чугуне, превышающий допускаемую по ТУ норму	Несоблюдение режима охлаждения или недостаточная выдержка при 2-й стадии графитизации	Повторный отжиг при температуре 730—710° С
Пластинчатый графит в ковком чугуне	Отжиг при температуре выше 1100° С или наличие свободного графита в исходном чугуне	Дефект неисправим

## Дефекты закалки стали

Наименование и характеристика дефекта	Основные причины образования дефекта	Основные мероприятия по исправлению дефекта
Закалочные трещины	Закалочные напряжения вследствие быстро протекающих с увеличением объёма структурных превращений	Предупреждение дефекта: 1. Для изделий из конструкционной углеродистой стали: а) изотермическая закалка в расплавленной селитре температурой 150— 500° С; б) прерывистая закалка—охлаждение в воде до 300—200° С, а затем в масле; в) закалка с самоотпуском— охлаждение в воде до 250—200° С, затем выдержка на воздухе до саморазогрева поверхности до 600° С с последующей замочкой в воде; г) непрерывная закалка до полного охлаждения в водном растворе 5—10%-ного NaCl или KOH температурой 50—60° С; д) закалка в масло.

		<p>2. Для изделия из инструментальной углеродистой стали: а) прерывистая закалка — охлаждение в воде до 200° С, затем перенос в масло или медленный отпуск; б) ступенчатая закалка в расплавленной селитре с температурой 180-200°С и далее на возтолщичной или температурой 180— 2С0 °С на воздухе (для инструментов диаметром до 8 мм).</p> <p>3. Для инструментов из заменителей быстрорежущей стали (ЭИ-184, ЭИ-260 и т. д.) подстуживание до 1000—9501°С и ступенчатая закалка в расплавленной селитре температурой 450—550° С</p>
Недогрев. Недостаточная твёрдость изделий из углеродистой и легированной стали; повышенная твёрдость после закалки и пониженная после нормального отпуска изделий из быстрорежущей стали	Нагрев ниже нормальной температуры закалки стали	Исправление дефекта: нормализация или отжиг с последующей закалкой с нормальной температуры
Перегрев. Крупноигольчатая структура и крупнокристаллический излом. Низкие пластические свойства	Нагрев выше нормальной температуры закалки	То же
Пятнистая закалка. Наличие на поверхности деталей участков с пониженной твёрдостью (мягких мест)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Неправильное погружение в закалочную среду.</li> <li>2. Скопление пара в отдельных местах на поверхности изделий при закалке.</li> <li>3. Малая скорость охлаждения в закалочной среде в интервале температур 650—500° С.</li> <li>4. Неоднородность исходной структуры в связи с первичной кристаллизацией.</li> <li>5. Малая чувствительность стали к закалке</li> <li>6. Местное обезуглероживание</li> </ol>	Предупреждение дефекта: нормализация с последующей закалкой в 5— 10'70-ном водном растворе NaCl или непосредственная закалка в том же растворе. Исправление дефекта: нормализация и закалка в 5—10°/п-ном водном растворе NaCl
Нафталиновый излом в быстрорежущей стали. Крупнозернистая структура. Крупнокристаллический излом с блёстками	Окончаниековки или прокатки при температуре выше 1100° С или вторичная закалка без предварительного отжига	Предупреждение дефекта: окончаниековки или прокатки при температуре ниже 1100° С; отжиг перед вторичной закалкой. Исправление дефекта: перековка на новый профиль

Деформация (изменение размеров)	<p>а) Термические напряжения, вызывающие пластическую деформацию;</p> <p>б) структурные превращения в интервале температур 650—500° С и ниже 300° С, вызывающие пластическую деформацию</p>	<p>Предупреждение дефекта:</p> <p>а) понижение температуры заковки и уменьшение скорости охлаждения;</p> <p>б) применение природно мелкозернистой или специальной легированной стали;</p> <p>в) изотермическая или ступенчатая закалка</p>
Коробление (искривление длинных и тонких изделий)	<p>а) Внутренние напряжения в изделии перед нагревом под закалку;</p> <p>б) неравномерный нагрев и охлаждение частей изделия;</p> <p>в) структурные превращения при температурах ниже 300°С</p>	<p>Предупреждение дефекта: высокий отпуск (600—650° С) перед закалкой и равномерный нагрев и охлаждение при закалке. Исправление дефекта: правка</p>
Окисление. Значительный слой окалины на поверхности закалённого изделия	Окислительная атмосфера в печи при нагреве под закалку	<p>Предупреждение дефекта;</p> <p>а) нагрев в печах с восстановительной, нейтральной или защитной атмосферой;</p> <p>б) ускоренный нагрев изделий;</p> <p>в) нагрев в ящиках с сухим углем, отработанным карбюризатором или чугушной стружкой;</p> <p>г) нагрев в соляных или свинцовых ваннах</p>
Обезуглероживание (выгорание углерода в поверхностных слоях изделия)	То же	То же
Эрозия (уменьшение размеров изделий или искажение профиля их вследствие уноса металла с поверхности)	Химическое действие хлористых солей и окисление металла при нагреве в соляных ваннах	Меры предупреждения: раскисление соляных ванн углём или ферросилицием
Разъедание (точечное или ручьеобразное поражение поверхности изделия)	<p>При нагреве в соляных ваннах:</p> <p>а) повышенное содержание сернокислых солей;</p> <p>б) обогащение ванны кислородом из воздуха и окислами железа;</p> <p>в) химическое действие хлористых солей.</p> <p>При нагреве в свинцовых ваннах — образование окислов свинца. При нагреве в пламенных печах — неравномерное образование окалины.</p>	<p>Предупреждение дефекта:</p> <p>а) тщательный контроль состава солей для нагрева;</p> <p>б) раскисление соляных ванн углем, ферросилицием;</p> <p>в) засыпка на зеркало поверхности свинцовой ванны древесного угля или легкоплавких солей.</p>

## Дефекты отпуска стали

Наименование и характеристика дефекта	Основные причины образования дефекта	Основные мероприятия по исправлению дефекта
Недоотпуск. Повышенная твёрдость и пониженные пластические свойства изделий из углеродистой и легированной стали. Пониженная твёрдость инструмента из быстрорежущих сталей	Пониженная температура или недостаточная выдержка	Исправление дефекта: вторичный отпуск при нормальной температуре с достаточной выдержкой
Переотпуск. Пониженная твёрдость и низкие пределы прочности и упругости	Отпуск при температуре выше нормальной	Исправление дефекта: отжиг, а затем закалка с последующим отпуском при нормальной температуре
Хрупкий отпуск. Низкая ударная вязкость после отпуска: а) при температуре 250—350°С — стали углеродистой, кремнистой, никелевой, кремненикелевой; б) при температуре 325—425°С — стали марганцовистой и кремне-марганцовистой; в) при температуре 275—325 и 475-575°С — стали хромистой и хромоникелевой	Обособление и коагуляция карбидов критической степени дисперсности и превращение остаточного аустенита	Исправление дефекта; отжиг, а затем закалка с последующим отпуском при температуре ниже или выше интервала температур хрупкого
Отпускная хрупкость (чувствительность к скорости охлаждения при отпуске). Низкая ударная вязкость после отпуска при температуре 400—600°С (обычно около 525°С) с медленным охлаждением стали хромистой, хромоникелевой, марганцовистой и хромомарганцовистой (содержащих свыше 1% хрома или марганца)	Выпадение высокодисперсных карбидов, оксидов, фосфидов и нитридов по границам зёрен при медленном охлаждении с интервала температур отпускной хрупкости или при длительной выдержке при этих температурах	Предупреждение дефекта: а) охлаждение в воде или в масле после отпуска с последующим снятием внутренних напряжений при 300—350°С; б) отпуск при температуре ниже 400°С; в) применение стали, содержащей 0,3—0,5% Мо или Ti, Nb. Исправление дефекта: вторичный отпуск при температуре 400—600°С с охлаждением в воде или масле с последующим снятием внутренних напряжений при 300—350°С

## Дефекты цементации

Наименование и характеристика дефекта	Основные причины образования дефекта	Основные мероприятия по исправлению дефекта
Точечные углубления на поверхности цементованных изделий	Наличие сернокислых солей (более 3-6%) в карбюризаторе	Предупреждение дефекта: не допускать в карбюризаторе наличия сернокислых солей более 3—6%
Лишаеобразное разъедание поверхности цементованных изделий	Загрязнение карбюризатора серным колчеданом	Предупреждение дефекта: мероприятия малоэффективны (рекомендуется обжиг карбюризатора при температуре 900° С в течение 10—30 час. или просев карбюризатора)
Различная глубина цементированного слоя	Ссыпание солей в нижние зоны ящика вследствие непрочной связи их с частицами угля в карбюризаторе; неравномерный прогрев ящиков в печи	Предупреждение дефекта: применение крупнозернистого карбюризатора с частицами угля размером 5—7 мм и введение крепителя — патоки; равномерный нагрев ящиков
Стекловидные наплывы, препятствующие цементации и приводящие к образованию мягких мест после закалки	Загрязнение карбюризатора песком	Предупреждение дефекта: просеивать карбюризатор с последующей добавкой углекислых солей до требуемой концентрации
Слишком глубокая цементация	Повышенные температура и время выдержки при цементации. Применение сильного карбюризатора	Предупреждение дефекта: соблюдение установленной технологии цементации
Повышенная концентрация углерода в цементированном слое (цементитная сетка)	То же	То же
Пониженная концентрация углерода в цементованном слое	Низкая температура цементации. Применение слабого карбюризатора	Предупреждение дефекта: применение более сильного карбюризатора. Исправление дефекта: повторная цементация при нормальной температуре
Недостаточная глубина цементированного слоя	То же	То же
Поверхностное обезуглероживание цементированного слоя	Медленное охлаждение вместе с печью ящиков после цементации (особенно с крупнозернистым карбюризатором)	Предупреждение дефекта охлаждение ящиков после цементации на воздухе. Исправление дефекта: повторная кратковременная цементация при нормальной температуре

Пятнистая цементация (мягкие пятна на поверхности закалённых цементированных изделий)	Загрязнение поверхности цементируемых изделий; усадка карбюратора в ящике и обнажение изделий; плохая укупорка ящика; абнормальность стали	Предупреждение дефекта: применение нормальной природной крупнозернистой стали и точное
Отслаивание закалённого цементированного слоя (резкий переход от цементированного слоя к нецементированному)	Применение сильного карбюратора	Предупреждение дефекта - цементация в слабом карбюраторе. Исправление дефекта: нагрев в ящиках с углем до температуры 920—940° С и выдержка при этой температуре 2—4 часа
Остаточный аустенит. Пониженная твёрдость цементированного слоя, в закалённой высоколегированной стали	Повышенное содержание углерода в цементованном слое; большая скорость охлаждения при закалке	Исправление дефекта: а) высокий отпуск при температуре 650—670° С перед закалкой; б) закалка с нормальной температуры (760°С) в масло с подстуживанием изделий до температуры 650—600° С; в) закалка с температуры 860° С в масло с высоким отпуском при температуре 650—670°С, затем закалка с температуры 760° С и отпуск при 200° С; г) обработка холодом при температуре ниже 0° С
Повышенная твёрдость цементованного слоя после высоко-го отпуска	Недостаточные температура и выдержка при отпуске или нагрев выше <u>Ac1</u>	Повторный отпуск при нормальной температуре и выдержке

### Дефекты азотации

Наименование и характеристика дефекта	Основные причины образования дефекта	Основные мероприятия по исправлению дефекта
Коробление	Внутренние напряжения вследствие: а) быстрого охлаждения после отпуска предварительно закалённых изделий; б) механической обработки изделий	Предупреждение дефекта: а) охлаждение после отпуска со скоростью не более 2-3° С в минуту; б) стабилизирующий отпуск при температуре 520—540° С в течение 3—5 час. после механической обработки. Исправление дефекта: правка
Растрескивание (шелушение азотированного слоя изделий)	Внутренние напряжения вследствие резкого перехода от азотированного слоя к сердцевине	Предупреждение дефекта: медленное охлаждение после азотирования или азотирование с отпуском.

		Исправление дефекта: отпуск при 570—580° С в течение 4—5 час. в печи с постоянной атмосферой аммиака
Надуття на поверхности	Шлаковые включения, расположенные у поверхности азотированного изделия	Предупреждение дефекта: тщательный контроль стали на шлаковые включения
Хрупкость (выкрашивание поверхности азотированного слоя)	Чрезмерное насыщение нитридами тонкого слоя поверхности вследствие крупнозернистости структуры и обезуглероживания поверхности при предварительной термообработке	Предупреждение дефекта: ступенчатый процесс азотирования. Исправление дефекта: отпуск в атмосфере аммиака при температуре 570—580° С в течение 4—5 час. или при 630—650° С в течение 2 час.
Неравномерная (пятнистая) твёрдость (мягкие места на поверхности азотированного изделия)	Наличие отдельных участков, покрытых оловом, на азотируемой поверхности изделия	Предупреждение дефекта: фосфатирование перед азотированием и тщательная подготовка поверхности изделия

### Дефекты цианированного слоя

Наименование и характеристика дефекта	Основные причины образования дефекта	Основные мероприятия по исправлению дефекта
Разъедание (поражения в виде точек или рельефа на поверхности изделия при жидком высокотемпературном цианировании) (830-850° С)	Наличие сернокислых солей свыше 0,7—0,8% в нейтральных солях, применяемых для составления цианистой ванны; химическое действие нейтральных хлористых солей	Предупреждение дефекта: тщательный контроль нейтральных солей на содержание в них сернокислых
Хрупкость (выкрашивание поверхностного слоя инструмента из быстрорежущей стали после низкотемпературного жидкого цианирования)	Чрезмерное насыщение нитридами тонкого слоя поверхности вследствие длительной выдержки или повышенной температуры при цианировании	Исправление дефекта: нагрев в селитровой ванне до температуры 550—560* С с выдержкой 30 мин.
Остаточный аустенит (пониженная твёрдость цианированного слоя легированной стали после закалки)	Высокая концентрация углерода и азота в цианированном слое; большая скорость охлаждения	Предупреждение дефекта: закалка в масло с подстуживанием до 650—600° С. Исправление дефекта: обработка холодом при температурах ниже 0° С

### • 6.

Химико-термической обработкой называют процесс, представляющий собой сочетание термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали. Цель химико-термической обработки: повышение поверхностной твердости, износостойкости, предела выносливости, коррозионной стойкости, жаростойкости (окалиностойкости), кислотоустойчивости.



Наибольшее применение в промышленности получили следующие виды химико-термической обработки: цементация; нитроцементация; азотирование; цианирование; диффузионная металлизация.

Цементация – это процесс поверхностного насыщения углеродом, произведенный с целью поверхностного упрочнения деталей. В зависимости от применяемого карбюризатора цементация подразделяется на три вида: цементация твердым карбюризатором; газовая цементация (метан, пропан, природный газ).

Газовая цементация. Детали нагревают до 900–950°C в специальных герметически закрытых печах, в которые непрерывным потоком подают цементующий углеродосодержащий газ [естественный (природный) или искусственный]. Процесс цементации в твердом карбюризаторе заключается в следующем. Детали, упакованные в ящик вместе с карбюризатором (смесь древесного угля с активизатором), нагревают до определенной температуры и в течение длительного времени выдерживают при этой температуре, затем охлаждают и подвергают термической обработке. Цементации любым из рассмотренных выше способов подвергаются детали из углеродистой и легированной стали с содержанием углерода не более 0,2%. Цементация легированных сталей, содержащих карбидообразующие элементы Cr, W, V, дает особо хорошие результаты: у них, кроме повышения поверхностной твердости и износостойкости, увеличивается также предел усталости.

Азотирование – это процесс насыщения поверхностного слоя различных металлов и сплавов, стальных изделий или деталей азотом при нагреве в соответствующей среде. Повышается твердость поверхности изделия, выносливости, износостойкости, повышение коррозионной стойкости.

Цианирование – насыщение поверхностного слоя изделий одновременно углеродом и азотом. В зависимости от используемой среды различают цианирование: в твердых средах; в жидких средах; в газовых средах. В зависимости от температуры нагрева цианирование подразделяется на низкотемпературное и высокотемпературное.

Цианирование в жидких средах производят в ваннах с расплавленными солями.

Цианирование в газовых средах (нитроцементация). Процесс одновременно насыщения поверхности детали углеродом и азотом. Для этого детали нагревают в среде, состоящей из цементующего газа и аммиака, то есть нитроцементация совмещает в себе процессы газовой цементации и азотирования.

• 7.

Диффузионное насыщение поверхности деталей проводят различными элементами: углеродом, азотом, хромом, кремнием, бором и др. Существуют и применяются в промышленности способы насыщения поверхности деталей различными металлами (алюминием, хромом и др.) и металлоидами (кремнием, бором и др.) Назначение такого насыщения – повышение окалиностойкости, коррозионностойкости, кислотостойкости, твердости и износостойкости деталей. В результате поверхностный слой приобретает особые свойства, что позволяет экономить легирующие элементы.

Алитирование – процесс насыщения поверхностного слоя стали алюминием для повышения жаростойкости (окалиностойкости) и сопротивления атмосферной коррозии. Алитирование проводят в порошкообразных смесях, в ваннах с расплавленным алюминием, в газовой среде и распыливанием жидкого алюминия.

Хромирование – процесс насыщения поверхностного слоя стали хромом для повышения коррозионной стойкости и жаростойкости, а при хромировании высокоуглеродистых сталей – для повышения твердости и износостойкости.

Силицирование – процесс насыщения поверхностного слоя детали кремнием для повышения коррозионной стойкости и кислотостойкости. Силицированию подвергают детали из низко- и среднеуглеродистых сталей, а также из ковкого и высокопрочного чугунов.

Борирование – процесс насыщения поверхностного слоя детали бором. Назначение борирования – повысить твердость, сопротивление абразивному износу и коррозии в агрессивных средах, теплостойкость и жаростойкость стальных деталей. Существует два метода борирования: жидкостное электролизное и газовое борирование.

Сульфидирование – процесс насыщения поверхностного слоя стальных деталей серой для улучшения противозадирных свойств и повышения износостойкости деталей.

Сульфоцианирование – процесс поверхностного насыщения стальных деталей серой, углеродом и азотом. Совместное влияние серы и азота в поверхностном слое металла обеспечивает более высокие противозадирные свойства и износостойкость по сравнению с насыщением только серой.

#### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. На каком явлении основана термическая обработка сталей?
2. Назовите основные виды термической обработки сталей. В чем их сущность?
3. Можно ли применять стальное изделие сразу после закалки?
4. Какое изделие можно закалить – из стали с содержанием углерода 0,1% или 0,5 %? Почему?
5. Какое физическое явление лежит в основе нагрева детали ТВЧ? В чем сущность этого явления?
6. Для каких стальных деталей вы бы применили поверхностную закалку ТВЧ?

## РАЗДЕЛ 2. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МАШИНО- И ПРИБОРОСТРОЕНИИ

### Тема 2.1. Конструкционные материалы

План

1. Конструкционные чугуны: виды, применение, маркировка
2. Устройство и работа доменной печи
3. Классификация сталей
4. Способы производства сталей
5. Углеродистые стали: классификация, свойства, маркировка и применение
6. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства сталей
7. Легированные стали: классификация, свойства, маркировка и применение
8. Конструкционные стали: классификация, свойства, маркировка и применение

#### • 1

Сплав железа с углеродом ( $>2,14\%C$ ) называется чугуном. Присутствие эвтектики в структуре чугуна обуславливает его использование исключительно в качестве литейного сплава. Углерод в чугуне может находиться в виде цемента или графита. Цементит придает излому специфический белый светлый блеск, поэтому чугун называется белым. Графит придает излому чугуна серый цвет. В зависимости от формы графита и условий его образования различают следующие группы чугунов: серый, высокопрочный с шаровидным графитом и ковкой.

*Белый чугун.* В белом чугуне весь углерод находится в связанном состоянии в виде карбида железа. Такой чугун в изломе имеет белый цвет и характерный металлический блеск. Структура состоит из перлита, ледебурита и избыточного цемента, поэтому чугун отличается высокой твердостью, хрупкостью, низкой прочностью и трудоемкостью механической обработки. Из белого чугуна делают отливки деталей с последующим отжигом на ковкий чугун. Белые чугуны применяют для производства стали, поэтому их называют передельными чугунами.

Ограниченное применение имеют отбеленные чугуны — отливки из серого чугуна со слоем белого чугуна в виде твердой корки на поверхности. Из них изготавливают прокатные валки, тормозные колодки и другие детали, работающие в условиях износа.

*Серый чугун.* В серых чугунах углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме пластинчатого графита. Из-за этого излом имеет серый цвет.

В зависимости от распада цемента различают ферритный, феррито-перлитный и перлитный серые чугуны. Серый чугун обладает высокими литейными свойствами, хорошо обрабатывается, менее хрупок, чем белый чугун, ему присущи хорошие антифрикционные свойства, что объясняется пористым строением и наличием графита. Иногда в структуре чугуна наряду с графитом содержится ледебурит. Такой серо-белый чугун называют половинчатым. Основные его свойства: высокая твердость, хрупкость и низкая прочность.

Серый чугун широко применяют в автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении для производства отливок, поэтому его называют литейным. Из него изготавливают станины металлорежущих станков, блоки и гильзы автомобиль-

ных и тракторных двигателей, поршневые кольца, корпуса и др. Маркируется серый чугун по ГОСТ 1412—79 буквами СЧ и цифрами, которые обозначают предел прочности при растяжении. Выбор марки чугунов для конкретных условий работы обуславливается совокупностью технологических и механических свойств. Ферритные серые чугуны СЧ10, СЧ15, СЧ18 предназначены для слабо- и средненагруженных деталей. Из них изготавливают крышки, фланцы, маховики, диски сцепления и др. Феррито-перлитные СЧ20, СЧ21, СЧ25 применяют для изготовления деталей, работающих при повышенных статических и динамических нагрузках: блоков цилиндров, картеров двигателя, поршней цилиндров, барабанов сцепления и др. Перлитные серые модифицированные чугуны СЧ30, СЧ35, СЧ40, СЧ45 обладают наиболее высокими механическими свойствами и их используют для изготовления гильз цилиндров, распределительных валов и др.

Высокопрочный чугун, так же как и серый, подразделяют на ряд марок в зависимости от механических свойств, причем основными показателями служат предел прочности при растяжении и относительное удлинение. Механические свойства зависят от структуры металлической основы, которая может быть перлитная, феррито-перлитная и ферритная. Лучшей структурой является структура, состоящая из перлита и шаровидного графита, окруженного небольшими островками феррита.

Маркируется высокопрочный чугун по ГОСТ 7293—79 (всего по ГОСТу 10 марок) буквами ВЧ и цифрами, из которых первые две обозначают предел прочности при растяжении, а последние — относительное удлинение в процентах. Например, марка ВЧ42-12 показывает, что чугун данной марки имеет  $\sigma_b = 412$  МПа и 6-12 %.

*Ковкий чугун.* Ковким называют чугун с хлопьевидным графитом, который получают из белого-чугуна в результате специального графитизирующего отжига (томления). Для получения ковкого чугуна необходимо белый чугун нагреть до 950... 1000 °С и затем после длительной выдержки охладить с малой скоростью до нормальной температуры. Изолированная хлопьевидная форма графита придает чугуну большую прочность и повышенную пластичность (хотя он и не поддается ковке).

В зависимости от степени графитизации ковкий чугун может быть ферритным, перлитным, феррито-перлитным. Разная степень графитизации достигается изменением условий отжига. Различие структур чугунов обуславливает и различие их свойств. Так, ферритный ковкий чугун по сравнению с перлитным чугуном обладает меньшей твердостью, но большей пластичностью. Ковкий чугун широко используют в сельскохозяйственном машиностроении для изготовления деталей, которые в процессе работы испытывают ударные нагрузки (зубчатые колеса, звенья цепей и др.).

Маркируется ковкий чугун по ГОСТ 1215 — 79 (всего по ГОСТу 11 марок) буквами КЧ и цифрами, из которых первые две обозначают предел прочности при растяжении, а последние — относительное удлинение в процентах. Специальные чугуны. К специальным чугунам относятся: износостойкие, обладающие высокой сопротивляемостью изнашиванию; жаростойкие, хорошо сопротивляющиеся окислению, и коррозионно-стойкие (для работы в агрессивных средах).

Для получения специальных чугунов их легируют никелем, хромом, молибденом, титаном, алюминием и медью.

*Применение чугуна в машиностроении.* На машиностроительных заводах по большей части производится ковкий ферритный чугун, и в незначительных количествах перлитный, несмотря на то, что последний отличается более высокой износо-

устойчивостью, прочностью, отлично работает при высоких температурах, имеет высокую усталостную прочность, глушит вибрации и т.д. Из ковкого перлитного чугуна изготавливаются такие детали, как распределительные и коленчатые валы, поршни дизельных моторов, клапанные коромысла, элементы сцепления и многое другое.

Материал с шаровидным графитом нашел применение в автопромышленности в качестве современного конструкционного чугуна и заменителя углеродистой стали, а также серого и ковкого чугуна. Области использования такого материала определяются его высокими эксплуатационными, конструкционными и технологическими характеристиками и в большинстве случаев прекрасным сочетанием данных свойств.

Главной отличительной чертой чугуна является его применение в изготовлении как небольших деталей, вес которых составляет несколько сот граммов (к примеру, поршневые кольца), так и довольно крупных деталей, вес которых может достигать до 150 т; как толстостенных (до 10 см), так и тонкостенных (от 3 до 5 мм) деталей. Детали используются не только в литом состоянии, но и после необходимой термической обработки. Все мы прекрасно помним из повседневного быта чугунные ванны, которые отличаются от прочих прекрасными эксплуатационными характеристиками, при этом их вес очень велик. В автомобилестроении же, такой вид чугуна применяют для изготовления блока цилиндров мотора.

Ярким примером использования такого вида чугуна, заменившего стальные поковки, считаются коленчатые валы для моторов крупных дизельных тракторов и автомобилей. Такие чугунные детали кроме того что дешевле кованых стальных, еще и превосходят их по качествам эксплуатации.

## • 2.

Выплавка чугуна производится в доменных печах, представляющих собой сложный технологический агрегат. *Доменная печь, домна* — большая металлургическая, вертикально расположенная печь шахтного типа для выплавки чугуна и ферросплавов из железорудного сырья.

Важнейшей особенностью доменного процесса является его непрерывность в течение всей кампании печи (от строительства печи до ее «капитального» ремонта) и противоток поднимающихся вверх фурменных газов с непрерывно опускающимся и наращиваемым сверху новыми порциями шихты столбом материалов.

Основным материалом для доменного производства является железная руда, содержащая железо в виде оксидов. Оксиды железа купить в виде руды возможно у сырьевых компаний крупнейших стран-экспортёров: Австралия, Бразилия, Индия, Канада, ЮАР, Украина, Россия, Швеция, Казахстан. Для загрузки в печь наиболее удобны куски руды диаметром от 10 до 50 мм. Более мелкая и пылевидная руда должна быть окускована путем спекания. Такое спекание называется агломерацией и производится на агломерационных фабриках, которые строятся иногда на рудниках, но чаще непосредственно на металлургических заводах.

В доменной печи (*рисунок 19*) происходит отделение железа от кислорода (процесс восстановления). Этот процесс возможен при высоких температурах, для создания которых в доменной печи сжигается кокс. Кокс содержит углерод, который при высоких температурах соединяется с кислородом оксидов железа или, как принято говорить, восстанавливает железо из оксидов. Раньше вместо кокса в доменных печах сжигали обыкновенный древесный уголь.

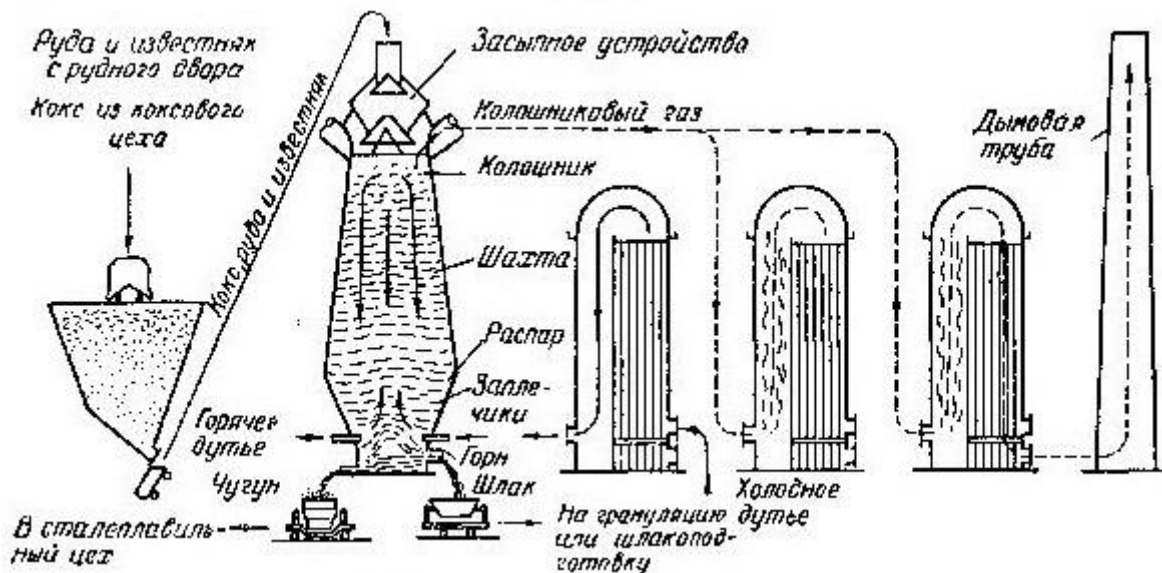


Рисунок 19. Схема доменного производства

Пустая порода, содержащаяся в большом количестве в железной руде, и зола, имеющаяся в коксе, при плавлении шихты не переходят в металл, а образуют шлак, который нужно своевременно удалить из печи. Чтобы облегчить удаление шлака, в руду добавляют флюсы - материал, придающий шлаку более жидкий вид. Обычно флюсом служит известняк.

Материалы подают в засыпное устройство, находящееся в верхней части доменной печи, по наклонному мосту в специальных тележках-скипах, емкость которых на больших печах достигает  $10 \text{ м}^3$ ; подача материалов идет непрерывно.

Таким образом, основными материалами для производства чугуна в доменной печи является железная руда, кокс и известняк. Кроме того, в доменном процессе для поддержания горения необходим воздух. Печь может работать только при непрерывной подаче воздуха.

Для того чтобы не охлаждать печь во время работы и ускорить плавку, воздух в печь подается подогретым до  $600-800^\circ$  и под давлением  $1,5-2 \text{ атм}$ . Воздух подогревают в специальных аппаратах - воздухонагревателях.

Воздухонагреватели представляют собой сварные цилиндрические сосуды диаметром от 7 до 9 м и высотой до 46 м с днищем и куполом. Воздухонагреватели изготовляют из листовой стали толщиной 10-14 мм. Внутреннее пространство воздухонагревателей разделено стенкой из огнеупорного кирпича на две вертикальные камеры - камеру горения и камеру насадки.

Камера, или шахта горения, и разделительная стенка начинаются от днища и идут до основания купола, так что под куполом остается свободное пространство для сообщения между камерами. В нижней части воздухонагревателя со стороны камеры: горения врезана горелка для сжигания газа.

Насадка - кирпичная кладка - выкладывается из огнеупорного (шамотного) кирпича так, чтобы образовались вертикальные сквозные от низа до верха каналы для прохода газа и воздуха. Благодаря каналам насадка обладает большой поверхностью нагрева (от 10 до 20 тыс.  $\text{м}^2$  и более). Насадка кладется на чугунную поднасадочную решетку, которая опирается на специальные колонны и расположена на уровне 2-2,5 м от днища воздухонагревателя.

Каналы насадки соответствуют отверстиям в решетке и имеют выход в пространство под решеткой, называемое поднасадочным пространством. В поднасадочное пространство по воздухопроводу холодного дутья подводится от воздуходувных машин холодный воздух.

Нагрев воздуха в воздухонагревателях происходит за счет сжигания очищенного газа, который, сгорая в камере горения, поднимается вверх под купол, а затем по каналам насадки опускается вниз и, отдав тепло насадке, уходит в дымовую трубу. После нагрева насадки газ и дымовую трубу отключают и через насадку пропускают воздух, который движется в направлении, обратном движению горячего газа. Горячий кирпич насадки отдает свое тепло воздуху.

Подогретый воздух по воздухопроводу горячего дутья подается от воздухонагревателей в кольцевую трубу и затем через специальные приборы, называемые фурмами, - в доменную печь.

Для одной доменной печи строят три или четыре воздухонагревателя, которые работают поочередно, т. е. если в одном нагревается насадка, то в другом - воздух, а третий запасной. Доменный процесс сопровождается также выделением побочных продуктов - доменного газа и шлака.

Жидкий шлак выпускается через шлаковые лётки в специальные ковши, в которых отвозится в шлаковые отвалы. В дальнейшем из него изготавливают строительные материалы - шлакоблоки. Доменный газ используется как топливо для сжигания в коксовых и мартеновских печах, в нагревательных печах прокатных цехов, а также в обыкновенных котельных топках.

Образующийся в печи газ через подсвечники, свечи и наклонные газопроводы отводится, в пылеуловители. Обычно на каждую доменную печь ставилось два пылеуловителя - первичный и вторичный. В настоящее время доменные печи сооружаются преимущественно с одним первичным пылеуловителем.

Свечи своей нижней частью, так называемыми подсвечниками, примыкают к куполу шахты. На доменную печь ставятся четыре подсвечника, а далее каждая пара подсвечников объединяется в одну свечу; свечи соединяются с первичным пылеуловителем двумя наклонными газопроводами грязного газа.

Пылеуловители представляют собой сварные цилиндрические сосуды диаметром от 9 до 11 м с коническим днищем и куполом, пылеуловители изготавливаются из листовой стали толщиной 10-14 мм.

Доменный газ уносит с собой большое количество мелких частиц руды и кокса (колошниковой пыли) и по наклонным газоотводам попадает в пылеуловители. Здесь вследствие большего объема сосуда давление и скорость газа резко падают и значительная часть пыли (до 3/4) осаждается в конусах пылеуловителей, откуда ее периодически выпускают в вагоны и отвозят в отвал или на агломерационную фабрику, где она спекается в куски и вновь используется как шихтовый материал для доменной печи.

Пыль сильно истирает стенки свечей, газоотводов и пылеуловителей, поэтому их футеруют (выкладывают) шамотным кирпичом, а тройники и подсвечники - специальными чугунными плитами.

В пылеуловителях доменный газ проходит грубую очистку. Для дальнейшего использования газа необходима его полная очистка, которая происходит в специальных газовых цехах - газоочистках, входящих в комплекс сооружений доменного цеха. От пылеуловителей к газоочистке газ подается по газопроводу грязного газа.

Очищенный газ по газопроводу чистого газа поступает к потребителям.

Доменный газ совершенно бесцветный и не имеет запаха, ядовит, а при соединении с воздухом образует взрывчатую смесь, которая при вспышке взрывается с огромной разрушительной силой. Поэтому при обращении с доменным газом требуется большая осторожность.

Таким образом, основным продуктом доменного производства является чугун, побочными продуктами - шлак, доменный газ и колошниковая пыль.

Основной примесью чугуна является углерод (2-4% и более), который может содержаться в чугуне в виде механической примеси (свободного графита) и в виде химического соединения с железом, называемого карбидом железа или цементитом. Получаемые в доменной печи чугуны разделяются на сорта: литейный, передельный и специальный.

Чугун и шлак периодически выпускают из печи: чугун через 4-6 час., а шлак через 2-3 часа. Производительность доменной печи характеризуется коэффициентом использования полезного объема, который представляет собой отношение полезного объема печи в кубических метрах к суточной выплавке чугуна в тоннах. Полезным объемом называется объем печи от уровня чугунной лётки до отметки низа большого конуса в опущенном состоянии.

Чем меньше коэффициент по абсолютному значению, тем лучше работает доменная печь. Более экономичными в эксплуатации являются доменные печи большого объема, поэтому впрямь предполагается строительство печей большого объема.

*Литейный чугун* содержит свободный графит и имеет в изломе серый цвет и крупнозернистое строение. Этот чугун хорошо заполняет формы и легко поддается обработке режущим инструментом. Литейный чугун применяют для отливки радиаторов, труб, печных приборов и других строительных и бытовых изделий.

*Передельный чугун* содержит углерод в виде химического соединения с железом и имеет блестящий белый излом, поэтому иногда называется белым чугуном (белый цвет излома следует считать условным). Этот сорт чугуна плохо отливается и обрабатывается и идет главным образом в переплавку на сталь.

*Специальные чугуны*, или ферросплавы, имеют повышенное (более 10%) содержание одного или нескольких элементов, например кремния, марганца и др. Применяют их в основном в качестве специальных добавок при выплавке сталей.

### • 3

*Сталь* - деформируемый (ковкий) сплав железа с углеродом (до 2,14%) и другими элементами. Получают, главным образом, из смеси чугуна со стальным ломом в кислородных конвертерах, мартеновских печах и электропечах. Сплав железа с углеродом, содержащий более 2,14% углерода, называют чугуном.

Классификация сталей и сплавов производится: по химическому составу; по структурному составу; по качеству (по способу производства и содержанию вредных примесей); по степени раскисления и характеру затвердевания металла в изложнице; по назначению.

*По химическому составу* углеродистые стали делят в зависимости от содержания углерода на следующие группы:

- малоуглеродистые - менее 0,3% С;
- среднеуглеродистые - 0,3...0,7% С;
- высокоуглеродистые - более 0,7 %С.



Для улучшения технологических свойств стали легируют. Легированной называется сталь, в которой, кроме обычных примесей, содержатся специально вводимые в определенных сочетаниях легирующие элементы (Cr, Ni, Mo, W, V, Al, B, Ti и др.), а также Mn и Si в количествах, превышающих их обычное содержание как технологических примесей (1% и выше). Как правило, лучшие свойства обеспечивает комплексное легирование. В легированных сталях их классификация по химическому составу определяется суммарным процентом содержания легирующих элементов:

- низколегированные - менее 2,5%;
- среднелегированные - 2,5...10%;
- высоколегированные - более 10%.

Легированные стали и сплавы делятся также на классы *по структурному составу*:

- в отожженном состоянии - доэвтектоидный, заэвтектоидный, ледебуритный (карбидный), ферритный, аустенитный;
- в нормализованном состоянии - перлитный, мартенситный и аустенитный.

К перлитному классу относят углеродистые и легированные стали с низким содержанием легирующих элементов, к мартенситному - с более высоким и к аустенитному - с высоким содержанием легирующих элементов.

По качеству, то есть по способу производства и содержанию примесей, стали и сплавы делятся на четыре группы:

Группа	S, %	P, %
Обыкновенного качества (рядовые)	менее 0,06	менее 0,07
Качественные	менее 0,04	менее 0,035
Высококачественные	менее 0,025	менее 0,025
Особовысококачественные	менее 0,015	менее 0,025

Стали обыкновенного качества по химическому составу - углеродистые стали, содержащие до 0,6% С. Эти стали выплавляются в конвертерах с применением кислорода или в больших мартеновских печах.

*Стали обыкновенного качества*, являясь наиболее дешевыми, уступают по механическим свойствам сталям других классов, так как отличаются повышенными ликвацией (химической и структурной неоднородностью) и количеством неметаллических включений.

*Стали качественные* по химическому составу бывают углеродистые или легированные. Они также выплавляются в конвертерах или в основных мартеновских печах, но с соблюдением более строгих требований к составу шихты, процессам плавки и разлива.

Стали обыкновенного качества и качественные по степени раскисления и характеру затвердевания металла в изложнице делятся на *спокойные (сп)*, *полуспокойные (пс)* и *кипящие (кп)*.

Каждый из этих сортов отличается содержанием кислорода, азота и водорода. Так в кипящих сталях содержится наибольшее количество этих элементов.

*Стали высококачественные* выплавляются преимущественно в электропечах, а особо высококачественные - в электропечах с электрошлаковым переплавом (ЭШП) или другими совершенными методами, что гарантирует повышенную чистоту.

ту по неметаллическим включениям и содержанию газов, а следовательно, улучшение механических свойств.

*По назначению* стали и сплавы классифицируются на *конструкционные, инструментальные и стали с особыми физическими и химическими свойствами.*

Сплав железа с углеродом называется сталью, если содержание углерода будет не более 1,7%. Как и в чугунах, кроме углерода, в стали всегда имеются следующие примеси: марганец, кремний, сера и фосфор.

Сталь имеет более высокие физико-механические свойства по сравнению с чугуном: ее можно закаливать, ковать, прокатывать; она имеет высокую прочность и значительную пластичность, хорошо обрабатывается резанием.

В расплавленном состоянии сталь обладает достаточной жидкотекучестью для получения отливок.

Сталь с малым содержанием углерода (такую сталь раньше ошибочно называли железом) мягкая, не закаливается, обладает высокой пластичностью, хорошо сваривается, легко куется и прокатывается в горячем и холодном состоянии.

#### • 4.

С момента изобретения стали, менялись и совершенствовались способы ее производства. В настоящее время существует несколько приоритетных способов производства стали. К ним относятся кислородно-конвертерный, мартеновский и электросталеплавильный способы производства (или плавления) стали. В основе всех этих способов лежит окислительный процесс, направленный на снижение в чугуне некоторых веществ.

#### *Кислородно-конвертерный способ*

Первое использование кислородно-конвертерного способа приходится на пятидесятые годы двадцатого столетия. В процессе производства стали, чугун продувают в конвертере чистым кислородом. При этом, процесс происходит без затраты топлива. Для того, чтобы переработать 1 тонну чугуна в сталь требуется около 350 кубометров воздуха. Стоит отметить, что кислородно-конвертерный способ получения стали является наиболее актуальным на сегодняшний день. При этом, процесс не ограничивается на одном способе вдувания кислорода. Различают кислородно-конвертерный процесс с комбинированной, верхней и нижней поддувкой. Конвертерный способ производства стали с комбинированной поддувкой является наиболее универсальным.

Для осуществления этого метода необходим конвертер. Подача кислорода осуществляется через водоохлаждаемую фурму под давлением. В данном случае, процесс окисления является наиболее значимым. Окисление чугуна происходит под воздействием дутья. В результате окисления выделяется тепло, что способствует снижению примесей и повышению температуры металла. далее происходит так называемое раскисление металла.

#### *Мартеновский способ*

В процессе производства стали мартеновским способом, участвует специальная отражательная печь. Для того чтобы нагреть сталь до нужной температуры (2000 градусов), в печь вводят дополнительное тепло с помощью регенераторов. Это тепло получают за счет сжигания топлива в струе нагретого воздуха. Обязательное

условие – топливо должно полностью сгорать в рабочем пространстве. Особенностью мартеновского способа производства стали является то, что количество кислорода, подаваемого в печь, превышает необходимый уровень. Это позволяет создать воздействие на металл окислительной атмосферы. Сырье (чугун, железный и стальной лом) погружается в печь, где подвергается плавлению в течение 4 – 6 часов. В процессе плавления есть возможность проверять качество металла, путем взятия пробы. В мартеновской печи возможно получать специальные сорта стали. Для этого в сырье вводят необходимые примеси.

### *Электросталеплавильный способ*

В результате электросталеплавильного способа, получают сталь высокого качества. Процесс этот происходит в специальных электрических печах. Основной принцип электросталеплавильного способа производства стали – использование электроэнергии для нагрева металла. Механизм производства следующий: в результате горения нагревательного элемента, выделяется тепло, за счет преобразования электроэнергии в тепловую энергию. Важно отметить, что процесс выплавки связан с выработкой шлаков. Качество получаемой стали во многом зависит от количества и состава шлаков. Основной причиной образования шлаков, в процессе производства стали, является окисление шихты из оксидов.

Благодаря шлакам, происходит связь оксидов, которые образуются в процессе окисления чугуна, а так же удаление ненужных примесей. Кроме этого, шлаки являются передатчиками тепла и кислорода. Присутствие шлаков в процессе производства стали оказывает благотворное влияние на качество стали. Определенное соотношение количества шлаков выводит из стали ненужные вредоносные вещества, например, фосфор. Кроме вышеперечисленных способов производства стали, известны и такие способы, как производство стали в вакуумных индукционных печах, плазменно-дуговая сварка.

Выбор способа всегда зависит от поставленных задач, удобства применения оборудования, необходимого качества полученной стали и от других факторов. Естественно, что каждый способ имеет свои преимущества и свои недостатки.

### • 5

*Углеродистая сталь.* По ГОСТ 380-88 выпускается углеродистая горячекатаная сталь обыкновенного и повышенного качества. Выплавляется она мартеновским или бессемеровским (конверторным) способом (лист и широкополосная сталь, фасонный и сортовой прокат — трубы, проволока, ленты). Эта сталь в зависимости от назначения и гарантируемых характеристик подразделяется на три группы.

**Группа I** — сталь, поставляемая по механическим свойствам (т.е. гарантируется определенный предел прочности, относительное удлинение и т. п.).

К этой группе относятся стали следующих марок: бессемеровская — марок БСт.О, БСт.Зкп, БСт.З, БСт.4кп, БСт.4, БСт.5, БСт.6; мартеновская — марок Ст.0, Ст.1, Ст. 2, Ст. Зкп, Ст.3, Ст.4, Ст.4а, Ст.5, Ст.6, Ст.7.

**Группа II** — сталь, поставляемая по химическому составу (т.е. завод-изготовитель поставляет сталь с определенным химическим составом).

К этой группе относятся следующие стали: бессемеровская — марок Б09кп, Б09, Б16кп, Б16, Б23, Б33; мартеновская — марок М09кп, М12кп, М18кп, М18, М21, М26, М31, М44, М56.

**Группа III** — сталь повышенного качества, у которой гарантируются одновременно определенный химический состав и определенные механические свойства.

К этой группе относится только мартеновская сталь следующих марок: М09, М12, М16, М18а, М21а, М26а, М31а, М44а, М56а.

В марках стали II и III группы цифры обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента, дополнительный индекс «кп» в стали группы I и II — кипящая сталь. Сталь I и II групп может поставляться в полуспокойном состоянии с содержанием кремния 0,06—0,15%. В этом случае к обозначению марки стали в конце добавляется индекс «пс», например М18пс.

По ГОСТ 1050-57 выпускается углеродистая качественная машиностроительная горячекатаная и кованая сортовая сталь размером до 250 мм, выплавляемая в мартеновских или электрических печах.

В зависимости от химического состава сталь подразделяется на две группы:

**группа I**—сталь с нормальным содержанием марганца (марки — 08кп, 08, Юкп, 10, 15кп, 15, 20кп, 20, 25, 30, 35 и т. д. до 85);

**группа II** — сталь с повышенным содержанием марганца (марки— 15Г, 20Г, 30Г, 40Г, 45Г, 50Г, 60Г, 65Г, 70Г, 10Г2, 15Г2, 20Г2, 30Г2, 35Г2, 40Г2, 45Г2, 50Г2).

В марке стали двухзначные цифры обозначают среднее содержание углерода в сотых долях процента, буква Г — повышенное содержание марганца, цифра после буквы Г — приблизительное содержание марганца в процентах.

#### *Маркировка углеродистых сталей.*

Марки углеродистой стали обыкновенного качества обозначаются: Ст. 1, Ст. 2, Ст. 3, Ст. 4, Ст. 5, Ст. 6, Ст. 7. Цифры указывают процентное содержание углерода, увеличенное в 10 раз.

Марки углеродистой качественной конструкционной стали обозначаются: 08, 10, 15, 20, 25 ... 85, где двузначные цифры указывают процентное содержание углерода, увеличенное в 100 раз.

В тех случаях, когда сталь кипящая, после двухзначных цифр, обозначающих содержание углерода, ставится индекс кп, а если сталь полуспокойная, индекс пс. Марки стали, не имеющие индекса, относятся к спокойной стали. Если в стали повышенное содержание марганца, после цифр ставится буква Г.

Сталь 08 обладает хорошей пластичностью в холодном состоянии и применяется для деталей, изготовляемых методом холодной штамповки. Стали 10, 15, 20 —низкоуглеродистые. Они хорошо куются, свариваются, цементируются и применяются для изготовления мелких деталей (валики, гайки, оси, втулки, трубы и листы под сварку). Стали 45, 50, 55 хорошо закаливаются и применяются для изготовления ответственных деталей. Инструментальные углеродистые стали обозначаются: У7, У7А, У8, У8А, У9А, У10, У11, УНА, У12, У12А, У13, У13А. Буква У указывает, что сталь инструментальная углеродистая, цифры указывают процентное содержание углерода, увеличенное в 10 раз; буква А указывает высокое качество стали.

Стали высокого качества по химическому составу отличаются от сталей качественных меньшим процентным содержанием вредных примесей (серы и фосфора).

Углеродистая сталь обладает следующими недостатками, ограничивающими ее применение: высоким коэффициентом теплового расширения, низкими электро-техническими свойствами, низкой коррозионной стойкостью в агрессивных средах и при высоких температурах, снижением прочности при повышенных температурах,

чувствительностью к перегреву (инструментальная сталь), что вызывает коробление и образование трещин при закалке деталей, малой стойкостью мартенсита при отпуске (при  $t = 225^\circ \text{C}$  резко понижается твердость стали). Поэтому инструмент может работать при небольших скоростях резания.

Углеродистая сталь является основным материалом для изготовления деталей машин и аппаратов. Для котельных агрегатов, турбин, вспомогательного оборудования широко применяют низкруклеродистые стали, содержащие до 0,25% углерода. Они очень пластичны и поэтому хорошо поддаются обработке давлением, гибке и правке в горячем и холодном состоянии, хорошо свариваются. Эти стали можно использовать также в виде стального фасонного литья. Кроме того, они обладают вполне удовлетворительными механическими свойствами: достаточно прочны при температурах до  $450^\circ \text{C}$ , хорошо воспринимают динамические нагрузки.

Низкруклеродистые стали удовлетворительно сопротивляются коррозии в условиях работы ряда деталей тепломеханического оборудования электростанций. Эти стали самые дешевые и наименее дефицитные.

Особенности производства стали и стальных полуфабрикатов оказывают существенное влияние на механические свойства и качество готовых изделий.

Большинство деталей котлов и турбин изготавливают из углеродистой стали, выплавленной в основных мартеновских печах.

Продувкой в бессемеровском конвертере получают углеродистую сталь с содержанием углерода до 0,5%. Эту сталь применяют для производства сварных труб неответственного назначения, болтов, профилей, тонкой жести.

При одинаковом содержании углерода бессемеровская сталь имеет более высокую прочность и твердость, чем мартеновская. Эта разница в свойствах объясняется тем, что в бессемеровской стали содержится повышенное количество растворенных азота и фосфора — элементов, упрочняющих сталь, но делающих ее одновременно и более хрупкой. Применение кислородного дутья в конвертерах значительно ослабляет этот недостаток конвертерной стали.

Сталь, полученная в конвертерах с кислородным дутьем и основной футеровкой, приближается по свойствам к мартеновской. Кроме способа выплавки, на свойства стали и готовых изделий большое влияние оказывает способ раскисления, по которому стали делятся на спокойные (сп), полуспокойные (пс) и кипящие (кп).

По назначению углеродистые стали делят на конструкционные и инструментальные. Конструкционные стали в свою очередь разделяют на строительные и машиностроительные.

В строительных сталях содержание углерода обычно не превышает 0,25%, т. е. эти стали относятся к категории малоуглеродистых. Они хорошо свариваются, хорошо деформируются в горячем и холодном состоянии, но прочность их относительно невысока.

Машиностроительные малоуглеродистые стали часто применяют в качестве цементуемых, т. е. для деталей, подвергаемых поверхностному науглероживанию и закалке для повышения износостойкости, а также для изготовления крепежных деталей. Среднеуглеродистые машиностроительные стали (0,3—0,7% углерода) прочнее строительных и могут подвергаться закалке с высоким отпуском. В результате такой термической обработки улучшаются их механические свойства. Однако эти стали хуже свариваются и плохо поддаются деформации в холодном состоянии, в Инструментальные стали содержат от 0,7 до 1,4% углерода.

Углеродистая сталь, полученная в плавильном агрегате, помимо основы (железо и углерод), содержит постоянные примеси (кремний, марганец, фосфор, сера, кислород, азот, водород) и случайные примеси (хром, никель, медь и др.). Некоторые примеси (марганец, кремний) необходимы в стали по условиям технологии ее выплавки. Вредные примеси (сера, фосфор) не поддаются полному удалению. Постоянный характер носят также так называемые скрытые примеси (кислород, азот, водород), содержание которых мало.

В зависимости от способа производства стали содержание примесей в ней колеблется, а это оказывает влияние на свойства. В углеродистой стали углерод является главным элементом, который обуславливает ее физико-механические свойства. Увеличение содержания углерода повышает твердость и прочность стали и уменьшает пластичность и вязкость, теплопроводность и электропроводность. С увеличением процентного содержания углерода (свыше 0,8 %) обрабатываемость резанием и свариваемость стали ухудшаются.

*Кремний* в пределах 0,3...0,5 % является полезной примесью. Он раскисляет сталь и, растворяясь в феррите, повышает его упругость и жесткость.

*Марганец* в пределах 0,25...0,8 % тоже полезен. Он, растворяясь в феррите, упрочняет его, образуя карбид, повышает механические свойства стали, увеличивает ее прокаливаемость и устраняет вредное действие серы.

*Сера* — вредная примесь, так как сернистое железо  $FeS$  образует с железом легкоплавкую (988 °С) эвтектику и приводит к красноломкости стали, то есть повышенной хрупкости в горячем состоянии при ковке и прокатке. Она понижает сопротивляемость стали истиранию и усталостному разрушению, а также химическую стойкость. Содержание серы в сталях обыкновенного качества не более 0,05%, а в высококачественных — 0,03%.

*Фосфор* — вредная примесь, которая резко увеличивает хрупкость стали при нормальной температуре. Это явление, называемое хладноломкостью, возникает в результате того, что фосфор, растворяясь в феррите, существенно увеличивает его хрупкость. Он также снижает ударную вязкость стали. Содержание фосфора в сталях обыкновенного качества не должно превышать 0,05 %, а в высококачественных — 0,03 %.

*Азот и кислород* образуют в сталях неметаллические включения (нитриды, оксиды), которые уменьшают ударную вязкость стали и резко повышают порог хладноломкости.

Водород не образует соединений с железом, поэтому он может выделяться из металла. Однако если водорода много в стали, то это может привести к чрезвычайно опасным внутренним надрывам в металле (флокенам).

Сталь, содержащая, кроме постоянных примесей (марганец, кремний), один или несколько специальных элементов или повышенные концентрации марганца и кремния (>1 %), называется легированной. В качестве легирующих специальных элементов используют Сг, Ni, Ш, Мо, ТЛ, V, Со и др.

Положительное влияние легирующих элементов на свойства стали объясняется тем, что они смещают температуры превращений и особым образом взаимодействуют с железом и углеродом. Специальные элементы (№, 5), Al и др.), растворенные в феррите, повышают его механические свойства.

Введение легирующих элементов способствует образованию структур, имеющих более тонкое строение. В результате взаимодействия с углеродом некоторые элементы (хром, вольфрам, ванадий и др.) образуют химические соединения (карбиды), которые обладают очень высокой твердостью. Легирующие элементы в большинстве случаев способствуют увеличению глубины прокаливаемости стали и достижению более качественной термической обработки, так как придают аустениту большую устойчивость.

*Хром*, широко применяемый для легирования (в конструкционных сталях до 3% Cr), повышает твердость и прочность стали при одновременном незначительном понижении пластичности и вязкости. Он частично растворяется в феррите и одновременно образует прочные карбиды. Хром увеличивает прокаливаемость стали, повышает сопротивляемость коррозии, при содержании свыше 13 % Cr сталь становится нержавеющей. Кроме того, хром повышает жаропрочность, а также сильно изменяет магнитные свойства стали. Благодаря высокой износостойкости хромистой стали из нее изготавливают подшипники качения. Хром вводится в состав быстрорежущей стали.

*Никель* — ценный легирующий элемент (в конструкционных сталях 1...5 % Ni) — придает стали прочность, высокую пластичность и вязкость. Его используют в значительных количествах, когда необходимо получить немагнитную сталь и сталь с повышенной антикоррозионностью. Растворяясь в феррите, никель упрочняет его, способствует более глубокой прокаливаемости стали. Для легирования инструментальных сталей никель не применяют.

*Вольфрам* — карбидообразующий элемент — сильно повышает твердость стали и придает ей красностойкость (способность сохранять твердость при повышенных температурах). Его вводят преимущественно в инструментальные и быстрорежущие стали.

*Ванадий* — карбидообразующий элемент — повышает твердость стали и придает ей красностойкость, способствует образованию мелкозернистой структуры, повышает упругость и сопротивление усталости.

Ванадий вводят в инструментальные и быстрорежущие стали и в небольших количествах в конструкционные стали (0,1...0,3%).

*Молибден* — карбидообразующий элемент — повышает твердость и прочность стали при повышенных температурах. Он способствует глубокой прокаливаемости стали, придает ей мелкозернистость и предотвращает образование отпускной хрупкости.

Молибден вводят в конструкционные, инструментальные и жаропрочные стали.

*Марганец* — недорогой легирующий элемент, является неизбежной примесью стали. В конструкционных сталях марганца содержится не более 2 %. Он повышает прочность и твердость стали, сильно увеличивает глубину ее прокаливаемости. При повышенном содержании марганец придает стали износостойкость и магнитоустойчивые свойства.

*Кремний*, как и марганец, — неизбежная примесь стали. При содержании кремния до 1 % прочность стали увеличивается при сохранении вязкости (рессорные и пружинные стали). Он увеличивает кислотостойкость, жаропрочность, электросопротивление и магнитную проницаемость стали. Кремний вводят в конструкционные, электротехнические, кислотоупорные и другие стали. *Алюминий* вводят для повышения твердости азотируемой стали. Стали с 5...6 % Al приобретают ока-

линоустойкость. В сплавы, предназначенные для изготовления мощных постоянных магнитов, вводят 12...15% Al.

• 7

К специальным сталям относятся стали, в состав которых добавлены специальные легирующие элементы, придающие стали особые свойства, например повышенную прочность или вязкость, жаростойкость и другие. В качестве легирующих элементов применяют хром, никель, вольфрам, молибден и др. К специальным сталям относят также те стали, в которых содержание марганца или кремния превосходит обычное содержание их в простых углеродистых сталях. В зависимости от рода специальной примеси сталь называется марганцовистой, никелевой, хромоникелевой и т.д.

Специальные стали подразделяются в зависимости от количества легирующих добавок на низколегированные (количество добавок не превышает 2,5%), среднелегированные (добавок от 2,5 до 10%), высоколегированные (добавок свыше 10%) и легированные инструментальные стали.

Низколегированные стали с малым содержанием углерода—до 0,35%—свариваются хорошо. Сварка высоколегированных сталей с высоким содержанием углерода затруднена и требует особых приемов сварки. В нашей промышленности широко применяются специальные стали. В сварочной практике часто приходится сталкиваться со сваркой таких специальных сталей, как низколегированная молибденовая и хромомолибденовая сталь марок 15М, 20М, 15ХМ, низколегированная хромокремнемарганцевая сталь марок 20ХГСА, 25ХГСА, 30ХГСА, высоколегированные хромоникелевые нержавеющие стали и др.

Легированные стали классифицируют по назначению, химическому составу и структуре.

По назначению легированные стали делят на три группы.

1. Конструкционные стали, применяемые для изготовления деталей машин и конструкции, подразделяют на: работающие в условиях обычных температур; работающие в условиях повышенных температур (окалиностойкие).

2. Инструментальные стали и сплавы, применяемые для изготовления различного производственного инструмента и оснастки, подразделяют на три вида: для режущего инструмента; для штампов; для измерительного инструмента.

Инструментальные стали должны обладать высокой твердостью и износостойкостью.

3. Стали и сплавы с особыми свойствами, обладающие определенными физическими, химическими или механическими параметрами, объединены в шесть групп: нержавеющие, с высоким электросопротивлением, электротехнические, с особым тепловым расширением, магнитные, для работы при высоких температурах (жаропрочные и жаростойкие).

По химическому составу стали подразделяют в зависимости от того, какие легирующие элементы (кроме Fe и C) и в каких количествах присутствуют в стали.

В зависимости от количества одновременно находящихся легирующих элементов различают тройные, четвертные и сложнолегированные стали.

В зависимости от основных легирующих элементов сталь подразделяют на ряд групп, например хромистая, марганцовистая, хромомарганцовистая и т.д.



В зависимости от общего содержания легирующих элементов различают низколегированные (с общим содержанием легирующих элементов не выше 3), средне-легированные (с общим содержанием легирующих элементов 3...10%) и высоколегированные (с общим содержанием легирующих элементов более 10%) стали.

В зависимости от химического состава и свойств легированная конструкционная сталь делится на следующие категории: качественная, высококачественная—А, особо высококачественная — Ш. По структуре в отожженном состоянии легированные стали подразделяют на доэвтектоидные, имеющие в структуре свободный феррит; заэвтектоидные — избыточные карбиды и ледебуритные — первичные карбиды, выделившиеся из жидкой фазы.

По структуре после охлаждения на воздухе легированные стали подразделяют на три основных класса: перлитный, мартенситный и аустенитный. Эта классификация чрезвычайно важна, поскольку по структуре сталей полностью устанавливают их свойства. Например, сталь, имеющая перлитную структуру, обладает небольшой твердостью и высокой пластичностью, а сталь, имеющая мартенситную структуру, весьма твердая и хрупкая.

Маркировка легированных сталей. Легированные стали обозначают по буквенно-цифровой системе; легирующие элементы — буквами: никель — Н, хром — Х, вольфрам — В, ванадий — Ф, молибден — М, титан — Т, кобальт — К, кремний — С, марганец — Г, алюминий — Ю, медь — Д, ниобий — Б, бор — Р, фосфор — П, цирконий — Ц, селен — Е, редкоземельные элементы — Ч.

Первые цифры марки (конструкционная сталь) указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, стоящие за буквами, означают среднее содержание данного легирующего элемента в стали в целых процентах, если его содержание превышает 1,5%. Например, марка 20ХН обозначает хромоникелевую сталь, содержащую около 0,20 % С, до 1,5 % N1 и до 11,5% Cr.

• 8

Конструкционные легированные стали (ГОСТ 4543—71) применяют для изготовления различных деталей и машин. В зависимости от условий работы они должны обладать необходимыми механическими свойствами: высокой прочностью при значительных статических нагрузках, пластичностью и вязкостью при динамических воздействиях, достаточной выносливостью при знакопеременных нагрузках, твердостью и износостойкостью. Конструкционные легированные стали делятся на: 1) цементируемые; 2) улучшаемые; 3) азотируемые; 4) стали со специальными свойствами.

Низкоуглеродистые (0,1...0,3 % С) легированные стали подвергаются цементации и нитроцементации. Этими технологическими методами упрочняются шестерни, зубчатые колеса, червяки, оси, рычаги переключений, поршневые пальцы и др. В качестве легирующих элементов для цементуемых сталей используют хром, никель, марганец, молибден, титан и др. Для деталей, работающих в условиях износа при трении (поршневые пальцы, шлицевые валы), применяют стали 15Х, 20Х, 15ХФ, 20ХФ, 18ХГ, а также стали повышенной прочности, вязкости и прокаливаемости марок 20ХН, 12ХН2, 12ХН2М и др. Для тяжело нагруженных зубчатых колес с высокой прочностью сердцевины зуба используют стали 18ХГТ, 25ХГТ, 25ХГМ, 30ХГТ.

Азотируемые стали 38Х2Ю и 38Х2МЮА используют для изготовления деталей с большой твердостью и износостойкостью поверхности (валики водяных насосов, плунжеры, гильзы цилиндров двигателей внутреннего сгорания и др.).

Улучшаемые легированные стали (0,4...0,5 % С) применяют для большой группы деталей машин, работающих не только при статических, но и в условиях циклических и ударных нагрузок (валы, штоки, шатуны и др.).

Хромистые стали 40Х, 45Х, 50Х относятся к дешевым конструкционным материалам. С увеличением содержания углерода в них повышается прочность, но снижаются пластичность и вязкость. Для изготовления пружин и рессор используют легированные стали 50С2, 55С2, 50ХФА, 60С2ХА и др., обладающие высокой упругостью, выносливостью, достаточной вязкостью и пластичностью.

Подшипниковые стали ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ, служащие для изготовления подшипников качения, обладают высокой твердостью и износостойкостью.

Особое положение занимает коррозионно-стойкая шарикоподшипниковая сталь 95Х18 для деталей, работающих при температуре до 500°С.

*Стали и сплавы с особыми свойствами.*

*Нержавеющие стали* обладают стойкостью против электрохимической коррозии (атмосферной, щелочной, кислотной и др.).

*Коррозионно-стойкие стали* для общего и химического машиностроения подразделяют на: стали (08Х13, 12Х13, 20Х13 —ГОСТ 5632—72), применяемые в слабоагрессивных средах (воздух, вода, пар) для изготовления деталей с повышенной пластичностью, подвергающихся ударным нагрузкам (клапаны гидравлических прессов, предметы домашнего обихода и т. д.); стали (09Х15Н8Ю, 07Х16Н6, 08Х17Н5МЗ —ГОСТ 5632—72) для изделий, работающих в атмосферных условиях, уксуснокислых и других солевых средах; стали (08Х17Т, 08Х18Т1, 15Х25Т —ГОСТ 5632—72), применяемые в средах средней агрессивности для изготовления оборудования заводов пищевой и мясо-молочной промышленности; стали (08Х18Н10Т, 08Х18Н12Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х17Н13М3Т —ГОСТ 5632—72), применяемые в средах повышенной и высокой агрессивности для изготовления сварных изделий, работающих в азотной кислоте и азотнокислых средах при повышенных температурах.

*Жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы.* Жаропрочность— способность материала противостоять механическим нагрузкам при высоких температурах. Многие жаропрочные стали и сплавы должны обладать одновременно и достаточной жаростойкостью.

Жаростойкость (окалиностойкость) — способность сталей и сплавов сопротивляться окислению при высокой температуре. Жаростойкость зависит от непроницаемости и прочности пленки окислов, образующихся на поверхности сплавов в процессе газовой коррозии при высоких температурах.

Для получения прочной и непроницаемой пленки сталь легируют хромом, а также кремнием или алюминием.

Жаропрочные стали и сплавы классифицируют по температуре эксплуатации. Для работы при 500...550 °С используют стали марок 20Х13, 15Х11МФ, 13Х14Н3В2ФР, из которых изготавливают лопатки паровых турбин, тяжело нагруженные детали (диски, валы, стяжные болты), работающие в условиях повышенной влажности.

Для работы при 650...850 °С применяют стали марок 40Х9С2, 40Х10С2М, 45Х14Н14В2М, из которых изготавливают клапаны автомобильных, тракторных двигателей. Кроме жаропрочных сталей, для работы при 650...850 °С применяют сплавы (ХН35ВТ, ХН80ТБЮ, ХН77ТЮР) на никелевой и железоникелевой основе, из которых изготавливают рабочие лопатки и диски газовых турбин.

Для работы при 900...1100°С используют сплавы марок ХН62МВКЮ, ХН56ВМКЮ, ХН60ВТ, из которых изготавливают лопатки и листовые детали газовых турбин.

### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Что называется чугуном?
2. На какие группы делятся чугуны в зависимости от формы графита и условий его образования?
3. Какие чугуны имеют ограниченное применение?
4. Из какого чугуна изготавливаются такие детали, как распределительные и коленчатые валы?
5. В каких печах производится выплавка чугуна?
6. Что является основным материалом для доменного производства?
7. С какой целью воздух в доменную печь при выплавке чугуна подается подогретым до 600-800° и под давлением 1,5-2 атм?
8. По каким признакам производится классификация сталей и сплавов?
9. На какие группы делятся стали и сплавы по качеству?
10. Чем объясняется положительное влияние легирующих элементов на свойства стали?
11. Как обозначают легированные стали?
12. От чего зависит жаростойкость сталей?

## **Тема 2.2. Износостойкие материалы**

План

1. Материалы с высокой твердостью поверхности
2. Антифрикционные материалы

### • 1.

Долговечность машин в большой мере зависит от износостойкости материала, из которого изготовлены ее детали. Износостойкость стали зависит от ее химического состава, структуры, термической обработки и твердости структурных составляющих.

Обеспечение износостойкости связано с предупреждением катастрофического износа, уменьшением скоростей начального и установившегося изнашивания. Эта задача решается рациональным выбором материала трущихся пар и способа его обработки.

Различают следующие виды изнашивания:

- *абразивное* – образуется твердыми частицами, попадающими в зону контакта;
- *адгезионное* – связано с образованием на участках контакта адгезионных мостиков сварки, за счет того, что на одной поверхности трения образуются углубления, на другой – вырванные частицы повторно схватываются и бороздят трущиеся поверхности, вызывая их интенсивное разрушение и, из-за большого тепловыделения, сваривание (заедание);

- *гидро- и газообразивное* – образуется твердыми частицами, перемешиваемыми жидкостью или газом;
- *эрозионное, гидро- и газозерозионное* – образуется за счет потока жидкости или газа;
- *кавитационное* – образуется от гидравлических ударов жидкости;
- *фреттинг-процесс* – при механическом способе воздействия;
- *фреттинг-коррозия* – при коррозионно-механическом воздействии;
- *окислительное* – разрушение поверхности путем среза оксидных пленок, которыми всегда покрыты трущиеся поверхности, это наиболее благоприятный вид изнашивания.

В зависимости от механических и фрикционных свойств износостойкие материалы подразделяют на три группы:

1. Материалы с высокой твердостью поверхности.
2. Антифрикционные материалы, имеющие низкий коэффициент трения скольжения.
3. Фрикционные материалы, имеющие высокий коэффициент трения скольжения.

Большинство пластичных металлов (*алюминий, свинец* и др.), в том числе и *титан* имеют аномально высокий коэффициент трения и износ. Это обусловлено тем, что оксидная пленка имеет высокую твердость и прочность, а нижележащий металл мягок, поэтому пленка легко разрушается, и схватывание развивается даже при малой нагрузке. Если титан подвергнуть азотированию, то он станет износостойким, т.к. оксидная пленка сформируется на твердой основе.

*Хром, сталь, а также медь* образуют тонкие прочные пленки. Закаленные стали и стали, упрочненные химико-термической обработкой, имеют высокую стойкость к схватыванию, которая повышается при сульфидировании и фосфатировании. При этом формируется пленка, которая в начальный момент легко разрушаясь, улучшает прирабатываемость и снижает коэффициент трения, а в тяжелых условиях трения способна изменяться, образовывать вторичные структуры сложного состава и повышенной износостойкости.

К износостойким относят углеродистые инструментальные стали У10...У13, хромистые, хромовольфрамовые, быстрорежущие стали. К износостойким также относят графитизированные стали марок ЭИ293, ЭИ336 и ЭИ366, имеющие высокое содержание углерода и кремния (1,30...1,75 % С, 0,7...1,25 % Si), которые повышают способность стали к графитизации при графитизирующем отжиге.

Детали из графитизируемой стали можно применять в отожженном состоянии и после закалки с отпуском. Термически обработанную графитизированную сталь используют для холодных штампов, калибров, траков и других деталей, подвергающихся в работе большим давлениям и износу. Из этой стали изготавливают литые коленчатые валы.

Широкое распространение в качестве износостойких сталей получили высокомарганцовистые литые аустенитные стали марки 110Г13Л с содержанием 1,0...1,4% С, 11...14% Mn. Они обладают высокой вязкостью, износостойкостью в условиях ударных нагрузок и больших давлений; эти стали применяют для изготовления гусениц тракторов, черпаков и козырьков землечерпальных машин. Данные стали трудно обрабатываются резанием из-за способности наклепываться.

Антифрикционные материалы - материалы, применяемые для деталей машин (подшипники, втулки и др.), работающих при трении скольжения и обладающих в определённых условиях низким коэффициентом трения. Отличаются низкой способностью к адгезии, хорошей прирабатываемостью, теплопроводностью и стабильностью свойств. В условиях гидродинамической смазки, когда детали (не деформирующиеся под влиянием давления в смазочном слое) полностью разделены сравнительно толстым слоем смазочного материала, свойства материала этих деталей не оказывают влияния на трение.

Антифрикционность материалов проявляется в условиях несовершенной смазки (или при трении без смазки) и зависит от физических и химических свойств материала, к которым относятся: высокие теплопроводность и теплоёмкость; способность образовывать прочные граничные слои, уменьшающие трение; способность материала легко (упруго или пластически) деформироваться или изнашиваться, что способствует равномерному распределению нагрузки по поверхности соприкосновения (свойство прирабатываемости).

Проявлению антифрикционности в условиях сухого трения способствует наличие в материале таких компонентов, которые, сами обладая смазочным действием и присутствуя на поверхности трения, обеспечивают низкое трение (например, графит, дисульфид молибдена и др.). Одним из важных свойств А. м., обуславливающих антифрикционность при всех условиях трения, является его неспособность или малая способность к "схватыванию" (адгезии) с материалом сопряжённой детали. Наиболее склонны к "схватыванию" при трении одноимённые пластичные металлы в паре, имеющие гранецентрированную и объёмноцентрированную кубической решётки. При трении по стали наименее склонны к "схватыванию" серебро, олово, свинец, медь, кадмий, сурьма, висмут и сплавы на их основе.

Наиболее распространены как антифрикционные материалы подшипниковые материалы (ПМ), применяемые для подшипников скольжения. Кроме антифрикционных свойств, они должны обладать необходимой прочностью, сопротивлением коррозии в среде смазки, технологичностью и экономичностью. Вследствие различия в требованиях к материалу подшипника, образующему поверхность трения (антифрикционность), и к остальной части подшипника (достаточная прочность) получили распространение ПМ и подшипники, у которых основа состоит из прочного конструкционного материала (например, стали), а поверхность трения — из слоя антифрикционного материала (например, баббита).

Антифрикционный материал наносится литейным способом на заготовку подшипника или на непрерывно движущуюся стальную ленту; из полученной биметаллической калиброванной ленты подшипники (вкладыши и втулки) изготавливаются штамповкой.

Подшипниковые материалы (ПМ) делятся на металлические и неметаллические. К металлическим ПМ относятся: сплавы на основе олова, свинца, меди, цинка, алюминия, а также некоторые чугуны; к неметаллическим ПМ — некоторые виды пластмасс, материалы на основе древесины, графито-угольные материалы, резина. Некоторые ПМ представляют собой сочетание металлов и пластмасс (например, пористый слой, образованный спечёнными бронзовыми шариками, пропитанный фторопластом-4 или фторопластом-4 с наполнителями).

ПМ на основе олова или свинца (баббиты) применяются в подшипниках в

виде слоя, залитого по стали (иногда по бронзе). Прочное сцепление достигается специальной очисткой стали; возможна также наплавка баббита (для больших подшипников) и заливка им поверхности подшипника, имеющего углубления или пазы для лучшего сцепления. Подшипники автомобилей изготавливаются штамповкой из биметаллической ленты стальбаббит.

ПМ на медной основе — бронзы оловянистые, оловянно-свинцовистые, свинцовистые, некоторые безоловянные, а также некоторые латуни. Для наиболее напряжённых подшипников двигателей внутреннего сгорания применяются свинцовистые пластичные бронзы (25% свинца и более) в виде тонкого слоя, залитого по стали.

ПМ на цинковой основе служат заменителями бронзы, например сплав ЦАМ 9—1,5 применяется в подшипниках паровозов как для изготовления вкладышей целиком, так и для заливки по стали; известен также метод плакирования стали этим сплавом при производстве биметаллической ленты прокаткой.

ПМ на основе алюминия широко применяемые для подшипников двигателей внутреннего сгорания, можно подразделить на 2 группы по степени пластичности (оцениваемой по твёрдости). По сравнению с баббитами пластичные алюминиевые сплавы обладают более высокой теплопроводностью и лучшими механическими свойствами при повышенных температурах; они гораздо дешевле, но хуже прирабатываются, менее способны "поглощать" твёрдые частицы и несколько сильнее изнашивают сопряжённый стальной вал. Их свойства улучшают нанесением на рабочую поверхность тонкого (25 мкм) слоя оловянно-свинцовистого сплава. Наиболее высокими антифрикционными свойствами обладает алюминиевый сплав с 20% олова, с микроструктурой, полученной в результате пластического деформирования и отжига.

Серый перлитный чугун при определённой микроструктуре (перлит средне- или крупнопластинчатый, графит средней крупности, фосфидная эвтектика в виде изолированных включений) обладает антифрикционными свойствами и используется для подшипников, работающих при невысоких нагрузках и малых скоростях.

ПМ на основе пластмасс с наполнителями из ткани (текстолит) древесного шпона, древесной крошки с успехом применяют в подшипниках, обильно смачиваемых водой, при невысоких частотах вращения вала. Всё большее распространение как ПМ получают пластмассы (полиамиды, политетрафторэтилен и др.), работающие со смазкой маслом или водой. Полиамиды используют также в виде тонкого покрытия (например, 0,3 мм) по металлической основе подшипника, что повышает допустимую нагрузку. Режим работы подшипников из пластмасс ограничивается температурой на поверхности трения (например, для полиамидов не более 80—100°C). Особенность некоторых подшипников из полиамидов — почти полное отсутствие изнашивания сопряжённого стального вала. Наилучшей антифрикционностью по сравнению с другими пластмассами при малой скорости скольжения без смазки обладает Фторопласт-4, причём низкое трение сохраняется у него в широком интервале рабочих температур от —200°C до 260°C.

ПМ на основе древесины. В качестве ПМ в основном используют натуральную древесину и прессованную древесину, древеснослоистые пластики. Пример натурального ПМ — гваяковое или бакаутовое дерево, применяемое при смазке водой. ПМ на основе древесины используют при обильной смазке водой в подшипниках прокатных станков, водяных турбин, валов корабельных винтов.

Графито-угольные ПМ представляют собой продукты прессования и термической обработки смеси нефтяного кокса и каменноугольной смолы с небольшим

количеством натурального графита. Применяются как ПМ для работы без смазки при невысоких удельных нагрузках, температуре до 480°C, в воздушной среде. Изготавливаются также графито-угольные ПМ, пропитанные жидкими металлами или смолой.

Резину как ПМ используют при хорошей смазке водой, малых удельных нагрузках и небольших скоростях скольжения. Режим работы ограничивается температурой на поверхности трения 50—70 °С.

Металло-керамические самосмазывающиеся ПМ применяют в виде пористых втулок (главным образом малого размера, работающих при низких скоростях без подвода смазки извне). Изготавливаются спеканием предварительно спрессованных заготовок из порошков оловянистой бронзы (10% Sn) с примесью графита или железа с графитом. Степень пористости — около 25%. Втулки пропитываются маслом

### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. От чего зависит износостойкость стали?
2. Назовите виды изнашивания конструкционных материалов
3. На какие группы подразделяют износостойкие материалы в зависимости от механических и фрикционных свойств?
4. В каких случаях следует применять антифрикционные материалы?

### **Тема 2.3. Материалы с малой плотностью**

#### План

1. Общая характеристика и классификация алюминиевых сплавов
2. Общая характеристика и классификация магниевых сплавов

#### • 1

Алюминий и его сплавы. Характерные свойства алюминия — высокая пластичность, теплопроводность, электропроводность и малая прочность. Он слабо подвергается коррозии на воздухе, в пресной воде и некоторых других средах благодаря тому, что на его поверхности образуется плотная оксидная пленка.

Алюминий широко применяют для электротехнических целей, изготовления трубопроводов, цистерн для молока, посуды и т.д. Как конструкционный материал применять алюминий нецелесообразно из-за низкой прочности.

По степени чистоты ГОСТ 11069—74 предусматривает алюминий особой чистоты, высокой чистоты и технической чистоты.

Технический алюминий изготавливают в виде листов, профилей, прутков, проволоки и других полуфабрикатов, маркируют АД и АД1.

В современной технике широко применяют сплавы на алюминиевой основе, которые по своим технологическим свойствам можно разделить на три группы: литейные сплавы, из которых детали изготавливают методом литья; деформируемые сплавы, из которых изготавливают различные полуфабрикаты прокаткой, прессованием, волочением, ковкой и штамповкой, сплавы, получаемые методом порошковой металлургии (САП — спеченные алюминиевые порошки, САС — спеченные алюминиевые сплавы).

Литейные сплавы должны обладать высокой жидкотекучестью, небольшой усадкой и малой склонностью к образованию горячих трещин. Литейные сплавы обозначаются буквами АЛ.

Сплавы, полученные на основе системы  $Al-Si$  (АЛ2, АЛ4, АЛ9), называют силуминами. Данные сплавы применяют для изготовления деталей сложной конфигурации и средней нагруженности.

*Сплавы алюминия с магнием* АЛ8 имеют высокую коррозионную стойкость, их применяют для изготовления деталей, подверженных значительным ударным нагрузкам или работающих при высоких температурах.

*Сплавы алюминия с медью* применяют для производства фасонного литья.

Деформируемые сплавы в зависимости от состава, методов обработки и применения подразделяются на сплавы, не упрочняемые термической обработкой, и сплавы, упрочняемые термической обработкой. Сплавы, не упрочняемые термической обработкой, обладают высокой пластичностью и сопротивляемостью коррозии, а упрочняются они нагартовкой. К этой группе относятся сплавы систем  $Al-Mn$  и  $Al-Mg$ .

*Сплавы алюминия с марганцем* обладают коррозионной стойкостью, пластичностью, хорошей свариваемостью. Прочность этих сплавов (АМц, АМцС и др.) выше, чем у чистого алюминия, и они применяются для изготовления сварных резервуаров для жидкостей и газов.

*Сплавы алюминия с магнием* обладают высокой прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью и хорошо свариваются. В промышленности сплавы алюминия с содержанием до 5% магния (АМг и АМг5) применяют для изготовления трубопроводов для бензина и масла, арматуры.

К сплавам, упрочняемым термообработкой, относятся сплавы системы  $Al-Si-Mg$ , называемые дюралюминами. Упрочняют их закалкой с последующим старением.

Медь и магний — основные элементы в *дюралюминах*, которые сообщают сплавам высокие механические свойства после соответствующей термической обработки.

Все сплавы типа дюралюмина обозначают буквой Д и цифрами, которые показывают условный номер марки сплава. Например, Д1, Д16 (3,8...4,9% Si, 1,2...1,8% Mg, 0,3...0,9% Mn, Al — остальное), которые применяют для изготовления лонжеронов самолетов, обшивки, силовых каркасов, строительных конструкций, кузовов грузовых автомобилей.

При закалке сплавы Д1 и Д16 нагревают до 495... 510°C, а затем охлаждают в воде при 40 °C. После закалки следует старение, когда сплав выдерживают при комнатной температуре несколько суток (естественное старение) или в течение 10...24 ч при температуре 100... 190°C (искусственное старение).

Алюминиевые сплавы дляковки и штамповки, так называемые *ковочные алюминиевые сплавы*, маркируют буквами АК. Они обладают хорошей пластичностью и стойки к образованию трещин при горячей пластической деформации (450...475°C).

*Высокопрочные алюминиевые сплавы* маркируют буквой В. Они отличаются высокой прочностью, но меньшей пластичностью, чем дюралюминий. Представителями высокопрочных алюминиевых сплавов являются сплав В95 и более прочный В96 которые применяют для нагруженных конструкций, работающих в условиях напряжения сжатия (обшивка, стрингеры, шпангоуты, лонжероны самолетов, силовые каркасы строительных сооружений и т.д.).



*Жаропрочные сплавы* для деталей, работающих при температурах до 300 °С (порошки, головки цилиндров, крыльчатки, лопатки и диски осевых компрессоров турбореактивных двигателей и т.д.

К *спеченным алюминиевым сплавам* относятся сплавы на основе  $Al-Al_2O_3$ , получившие название САП и САС, содержащие большое количество легирующих элементов. САС1 применяют для изготовления деталей приборов, работающих в паре со сталью при температуре 20...200°С, которые требуют сочетания низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности. Сплавы типа САП обладают высокой жаропрочностью при длительном нагреве до 500 °С.

• 2

Название «магнезия» встречается уже в III веке н.э., хотя не вполне ясно, какое вещество оно обозначает. Долгое время магнезит - карбонат магния - ошибочно отождествляли с известняком - карбонатом кальция. Слово магнезия происходит от названия одного из Греческих городов - Магнесии. До XVIII века соединения магния считали разновидностями кальциевых или натриевых солей. Открытию магния способствовало изучение состава минеральных вод.

В 1695 году английский врач Крю сообщил, что им выделена из воды эпсомского минерального источника соль, обладающая лечебными свойствами, и вскоре был доказан её индивидуальный характер. Затем стали известны и другие соединения магния. Карбонат магния получил название "белая магнезия", в отличие от «чёрной магнезии» - оксида марганца. Отсюда и созвучие названий металлов, выделенных впоследствии из этих соединений. Впервые магний был получен Деви (XIX в.) из окиси магния. Бюсси, Либих, Девильс, Карон и др получали магний действием паров калия или натрия на хлористый магний.

В 1808 г. английский химик Г. Деви электролизом увлажнённой смеси магнезии и оксида ртути получил амальгаму неизвестного металла, которому и дал название "магнезии", сохранившееся до сих пор во многих странах.

В России с 1831 года принято название "магний". В 1829 г. Французский химик А. Бюсси получил магний, восстанавливая его расплавленный хлорид калием. Следующий шаг к промышленному получению сделал М. Фарадей. В 1830 г. он впервые получил магний электролизом расплавленного хлористого магния.

Промышленное производство магния электролитическим способом предпринято в Германии в конце XIX в. Перед второй мировой войной началось освоение термических способов получения магния.

В настоящее время наряду с развитием электролитического способа совершенствуются силикотермический и карботермический способы получения магния. На первой стадии развития магниевой промышленности в качестве сырья применяли хлористые соли карналлит, природные рассолы, хлоромagneиные щёлочи калийной промышленности. Сейчас наряду с хлористыми солями широко используют доломит и магнезит.

*Физические свойства магния.* Магний - серебристо-белый блестящий металл, сравнительно мягкий и пластичный, хороший проводник тепла и электричества. Почти в 5 раз легче меди, в 4,5 раза легче железа; даже алюминий в 1,5 раза тяжелее магния.

Плавится магний при температуре 651°С, но в обычных условиях расплавить

его довольно трудно: нагретый на воздухе до  $550^{\circ}\text{C}$  он вспыхивает и мгновенно сгорает ослепительно ярким пламенем. Полоску магниевой фольги легко поджечь обыкновенной спичкой, а в атмосфере хлора магний самовозгорается даже при комнатной температуре.

На воздухе магний окисляется, но образующаяся при этом окисная пленка предохраняет металл от дальнейшего окисления. Магний легко растворяется при действии растворов солей аммония. Растворы щелочей на него не действуют. Магний поступает в лаборатории в виде порошка или лент. Если поджечь магниевую ленту, то она быстро сгорает с ослепительной вспышкой, развивая высокую температуру. Магниевые вспышки применяют в фотографии, в изготовлении осветительных ракет. Температура кипения магния  $1107^{\circ}\text{C}$ , плотность =  $1,74 \text{ г/см}^3$ , радиус атома  $1,60 \text{ нм}$ .

*Химические свойства магния.* Химические свойства магния довольно своеобразны. Он легко отнимает кислород и хлор у большинства элементов, не боится едких щелочей, соды, керосина, бензина и минеральных масел. С холодной водой магний почти не взаимодействует, но при нагревании разлагает ее с выделением водорода. В этом отношении он занимает промежуточное положение между бериллием, который вообще с водой не реагирует и кальцием, легко с ней взаимодействующим.

*Классификация магниевых сплавов.* Химический состав основных отечественных магниевых сплавов приведен в таблице. Магниевые сплавы, как и алюминиевые, по способу производства из них полуфабрикаты и изделий разделяют на 2 основные группы:

А) Деформируемые - для производства полуфабрикатов различными методами обработки давлением;

Б) Литейные - для получения детали методами фасонного литья.

Деформируемые и литейные магниевые сплавы маркируют соответственно буквами МА и МЛ.

По плотности магниевые сплавы разбиваются на легкие и сверхлегкие. К сверхлегким относятся сплавы, легированные литием (МА21, МА18), а к легким - все остальные. Сплавы магния с литием (МА21, МА18) - самые легкие конструкционные металлические материалы.

При классификации по возможным температурам эксплуатации магниевые сплавы подразделяются на следующие группы:

1) предназначенные для работы при обычных температурах (сплавы общего назначения);

2) жаропрочные (для длительной эксплуатации при температурах до  $200^{\circ}\text{C}$ );

3) высокожаропрочные (для длительной эксплуатации при температурах до  $250 - 300^{\circ}\text{C}$ );

4) предназначенные для эксплуатации при криогенных температурах.

Различают термически упрочняемые термически неупрочняемые сплавы.

Магниевые сплавы разделяются так же на группы в зависимости от той системы, к которой они относятся по своему химическому составу. Магний применяют в виде металлических пластин при защите от коррозии морских судов и трубопроводов. Защитное действие магниевых «протекторов» связано с тем, что из стальной конструкции и магниевых протекторов (магний стоит в электрохимическом ряду напряжений левее, чем железо) создается электрическая цепь. Происходит разрушение магниевых протекторов; основная же стальная часть конструкции при этом со-

храняется.

В металлургии магний используют как «раскислитель» – вещество, связывающее вредные примеси в расплаве железа. Добавка 0,5% магния в чугун сильно повышает ковкость чугуна и его сопротивление на разрыв. Используют магний и при изготовлении некоторых гальванических элементов.

Сплавы магния играют в технике очень важную роль. Существует целое семейство магниевых сплавов с общим названием «электрон». Основу их составляет магний в сочетании с алюминием (10%), цинком (до 5%), марганцем (1-2%). Малые добавки других металлов придают «электрону» различные ценные свойства. Но главным свойством всех видов «электронов» является их лёгкость (1,8 г/см<sup>3</sup>) и прекрасные механические свойства. Их используют в тех отраслях техники, где особенно высоко ценится лёгкость: в самолёто- и ракетостроении.

В последние годы созданы новые устойчивые на воздухе магниевые-литиевые сплавы с совсем малой плотностью (1,35 г/см<sup>3</sup>). Их использование в технике очень перспективно. Среди кислородных соединений Mg нужно отметить оксид магния MgO, называемый также жжёной магнезией. Он применяется в изготовлении огнеупорных кирпичей, т.к. температура его плавления 2800оС. Жжёная магнезия используется и в медицинской практике.

Интерес к магнию и сплавам на его основе обусловлен, с одной стороны, сочетанием важных для практического использования свойств, а с другой стороны, большими сырьевыми ресурсами магния. Велика сфера использования магния и магниевых сплавов со специальными химическими свойствами, например в источниках тока и для протекторов при защите стальных сооружений от коррозии.

Конструкционные магниевые сплавы – это лишь одна, причём не самая большая по объёму область применения магния. Магний широко используется как химический реагент во многих металлургических процессах. В частности, он применяется в чёрной металлургии для обработки чугуна с целью десульфурации.

В последние годы имеется тенденция к расширению применения магния в качестве химического реагента. Значительное количество магния используется для получения титана, и надо искать пути повышения эффективности применения его в этих целях. Проявляется также значительный интерес к магнию и сплавам на его основе как аккумуляторам водорода.

#### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Назовите характерные свойства алюминия
2. Какие сплавы называют силуминами?
3. На какие группы можно разделить сплавы на алюминиевой основе по технологическим свойствам?
4. Назовите способы получения магния
5. Какова область применения магния?

## Тема 2.4. Материалы с высокой удельной прочностью

План

1. Титан и сплавы на его основе
2. Особенности обработки титановых сплавов

• 1

Титан - металл серого цвета. Температура плавления титана ( $1668\pm 5$ )°С. Титановые сплавы – это передовые металлические соединения, в основе которых лежит титан, обладающий непревзойдённой антикоррозийностью, конструкционной прочностью и тугоплавкостью. Высокая химическая пассивность титана превосходит аналогичные характеристики лучших марок нержавеющей стали. Эти свойства в той или иной степени имеют место в различных титановых сплавах, что обуславливает высокий спрос на эту группу металлов в различных областях промышленности. Титановые сплавы получают путём традиционного легирования чистого титана дополнительными металлами и минералами, что позволяет получать на выходе материалы с различными физико-химическими свойствами. Основные легирующие элементы в титановых сплавах это алюминий, никель, олово, медь, железо, молибден, цирконий, ванадий и хром.

Титановые сплавы в металловедении классифицируются по конфигурации кристаллических решёток, от которой напрямую зависят те или иные свойства конечного материала. Определённые легирующие элементы стимулируют стабилизацию кристаллических решёток титанового сплава в форме гексаэдра ( $\alpha$ -состояние) и в форме куба ( $\beta$ -состояние). Поэтому специалисты различают три вида титановых сплавов  $\alpha$ ,  $\beta$  и смешанное – ( $\alpha + \beta$ ).

К титановым сплавам с кристаллической решёткой типа  $\alpha$  относят соединения с использованием в качестве легирующих элементов алюминия, циркония и олова. Соединение титана с алюминием или оловом позволяет получать титановый прутки из жаропрочных сплавов, который применяются при изготовлении термостойких деталей, работающих в условиях повышенных температур на ответственных участках. Подобные сплавы сохраняют свою техническую и конструктивную прочность при температуре до 400 °С.

Дополнительные основные свойства  $\alpha$ -сплавов можно перечислить следующим списком: хорошая свариваемость; высокая жидкотекучесть; низкий предел застывания.

Последние два свойства позволяют активно использовать титановые  $\alpha$ -сплавы в отливке деталей и заготовок фасонным методом.

Если в  $\alpha$ -сплавах процентный состав легирующих элементов минимален, то подобные соединения называют техническим титаном. Технический титан хорошо поддаётся холодной штамповке и другим видам механической обработки.

Титановые сплавы второй категории, так называемые  $\beta$ -сплавы, отличаются следующими свойствами: более высокая пластичность; противостояние ползучести; способность к холодной механической обработке; возможность упрочнения различными методами.

Единственный недостаток титановых сплавов этой категории – это сравнительно низкий термальный предел рабочего режима – при температуре выше 300 °С металлы этой группы склоны к охрупчиванию.

Как и большинство сплавов на основе цветных металлов, материалы этой категории подразделяются на деформированные и литейные. Деформированные титановые сплавы используются для производства деталей методами механической обработки, а литейные – с помощью фасонного литья. Кроме того, титановые сплавы условно подразделяются в соответствии с областью применения на следующие группы: сплавы для сварных конструкций; жаропрочные сплавы; сплавы, обладающие механической прочностью, используемые в изготовлении штампованных изделий.

Сегодня титановые листы активно применяются в производстве ответственных деталей различной спецификации для машиностроения и строительства, а также в авиационной и космической промышленности.

• 2

*Обработка титана* – сложный технический процесс, который имеет целый ряд особенностей. Они обусловлены, прежде всего, характеристиками данного металла: высокое соотношение веса к прочности, низкий модуль упругости, высокая стойкость к коррозии, низкая теплопроводность. Для его эффективной обработки достаточно сложно выбрать подходящий режущий инструмент, а также организовать процесс резки так, чтобы заготовка была закреплена с максимальной надежностью. Основная проблема заключается в том, что резка титана требует высоких и концентрированных сил резания на обработке, что вызывает усиленные вибрации и быстрый износ режущей кромки.

В сравнении со многими другими металлами, механическая обработка титана предъявляет больше требований, внося соответствующие ограничения. Свойства титановых сплавов оказывают влияние на резку и на режущий материал. При правильном выборе инструмента и режимов резания и подходящей жесткости станка с надежным креплением заготовки, обработка титана будет проведена с большим эффектом. Преодоление влияния свойств титана на процесс обработки помогает избежать многих трудностей.

Твердость и прочность титана при высоких температурах мощно нагружают режущую кромку пластины. Зона резания накапливает большое количество тепла, что может привести к деформации детали. Ключевыми моментами успешной обработки являются правильный выбор марки сплава, а также геометрия сменной пластины. С давних времен мелкозернистым маркам твердых сплавов без покрытия отдается предпочтение, покрытие PVD повышает эффективность.

Важны точность радиального и торцевого биения инструментов при резке титана. Неправильная установка пластин в корпусе фрезы, может повредить все режущие кромки. Стойкость инструмента в обработке титана снижается низкими допусками при изготовлении корпусов фрез или державок, степенью их изношенности, наличием дефектов или низким качеством державки или износом шпинделя станка.

*Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Какова температура плавления титана?
2. Как классифицируются титановые сплавы в металловедении?
3. Каковы преимущества и недостатки титановых сплавов?
4. В чем заключается основная проблема при резке титана?

## Тема 2.5. Материалы, устойчивые к воздействию температуры и рабочей среды

План

1. Металлы, работающие при низких температурах
2. Основные виды коррозии
3. Меры борьбы с коррозией

• 1

Конструкционные стали для работы при низких температурах подразделяют на две группы. В первую группу входят стали, предназначенные для эксплуатации при низких климатических температурах (до  $-60$  °С). Это так называемые стали северного исполнения. Стали второй группы используют в машинах и оборудовании для получения, хранения и транспортировки сжиженных газов с температурами кипения от  $-80$  до  $-269$  °С (углеводородов, кислорода, азота, водорода, гелия и др.). Стали второй группы называют криогенными сталями.

Основным требованием, предъявляемым к криогенным сталям, является высокое сопротивление хрупкому разрушению при рабочих температурах. Температурный порог хладноломкости таких сталей должен находиться ниже рабочей температуры.

В качестве криогенных материалов для работы в широком диапазоне минусовых температур, используют аустенитные стали, многие из которых являются одновременно коррозионностойкими. Криогенные аустенитные стали могут быть хромоникелевыми, хромомарганцевыми и хромоникельмарганцевыми.

Хромоникелевые аустенитные стали содержат от 18 до 25% Cr и от 8 до 25% Ni. К ним относятся 08X18N8; 08X18N10; 08X18N20 и др. Стали сохраняют аустенитную структуру при низких температурах, так как хром и никель эффективно снижают температуру мартенситного превращения.

Хромоникелевые аустенитные стали обладают высоким сопротивлением хрупкому разрушению вплоть до  $-269$  °С (температура кипения жидкого гелия) это определяет их широкий диапазон рабочих температур (до  $-269$  °С).

Для работы при температурах выше  $-196$  °С (температура кипения жидкого азота), могут быть использованы стали, в которых дефицитный никель частично заменен марганцем или совместно марганцем и азотом. Такими сталями являются 10X14Г14Н4Т; 07X21Г7АН5; 03X13Г19 и др. Так же, как никель, марганец повышает стабильность аустенита при охлаждении и холодной пластической деформации, снижая температуру мартенситного превращения.

Термическая обработка криогенных сталей одинакова: закалка 1050—1150 °С в воде для получения однородной аустенитной структуры. Широкое применение для работы при низких температурах (до  $-196$  °С) получили также железоникелевые сплавы (стали), содержащие 3,5—9 % Ni и до 0,06 % C.

Никель интенсивно снижает температурный порог хладноломкости железа и уменьшает его склонность к хрупкому разрушению. При добавлении к железу (0,06 % C) 3—4 % Ni порог хладноломкости снижается от  $-40$  до  $-120$  °С. Сплавы с 6—9 % Ni имеют порог хладноломкости ( $-180$ ) — ( $-190$  °С).

К указанной группе относятся никелевые стали ОН6 (6—7% Ni ); 0,06% C) и ОН9 (8,5—9,5% Ni 0,06% C). Они имеют структуру легированного никелем ферри-

та. Стали экономно легированы, технологичны, хорошо свариваются, имеют более высокие прочностные свойства при комнатной температуре, чем хромоникелевые аустенитные стали.

• 2

Коррозия – это процесс разрушения металлов под воздействием электрохимических или химических факторов окружающей среды. Соответственно, различают два типа коррозии, в зависимости от способа взаимодействия с окружающей средой и механизму протекания процесса окисления. Это химическая коррозия и электрохимическая коррозия. Под термином «химическая коррозия» понимают процессы, протекающие без участия электрического тока.

В процессе химической коррозии на поверхности металла образуются различные химические соединения в виде пленок (оксида, сульфиды и др.). Пример химической коррозии – нагрев стали для термической обработки или обработки давлением. Иногда пленка, образовавшаяся на металле в результате процесса химической коррозии, служит препятствием для дальнейшего разрушения металла. Это происходит, например, у таких металлов, как свинец, олово, алюминий, никель и хром. На их поверхности образуется плотная пленка оксида. На поверхности стали и чугуна пленка образуется непрочная, тонкая, она растрескивается и ведет к дальнейшей коррозии.

Процесс электрохимической коррозии протекает в присутствии электрического тока. Примеры такого типа коррозии – появление ржавчины на корпусах судов, стальной арматуре гидравлических сооружений, под воздействием атмосферных осадков. Принципиально резкого отличия между механизмами протекания химической и электрохимической коррозии нет.

Процесс химической коррозии может плавно перейти к электрохимической, и наоборот, а также носить двойной характер, как это бывает при электролизе. В зависимости от условий протекания коррозия труб бесшовных горячедеформированных бывает: газовая (протекает в присутствии газов при высокой температуре); неэлектролитическая (сталь в бензине); атмосферная (металлические детали и конструкции на воздухе); электролитическая (в жидкой среде под воздействием электрического тока); почвенная (разрушение металлических труб, толстостенных стальных труб под землей); электрокоррозия (под воздействием внешних токов); контактная (разные виды металлов в электролите); структурная (неоднородные по структуре металлы, например чугун и графит в растворе серной кислоты); коррозия напряжения (снижение выносливости металла, вызывающее так называемую коррозионную усталость); коррозия трения (вращающиеся детали машин в морской воде); щелевая коррозия (протекает в зазорах между деталями механизмов); биокоррозия (под воздействием микроорганизмов и биологических факторов).

В зависимости от характера и места распространения коррозии ее подразделяют на местную, сплошную и межкристаллитную. Сплошная коррозия охватывает всю поверхность металлической детали, после чего деталь разрушается. Несмотря на столь печальные перспективы, сплошная коррозия довольно легко по сравнению с другими видами контролируется и поддается оценке. На отдельных частях металлического изделия может возникать местная коррозия. Она более опасна, так как распространяется, как правило, не в ширину, а в глубину, разрушая нижележащие слои и приводя к поломке и разрушению изделия.

Чаще всего местная коррозия возникает там, где имели место механические или другие повреждения поверхности детали. Межкристаллитная коррозия распространяется по границам зерен металла, начинается, как правило, на поверхности и быстро распространяется в глубину. Приводит к хрупкости детали и снижению прочности. Это особо опасный вид коррозии, он возникает обычно при сварке металла или его термообработке.

• 3

Известно большое количество способов защиты металлических поверхностей от коррозионного воздействия среды. Наиболее распространенными являются следующие:

1. Гуммирование — защитное покрытие на основе резиновых смесей с последующей их вулканизацией. Покрытия обладают эластичностью, вибростойкостью, химической стойкостью, водо- и газонепроницаемостью. Для защиты химического оборудования применяют составы на основе натурального каучука и синтетического натрий-бу - тадиенового каучука, мягких резин, полуэбонитов, эбонитов и других материалов.

2. Торкретирование — защитное покрытие на основе торкрет-растворов, представляющих собой смесь песка, кремнефторида натрия и жидкого стекла. Механизированное пневмонанесение торкрет-растворов на поверхность металла позволяет получить механически прочный защитный слой, обладающий высокой химической стойкостью ко многим агрессивным средам.

3. Лакокрасочные покрытия — широко применяются для защиты металлов от коррозии, а неметаллических изделий — от гниения и увлажнения. Представляют собой жидкие или пастообразные растворы смол (полимеров) в органических растворителях или растительные масла с добавленными к ним тонкодисперсных минеральных или органических пигментов, наполнителей и других специальных веществ. После нанесения на поверхность изделия образуют тонкую (до 100—150 мкм) защитную пленку, обладающую ценными физико-химическими свойствами. Лакокрасочные покрытия для металлов обычно состоят из грунтовочного слоя, обладающего антикоррозионными свойствами и внешнего слоя — эмалевой краски, препятствующей проникновению влаги и агрессивных ионов к поверхности металла. С целью обеспечения хорошего сцепления (адгезии) покрытия с поверхностью ее тщательно обезжиривают и создают определенную шероховатость, например, гидро- или дробе- и пескоструйной обработкой.

4. Лакокрасочные покрытия термостойкие — покрытия способные выдерживать температуру более 100 °С в течение определенного времени без заметного ухудшения физико-механических и антикоррозионных свойств. В зависимости от природы пленкообразующего компонента различают следующие виды термостойких лакокрасочных покрытий:

- этилцеллюлозные — при 100 °С;
- алкидные на высыхающих маслах — при 120—150 °С;
- фенольно-масляные, полиакриловые, полистирольные — при 200 °С;
- эпоксидные — при 230—250 °С;
- поливинилбутиральные — при 250—280 °С;
- полисилоксановые, в зависимости от типа смолы — при 350-550 °С, и др.



5. Латексные покрытия — на основе водных коллоидных дисперсий каучукоподобных полимеров, предназначенных для создания бесшовного, непроницаемого подслоя под футеровку штучными кислотоупорными изделиями или другими футеровочными материалами. Латексные покрытия обладают хорошей адгезией со многими материалами, в том числе и с металлами. Они применяются в производствах фосфорной, плавиковой, кремнефтористоводородной кислот, растворов фторсодержащих солей при температуре не более 100 °С.

6. Футерование химического оборудования термопластами. Защитное действие полимерных покрытий и футеровок в общем случае определяется их химической стойкостью в конкретной агрессивной среде, степенью непроницаемости (барьерная защита), адгезионной прочностью соединения с подложкой, стойкостью к растрескиванию и отслоению, зависящей от внутренних механических свойств полимера и подложки, неравновесностью процессов формирования защитных слоев и соединений.

Наибольшее распространение при футеровании химического оборудования получили листы и пленки из полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП), политетрафторэтилена (ПТФЭ), поливинилхлорида (ПВХ), пентапласта (ПТ) и других композиционных материалов.

Для повышения физико-механических и защитных свойств, износостойкости листовые футеровочные материалы наполняют минеральными наполнителями (сажа, графит, сернокислотная обработка, ионная бомбардировка и др.).

Для повышения адгезионной активности по отношению к клеям листовые материалы дублируют различными тканями.

Правильно выбранный способ антикоррозионной защиты позволит обеспечить максимальную долговечность защиты химического оборудования в конкретных условиях его эксплуатации.

### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. На какие группы подразделяют конструкционные стали для работы при низких температурах? Какие стали входят в эти группы?
2. Какие требования предъявляют к криогенным сталям?
3. Что называют коррозией?
4. Назовите основные виды коррозии
5. Укажите опасный вид коррозии, который возникает обычно при сварке металла или его термообработке
6. Каковы способы защиты металлических поверхностей от коррозионного воздействия среды?

## **Тема 2.6. Неметаллические материалы**

### **План**

1. Пластмассы: классификация, свойства, достоинства и недостатки, применение в промышленности
2. Материалы на основе резины, прокладочные и фрикционные материалы

Пластическими массами (пластиками) называют материалы, которые при определенной температуре приобретают пластические свойства, то есть способность принимать в результате прессования, литья под давлением или других видов обработки необходимую форму и сохранять ее.

Некоторые пластики, обладающие низким коэффициентом трения, пригодны для изготовления подшипников скольжения, другие же, обладающие фрикционными свойствами, используются в тормозных устройствах. Пенообразные, пористые пластики применяют для теплоизоляции.

Пластмассы представляют собой сложные композиции. Смола в них является основной составляющей.

Искусственные смолы разделяют на термопластичные и термореактивные. Термопластичные смолы и пластики, изготовленные на их основе, при нагревании приобретают пластичность, размягчаются и плавятся, а после охлаждения отвердевают. При повторном нагреве они снова приобретают пластичность. Благодаря этому свойству данные пластики могут подвергаться многократной переработке.

Термореактивные смолы и пластики, изготовленные на их основе, при нагревании приобретают пластичность, но после охлаждения утрачивают способность вновь размягчаться при повторном нагреве.

В состав пластических масс входят наполнители, пластификаторы, смазывающие вещества, отвердители, красители и др.

*Термореактивные пластмассы* получают на основе фенолформальдегидных, аминоформальдегидных, кремнийорганических смол с различными наполнителями (порошковыми, волокнистыми, слоистыми).

*Пластмассы с порошковыми наполнителями* изготавливают из органических (древесная мука, порошкообразная целлюлоза) и минеральных (молотый кварц, тальк, цемент, графит) порошков.

Из кремнийорганических полимеров можно изготавливать контакторы, коллекторы, изоляцию электрических машин. Композиции на основе эпоксидных смол применяют для изготовления различных деталей машин, литейных моделей, а также для восстановления изношенных деталей.

Пластмассы с волокнистыми наполнителями: волокниты, асболокниты, стекловолокниты.

*Волокниты* представляют собой материалы с наполнителями из отходов хлопка, пропитанного фенолформальдегидной смолой.

*Асболокниты* состоят из асбестоволокнистого минерала и фенолформальдегидной смолы. Они имеют высокую теплостойкость и применяются для теплозащитных покрытий или в качестве кислотоупорных материалов. Асболокниты обладают высокими фрикционными свойствами и используются в тормозных устройствах (тормозные колодки, диски, накладки).

*Стекловолокниты* — это композиции, состоящие из связующего (синтетической смолы) и стекловолокнистого наполнителя. Из стекловолокнитов можно прессовать детали сложных форм с металлической арматурой, изготавливать силовые электротехнические детали, крупногабаритные изделия простой формы (кузова автомобилей, корпуса приборов).

*Слоистые пластмассы* изготавливают прессованием пропитанных термореак-

тивными смолами листов бумаги, тканей и древесного шпона.

*Гетинакс* — слоистый пластик с бумажной основой. Он подразделяется на электротехнический (для панелей, щитков) и декоративный (для облицовки кабин).

*Текстолит* — слоистый пластик с основой из хлопчатобумажной ткани. Его используют для изготовления зубчатых колес, вкладышей подшипников и др. В зависимости от назначения текстолит бывает конструкционный, электротехнический и прокладочный.

Древеснослоистые пластики (**ДСП**) — на основе древесного шпона, их применяют для изготовления зубчатых колес, подшипников, шкивов, втулок.

Асботекстолит — слоистый пластик на основе асбестовой ткани. Это конструкционный, фрикционный и термоизоляционный материал. Из него делают тормозные колодки, фрикционные диски и др.

Стеклотекстолит — слоистый пластик на основе стеклянной ткани. Это электроизоляционный и конструкционный материал для изготовления электрических машин, автомобильных кузовов.

Материал **СВАМ** — стекловолоконный анизотропный пластик. Он имеет большую прочность и высокую ударную вязкость и используется для силовых изделий.

Термопластичные пластмассы характеризуются высокой ударной вязкостью, водостойкостью и хорошими диэлектрическими свойствами, значительной хладотекучестью и низкой теплостойкостью. Из термопластичных пластмасс наиболее широко применяют полиэтилен, полипропилен, полистирол, органическое стекло, поливинилхлорид, фторопласты и др.

Полиэтилен имеет высокие антикоррозионные и диэлектрические свойства, химически стоек. Его применяют для изготовления труб, кранов, контейнеров, кабелей. Им покрывают металлы для защиты от коррозии.

Полипропилен — нетоксичный материал, из него изготавливают различные трубы, детали автомобилей, холодильников, корпуса насосов и др. Пленка из полипропилена имеет более высокую прочность и газопроницаемость, чем из полиэтилена.

Полистирол по диэлектрическим свойствам близок к полиэтилену. Из полистирола изготавливают детали приборов, холодильников, кожухи, сосуды для воды и химикатов, электроизоляцию.

Поливинилхлорид применяют для изготовления труб, изоляции электрокабелей, для производства лаков, клеев, искусственной кожи.

Органическое стекло (плексиглас) — аморфный термопласт, обладающий высокой прочностью, используется для изготовления подфарников, деталей приборов и аппаратов, оптических линз, молокопроводов и др.

Фторопласты обладают высокими антифрикционными свойствами и теплостойкостью, не растворяются в органических растворителях, имеют хорошие диэлектрические свойства, используются для изготовления уплотнительных деталей прокладок, манжет, сальниковых набивок), труб, кранов, насосов и др.

Полиформальдегид обладает высокой прочностью и твердостью, стоек к минеральным маслам и бензину, имеет хорошие антифрикционные и диэлектрические свойства.

Полиамиды (капрон, нейлон) имеют низкий коэффициент трения и хорошую прирабатываемость, высокую прочность, термостойкость, масло и бензостойкость, хорошие технологические и антикоррозионные свойства. Полиамиды применяют для изготовления деталей, подвергающихся трению, в качестве прокладочного и

уплотнительного материала, для изготовления покрышек, транспортерных лент.

Газонаполненные пластмассы (пенопласты, паропласты) получают на основе синтетических полимеров (поливинилхлорида, полистирола, фенолформальдегидных и других смол) и газообразующих материалов (углекислого аммония, бикарбоната натрия и др.).

• 2

Резиной называют продукты химической переработки каучука и вулканизирующих веществ (сера, натрий, диазоаминобензол), осуществляемой при помощи термической обработки (горячая вулканизация) или без нее (холодная вулканизация).

Основными свойствами резины являются: эластичность, вибростойкость, повышенная химическая стойкость, газо- и водонепроницаемость, электроизоляционность.

Основными процессами производства резины являются приготовление резиновых смесей, их переработка в полуфабрикаты (изделия) и вулканизация. Резиновые смеси (сырую резину) готовят из каучука и порошкообразных составляющих. Каучуки по происхождению подразделяют на натуральные, или естественные (НК), и синтетические, или искусственные (СК).

К основным компонентам и составляющим резиновой смеси относятся вулканизирующие вещества (сера, металлический натрий и диазоаминобензол), ускорители вулканизации (дифенилгуанидин, окись цинка), наполнители или усилители (сажа газовая и ламповая, углекислый марганец, мел, барит, тальк, инфузорная земля), противостарители (стеариновая и олеиновая кислоты, минеральные масла, парафины), красители (охра, ультрамарин), регенерат (пластический продукт, полученный специальной обработкой бывшей в употреблении резины).

Введение указанных составляющих при определенном процентном соотношении улучшает эластичность, сокращает время вулканизации, снижает температуру процесса, удешевляет резину, предохраняет ее от быстрого старения, придает мягкость, морозостойкость, повышает пластичность.

Резины общего назначения изготавливают из натрийбутадиенового каучука (СКВ), бутадиенстирольного каучука (СКС), бутадиеннитрильного каучука (СКН), изопренового каучука (СКИ) и др. Резины общего назначения могут работать в воде, воздухе, слабых растворах кислот и щелочей. Из них изготавливают шины, ремни, рукава, транспортерные ленты, изоляцию кабелей, различные резинотехнические изделия.

Специальные резины подразделяют на несколько видов: (Маслобензостойкие, теплостойкие, светоозоностойкие, износостойкие, электротехнические, стойкие к гидравлическим жидкостям. Маслобензостойкие резины могут работать в среде бензина, топлива, масел, а теплостойкие выдерживают температуру до 400°C. Электротехнические резины разделяют на электроизоляционные и электропроводящие (в их состав входит до 70% сажи и графита).

Применяемые в сельскохозяйственном и автотракторном машиностроении резиновые изделия по назначению подразделяют на ряд групп: уплотнительные (кольца, оконные ленты для автомобилей, мембраны и др.); силовые (шестерни, корпуса насосов, муфты, шарниры); опоры скольжения (резинометаллические подшипники, опоры); армированные (гибкие шланги с металлической сеткой); противоизносные (протекторные кольца, катки); фрикционные (фрикционные колеса); несиловые и защитные (ковры, ручки, педали).

Из резиновых изделий изготавливают напорные рукава для топлива, масла, а

также трубопроводы воздушных тормозов, приводные ремни, ленты. Из армированной резины, помимо шлангов, изготавливают шины к различным машинам. Для производства изделий, которым необходимы значительная механическая прочность и твердость, а также хорошие электроизоляционные свойства, применяют эбонит (твердая резина).

Эбонит получают из резиновой смеси, содержащей до 35% серы, путем длительного нагревания. Из него изготавливают детали электрооборудования (магнето), аккумуляторные банки, штурвалы и др.

Прокладочные материалы преднозначены для создания герметичности сопрягаемых деталей с целью предохранения от попадания пыли, а также вытекания смазки, газов и др. К прокладочным материалам относятся кожа, фибра, войлок, картон, паропит, клингерит, пробка, асбометаллические прокладки и кольца, фторопласт-4.

Техническую кожу применяют для изготовления манжет и уплотнительных прокладок для насосов, компрессоров, прессов. Она хорошо сохраняется в среде бензина, масла, но имеет слабую химическую стойкость и повышенную способность к поглощению. В качестве заменителей кожи используют дермантин (ткань, покрытая специальной пленкой) и фибру.

Фибру прокладочную (марки ФТ) получают из специальной бумаги (типа фильтровальной), обработанной концентрированным раствором хлористого цинка. Фибра идет на изготовление уплотнительных прокладок и шайб, а специальная электротехническая фибра используется и в качестве изоляционного материала.

Войлок изготавливают уплотнением шерсти. Он имеет высокие теплоизоляционные свойства. Технический войлок применяют для изготовления сальников, прокладок между металлическими поверхностями, а также для масляных фильтров.

Бумагу и картон изготавливают из дешевых сортов древесины. Их применяют в качестве электроизоляционных материалов и прокладок.

Паронит — листовой материал, изготовленный из асбеста, каучука и наполнителей. Применяют в виде уплотнительных прокладок соединений в моторах, паропроводах, гидравлических установках и других механизмах работающих при температуре до 450 °С.

Клингерит — листовой материал, изготавливаемый из асбеста, смешанного с графитом, суриком, окисью железа и каучуком. Прокладки из клингерита используют в соединениях машин, работающих при температурах до 200 °С.

Пробка изготавливается из коры пробкового или бархатного дерева и применяется в качестве изоляционных прокладок и сальников в двигателях электроустановок.

Асбометаллические прокладки и кольца применяют для уплотнения соединений металлических поверхностей, работающих при температуре до 350 °С и большом давлении, например прокладки головки блока в двигателях внутреннего сгорания. Они состоят из двух листов фольги (медной, латунной или алюминиевой) и заключенного между ними асбестового картона или двух листов латексной бумаги, соединенных перфорированным стальным каркасом.

Фторопласт-4 применяют для изготовления уплотнительных прокладок, манжет, сальфонов.

Фрикционные материалы — тканые асбестовые ленты, асбестовый и асбестолатексный картон, асбестоволокниты, асботекстолиты. Из этих материалов изготавливают детали высокой фрикционной способности (накладки, ленты и колодки тор-

мозных устройств, муфты и др.). Недостатком фрикционных материалов является низкая теплопроводность, увеличение которой достигается введением особых компонентов, например латунных частиц. Фрикционные свойства этих материалов сохраняются при температуре до 300 °С.

*Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Какие материалы называют пластическими массами (пластиками)?
2. Какова область применения пластмасс в технике?
3. Укажите свойства стекловолоконистых анизотропных пластиков
4. Из чего состоят асбометаллические прокладки?

## РАЗДЕЛ 3. ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### Тема 3.1. Стали для режущих и измерительных инструментов

План

1. Материалы для режущих инструментов: углеродистые стали, низколегированные стали, быстрорежущие стали
2. Спеченные твердые сплавы, сверхтвердые материалы стали для измерительных инструментов

#### • 1

Инструментальные стали, применяемые для изготовления различных видов инструмента, можно разделить на четыре категории: пониженной прокаливаемости (преимущественно углеродистые); повышенной прокаливаемости (легированные); штамповые; быстрорежущие. Применяемые на практике инструменты можно разделить на три группы: режущие, измерительные и штампы.

*Стали для режущих инструментов.* Для режущих инструментов применяют стали, имеющие в термически обработанном виде высокую твердость и красностойкость. Измерительные инструменты должны обладать износостойкостью, сохранять свои размеры, поэтому их изготавливают из сталей, имеющих высокую износостойкость. Штампы изготавливают из сталей, обладающих высокой твердостью и вязкостью.

Углеродистые и легированные стали применяют для режущего инструмента при легких условиях работы, для измерительного инструмента и ударного инструмента (штампов). Из быстрорежущих сталей изготавливают режущий инструмент, работающий при ускоренных режимах.

Инструментальные стали пониженной прокаливаемости включают все углеродистые инструментальные, а также стали с небольшим содержанием легирующих элементов. Эти стали закаливают в воде. Инструмент, изготовленный из этих сталей, имеет, как правило, незакаленную сердцевину. После термообработки стали приобретают высокую твердость, прочность и износостойкость, но сохраняют их лишь при относительно невысоком нагреве (200...250°C).

В качестве углеродистых инструментальных сталей используют стали по ГОСТ 1435—74, имеющие невысокую твердость (НВ165...180) и хорошую обрабатываемость в отожженном состоянии. Их используют для изготовления слесарного инструмента, матриц для холодной штамповки, кузнечного, столярного и пневматического инструмента.

Легированные инструментальные стали (ГОСТ 5950—63) марок 7ХФ, 8ХФ, 9ХФ, ИХ, 13Х и другие применяют для изготовления матриц, пуансонов, метчиков диаметром до 30 мм, спиральных сверл, роликовых ножей.

Инструментальные легированные стали повышенной прокаливаемости содержат легирующие элементы в количестве 1...3 % и поэтому обладают повышенной прокаливаемостью и износостойкостью. Их закаливают в масле, а температуру отпуска устанавливают в зависимости от требуемой твердости рабочей части инструмента.

*Стали для изготовления штампов.* Из легированных сталей повышенной прокаливаемости марок Х, 9ХС, ХГ, Х8Г и других (ГОСТ 5950—63) изготавливают

инструменты, для которых необходима высокая твердость и износостойкость (сверла, фрезы, плашки, калибры и штампы для холодной штамповки).

Штамповые стали марок 7ХЗ, 5ХНМ, 5ХНВ и другие обладают хорошей прокаливаемостью и износостойкостью, но невысокой вязкостью.

Из сталей марок 5ХНМ, 5ХНТ, содержащих никель и обладающих большой вязкостью и глубокой прокаливаемостью, изготавливают кузнечные (молотовые) штампы. Для штампов горячего деформирования используют стали марок 3Х2В8Ф, 4Х2В5ФМ и другие, обладающие высокой стойкостью при высоких температурах.

*Стали для измерительных инструментов.* Измерительный инструмент изготавливают из углеродистых (У8...У12) и легированных инструментальных сталей пониженной и повышенной прокаливаемости. Для измерительного инструмента большое значение имеют стабильность размеров в течение длительного времени, а также коэффициент теплового расширения, не изменяющийся при температурных колебаниях, высокая твердость и износостойкость.

Быстрорежущие стали широко применяют для изготовления режущих инструментов, которым необходимы высокая твердость, износостойкость, красностойкость при высоких скоростях резания.

Все быстрорежущие стали обозначают буквой Р. Цифры, стоящие после буквы Р, показывают среднее содержание основного легирующего элемента — вольфрама.

Наибольшее применение имеет сталь марки Р18.

В промышленности находит широкое применение вольфрамомолибденовая сталь марки Р6М3 для изготовления инструментов, работающих в условиях динамических нагрузок и при больших подачах.

Так как быстрорежущая сталь обладает низкой теплопроводностью, то нагревают ее под закалку по ступенчатому режиму (медленно) до 800...850 °С и выдерживают при этой температуре. Фасонные инструменты из этой стали сначала подогревают до 550...600 °С и выдерживают, затем подогревают до 800...850 °С и снова выдерживают.

При 800...850°С сорбит превращается в аустенит, а карбиды сохраняются свободными. От 800...850°С сталь быстро нагревают до температуры закалки, чтобы растворить в аустените максимум карбидов. После короткой выдержки инструмент охлаждают в масле.

В результате закалки получается структура, состоящая из мартенсита (60%), сложных карбидов (10%) и остаточного аустенита (30%); твердость HRC 62...64. Для превращения остаточного аустенита в мартенсит инструмент после закалки подвергают трехкратному отпуску при 560 °С с выдержкой по 1 ч. В результате трехкратного отпуска количество мартенсита и карбидов в структуре повышается, а остаточного аустенита понижается. Для более полного превращения остаточного аустенита в мартенсит применяют обработку холодом. Низкотемпературное (540...570 °С) цианирование инструмента из быстрорежущей стали после отпуска повышает его режущие свойства.

## • 2

На основе синтетических алмазов разработаны и выпускаются сверхтвердые материалы (СТМ), наиболее известные из них баллас, карбонадо, славутич, СВ и эпитаксиальный СТМ и др.



Баллас — сверхтвердый поликристаллический материал, полученный из порошков синтетических алмазов и предназначенный для изготовления инструмента разного назначения. Поликристаллы балласа темного цвета и значительной массы (0,15...2,5 кар), что позволяет делать из них режущие пластины для резцов и волоки (фильеры). Стойкость резцов из балласа в 50 — 60 раз выше, чем из твердого сплава, что позволило достичь высочайшей скорости резания алюминия — 1 500 м/мин, превысив в 3 раза скорость резания алмазным резцом. Кроме того, из этих поликристаллов производят инструмент для доводки поверхности ответственных деталей, снижая при этом на два - четыре класса шероховатость и значительно повышая твердость, в том числе и закаленных изделий.

Выглаживанием обрабатываемой поверхности СТМ достигается пластическая деформация микронеровностей предварительной обработки с одновременным ее упрочнением в холодном состоянии, т.е. создается так называемый наклеп. Особо следует остановиться на использовании балласа для изготовления волок (фильер), необходимых для изготовления путем волочения проволоки диаметром от 12 мкм до 3 мм. До создания балласа волоки изготавливали из ювелирных алмазов высокого качества, а с внедрением лазера в процесс обработки волочильных отверстий в СТМ процесс изготовления тонких нитей значительно упростился и подешевел. Рабочее отверстие волоки имеет сложную конструкцию и состоит из входной части (входной распушки), смазочного и рабочего конусов, калибрующей зоны, обработочного конуса и выходной части (выходной распушки).

Изготавливают волоки разных назначений: для холодного волочения очень мягких металлов (алюминия, цинка, сплавов на их основе), мягких (меди, серебра, золота, платины), полутвердых (латуни, бронзы, никеля, Константина, манганина) и твердых (стали, нихрома, вольфрама, молибдена) материалов. В зависимости от диаметра и свойств протягиваемого материала для изготовления волок используют отборный СТМ массой 0,8...2,2 кар.

Стойкость волок из балласа в 250 раз выше, чем стойкость твердосплавных волок, и позволяет протянуть через них провод длиной свыше 17 тыс. км. Тонкий провод нужен для производства электрических ламп, электродных выводов в полупроводниковых приборах и микросхемах, для изготовления миниатюрных трансформаторов, электромагнитных реле, входящих в состав многочисленных приборов и аппаратов космической техники, и для других целей. Кроме того, микропровод диаметром 20 мкм широко используют в сеткографии для изготовления сеткотрафаретов, а также сит.

Карбонадо — поликристаллический синтетический алмаз черного или темно-серого цвета имеет радиально-лучевое строение с взаимно внедрившимися один в другой кристаллами. Такой алмаз тверд и прочен и оказался хорошим материалом для изготовления резцов, предназначенных для обработки ряда твердых материалов, среди которых ситаллы, рубины, фарфор, германии, керамика и др. Керамику можно обрабатывать с помощью карбонадо со скоростью резания 200... 300 м/мин, твердые сплавы - 15... 30 м/мин.

Славутич — синтетический сверхтвердый материал, полученный спеканием под высоким давлением смеси порошков твердого сплава (ВК6) и крупных зерен (400... 500 мкм) синтетического алмаза. Основное назначение славутича — армирование бурового инструмента, в котором он способен работать при температуре 800 °С и давлении более 20 МПа (200 бар). Данный материал пригоден и для изготовле-

ния измерительных инструментов. Так, измерительная скоба, изготовленная из славутича, выдержала 800 тыс. измерений, а из закаленной стали — только 1,5 тыс. измерений.

Материал СВ — поликристаллический алмазный сверхтвердый, синтезированный спеканием при сверхвысоком давлении из смеси порошков природного и синтетического алмазов и предназначенный для изготовления режущих пластинок, волок, буровых инструментов. Этот материал весьма тверд, более прочен, нежели природные алмазы, так как его структура представляет собой густо переплетенную систему кристаллов, глубоко вросших один в другой (аналогична структуре карбонадо).

Эпитаксиальный СТМ — пленочный поликристаллический материал, выращенный из газовой фазы (метана) методом эпитаксии — упорядоченного наращивания на подложке.

Процесс проводят в специальной установке, где подложкой (затравкой) служит алмаз, структуру которого и повторяет наращиваемая в импульсном режиме из метана сверхтвердая пленка. За прокачкой перенасыщенного метана следуют вспышки света, которые с помощью системы зеркал фокусируются на затравке, в результате происходит образование пленки алмаза на подложке. Такое наращивание алмазной пленки не требует сверхбольших давлений, высоких температур, катализаторов.

Быстрорежущее сверло, покрытое алмазной пленкой, работает в 3 раза дольше обычного. Ряд СТМ получен на основе нитрида бора, который может быть в двух модификациях — гексагональной (ГНБ) и кубической (КНБ), отличающихся высокой химической устойчивостью и термостойкостью, а также повышенной твердостью и жаропрочностью.

Гексагональный нитрид бора — это белый порошок, из него, как и из графита, делают высокоогнеупорные тигли, сухие смазки и др.

Новый сверхтвердый алмазоподобный синтетический материал КНБ обладает свойствами, не уступающими алмазу, а в ряде случаев даже превосходящими его. Это вещество — боразон — состоит из бора (45,6%) и азота (54,4%). Оно совершенно пассивно в отношении железа. Кроме того, на боразон не действуют кислоты, их смеси и едкие щелочи. Данный синтетический алмазоподобный материал превосходит алмаз по теплостойкости (2000°С и для сравнения 800°С у алмаза) и уступает ему по микротвердости (89...94 у боразона и 100,6 ГПа у алмаза). Боразон получают из КНБ и азота при больших давлениях и высоких температурах в присутствии катализатора. Боразон имеет сходную с алмазом кристаллическую решетку, что предопределяет сходство их свойств.

Кристаллы боразона в отличие от большинства кристаллов алмаза обладают проводимостью, а его зерна разнообразны по форме и окраске. Как и алмаз, боразон имеет уникальные абразивные свойства, превосходящие свойства всех известных шлифующих материалов.

Боразон, изготавливаемый разными заводами, известен под торговыми марками «кубонит» и «эльбор». Эльбор — сверхтвердый синтетический материал, состоящий из кубического нитрида бора (КНБ) (85...90%), оксидов магния и кальция (5...2 %) и тугоплавких соединений (10... 1 %). Этот материал в виде порошка с размерами зерен до 250 мкм применяют при изготовлении шлифовального инструмента.

Развитием работ по производству СТМ стал эльбор-Р — «эльбор резцовый», представляющий собой плотно сцементированные, глубоко проросшие один в другой кристаллы КНБ размером в несколько микрометров. Эльбор-Р изготавливают в виде цилиндров диаметром 3,5...7,0 мм и высотой 4...6 мм.

Достоинствами такого материала являются высокая твердость (80...90 ГПа), термическая и химическая стойкость, полная инертность к железу, а также надежная пайка металлизированных режущих пластинок к державкам резцов и фрез. При точении эльбором-Р изделий из быстрорежущей закаленной стали и скорости резания 100 м/мин его стойкость в десятки раз выше стойкости инструмента из твердых сплавов и минералокерамики, а износ при этом в 1,5 раза меньше. Такими резцами можно обрабатывать твердый сплав при изготовлении из него деталей штампов. Эффективными оказались резцы из эльбора-Р при использовании их на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) и станках-автоматах.

При нагревании примерно до 1000°C режущая кромка резца из эльбора-Р окисляется. Однако шероховатость обрабатываемой поверхности изделия при этом уменьшается. При исследовании оказалось, что резец работает как выглаживатель, пластично деформируя микронеровности. Стойкость сверл из эльбора-Р в десятки раз превышает стойкость из традиционных материалов.

Гексанит-Р — сверхтвердый синтетический материал, полученный из модифицированного (подвергнутого кратковременной обработке ударной взрывной волной) гексагонального нитрида бора (ГНБ), синтезированный при давлении 20 ГПа (200 кбар) и температуре 1 500 °С. Полученные таким образом поликристаллы представляют собой цилиндрики диаметром 8,0, высотой 2,5...3,0 мм и массой 0,3... 1,5 кар, обладающие тонкозернистой структурой, высокой вязкостью, большой твердостью, полной инертностью к железу, предназначены для изготовления вставок металлорежущего инструмента, хорошо работающего при точении закаленных сталей и чугунов, выдерживающего ударные нагрузки при обработке прерывистых поверхностей изделий.

Белбор (белорусский нитрид бора) — сверхтвердый материал, синтезированный без применения катализаторов (в результате чего получены порошки и крупные поликристаллы), обладающий высокой твердостью и теплостойкостью, хорошо зарекомендовавший себя при обработке закаленных сталей и твердых сплавов. Исмит — сверхтвердый синтетический поликристаллический материал, полученный из КНБ в смеси с другими веществами. Используется для изготовления режущих вставок к резцам и фрезам. При точении легированной закаленной стали и скорости резания 140 м/мин резец работал 4 ч.

Дисмит — сверхтвердый поликристаллический материал, полученный спеканием мельчайших порошков синтетического алмаза (20...25 %) и КНБ (75...80%) при высоком давлении в присутствии металлического катализатора, имеет кристаллическую решетку типа карбонадо или балласа (в зависимости от состава шихты и условий синтеза) и свойства алмаза и КНБ. При точении трудного для обработки материала — фосфористой бронзы резец работал без перерыва 12 ч, снял стружку общей длиной 288 км.

Кибор — разновидность боразона (кубанита, эльбора), отличается тем, что при температуре до 1400°C не теряет своих рабочих качеств и на 20% прочнее синтетического алмаза.

1. На какие категории делятся инструментальные стали, применяемые для изготовления различных видов инструмента?
2. Какие стали используют для изготовления слесарного инструмента?
3. Для чего применяется вольфрамомолибденовая сталь марки Р6М3?
4. Каково назначение волок?
5. Какой алмаз оказался хорошим материалом для изготовления резцов, предназначенных для обработки фарфора, германия, керамики и др.?
6. Какой материал в виде порошка с размерами зерен до 250 мкм применяют при изготовлении шлифовального инструмента?
7. Какой материал используется для изготовления режущих вставок к резцам и фрезам?

### **Тема 3.2. Твердые сплавы**

1. Классификация твердых сплавов
2. Метод получения твердых сплавов

• 1

*Твёрдые сплавы* — твёрдые и износостойкие металлические материалы, способные сохранять эти свойства при 900—1150 °С.

В основном изготавливаются из высокотвердых и тугоплавких материалов на основе карбидов вольфрама, титана, тантала, хрома, связанных кобальтовой металлической связкой, при различном содержании кобальта или никеля.

Твердые сплавы в настоящее время являются распространенным инструментальным материалом, широко применяемым в инструментальной промышленности. За счет наличия в структуре тугоплавких карбидов твердосплавный инструмент обладает высокой твердостью HRA 80-92 (HRC 73-76), теплостойкостью (800—1000 °С), поэтому ими можно работать со скоростями, в несколько раз превышающими скорости резания для быстрорежущих сталей.

Различают спечённые и литые твёрдые сплавы. Главной особенностью спеченных твердых сплавов является то, что изделия из них получают методами порошковой металлургии и они поддаются только обработке шлифованием или физико-химическим методам обработки (лазер, ультразвук, травление в кислотах и др), а литые твердые сплавы предназначены для наплавки на оснащаемый инструмент и проходят не только механическую, но часто и термическую обработку (закалка, отжиг, старение и др). Порошковые твердые сплавы закрепляются на оснащаемом инструменте методами пайки или механическим закреплением.

*По химическому составу твердые сплавы делят на* вольфрамокобальтовые твердые сплавы (ВК), титановольфрамокобальтовые твердые сплавы (ТК), титано-танталовольфрамокобальтовые твердые сплавы (ТТК).

*Твердые сплавы по назначению делятся (классификация ISO) на:*

Р — для стальных отливок и материалов, при обработке которых образуется сливная стружка;

М — для обработки труднообрабатываемых материалов (обычно нержавеющей

щая сталь);

К — для обработки чугуна;

N — для обработки алюминия, а также других цветных металлов и их сплавов;

S — для обработки жаропрочных сплавов и сплавов на основе титана;

H — для закаленной стали.

Из-за дефицита вольфрама разработана группа безвольфрамовых твердых сплавов, называемых керметами. Эти сплавы содержат в своем составе карбиды титана (TiC), карбонитриды титана (TiCN), связанные никельмолибденовой основой. Технология их изготовления аналогична вольфрамосодержащим твердым сплавам. Эти сплавы по сравнению с вольфрамовыми твердыми сплавами имеют меньшую прочность на изгиб, ударную вязкость, чувствительны к перепаду температур из-за низкой теплопроводности, но имеют преимущества — повышенную теплостойкость (1000°C) и низкую схватываемость с обрабатываемыми материалами, благодаря чему не склонны к наростообразованию при резании. Поэтому их рекомендуют использовать для чистового и получистового точения, фрезерования. По назначению относятся к группе P классификации ISO.

### *Спечённые твёрдые сплавы*

Твердые сплавы изготавливают путем спекания смеси порошков карбидов и кобальта. Порошки предварительно изготавливают методом химического восстановления (1-10 мкм), смешивают в соответствующем соотношении и прессуют под давлением 200—300 кгс/см<sup>2</sup>, а затем спекают в формах, соответствующих размерам готовых пластин, при температуре 1400—1500°C, в защитной атмосфере. Термической обработке твердые сплавы не подвергаются, так как сразу же после изготовления обладают требуемым комплексом основных свойств.

Композиционные материалы, состоящие из металлоподобного соединения, цементированного металлом или сплавом. Их основой чаще всего являются карбиды вольфрама или титана, сложные карбиды вольфрама и титана (часто также и тантала), карбонитрид титана, реже — другие карбиды, бориды и т. п.

В качестве матрицы для удержания зерен твердого материала в изделии применяют так называемую «связку» — металл или сплав. Обычно в качестве «связки» используют кобальт (кобальт является нейтральным элементом по отношению к углероду, он не образует карбиды и не разрушает карбиды других элементов), реже — никель, его сплав с молибденом (никель-молибденовая связка).

### • 2

Для изготовления металлокерамических твердых сплавов порошкообразные составляющие тщательно перемешивают и смесь прессуют под давлением от 100 до 420 МПа. Полученные прессовки спекают в электропечах при температуре 1500°C в атмосфере водорода или в вакууме. При спекании связующий металл (кобальт) расплавляется и, обволакивая зерна карбидов, связывает их.

Твердые сплавы чаще изготавливают в виде стандартных пластин различной формы для оснащения ими резцов, фрез, сверл и других режущих инструментов. Пластины в режущем инструменте крепят либо медным припоем, либо механическим способом. Получают порошки карбидов и кобальта методом восстановления из оксидов. Измельчение порошков карбидов и кобальта производится на шаровых мельницах в течение 2-3 суток до 1-2 микрон. Просеивание и повторное измельче-

ние осуществляют при необходимости. При холодном прессовании в смесь добавляют органический клей для временного сохранения формы. Спекание осуществляют под нагрузкой (горячее прессование) при 1400 °С (при 800—850 °С клей сгорает без остатка). При 1400 °С кобальт плавится и смачивает порошки карбидов, при последующем охлаждении кобальт кристаллизуется, соединяя между собой частицы карбидов.

Твёрдые сплавы в настоящее время являются распространённым инструментальным материалом, широко применяемым в инструментальной промышленности. За счет наличия в структуре тугоплавких карбидов твёрдосплавный инструмент обладает высокой твёрдостью HRA 80-92 (HRC 73-76), теплостойкостью (800—1000 °С), поэтому им можно работать со скоростями, в несколько раз превышающими скорости резания для быстрорежущих сталей. Однако, в отличие от быстрорежущих сталей, твёрдые сплавы имеют пониженную прочность, не обладают ударной вязкостью.

Твёрдые сплавы нетехнологичны: из-за большой твёрдости из них невозможно изготовить цельный фасонный инструмент, к тому же они ограниченно шлифуются — только алмазным инструментом, поэтому твёрдые сплавы применяют в виде пластин, которые либо механически закрепляются на державках инструмента, либо припаиваются к ним.

Твёрдые сплавы ввиду своей высокой твёрдости применяются в следующих областях: оснащение резцов, фрез, сверл, протяжек и прочего инструмента; оснащение измерительного инструмента; оснащение рабочей части клеем; оснащение рабочей части волок; оснащение штампов и матриц (вырубных, выдавливания и проч.); изготовление твёрдосплавных валков (выполняются в виде колец из твёрдого сплава, одеваемых на металлическое основание); напайка спеченных и наплавка литых твёрдых сплавов в горнодобывающем оборудовании; производство износостойких деталей подшипников (шариков, роликов, обойм).

#### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Какие материалы относятся к инструментальным?
2. Что такое быстрорежущая сталь?
3. Какие материалы называют твердыми сплавами?
4. Какова твердость твердых сплавов?
5. Какими свойствами характеризуются алмазы?
6. Какие материалы называют сверхтвердыми?

## РАЗДЕЛ 4. ПОРОШКОВЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### Тема 4.1. Порошковые материалы

План

1. Получение изделий из порошков
2. Свойства и применение порошковых материалов в промышленности

#### • 1

Сплавы, получаемые из металлических порошков прессованием и последующим спеканием без расплавления, называют порошковыми, а метод получения — порошковой металлургией.

Порошковая металлургия позволяет получать готовые изделия, которые обычными методами литья и обработки давлением получены быть не могут либо получение которых сопряжено с большими трудностями. Данным методом получают изделия из особо тугоплавких металлов, сплавы и изделия из не растворимых друг в друге металлов (вольфрам и медь, железо и свинец), изделия из композиций металлов с различными неметаллическими материалами.

Методы производства металлических порошков разделяют на две группы: физико-механические — технологические процессы, при которых металлические порошки получают в результате измельчения твердых или жидких металлов или сплавов без изменения их химического состава; физико-химические — технологические процессы, в результате которых происходят физико-химические превращения исходного материала и получаются металлические порошки, как правило, отличающиеся от исходного материала по химическому составу.

Порошковые материалы из железа, углеродистой, легированной и нержавеющей сталей, бронзы, латуни, меди и других металлов и сплавов применяют для изготовления различных деталей машин и приборов.

Повышение механических свойств (прочности, твердости, пластичности) деталей из порошковых материалов достигается применением легированных порошков, а также термической или химико-термической обработкой.

Большинство деталей машин делают из компактных материалов на железной и железомедной основе. Железомедные спеченные сплавы обладают высокой прочностью, износостойкостью и вязкостью. Из порошковых сплавов на основе меди широкое применение получили латунные порошки для изготовления беспористых подшипников. Сюда же относятся сплавы на алюминиевой основе типа САП и САС.

К порошковым материалам со специальными свойствами относятся: антифрикционные, фрикционные, пористые, магнитные, вакуумные, контактные и др.

Из антифрикционных материалов изготавливают пористые подшипники скольжения и биметаллические вкладыши.

Фрикционные материалы должны иметь стабильный коэффициент трения, быть достаточно прочными, иметь хорошую прирабатываемость, обладать высокой теплопроводностью и коррозионной стойкостью. Пористые материалы широко применяют для изготовления металлических фильтров из порошков железа, меди, латуни, бронзы, алюминия. Эти материалы служат для изготовления деталей, работающих при высоких температурах (лопатки газовых турбин), их также используют

для токоъемников, электродов аккумуляторов, горелок.

Методами порошковой металлургии получают твердые магнитные материалы (постоянные магниты), мягкие магнитные материалы и магнитодиэлектрики. Наиболее распространенным является способ механического измельчения исходного сырья (стружкой, обрезков). Для измельчения применяются механические мельницы.

Физико-химические способы получения порошков: восстановление оксидов, осаждение металлического порошка из водного раствора соли. Получение порошка связано с изменением химического состава сырья. Физико-химические способы получения порошков более универсальны, чем механические. Благодаря использованию дешевого сырья физико-химические способы отличаются экономичностью.

Металлокерамические контактные материалы по своему составу являются псевдосплавами металлов, обладающих высокой прочностью и тугоплавкостью (W, Mo и др.), с металлами, имеющими высокую электропроводность (Al, Si и др.). Для мощных воздушных выключателей применяют контакты на основе карбида вольфрама, а для щеток и коллекторных пластин — медно-графитовые композиции.

Вакуумные порошковые материалы применяют для изготовления ламп накаливания, рентгеновских трубок, катодных ламп, выпрямителей. Они должны обладать высокой механической прочностью, химической инертностью, небольшим коэффициентом линейного расширения, малой распыляемостью. Таким требованиям отвечают тугоплавкие металлы (W, Mo, Ta), а также железо высокой чистоты и его сплавы с никелем, молибденом, кобальтом и медью.

## • 2

Порошковые материалы применяют при изготовлении деталей, которые имеют простую симметричную форму, небольшие массу и размер.

Антифрикционные порошковые сплавы имеют низкий коэффициент трения, легко обрабатываются, имеют хорошую износостойкость. Сплавы на основе цветных материалов применяют в приборостроении и электронной технике.

Химический состав порошков определяется содержанием основного металла или компонента и примесей. Физические свойства порошков определяются размером и формой частиц, микротвердостью, плотностью, созданием кристаллической решетки. Технологические свойства характеризуются текучестью, прессуемостью и спекаемостью порошка.

Эффективность порошковой металлургии повышается в условиях массового производства изделий. Так, в массовом производстве при изготовлении 1 тыс. т деталей методами порошковой металлургии экономится около 1,3 млн. рублей, свыше 2000 т стали, высвобождается более 200 рабочих и 50 металлорежущих станков. С увеличением объема выпуска себестоимость снижается по сравнению с себестоимостью литых заготовок.

Основные преимущества использования порошковой металлургии:

- снижает затраты на дальнейшую механическую обработку, которая может быть исключена или существенно уменьшена;
- использует энерго и ресурсосберегающие технологии;
- позволяет получать изделия с уникальными свойствами, используя многокомпонентные смеси, объединяя металлические и неметаллические компоненты;
- получает более высокие экономические, технические и эксплуатационные характеристики изделий по сравнению с традиционными технологиями;



- упрощает зачастую изготовление изделий сложной формы;
- обеспечивает прецизионное производство.

Для получения изделий из порошков не нужны специалисты высокой квалификации, технологические процессы не загрязняют окружающей среды. При изготовлении изделий заданной формы из порошков зачастую удается вообще избежать последующей механической обработки, а если она нужна, то очень незначительная — обычно это тонкое точение или шлифовка, при которых стружку идет 5—10% металла.

Можно сочетать многие вещества, регулируя тем самым свойства антифрикционных композитов. Литейными методами таких материалов не изготовить — они позволяют получать сплавы, а для работы этих материалов необходима именно структура композитов. Чтобы твердые смазки могли выполнять свои функции, они не должны растворяться в основе. При литье этого растворения избежать нельзя. А используя порошковую технологию — можно.

Порошковая металлургия, открывает широкие перспективы для изучения свойств порошков металлов, полимеров, тугоплавких соединений и получения из них изделий, с заданными характеристиками.

Свойства сталей, полученных из порошков после термической обработки, часто уступают свойствам сталей, полученных обычными методами. Поэтому рекомендовать порошковую технологию для стальных высоконагружаемых деталей нельзя. Вследствие этого, а также по причине высокой стоимости порошкового конструкционного материала, он (порошковая сталь) используется для малонагружаемых изделий, главным образом сложной формы.

Порошковая металлургия позволяет увеличить коэффициент использования металла и повысить производительность труда.

Экономическая эффективность достигается благодаря сокращению или полному исключению механической обработки.

Но вследствие высокой стоимости пресс-форм, изготовление деталей машин методами порошковой металлургии оправдано лишь в массовом производстве.

### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Какие сплавы, называют порошковыми?
2. Каким методом получают изделия из особо тугоплавких металлов?
3. Какими свойствами обладают фрикционные материалы?
4. Какие материалы по своему составу являются псевдосплавами металлов?
5. Чем определяются физические свойства порошков?
6. Назовите основные преимущества использования порошковой металлургии?

## **Тема 4.2. Композиционные материалы**

План

1. Классификация композиционных материалов
2. Свойства композиционных материалов, применение их в промышленности

Современная техника нуждается в материалах, надежно работающих в сложной комбинации силовых и температурных полей, под действием агрессивных сред, излучений, глубокого вакуума и высоких давлений. Таким требованиям отвечают современные материалы, которые называют композиционными (КМ) или композитами. Они состоят из значительно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов.

Композиционные материалы позволяют создавать элементы конструкции с заранее заданными или совершенно новыми свойствами. Композиты применяют в авиа-, машино-, приборостроении, энергетике, в электронной, радиотехнической и электротехнической промышленности, на транспорте, в строительстве и других отраслях. Композиты состоят из матричного пластичного материала и упрочняющего наполнителя.

Матрица связывает композицию и придает ей нужную форму. В зависимости от материала матрицы различают металлические-композиционные материалы (МКМ), полимерные композиционные материалы (ПКМ) и керамические композиционные материалы (ККМ).

Упрочняющий наполнитель — твердое прочное вещество. По типу наполнителя композиты подразделяют на дисперстоупрочненные, волокнистые и слоистые. В дисперсно-упрочненных материалах матрица — основной несущий элемент. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояния между ними, тем прочнее композиционный материал. В качестве примера можно привести равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и др., которые не взаимодействуют с матрицей и не растворяются в ней.

Арматурой в армированных композиционных материалах могут служить волокна различной формы (нити, ленты, сетки). Прочность таких композитов зависит от прочности армирующих волокон.

Слоистые композиционные материалы набирают из чередующихся слоев волокон и листов матричного материала. Слои волокон могут быть различно ориентированы.

Наибольшее распространение получил материал типа САП (спеченная алюминиевая пудра). Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах (размер частиц до 1 мкм) в присутствии кислорода. При длительном размалывании пудра становится мельче и в ней повышается содержание алюминия оксида  $Al_2O_3$ .

После формования и спекания проводят горячую пластическую деформацию для получения плотного беспористого полуфабриката (лент, полос, профилей и т.д.).

Эти материалы хорошо обрабатываются резанием, обладают высокими коррозионной стойкостью и жаропрочностью.

Выпускают три марки дисперсно-упрочненных композиционных материалов (ДКМ) на основе алюминия: САП-1, САП-2 и САП-3, различающиеся концентрацией оксидов (соответственно 6...9, 9...13; 13...17%  $Al_2O_3$ ). С увеличением содержания  $Al_2O_3$  прочность материала возрастает, а пластичность снижается.

Сплавы типа САП применяют в авиастроении для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до 300...500°C (штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепло-

выделяющих элементов и трубы теплообменников).

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы на основе бериллия (BeO) и магнезия (MgO) применяют в авиации, ракетной и ядерной технике в качестве конструкционного материала деталей несущих и корпусных изделий минимальной массы и повышенной прочности. ДКМ на основе Ni используют для работы при температурах выше 1000°C, (лопатки газовых турбин, камер сгорания, трубопроводов и сосудов, работающих при высоких температурах в агрессивных средах). ДКМ на основе Co используют при температуре 1100°C, на основе C — для сопел плазмотронов.

Волокнистые материалы изготавливают путем укладывания волокон в матрицу (лист или фольга), спекания и прессования, прокатки или сварки взрывом.

Используют металлические волокна в виде проволоки из бериллия, вольфрама, молибдена, стали, титановых сплавов, а также неметаллические — борные, углеродные, из карбида кремния, алюминия оксида, циркония оксида, нитевидные кристаллы карбида и нитрида кремния, алюминия оксида и нитрида и др.

Наиболее широкое распространение в качестве матричного композиционного материала получил алюминий. Например, и алюминиевых листов, армированных стальной и бериллиевой проволокой, которая обладает высокой прочностью и сравнительно недорога, изготавливают корпусные детали ракет и топливные баки.

Композит алюминий—волокна бора применяют в самолетостроении для изготовления обшивки крыльев, рулей, элементом хвостового оперения, лонжеронов.

Композит алюминий—углерод применяют в конструкциях топливных баков современных истребителей. Наиболее перспективен КМ на основе углеродных волокон, т.е. углепластик.

• 2

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними. Армирующие материалы могут быть в виде волокон, жгутов, нитей, лент, многослойных тканей.

Содержание упрочнителя в ориентированных материалах составляет 60-80 об.%, в неориентированных (с дискретными волокнами и нитевидными кристаллами) 20-30 об.%. Чем выше прочность и модуль упругости волокон, тем выше прочность и жесткость композиционного материала.

Свойства матрицы определяют прочность композиции при сдвиге и сжатии и сопротивление усталостному разрушению. В слоистых материалах волокна, нити, ленты, пропитанные связующим, укладываются параллельно друг другу в плоскости укладки. Плоские слои собираются в пластины. Свойства получаются анизотропными. Для работы материала в изделии важно учитывать направление действующих нагрузок. Можно создать материалы как с изотропными, так и с анизотропными свойствами. Можно укладывать волокна под разными углами, варьируя свойства композиционных материалов. От порядка укладки слоев по толщине пакета зависят изгибные и крутильные жесткости материала. Применяется укладка упрочнителей из трех, четырех и более нитей. Наибольшее применение имеет структура из трех взаимно перпендикулярных нитей. Упрочнители могут располагаться в осевом, радиальном и окружном направлениях. Трехмерные материалы могут быть любой толщины в виде блоков, цилиндров. Объемные ткани увеличивают прочность на отрыв и сопро-

тивление сдвигу по сравнению со слоистыми. Система из четырех нитей строится путем разложения упрочнителя по диагоналям куба. Структура из четырех нитей равновесна, имеет повышенную жесткость при сдвиге в главных плоскостях. Однако создание четырехнаправленных материалов сложнее, чем трехнаправленных.

Области применения композиционных материалов не ограничены. Они применяются в авиации для высоконагруженных деталей самолетов (обшивки, лонжеронов, нервюр, панелей и т.д.) и двигателей (лопаток компрессора и турбины и т.д.), в космической технике для узлов силовых конструкций аппаратов, подвергающихся нагреву, для элементов жесткости, панелей, в автомобилестроении для облегчения кузовов, рессор, рам, панелей кузовов, бамперов и т.д., в горной промышленности (буровой инструмент, детали комбайнов и т.д.), в гражданском строительстве (пролеты мостов, элементы сборных конструкций высотных сооружений и т.д.) и в других областях народного хозяйства.

Применение композиционных материалов обеспечивает новый качественный скачок в увеличении мощности двигателей, энергетических и транспортных установок, уменьшении массы машин и приборов. Технология получения полуфабрикатов и изделий из композиционных материалов достаточно хорошо отработана.

Композитные материалы с неметаллической матрицей, а именно полимерные карбо- и стекловолокниты используют в судостроении и автомобилестроении (кузова гоночных машин, шасси, гребные винты); из них изготавливают подшипники, панели отопления, спортивный инвентарь, части ЭВМ.

Высокомодульные карбо- и стекловолокниты применяют для изготовления деталей авиационной техники, аппаратуры для химической промышленности, в рентгеновском оборудовании и другом.

Карбо- и стекловолокниты с углеродной матрицей заменяют различные типы графитов. Они применяются для тепловой защиты, дисков авиационных тормозов, химически стойкой аппаратуры.

Изделия из карбо- и стекловолокнитов применяют в авиационной и космической технике (профили, панели, роторы и лопасти компрессоров, лопасти винтов и трансмиссионные валы вертолетов и т. д.).

Органоволокниты применяют в качестве изоляционного и конструкционного материала в электрорадио промышленности, авиационной технике, автомобилестроении; из них изготавливают трубы, емкости для реактивов, покрытия корпусов судов и другое.

### *Контрольные вопросы и задания для самопроверки*

1. Какие материалы называют композиционными (КМ) или композитами?
2. Как подразделяют композиты по типу наполнителя?
3. Объясните способы изготовления волокнистых материалов
4. От чего зависят свойства композиционных материалов?
5. Какова область применения композиционных материалов?

## ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ВНЕАУДИТОРНОЙ РАБОТЫ ОБУЧАЮЩИХСЯ

- Методы определения механических свойств
- Методы измерения твердости
- Ударная вязкость и методы ее определения
- Влияние постоянных примесей на свойства сталей
- Влияние легирующих элементов на полиморфизм железа
- Выбор температуры нагрева под различные виды термообработки
- Термомеханическая обработка сталей
- Охлаждающие среды для закалки
- Термообработка быстрорежущих сталей
- Пути повышения поверхностной твердости сталей
- Конструкционные материалы, применяемые в машиностроении
- Автоматные стали
- Рессорно-пружинные стали
- Шарикоподшипниковые стали
- Коррозионностойкие стали
- Жаропрочные стали и сплавы
- Аморфные сплавы
- Полимеры
- Органические неметаллические материалы
- Нерганические неметаллические материалы

## ВОПРОСЫ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ (ЭКЗАМЕНУ)

1. Значение и содержание дисциплины Материаловедение
2. Значение материаловедения в решении важнейших технических проблем
3. Вклад отечественных и зарубежных ученых в создании материаловедения как науки
4. Основные направления современного развития металловедения
5. Классификация металлов
6. Атомно-кристаллическое строение металлов
7. Элементы кристаллографии: кристаллическая решетка, анизотропия, изотропия, квазиизотропия
8. Аллотропическое превращение твердого тела
9. Механические свойства материалов
10. Строение кристаллического слитка
11. Технологические свойства металлов
12. Физические свойства металлов
13. Химические свойства металлов
14. Методы испытания твердости и их сущность
15. Испытания металлов на растяжение
16. Испытания металлов на ударную вязкость
17. Понятие о сплавах
18. Структурные составляющие сплавов
19. Дендритная или внутрикристаллическая ликвация

20. Структурные составляющие железоуглеродистых сплавов
21. Превращения аустенита при непрерывном охлаждении
22. Основные виды термической обработки
23. Отжиг без фазовых превращений
24. Отжиг и нормализация с перекристаллизацией
25. Закалка: назначение, сущность и технология
26. Отпуск: назначение, сущность и технология
27. Цементация: назначение, сущность и технология
28. Азотирование: назначение, сущность и технология
29. Закалка ТВЧ: назначение, сущность и технология
30. Общая характеристика сталей
31. Производство стали в электропечах
32. Кислородно-конверторный способ получения стали
33. Устройство и работа доменной печи
34. Продукты доменного производства
35. Классификация, маркировка и область применения углеродистых сталей
36. Влияние углерода и примесей на свойства сталей
37. Классификация, маркировка и область применения легированных сталей
38. Конструкционные легированные стали
39. Углеродистые инструментальные стали
40. Основные виды коррозии
40. Процесс образования нароста при резании пластичных материалов
41. Меры борьбы с коррозией
42. Классификация, маркировка и область применения бронз
43. Антифрикционные материалы
44. Классификация, маркировка и область алюминиевых сплавов
45. Общая характеристика белых чугунов
46. Общая характеристика серых чугунов
47. Общая характеристика высокопрочных чугунов
48. Общая характеристика ковких чугунов
49. Общая характеристика специальных чугунов
50. Магний и титан и их сплавы
51. Общая характеристика латуней
52. Ультразвуковой метод исследования металлов
53. Рентгеноструктурный метод исследования металлов
54. Макро- и микроскопические методы исследования металлов
55. Магнитная дефектоскопия
56. Металлы, работающие при низких температурах
57. Классификация и область применения порошковых материалов
58. Металлокерамические твердые сплавы
59. Свойства и применение пластических масс
60. Композиционные материалы

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Двоеглазова, Г.А. Материаловедение: учеб. для СПО / Г.А. Двоеглазова. – Ростов-на/Д.: Феникс, 2015. – 445 с. – (Среднее профессиональное образование)
2. Колтунов, И.И. Материаловедение [Электронный ресурс]: учебник / И.И. Колтунов, В.А. Кузнецов, А.А. Черепяхин. – М.: КноРус, 2018. - 237 с. – (Среднее профессиональное образование) // ЭБС Book.ru: сайт / Режим доступа: <https://www.book.ru/book/922706>. -Загл. с экрана
3. Моряков, О.С. Материаловедение / О.С. Моряков. – М.: Академия, 2008. - 240 с.: ил. – (Среднее профессиональное образование)
4. Солнцев, Ю.П. Материаловедение: учебник / Ю.П. Солнцев, С.А. Вологжанина. – 10-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2015. – 496 с.: ил.
5. Теплоизоляционные материалы и конструкции: учеб. для СПО. – М.: Инфра-М, 2003. – 286 с.: ил.
6. Черепяхин, А.А. Материаловедение [Электронный ресурс]: учебник / А.А. Черепяхин, И.И. Колтунов, В.А. Кузнецов. – М.: КноРус, 2016. - 240 с. – (Среднее профессиональное образование) // ЭБС Book.ru: сайт / Режим доступа: <https://www.book.ru/book/918860>. -Загл. с экрана
7. Чумаченко, Ю.Т. Материаловедение и слесарное дело учеб. пособ. для НПО / Ю.Т. Чумаченко. - 7 -е изд. - Ростов-на/Д.: Феникс, 2014. – 395 с. – (Начальное профессиональное образование )
8. Электротехнические и конструкционные материалы: учеб. пособ. / под ред. В.А. Филикова. – 5-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2009. – 280 с.: ил.

## ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕСУРСЫ

1. StandartGOST.ru - открытая база ГОСТов, <http://standartgost.ru/>- Дата обращения: 14.03.2017.- Заглавие с экрана.
2. Материаловедение [Электронный ресурс]: сайт // Режим доступа: <http://www.materialsince.ru> - Дата обращения: 14.03.2017.- Заглавие с экрана.
3. Все о материалах и материаловедении [Электронный ресурс]: сайт // Режим доступа: Materiall.ru: URL: <http://materiall.ru/>- Дата обращения: 14.03.2017.- Заглавие с экрана.

Учебное издание

Ивашкина Л. М.

# **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

*Учебное пособие*

Редактор Лебедева Е.М.

---

Подписано к печати 13.03.2018 г. Формат 60x84. 1/16.

Бумага печатная Усл.п.л. 6,51. Тираж 25 экз. Изд. № 5561.

---

Издательство Брянского государственного аграрного университета  
243365 Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ