

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ИВАНОВСКАЯ ПОЖАРНО-  
СПАСАТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ  
СЛУЖБЫ МИНИСТЕРСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ И  
ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ»**



**Методические рекомендации  
для самостоятельной работы  
обучающихся по дисциплине  
«Материаловедение»**

**(специальность 40.05.03 «Судебная экспертиза»)**

**Пучков П.В., Топоров А.В.,** Материаловедение. Методические рекомендации для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине для курсантов и студентов, обучающихся по специальности 40.05.03 «Судебная экспертиза». – Иваново: Ивановская пожарно - спасательная академия ГПС МЧС России.- 43 с.

В методических рекомендациях представлен теоретический материал по курсу «Материаловедение» и список рекомендуемой литературы.

Методические рекомендации предназначены для курсантов и студентов очной формы обучения, обучающихся по специальности 40.05.03 «Судебная экспертиза».

## Содержание

№темы	Наименование темы	Стр.
<b>Тема №1</b>	<b>Материаловедение. Введение.</b>	
	Вопрос 1. Введение в дисциплину «Материаловедение».....	4
<b>Тема №2</b>	<b>Кристаллическое строение металлов</b>	7
	Вопрос 1. несовершенства кристаллического строения.....	7
	Вопрос 2. Влияние несовершенств кристаллического строения на механические свойства материалов.....	9
<b>Тема №3</b>	<b>Физико-механические свойства материалов</b>	
	Вопрос 1. Физические свойства материалов.....	9
	Вопрос 2. Влияние температуры на изменение механических свойств материалов.....	12
	Вопрос 3. Неразрушающие методы исследования механических свойств металлов и сплавов.....	13
<b>Тема №4</b>	<b>Теория сплавов</b>	
	Вопрос 1. Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов.....	15
	Вопрос 2. Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов. Структуры железоуглеродистых сплавов.....	17
<b>Тема №5</b>	<b>Железоуглеродистые сплавы</b>	
	Вопрос 1. Легированные стали, их классификация, маркировка и область применения.....	18
	Вопрос 2. Способы получения чугунов различных типов и их маркировка. Процесс графитизации. Факторы, способствующие графитизации.....	20
<b>Тема №6</b>	<b>Термическая обработка материалов</b>	
	Вопрос 1. Структурно-фазовые превращения в стали в результате термической обработки.....	21
	Вопрос 2. Диффузионная металлизация как вид ХТО, её виды, режимы и назначение.....	23
	Вопрос 3. Поверхностная закалка, лазерная термическая и химико-термическая обработка.....	24
<b>Тема №7</b>	<b>Цветные металлы и их сплавы.</b>	
	Вопрос 1. Медь и сплавы на её основе .....	26
	Вопрос 2. Алюминий и сплавы на его основе .....	29
<b>Тема №8</b>	<b>Неметаллические материалы</b>	
	Вопрос 1. Композиционные материалы.....	32
	Вопрос 2. Пластмассы, их общая характеристика, классификация, и назначение.....	33
	Вопрос 3. Резины, их общая характеристика, классификация и назначение.....	37
<b>Тема №9</b>	<b>Коррозия металлов и сплавов</b>	
	Вопрос 1. Поведение материалов в особых условиях.....	38
	Вопрос 2. Стали и сплавы с особыми физико-механическими свойствами.....	41
	Литература.....	43

## Тема №1. Материаловедение. Введение

### Вопрос 1. Введение в дисциплину «Материаловедение»

*Материаловедение — наука довольно молодая. Основные её научные положения были описаны лишь во второй половине XIX века. Основы научного материаловедения были заложены великими русскими металлургами П.П. Аносовым и Д.К. Черновым.*

**Аносков Павел Петрович** (1799 – 1851 гг.), русский металлург широчайшего кругозора, считая структуру одним из важнейших факторов, определяющих качество стали, первым применил микроскоп для изучения структуры стали, что в дальнейшем привело Сорби к созданию микроскопического анализа металлов. П.П. Аносов впервые также разработал и описал процесс газовой цементации стали. Ему принадлежит приоритет в создании легированных сталей.

В высшей степени оригинальными были работы Аносова по раскрытию, утерянного в средние века, секрета приготовления булатной стали. Как известно, булат производили с древнейших времен (упоминается ещё Аристотелем), шёл он на изготовление клинков, мечей, сабель, кинжалов и других изделий, обладавших исключительной остротой. Проводившиеся Аносовым в течение десяти с лишним лет опыты по сплавлению железа с кремнием, золотом, платиной и другими элементами, изучение свойств получаемых сплавов позволили ему первым раскрыть тайну булата. Литой булат Аносова (Златоустовский завод) был аналогичен лучшим старинным восточным образцам.

**Чернов Дмитрий Константинович** (1839 – 1921 гг.), основоположник современного материаловедения и основатель крупной школы русских металлургов и материаловедов. Он открыл существование критических температур фазовых превращений в стали (критических точек) и их связь с содержанием углерода в сплаве. Эти критические точки в стали позволили рационально выбирать температуру её закалки, отпуска и пластической деформации в производственных условиях. Черновым Д.К. также были заложены основы создания диаграммы сплавов «железо-углерод», являющейся важнейшей в материаловедении, теория кристаллизации металлов и термической обработки стали. Его открытия (критические температуры, названные точками Чернова (1868 год); теория кристаллизации слитка (1879 год); совершенствование конверторного процесса — подогрев малокремнистого чугуна, считавшегося непригодным, в вагранке перед продувкой (1872 год); применение спектроскопа для определения конца процесса продувки; применение обогащённого кислородом воздуха для продувки жидкого чугуна (1876 год)) получили признание во всём мире.

Чернов Д.К. был избран почётным председателем Русского металлургического общества, почётным вице-президентом английского Института железа и стали, почётным членом американского Института горных инженеров и ряда других иностранных научных учреждений.

*Материаловедение — это наука, изучающая связь химического состава, строения и свойств материалов при различных термодинамических условиях.*

**Основной целью** науки «Материаловедение» является научно обоснованная рекомендация и оптимальный выбор (или разработка) того или иного конструкционного или инструментального материала для конкретных деталей технических объектов и сооружений, работающих при различных температурных и нагрузочных режимах в различных средах.

Основными направлениями в развитии металловедения является разработка способов производства чистых и сверхчистых металлов, свойства которых сильно отличаются от свойств металлов технической чистоты (с различными примесями в определённом количестве), с которыми преимущественно работают.

На сегодняшний день *главной задачей материаловедения* является создание материалов с заранее определёнными свойствами применительно к заданным параметрам и условиям работы. Большое внимание уделяется изучению работы материалов в особых условиях (низкие и высокие температуры, высокие нагрузки разного характера, агрессивные среды, облучение и т. д.).

**Предметом изучения** науки «Материаловедение» являются:

- 1) физические, химические, механические и другие свойства различных материалов;
- 2) связь этих свойств с применением материалов в машиностроении и других сферах деятельности человека;
- 3) методы получения (разработки) материалов и методы целенаправленного изменения их свойств.

Материаловедение служит теоретической основой процессов обработки материалов давлением, литейного производства, сварки, нанесения гальванических покрытий, технологии обработки металлов резанием, изготовления инструментов и деталей машин.

### Распределение металлов в природе

Среди факторов, определяющих возможность и целесообразность практического использования металлов и их сплавов, важнейшими являются их стоимость и дефицитность. Стоимость, в свою очередь, зависит от распространённости металлов в природе, химической устойчивости, определяющей способ и сложность производства, масштаба производства, степени совершенства технологий производства, хозяйственной и политической ситуации. Основным источником добычи металлов является земная кора и мировой океан. Распределение химических элементов (металлов) в земной коре и мировом океане представлено на гистограммах рис. 1.

Самый лёгкий металл — литий Li (удельный вес  $\rho = 0,563 \text{ г/см}^3$ ); самый тугоплавкий металл — вольфрам W (температура плавления  $3430^\circ\text{C}$ ); самый тяжёлый металл — осмий Os (удельный вес  $\rho = 22,38 \text{ г/см}^3$ ); самый легкоплавкий металл — ртуть Hg (температура плавления  $-38,89^\circ\text{C}$ ).

### Чёрные металлы

80% металлов, используемых в машиностроении — чёрные металлы. К чёрным металлам относятся железо и железоуглеродистые сплавы — сталь и чугун.

**Чугун** — самый дешёвый машиностроительный материал, обладающий хорошими литейными свойствами. Кроме того, он является исходным продуктом для получения стали. Его получают из железной руды. Он состоит из железа Fe (до 92%) и углерода C (от 2,14 до 5%). Кроме того в чугунах имеются примеси кремния Si (до 4,3%), марганца Mn (до 2%), серы S (до 0,07 %) и фосфора P (до 1,2%).

**Сталь** — важнейший материал промышленности. Этот материал в машиностроении играет наиболее важную роль среди всех металлов и сплавов. Основное его отличие от чугуна состоит в том, что сталь содержит до 2,14% углерода C, до 90% железа Fe, кремния Si (0,15 – 0,35%), марганца Mn (0,2 – 0,8%) и определённое количество вредных примесей серы S (до 0,07%) и фосфора P (до 0,07%). Сталь получают из чугуна, удаляя часть углерода и часть вредных примесей. Доля производства стали составляет 95% всех металлических материалов. Широкая распространённость стали обусловлена тем, что она обладает редким сочетанием физико-механических свойств. При сравнительно низкой стоимости сталь характеризуется высокой прочностью, пластичностью и вязкостью, одновременно обладая хорошими технологическими свойствами.

Затраты энергии на производство единицы массы стальных деталей (их энергоёмкость) значительно ниже, чем для деталей из алюминия, титана и т. д. Поэтому сталь широко используется во всех областях техники и объём её производства характеризует экономический потенциал страны. Наша страна занимает первое место в мире по производству стали (более 160 млн. т. в год). Обладая большими запасами железной руды (около 43% мировых запасов), наша страна имеет огромные возможности дальнейшего наращивания производства стали.

Современное производство стали в мире составляет более 600 млн. т. в год, и, по крайней мере, на ближайшее столетие сталь сохранит свое значение как важнейший конструкционный материал.

Из других металлов наиболее интенсивно будет развиваться производство алюминия и его сплавов. Содержание железа в земной коре составляет 4,6%, а алюминия — 8,8%, т. е. почти в два раза больше. Объёмы производства других цветных металлов и сплавов существенно меньше, однако без их применения было бы невозможно создание таких отраслей современной техники, как электротехника и радиоэлектроника, приборостроение, компьютерная, авиационная, атомная, ракетно-космическая техника.

### Цветные металлы

К цветным металлам относятся все металлы кроме железа Fe, хрома Cr, марганца Mn и сплавов на основе железа Fe. Важнейшие из цветных металлов: медь Cu, алюминий Al, магний Mg, цинк Zn, никель Ni, свинец Pb, олово Sn и титан Ti. В машиностроении цветные металлы применяются главным образом в виде сплавов (бронзы — это сплавы Cu-Sn, латуни — Cu-Zn, силумины — Al-Si), т. к. чистые металлы обладают более низкой прочностью. Основная область применения цветных металлов — это электротехническая (Cu, Al), авиационная (Al, Mg), автомобильная (Al, Zn) промышленности и приборостроение.

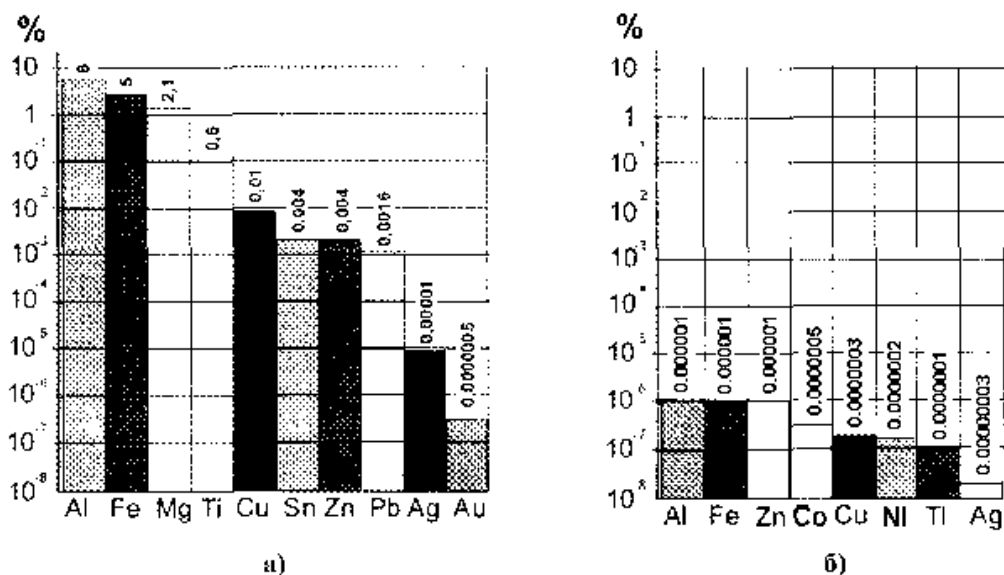


Рис.1. Содержание металлов: а – в земной коре на глубине до 1 км; б – в морской воде

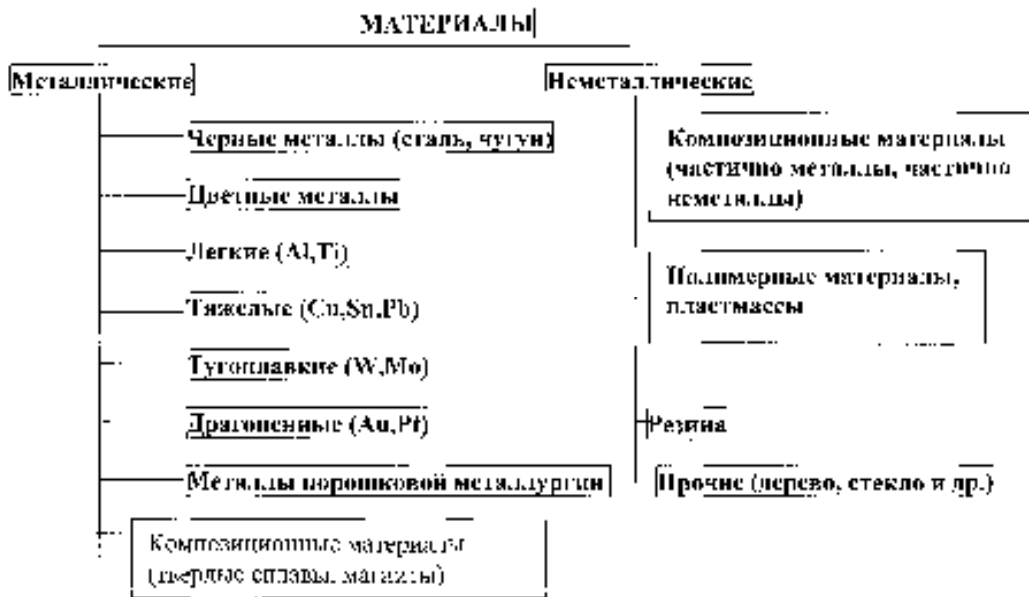


Рис. 2. Классификация материалов, используемых в технике

## Тема №2. Кристаллическое строение металлов

### Вопрос 1. Несовершенства кристаллического строения

Металлы и сплавы, полученные в обычных условиях, состоят из большого количества кристаллов, то есть, имеют поликристаллическое строение. Эти кристаллы называются зёрнами. Они имеют неправильную форму и различно ориентированы в пространстве. Каждое зерно имеет свою ориентировку кристаллической решётки, отличную от ориентировки соседних зёрен, вследствие чего свойства реальных металлов (как кристаллических тел) усредняются, и явления анизотропии не наблюдается.

В кристаллической решётке реальных металлов имеются различные дефекты (несовершенства, нарушения строгого расположения атомов), которые нарушают связи между атомами и оказывают влияние на свойства металлов.

**По геометрическим признакам различают следующие структурные несовершенства (дефекты) кристаллического строения:**

- 1) *точечные* — малые во всех трёх измерениях;
- 2) *линейные* — малые в двух измерениях и сколь угодно протяжённые в третьем;
- 3) *поверхностные* — малые в одном измерении.

#### Точечные дефекты

Точечные дефекты являются одними из наиболее распространённых несовершенств кристаллического строения металлов. К точечным дефектам относятся: вакансии, межузельные (дислоцированные) атомы, наличие в узлах кристаллической решётки атомов примесей (рис. 1).

*Вакансия* — это отсутствие атомов в узлах кристаллической решётки, «дырки» (незанятые атомами места в ячейках кристаллической решётки) (рис. 1а).

Образуются вакансии при переходе атомов с поверхности в окружающую среду или из узлов решётки на поверхность (границы зёрен, пустоты, трещины и т. д.), в результате пластической деформации, при бомбардировке тела атомами или частицами высоких энергий (облучение в циклотроне или нейтронное облучение в ядерном реакторе). Число вакансий увеличивается с повышением температуры, при обработке давлением, облучении и других видах воздействия. Скопление многих вакансий может привести к образованию пор и пустот.

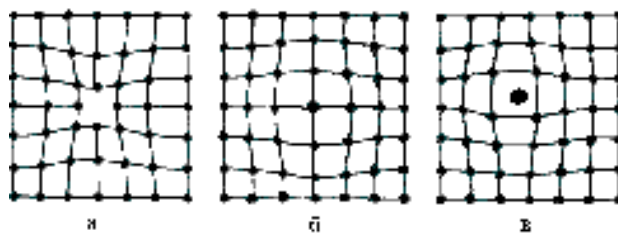


Рис. 1. Точечные дефекты.

*Атомы примесей* (примесные атомы) всегда присутствуют в металле, так как практически невозможно выплавить химически чистый металл. Они располагаются в узлах решётки или междоузлиях и могут иметь размеры больше или меньше размеров основных атомов (рис. 1б, 1в).

*Дислоцированный (межузельный) атом* — это атом, вышедший из узла решётки и занявший место в междоузлии (рис. 1в). Межузельные дефекты образуются в результате перехода атома из узла в междоузлии кристаллической решётки.

Точечные дефекты вызывают внутренние напряжения и незначительные искажения кристаллической решётки, что приводит к изменению физико-механических свойств тела (прочности, электропроводности, магнитных свойств и т. д.).

### Линейные дефекты

Основными линейными дефектами являются дислокации.

*Дислокации* — это линейные дефекты кристаллического строения, представляющие собой линии, вдоль и вблизи которых нарушено характерное для кристалла правильное расположение атомных плоскостей (рис. 2). Для дислокаций характерно наличие лишних атомов, находящихся в междоузлиях.

Различают два вида дислокаций — *краевые* и *винтовые* (см. рис. 2).

*Краевая дислокация* представляет собой местное искажение кристаллической решётки, линию, вдоль которой внутри кристалла обрывается край «лишней» полуплоскости (рис. 2, а). Неполная плоскость называется *экстраплоскостью* (рис. 2б).

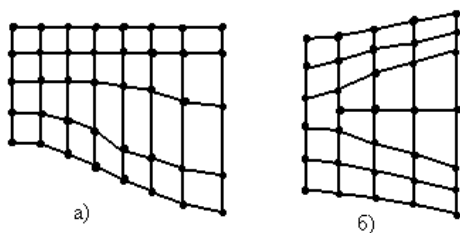


Рис. 2. Дислокации: а- краевая; б- экстраплоскость.

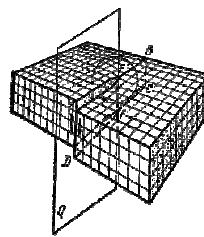


Рис. 3. Механизм образования винтовой дислокации.

*Винтовая дислокация* образуется при помощи частичного сдвига кристалла по плоскости  $Q$  вокруг линии  $EF$  (рис. 3). На поверхности кристалла образуется ступенька, проходящая от точки  $E$  до края кристалла. Такой частичный сдвиг нарушает параллельность атомных слоёв, кристалл превращается в одну атомную плоскость, закрученную по винту в виде полого геликоида вокруг линии  $EF$ , которая представляет границу, отделяющую часть плоскости скольжения, где сдвиг уже произошёл, от части, где сдвиг не начинался.

Дислокации образуются при термической и химико-термической обработках, в процессе кристаллизации, пластической деформации и других видах воздействия на структуру металлов и сплавов.

## Вопрос 2. Влияние несовершенств кристаллического строения на механические свойства материалов

Дислокационная структура материала характеризуется *плотностью дислокаций*. Она является характеристикой, непосредственно влияющей на сопротивление материала пластической деформации.

Плотность дислокации в значительной мере определяет такие механические свойства, как пластичность и прочность материала.

Дислокации влияют не только на прочность и пластичность, но и на другие свойства кристаллов. С увеличением плотности дислокаций возрастает внутреннее трение (вязкость), изменяются оптические свойства, **повышается электросопротивление металла**. Дислокации увеличивают среднюю скорость диффузии в кристалле, **ускоряют старение** и другие процессы, уменьшают химическую стойкость, поэтому в результате обработки поверхности кристалла специальными веществами в местах выхода дислокаций образуются ямки.

Дислокации образуются при образовании кристаллов из расплава или газообразной фазы, при срастании блоков с малыми углами разориентировки.

## Тема №3. Физико-механические свойства материалов

### Вопрос 1. Физические свойства материалов

#### Плотность

*Плотность* ( $\rho = m/V$ , г/см<sup>3</sup>) является одной из важнейших характеристик металлов и сплавов, численно равная отношению массы однородного тела к его объёму. По плотности металлы делят на следующие группы:

- лёгкие (плотностью не более 5 г/см<sup>3</sup>) — Mg, Be, Al, Ti и др.;
- тяжёлые (плотностью от 5 до 10 г/см<sup>3</sup>) — Fe, Ni, Cu, Zn, Sn и др. (это наиболее обширная группа);
- очень тяжелые (плотностью более 10 г/см<sup>3</sup>) — Mo, W, Au, Pb и др.

Самый легкий металл — литий Li ( $\rho = 0,53$  г/см<sup>3</sup>), самый тяжёлый — осмий Os ( $\rho = 22,6$  г/см<sup>3</sup>).

Важность плотности как физической характеристики материала обусловлена использованием установок в таких отраслях промышленности, как судостроение, транспортное машиностроение и особенно авиационная и ракетно-космическая техника. Для таких объёмов одним из решающих условий применения является минимизация массы технического объекта.

#### Температура плавления

*Температура плавления*  $T_{пл}$ , °C характеризует переход металла из твёрдого состояния в жидкое.

Температура плавления  $T_{пл}$  и равная ей температура затвердевания — характерный признак конкретного вещества.

Физическая сущность процесса плавления состоит в следующем. При плавлении нарушается порядок в расположении атомов, существующий в твёрдом состоянии, — происходит разрушение пространственной кристаллической решётки. В кристаллическом теле атомы совершают колебательные движения около своих положений равновесия. С повышением температуры амплитуда их колебаний возрастает (происходит повышение внутренней энергии тела) и достигает некоторой критической величины, после чего кристаллическая решётка разрушается. В свою очередь для разрушения кристаллической решётки требуется дополнительная тепловая энергия, поэтому в процессе плавления температура не повышается до тех пор, пока не произойдет разрушения всей кристаллической решётки тела, несмотря на то, что тепло продолжает поступать.

Температура плавления  $T_{\text{пл}}$ , подобно температуре кипения, зависит от давления. Для веществ, у которых увеличивается объём при плавлении, повышение давления снижает температуру плавления  $T_{\text{пл}}$ , и наоборот.

**В зависимости от температуры плавления металлы подразделяются на следующие группы:**

- легкоплавкие (температура плавления не превышает  $600^{\circ}\text{C}$ ) — Zn, Sn, Pb и др.;
- среднеплавкие (от  $600$  до  $1600^{\circ}\text{C}$ ). К ним относится почти половина металлов, в том числе Mg, Al, Fe, Ni, Cu, Au;
- тугоплавкие (более  $1600^{\circ}\text{C}$ ) — W, Mo, Ti, Cr и др.

Самым легкоплавким металлом является ртуть Hg ( $T_{\text{пл}} = -39^{\circ}\text{C}$ ). Цезий Cs и галлий Ga плавятся в руках. Самым тугоплавким металлом является вольфрам W ( $T_{\text{пл}} = 3390^{\circ}\text{C}$ ), поэтому он применяется для изготовления нитевидных спиралей электроламп.

### Удельная теплоёмкость

*Теплоёмкость* — способность материала при нагревании поглощать определённое количество тепла, а при остывании его отдавать.

*Удельная теплоёмкость*  $C_p$ , ( $\text{Дж/кг}\cdot\text{K}$ ) или ( $\text{Дж/кмоль}\cdot\text{K}$ ) — это количество энергии (теплоты), необходимое для повышения температуры единицы массы тела на один градус

$$C_p = \frac{Q}{m \Delta t},$$

где  $m$  — масса материала, кг;

$\Delta t$  — разность температур материала до и после нагревания, K;

$Q$  — количество теплоты, переданное образцу.

Удельная теплоёмкость  $C_p$  уменьшается с увеличением порядкового номера элемента в таблице Менделеева.

Удельные теплоёмкости разных металлов различны и, как правило, значительно меньше, чем у других веществ, благодаря хорошей теплопроводности. Например, у алюминия Al  $C_p = 880 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ ; у железа Fe  $C_p = 460 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ ; у меди Cu  $C_p = 385 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ ; свинца Pb  $C_p = 130 \text{ Дж/кг}\cdot\text{K}$ .

Удельная теплоёмкость  $C_p$  слабо растёт с повышением температуры и сильно меняется при фазовых превращениях. Известно также, что при высоких температурах теплоёмкость металлов и других кристаллических тел почти не изменяется и близка к постоянному значению. С понижением температуры теплоёмкость начинает быстро падать. Вблизи абсолютного нуля теплоёмкость всех тел стремится к нулю. При криогенных температурах даже малое количество теплоты существенно изменяют температуру материала.

### Теплопроводность и температуропроводность

*Теплопроводность*  $\lambda$ , ( $\text{кВт/м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ) (или  $\text{Дж/м}\cdot\text{с}\cdot\text{K}$ ) характеризует скорость передачи тепловой энергии от одной части тела к другой (молекулярный перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температуры). При этом теплопроводность не сопровождается перемещением составляющих тело частиц. Как ранее было сказано, хорошая теплопроводность металлов обусловлена высокой подвижностью свободных электронов и колебательным движением ионов. Теплопроводность  $\lambda$  является мерой быстроты выравнивания температур различных точек тела, или мерой количества переносимого тепла при заданной разности температур в различных точках тела. Чем больше теплопроводность  $\lambda$ , тем скорее тело приближается к состоянию теплового равновесия. Чем выше теплопроводность  $\lambda$ , тем равномернее распределение температуры по объёму тела.

*Коэффициент теплопроводности*  $\lambda$  характеризует количество тепла, проходящего через материал толщиной 1 м, через площадь поверхности  $1 \text{ м}^2$ , за время 1 с, при разности температур на противоположных поверхностях 1 K

$$\lambda = \frac{Q\tau}{\delta S \Delta t},$$

где  $Q$  — тепло, переданное от обогреваемой поверхности к более холодной;

$\delta$  — толщина образца (изделия), мм;

$S$  — площадь обогреваемой поверхности, м<sup>2</sup>;

$\Delta t$  — разность температур противоположных поверхностей образца, °C (K);

$\tau$  — время, с.

Числовые значения коэффициента теплопроводности зависят от вида материала.

Известен ряд металлов по мере увеличения теплопроводности: Pb, Fe, Sn, Zn, Mg, Al, Au, Cu, Ag.

*Температуропроводность* — способность образца материала (изделия) изменять температуру при нагревании (охлаждении). Температуропроводность характеризуется коэффициентом температуропроводности  $\alpha$  (м<sup>2</sup>/с).

Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры материала и может быть определён по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \rho};$$

где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала;

$C_p$  — удельная теплоёмкость материала;

$\rho$  — удельный вес материала.

### Электропроводность

*Электропроводность*  $\gamma$  характеризует способность материала проводить электрический ток. Известно, что металлы хорошо проводят электрический ток. Хорошая *электропроводность* металлов объясняется наличием в них свободных электронов, обладающих большой подвижностью, которые под влиянием даже небольшой разности потенциалов способны перемещаться от отрицательного полюса к положительному.

На электропроводность металлов оказывает влияние температура. С повышением температуры усиливаются колебания ионов и атомов металлов, что затрудняет перемещение электронов по проводнику (металлу) и тем самым приводит к снижению электропроводности. При низких температурах колебательное движение ионов и атомов кристаллической решётки проводника, наоборот, сильно уменьшается и электропроводность резко возрастает. Уже вблизи абсолютного нуля (–273,15°K) сопротивление металлов практически отсутствует.

Лучшим проводником электрического тока является серебро (Ag), за которым следуют медь (Cu), золото (Au), алюминий (Al), железо (Fe). Наряду с медными изготавливаются и алюминиевые электрические провода (кабели).

### Тепловое расширение материалов

Тепловое расширение твёрдых материалов характеризуется коэффициентами линейного и объёмного теплового расширения.

*Коэффициент теплового линейного расширения*  $\alpha$ , град<sup>-1</sup> — величина, характеризующая изменение размеров образца длиной 1 м при нагревании на 1°С. Он может быть определён по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta t},$$

где  $\Delta l$  — разность длин образца материала до и после нагрева, м;

$l_0$  — начальная длина образца, м;

$\Delta t$  — разность температур, К.

*Коэффициент объёмного теплового расширения*  $\beta$  — относительное изменение объёма образца материала при изменении его температуры на 1 К

$$\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta t},$$

где  $\Delta V$  — разность объёмов образца до и после нагрева, м<sup>3</sup>;

$\Delta t$  — разность температур, К;

$V_0$  — начальный объём образца, м<sup>3</sup>.

Причиной расширения твёрдых тел при нагревании является возрастание амплитуды тепловых колебаний атомов кристаллической решётки около положений равновесия.

Термическое расширение является одним из наиболее важных свойств конструкционных материалов, применяемых в криогенной технике. Показателями термического расширения материалов являются температурные коэффициенты объёмного и линейного расширения.

Знание коэффициентов теплового расширения конструкционных материалов позволяет при проектировании избежать типичные ошибки. Так, различные значения коэффициентов теплового расширения сопряжённых деталей могут привести к возникновению внутренних напряжений, в результате чего может произойти разрушение всей конструкции.

### Отражательная способность

*Отражательная способность* — это способность металла отражать световые волны определенной длины, которая воспринимается человеческим глазом как цвет. Цвет металлов: Mg — бело-серый, Al — серовато-белый, Fe — голубовато-белый, Au — жёлтый, Ag — белый и т. д.

Характерный металлический блеск металлов обусловлен взаимодействием электромагнитных световых волн со свободными электронами металлов.

## Вопрос 2. Влияние температуры на изменение механических свойств материалов

Повышенные температуры оказывают существенное влияние на такие механические характеристики конструкционных материалов, как ползучесть и длительная прочность. *Ползучестью* называют медленное непрерывное возрастание пластической (остаточной) деформации под воздействием постоянных нагрузок. *Длительной прочностью* называется зависимость разрушающих напряжений (временного сопротивления) от длительности эксплуатации. Свойства ползучести и длительной прочности проявляются у углеродистых сталей при  $T > 300^\circ\text{C}$ , для легированных сталей при  $T > 350^\circ\text{C}$ . для алюминиевых сплавов при  $T > 100^\circ\text{C}$ . Некоторые материалы проявляют эти свойства и при обычных температурах.

Мерой оценки ползучести материала является *предел ползучести* — напряжение, при котором пластическая деформация за определенный промежуток времени достигает заданной величины. В некоторых случаях сопротивление ползучести оценивается величиной скорости деформации по прошествии заданного времени. При обозначении предела ползучести указывается величина деформации, время и температура испытаний. Например, для жаропрочного сплава ХН77ТЮР при температуре  $700^\circ\text{C}$  за время 100 часов и деформации ползучести 0,2% предел ползучести составляет 400 МПа:  $\sigma_{0,2100}(700) = 400 \text{ МПа}$ .

Прочность материала при повышенных температурах оценивается *пределом длительной прочности* — напряжением, при котором материал разрушается не ранее заданного времени. При обозначении предела длительной прочности указывается продолжительность нагружения и температура испытания. Так, для сплава ХН77ТЮР при температуре  $700^\circ\text{C}$  и времени 1000 часов предел длительной прочности составляет  $\sigma_{дл1000}(700) = 330 \text{ МПа}$ .

### Вопрос 3. Неразрушающие методы исследования механических свойств металлов и сплавов.

#### Определение твёрдости материалов

*Твёрдость* — это механическое свойство материала, показывающее его способность сопротивляться проникновению в него другого, более твёрдого материала (тела). Более твёрдое тело является стандартным и называется *индентором*. Индентор не деформируется при испытании.

Твёрдость материала отражает его прочность и пластичность. Испытание на твёрдость считается самым доступным и распространённым видом механических испытаний. Наибольшее применение получили статические методы испытания на твёрдость при вдавливании индентора: метод Бринелля, метод Виккерса и метод Роквелла. Схемы испытания материалов на твёрдость по данным методам представлены на рис. 1.

Широкое распространение эти методы испытаний получили в силу того, что для этого не требуются специальные образцы. Это неразрушающие методы контроля, основные методы оценки качества проведённой термической обработки изделий, контактной прочности и износостойкости поверхностей деталей машин. О твёрдости судят либо по диаметру отпечатка от вдавливания шарика (метод Бринелля, рис. 1а), либо по глубине вдавливания в материал алмазного конуса (метод Роквелла, рис. 1б), или по диагонали отпечатка алмазной пирамиды (метод Виккерса, рис. 1в). Количественной оценкой твёрдости является число твёрдости, равное отношению прикладываемой нагрузки  $P$  (Н, кГ) к площади поверхности отпечатка  $F$  (мм<sup>2</sup>).

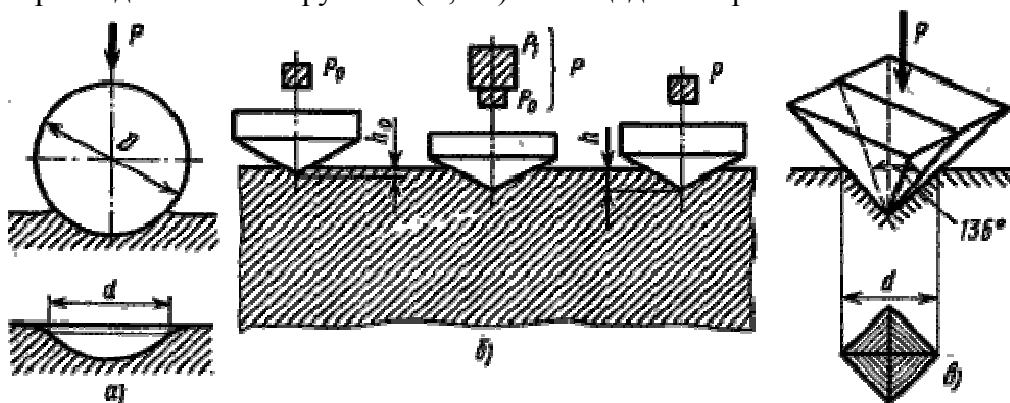


Рис. 1. Схемы определения твёрдости:

а — по Бринеллю; б — по Роквеллу; в — по Виккерсу

Во всех случаях испытания происходит пластическое деформирование материала. Соответственно, чем больше сопротивление материала пластической деформации, тем выше его твёрдость.

#### Определение твёрдости материалов по методу Бринелля

Испытание материалов на твёрдость проводят на твердомере Бринелля. Твёрдость материала определяется путём вдавливания в материал образца стального закалённого или твёрдосплавного шарика, служащего в качестве индентора — более твёрдого тела (рис. 1а).

Твёрдость по Бринеллю  $HB$  (в Н/мм<sup>2</sup> или в кГ/мм<sup>2</sup>) определяется как отношение приложенной нагрузки  $P$  к площади сферической поверхности отпечатка  $F$  шарика:

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad [H/мм^2]$$

где  $d$  — диаметр сферического отпечатка, измеренный после снятия нагрузки, мм;  $D$  — диаметр шарика (индентора), мм.

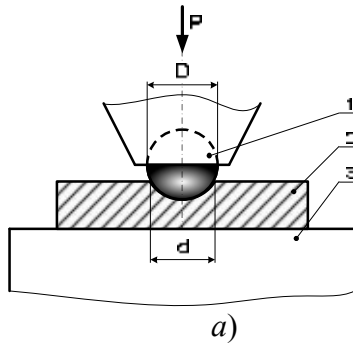


Рис. 2. Схема испытаний материалов на твердость по методу Бринелля:  
1 — индентор; 2 — образец из испытуемого материала; 3 — опорный столик пресса Бринелля.

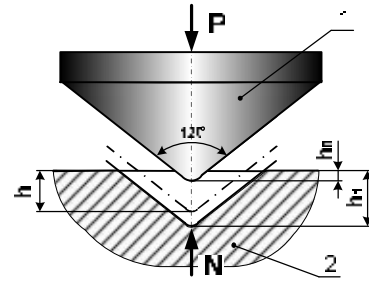


Рис. 3. Схема определения твердости по методу Роквелла при вдавливании в испытуемый образец алмазного конуса:  $h_0$  — углубление конуса под действием предварительной нагрузки  $P_0 = 100$  Н;  $h_1$  — углубление конуса под действием общей нагрузки  $P = P_0 + P_1$ ;  $h$  — глубина остаточного вдавливания индентора после снятия нагрузки  $P$ ;  $N$  — сила реакции опоры от действия прикладываемой нагрузки  $P$ ; 1 — индентор (конус); 2 — испытуемый образец.

Чем тверже материал, тем выше число твердости *HB* (*Hardness Brinelle*).

Диаметр шарика  $D$  может быть различным, в зависимости от толщины испытуемого образца. Для определения твердости металлических материалов рекомендуется применять стальные шарики следующих диаметров — 2,5; 5 и 10 мм для испытания на твердость образцов толщиной соответственно до 3; 6 и более 6 мм. Для шариков разного диаметра выбирают определенную нагрузку вдавливания  $P$  и время выдержки  $\tau$  под этой нагрузкой.

### Определение твердости материалов по методу Роквелла

При определении числа твердости по методу Роквелла в поверхность материала испытуемого образца вдавливают наконечник (индентор) под действием двух последовательно прикладываемых нагрузок — предварительной 100 Н и основной (предварительная + основная = общая 600, 1000 или 1500 Н). Согласно этому методу, за условную меру твердости принимается глубина отпечатка.

В качестве наконечников для твердых материалов применяют алмазный конус с углом при вершине  $120^\circ$ ; для мягких материалов (до *HB* 230) — стальной закаленный шарик диаметром 1/16" ( $\varnothing 1,588$  мм). Последовательность испытаний при разных инденторах одна и та же.

Нагружение осуществляется в два этапа. Сначала прикладывается предварительная нагрузка  $P_0 = 100$  Н (10 кгс) для плотного соприкосновения наконечника с испытуемым образцом. Под действием этой нагрузки ( $P_0$ ) индентор вдавливается на глубину  $h_0$  (рис. 3). Затем прикладывается основная нагрузка  $P_1$ , и в течение некоторого времени действует общая (окончательная) рабочая нагрузка  $P = P_0 + P_1$ . Под действием общей нагрузки  $P$  индентор вдавливается на глубину  $h_1$  (рис. 3). После снятия основной нагрузки  $P_1$  оставляют предварительную нагрузку  $P_0$ . При этом под действием упругой деформации индентор поднимается вверх до уровня  $h$ , но не достигает уровня  $h_0$ . Разность глубин ( $h - h_0$ ) зависит от твердости материала; чем тверже материал, тем меньше эта разность.

Значение твердости определяют по глубине остаточного вдавливания наконечника  $h$  под нагрузкой  $P$  (рис. 3). Глубину отпечатка измеряют индикатором часового типа, установленного на приборе с ценой деления 0,002 мм.

Число твёрдости, определённое методом Роквелла, обозначается символом  $HR$ . Однако в зависимости от формы индентора, значений нагрузок вдавливания и природы испытуемого материала символу добавляется буква  $A$ , или  $C$ , или  $B$ , обозначающая соответствующую шкалу измерения.

### Определение твёрдости материалов по методу Виккерса

Как и в случае измерения твёрдости по Бринеллю твёрдость здесь также определяется по величине отпечатка.

В качестве индентора при испытании в материал вдавливаются алмазная четырехгранная пирамида с углом при вершине  $136^\circ$ . При этом применяют нагрузки  $P$  от 50 до 1200 Н (5...120 кгс). После снятия нагрузки на образце остается отпечаток от внедрённой пирамиды (рис. 1,4). После снятия нагрузки вдавливания измеряется диагональ отпечатка  $d_1$  (рис. 4).

Твёрдость по Виккерсу  $HV$  представляет собой нагрузку, приходящуюся на единицу поверхности отпечатка, и определяется как отношение приложенной нагрузки  $P$  к площади поверхности пирамидального отпечатка  $F$ :

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d_1^2} = 1,8544 \frac{P}{d_1^2},$$

где  $P$  — нагрузка (составляет 5...120 кгс);  $d_1$  — диагональ отпечатка (измеряется при помощи микроскопа, установленного на приборе);  $\alpha = 136^\circ$  — угол при вершине пирамиды.

Число твёрдости по Виккерсу обозначается  $HV$  с указанием нагрузки  $P$  и времени выдержки под нагрузкой. Размерность числа твёрдости (кгс/мм<sup>2</sup>) не ставится. Продолжительность выдержки индентора под нагрузкой принимают для сталей 10 – 15 с, а для цветных металлов — 30 с. Например, 450  $HV_{10/15}$  означает, что число твёрдости по Виккерсу 450 получено при  $P = 10$  кгс (98,1 Н), приложенной к алмазной пирамиде в течение 15 с.

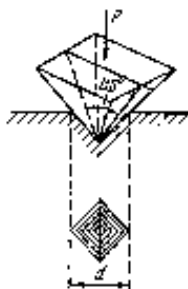


Рис. 4. Схема испытаний на твёрдость по Виккерсу.

## Тема №4. Теория сплавов

### Вопрос 1. Компоненты и фазы железоуглеродистых сплавов

Компонентами железоуглеродистых сплавов являются железо (Fe), углерод (C) и цементит ( $Fe_3C$ ).

**Железо (Fe)** — металл серебристо-светлого цвета. Имеет высокую температуру плавления —  $1539^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ .

В твёрдом состоянии железо может находиться в двух модификациях. Полиморфные превращения происходят при температурах  $911^\circ\text{C}$  и  $1392^\circ\text{C}$ . При температуре ниже  $911^\circ\text{C}$  существует  $\alpha$ -железо ( $Fe_\alpha$ ), обладающее объёмно-центрированной кубической решёткой. В интервале температур  $911 \div 1392^\circ\text{C}$  устойчивым является  $\gamma$ -железо ( $Fe_\gamma$ ), обладающее гранецентрированной кубической решёткой. Выше  $1392^\circ\text{C}$  железо имеет объёмно-центрированную кубическую решётку и называется  $\delta$ -железо ( $Fe_\delta$ ) или высокотемпературное  $\alpha$ -железо ( $Fe_\alpha$ ).

При температуре ниже  $768^{\circ}\text{C}$  железо ферромагнитно, а выше — парамагнитно. Точка Кюри железа — температура изменения магнитных свойств железа, соответствует  $768^{\circ}\text{C}$  и обозначается  $A_2$ .

Железо технической чистоты обладает невысокой твёрдостью ( $80\text{HB}$ ) и прочностью (предел прочности  $\sigma_b$  —  $250\text{ МПа}$ , предел текучести  $\sigma_t$  —  $120\text{ МПа}$ ) и высокими характеристиками пластичности (относительное удлинение  $\delta = 50\%$ , а относительное сужение  $\psi = 80\%$ ). Свойства могут изменяться в некоторых пределах в зависимости от величины зерна.

Железо (Fe) характеризуется высоким модулем упругости  $E$ , которым характеризуются и сплавы на его основе, благодаря чему обеспечивается высокая жёсткость и прочность деталей из этих сплавов.

Железо со многими элементами образует растворы: с металлами — твёрдые растворы замещения, с углеродом (C), азотом (N) и водородом (H) — твёрдые растворы внедрения.

**Углерод (C)** относится к неметаллам. Он обладает явлением полиморфизма. В зависимости от условий образования углерод (C) может существовать в форме графита с гексагональной слоистой кристаллической решёткой (температура плавления —  $3500^{\circ}\text{C}$ , плотность —  $\rho = 2,25\text{ г/см}^3$ ) или в форме алмаза со сложной кубической решёткой (температура плавления —  $5000^{\circ}\text{C}$ ). Графит является мягким материалом и обладает низкой прочностью. Однако с увеличением температуры прочность графита аномально растёт: при  $20^{\circ}\text{C}$   $\sigma_b = 20\text{ МПа}$ , а при  $2500^{\circ}\text{C}$   $\sigma_b = 40\text{ МПа}$ . При  $2500^{\circ}\text{C}$  графит прочнее всех тугоплавких металлов.

В сплавах с железом углерод образует либо твёрдые растворы внедрения, либо химическое соединение — цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Также углерод (C) может находиться в свободном состоянии в виде графита (в серых чугунах).

В системе «железо (Fe) — углерод (C)» существуют следующие фазы: жидкая фаза, феррит ( $\Phi$ ), аустенит ( $A$ ), цементит ( $Ц$ ), графит (C).

**Жидкая фаза.** В жидком состоянии железо (Fe) хорошо растворяет углерод (C) в любых пропорциях с образованием однородной жидкой фазы.

**Феррит ( $\Phi$ )** — твёрдый раствор внедрения углерода (C) в  $\alpha$ -железе ( $\text{Fe}_\alpha$ ).

Феррит имеет переменную предельную растворимость углерода: минимальную —  $0,006\%$  при комнатной температуре (точка  $Q$ ), максимальную —  $0,02\%$  при температуре  $727^{\circ}\text{C}$  (точка  $P$ ). Углерод (C) располагается в дефектах кристаллической решётки железа (Fe).

При температуре выше  $1392^{\circ}\text{C}$  существует высокотемпературный феррит с предельной растворимостью углерода (C) в  $\delta$ -железе ( $\text{Fe}_\delta$ ) —  $0,1\%$  при температуре  $1499^{\circ}\text{C}$  (точка  $H$ ).

Свойства феррита близки к свойствам железа (Fe). Он мягок (твёрдость —  $130\text{ HB}$ , предел прочности —  $\sigma_b = 300\text{ МПа}$ ) и пластичен (относительное удлинение —  $\delta = 30\%$ ), обладает магнитными свойствами до температуры  $768^{\circ}\text{C}$ .

**Аустенит ( $A$ )** — твёрдый раствор внедрения углерода (C) в  $\gamma$ -железе ( $\text{Fe}_\gamma$ ).

В аустените углерод (C) занимает место в центре гранецентрированной кубической ячейки. Аустенит имеет переменную предельную растворимость углерода (C): минимальную —  $0,8\%$  при температуре  $727^{\circ}\text{C}$  (точка  $S$ ), максимальную —  $2,14\%$  при температуре  $1147^{\circ}\text{C}$  (точка  $E$ ).

Аустенит имеет твёрдость  $200...250\text{HB}$ , пластичен (относительное удлинение его составляет  $\delta = 40...50\%$ ), обладает парамагнитными свойствами.

И в феррите и в аустените могут растворяться многие легирующие элементы, образуя твёрдые растворы замещения и резко изменяя их свойства. Кроме того, легирование может значительно изменять температурные границы существования фаз.

**Цементит ( $Ц$ )** — химическое соединение железа (Fe) с углеродом (C) (карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )), содержащее  $6,67\%$  углерода (C).

Цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) не испытывает полиморфных превращений при изменении температуры. Кристаллическая решётка цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) состоит из ряда октаэдров, оси которых наклонены друг к другу.

Температура плавления цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) точно не установлена (по разным данным она составляет  $1250^\circ\text{C}$  или  $1600^\circ\text{C}$ ). При низких температурах цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) слабо ферромагнитен. Магнитные свойства он теряет при температуре около  $217^\circ\text{C}$ .

Цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) имеет высокую твёрдость (более 800 НВ, легко царапает стекло), но очень низкую, практически нулевую, пластичность. Такие свойства являются следствием сложного строения кристаллической решётки цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). С химическими элементами цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) способен образовывать твёрдые растворы замещения. Атомы углерода (С) могут замещаться атомами неметаллов: азотом (N), кислородом (O); атомы железа (Fe) — металлами: марганцем (Mn), хромом (Cr), вольфрамом (W) и др. Такой твёрдый раствор на базе решётки цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) получил название *легированный цементит*.

Цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) — соединение неустойчивое и при нагреве распадается с образованием свободного углерода (С) в виде графита. Этот процесс имеет важное практическое значение при структурообразовании чугунов.

В железоуглеродистых сплавах выделяют три вида цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) в зависимости от температуры образования: цементит первичный ( $\text{Ц}_I$ ), цементит вторичный ( $\text{Ц}_{II}$ ), цементит третичный ( $\text{Ц}_{III}$ ).

**Ледобурит (Л)** — механическая эвтектическая смесь (эвтектика) кристаллов аустенита  $A$  и цементита  $\text{Ц}$  в интервале температур  $727 - 1147^\circ\text{C}$ , и перлита  $\text{П}$  (см. и цементита  $\text{Ц}$  при температурах ниже  $727^\circ\text{C}$ , содержащая 4,3% углерода (С).

## Вопрос 2. Процессы при структурообразовании железоуглеродистых сплавов. Структуры железоуглеродистых сплавов

Превращение аустенита в перлитные структуры происходит при медленном охлаждении, связано с диффузией углерода (С), сопровождается полиморфным превращением  $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$ , выделением углерода (С) из аустенита, образованием химического соединения — цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) и его распределением по объёму материала. Условно данное превращение можно записать следующим образом:



**Перлит** образуется при переохлаждении аустенита до температуры  $T = 727 \dots 650^\circ\text{C}$  при скорости охлаждения  $V_{\text{охл.}} = 30 \dots 50^\circ\text{C}/\text{с}$ . Его образование возможно при малых степенях переохлаждения  $\Delta T$  ниже линии  $PSK$  диаграммы «Fe-Fe<sub>3</sub>C» в области температур  $727 - 650^\circ\text{C}$ . Структура характеризуется твёрдостью порядка  $180 \dots 250 \text{HB}$  и степенью дисперсности пластинок цементита —  $\Delta_0 \approx (0,5 \dots 0,7) \cdot 10^{-6} \text{ м}$ .

**Сорбит** образуется при переохлаждении аустенита до температуры  $T = 650 \dots 600^\circ\text{C}$  при скорости охлаждения  $V_{\text{охл.}} = 50 \dots 60^\circ\text{C}/\text{с}$ . Структура характеризуется твёрдостью порядка  $250 \dots 350 \text{HB}$ , степенью дисперсности пластинок цементита —  $\Delta_0 \approx (0,1 \dots 0,5) \cdot 10^{-8} \text{ м}$ , высоким пределом упругости, достаточной вязкостью и прочностью. Стали со структурой сорбита имеют наибольшую пластичность. Структура названа в честь учёного Г. Сорби.

**Троостит** образуется при переохлаждении аустенита до температуры  $T = 600 \dots 550^\circ\text{C}$  при скорости охлаждения  $V_{\text{охл.}} = 60 \dots 100^\circ\text{C}/\text{с}$ . Твёрдость структуры составляет порядка  $350 \dots 450 \text{HB}$ , степень дисперсности пластинок цементита —  $\Delta_0 \approx 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . Структура характеризуется высоким пределом упругости, малой вязкостью и пластичностью. Структура названа в честь учёного Труста.

**Мартенсит** — пересыщенный метастабильный твёрдый раствор внедрения углерода (С) в  $\alpha$ -железе ( $\text{Fe}_\alpha$ ). Характеризуется искажённой кристаллической решёткой, что вызвано избыточным количеством внедрённых атомов углерода, большой плотностью дислокаций, и высокой твёрдостью ( $\text{HRC}60 - 65$ ). Образуется мартенсит при скорости охлаждения  $150 - 200^\circ\text{C}/\text{с}$ . Скорость роста кристаллов мартенсита очень велика и достигает  $1000 \text{ м/с}$ . Мартенсит имеет наибольший удельный объём по сравнению с другими структурными составляющими

сталей, особенно с аустенитом, и обладает магнитными свойствами. Он является основной структурной составляющей закалённых сталей и определяет их свойства. Структура мартенсита названа в честь немецкого учёного-металлурга А. Мартенса (1850 – 1914 гг.).

## **Тема №5. Железоуглеродистые сплавы**

### **Вопрос 1. Легированные стали, их классификация, маркировка и область применения**

Легированные стали классифицируются по структуре в равновесном состоянии, по структуре после охлаждения на воздухе, по количеству легирующих элементов и по назначению.

**По равновесной структуре легированные стали разделяют на:**

- 1) доэвтектоидные (содержат избыточное количество феррита в структуре);
- 2) эвтектоидные (имеют перлитную структуру);
- 3) заэвтектоидные (с избыточными карбидами в структуре);
- 4) ледебуритные стали (в структуре присутствуют первичные карбиды, выделившиеся из жидкой фазы).

**По структуре после охлаждения на воздухе (нормализации) различают следующие легированные стали:**

- 1) перлитные стали (характеризуются невысокой устойчивостью переохлаждённого аустенита);
- 2) мартенситные стали (характеризуются высокой устойчивостью аустенита);
- 3) аустенитные стали (сохраняют аустенитную структуру при комнатной температуре).

**По количеству легирующих элементов различают стали:**

- 1) низколегированные (содержат до 2,5% легирующих элементов);
- 2) среднелегированные (содержат 2,5 – 10% легирующих элементов);
- 3) высоколегированные (содержат более 10% легирующих элементов).

**По назначению различают три группы легированных сталей:**

- 1) конструкционные (машиностроительные и строительные);
- 2) инструментальные (штамповые, для режущего и измерительного инструмента);
- 3) стали с особыми физическими и химическими свойствами (коррозионностойкие, жаропрочные, электротехнические, магнитные и др.).

### **Маркировка легированных сталей**

В нашей стране принята буквенно-цифровая система маркировки легированных сталей. Каждая марка стали содержит определённое сочетание букв и цифр.

В маркировке легированных сталей приняты следующие буквенные обозначения легирующих элементов:

А — азот (N); Т — титан (Ti); С — кремний (Si); Ф — ванадий (V); Х — хром (Cr); К — кобальт (Co); Д — медь (Cu); П — фосфор (P); В — вольфрам (W); Н — никель (Ni); Ю — алюминий (Al); Е — селен (Se); Ц — цирконий (Zr); М — молибден (Mo); Г — марганец (Mn); Р — бор (B), Б — ниобий (Nb). Эти буквы в сочетании с цифрами образуют марку стали и дают её характеристику.

Для марок конструкционных легированных сталей первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента. Начальную цифру опускают, если содержание углерода С около 1% и более. Если содержание легирующего элемента больше 1%, то после буквы, указывающей химический элемент, указывается его среднее значение в целых процентах. Если содержание легирующего элемента меньше или около 1%, то после соответствующей буквы цифра не ставится. Буква А в конце маркировки обозначает, что данная сталь высококачественная, содержащая меньше вредных примесей (серы S и фосфора P). Например, 12Х2Н4А — это легированная сталь, высококачественная, с содержанием 0,12% С, 2% Cr, 4% Ni; сталь Г13 — легированная сталь с содержанием 1% С и более, 13% Mn. Для групп специальных сталей, обозначенных в начале маркировки одной буквой Р, Ш, Е, Э принятые правила маркировки не подходят. О них будет рассказано ниже.

### Распределение легирующих элементов и их влияние на свойства сталей

Легируемые стали, благодаря наличию легирующих элементов, обладают ценнейшими свойствами, которых нет у углеродистых сталей, и не имеют их недостатков. Применение легируемой стали экономит материал, повышает долговечность изделий, снижает массу, увеличивает производительность. В прогрессивной технике легируемые стали имеют решающее значение.

Легирующие элементы оказывают следующее разностороннее влияние на свойства стали.

**Хром (Cr)** — содержится в сталях в количестве 0,8...1,2% и является основным легирующим элементом. Хром повышает прокаливаемость, способствует получению высокой и равномерной твёрдости стали, повышает твёрдость и коррозионную стойкость. Порог хладноломкости хромистых сталей — 0...–100°C;

**Никель (Ni)** — придаёт высокую прочность, пластичность и коррозионную стойкость сталям. Введение в хромистые стали никеля значительно повышает прочность и прокаливаемость, снижает порог хладноломкости, но при этом повышает склонность к отпускной хрупкости (этот недостаток компенсируется введением в сталь молибдена (Mo)). Хромоникелевые стали, обладают наилучшим комплексом свойств. Однако никель является дефицитным металлом, и применение таких сталей ограничено. Значительное количество никеля в сталях можно заменить медью (Cu), однако это не приводит к снижению их ударной вязкости;

**Вольфрам (W)** — увеличивает твёрдость и красностойкость (термостойкость);

**Ванадий (V)** — повышает плотность, прочность, сопротивление ударным нагрузкам и механическому износу. Ванадий, введённый в состав хромистых сталей в количестве 0,1...0,3% способствует измельчению зерна, повышает прочность и ударную вязкость;

**Кобальт (Co)** — повышает жаропрочность и магнитную проницаемость;

**Молибден (Mo)** — увеличивает красностойкость, механическую прочность, сопротивление окислению при высоких температурах; Введение молибдена в небольших количествах (0,15...0,46%) в хромистые стали увеличивает их прокаливаемость, снижает порог хладноломкости до –20...–120°C. Молибден способствует увеличению статической, динамической и усталостной прочности сталей, устраняет их склонность к внутреннему окислению. Кроме того, он снижает склонность к отпускной хрупкости сталей, содержащих никель (Ni).

**Магний (Mg)** — при содержании свыше 1% увеличивает твёрдость, износостойкость, сопротивление ударным нагрузкам;

**Марганец (Mn)** — увеличивает прокаливаемость стали, однако содействует росту зерна, и повышает порог хладноломкости до +40...–60°C;

**Титан (Ti)** — вводится в сталь в небольших количествах (~0,1%), способствует повышению прочности и коррозионной стойкости; в хромомарганцевые стали вводится для измельчения зерна;

**Алюминий (Al)** — повышает окалиностойкость;

**Бор (B)** — вводится в сталь в небольших количествах, увеличивает прокаливаемость стали, повышает порог хладноломкости +20...–60°C;

**Ниобий Nb** — повышает кислотостойкость;

**Медь (Cu)** — уменьшает коррозию;

**Кремний (Si)** — повышает ударную вязкость сталей и температурный запас вязкости. При легировании хромомарганцевых сталей кремнием получают, стали – хромансиль (20ХГС, 30ХГСА) (см. ниже). Эти стали обладают хорошим сочетанием прочности и вязкости, хорошо свариваются, штампуются и обрабатываются резанием.

### Область применения некоторых легированных сталей

Область применения конструкционной легированной стали очень велика. Наибольшее распространение получили следующие стали.

*Хромистые стали*, обладающие хорошей твёрдостью, прочностью, сравнительно недорогие. К ним относятся стали марок 15Х, 20Х, 30Х, 45Х, борсодержащие 40ХР, с цирконием 40ХЦ.

*Марганцевые стали*, например 15Г, 20Г, 40Г, 45Г2, отличающиеся износоустойчивостью. Особенно износоустойчива сталь марки Г13, которую применяют для гусениц тракторов, железнодорожных стрелок.

*Кремнистые и хромокремнистые стали* (33ХС, 55ХС), обладающие высокой твёрдостью и упругостью; применяются для пружин, рессор.

*Хромованадиевые стали* (45ХФ, 40ХФА) особо прочные, плотные, хорошо противостоящие истиранию, применяемые для автомобильных деталей, осей, валов.

*Хромомолибденовые стали* (20ХМА, 30ХМА) очень прочные, хорошо сваривающиеся, штампуемые, используемые для осей, роторов.

*Хромомарганцевокремнистые стали* — хромансиль (25ХГСА, 30ХГСА), которые заменяют хромомолибденовую сталь и значительно дешевле её.

*Хромоникелевые стали* (12Х2Н4А, 20ХН3А), очень прочные и пластичные; применяются для изготовления коленчатых валов, поршней, деталей турбин.

*Легированные инструментальные стали* (сталь 9ХС, сталь ХВГ) применяется для изготовления режущего, измерительного и ударно-штампового инструмента. Они твёрже и прочнее углеродистой стали, хорошо противостоят ударным нагрузкам.

Из легированных инструментальных сталей изготавливают:

1) режущий и измерительный инструмент — фрезы, свёрла, метчики, развёртки, лекала (основное применение для этого нашли стали марок 9ХС, ХГС, 9Х5ВФ, 85Х6НФТ);

2) штампы горячей штамповки, пресс-формы, формы для литья под давлением (основное применение для этого нашли стали марок 7Х3, 5ХНМ, 55ХГСЛ14Х8В2);

3) штампы холодной штамповки (основное применение для этого нашли стали марок Х6НФ, Х12ВМ, Х12Ф, 7Х12ВМ).

### Вопрос 2. Способы получения чугунов различных типов и их маркировка. Процесс графитизации. Факторы, способствующие графитизации

*Чугунами* называются сплавы железа (Fe) с углеродом (C), с содержанием углерода (C) от 2,14% до 6,67% (масс.).

По сравнению со сталями чугуны обладают пониженной температурой плавления и хорошими литейными свойствами. За счёт этого из чугунов можно делать отливки значительно более сложной формы, чем из сталей.

Выплавляют чугуны в доменных печах и вагранках. В литейном чугуне обычно содержится не более 4,0% углерода (C). Кроме углерода обязательно присутствуют примеси S, P, Mn, Si, причём в значительно большем количестве, чем в углеродистой стали. В отличие от сталей чугуны заканчивают кристаллизацию образованием эвтектики (ледебурита), определяющей их технологические свойства (хорошую жидкотекучесть), и обладают низкой способностью к пластической деформации. В обычных условиях чугуны не поддаются ковке.

*Белыми чугунами* называются чугуны, кристаллизующиеся по диаграмме «Fe-Fe<sub>3</sub>C», в которых весь углерод (или большая его часть) находится в химически связанном с железом состоянии в виде цементита (Fe<sub>3</sub>C). Их получают при высокой скорости охлаждения и наличии карбидообразующих элементов — Mn, Cr, S, W. В структуре белых чугунов имеется высокоуглеродистая эвтектика — *ледебурит* (C ≈ 4,3%) — механическая эвтектическая смесь аустенита и первичного цементита (Ц) в интервале температур 1147°C – 727°C, и механическая эвтектическая смесь перлита и цементита при температурах ниже 727°C. Своё название белые

чугуны получил по виду излома, который имеет матово-белый цвет и обладает металлическим блеском. Белые чугуны из-за присутствия в них большого количества цементита  $\text{Fe}_3\text{C}$  обладают высокой твёрдостью (HB 450 – 550) и хрупкостью, практически не поддаются обработке режущим инструментом. В зависимости от содержания углерода  $\text{C}$  белые чугуны по равновесной структуре разделяют на доэвтектические, эвтектический и заэвтектические.

Белые чугуны используются в основном как *передельные* — в качестве полуфабриката для производства стали и серого ковкого чугуна.

*Серыми чугунами* называются чугуны, кристаллизующиеся по диаграмме «железо (Fe) – графит (C)», в которых большая часть углерода (C) находится в структурно-свободном состоянии — в виде включений графита (C). Графит (C) является неметаллической фазой, поэтому графитные включения резко понижают прочность (особенно при растяжении) и пластичность чугунов, так как нарушают сплошность металлической основы. Степень понижения механических свойств обуславливается количеством и формой включений графита, а также их размерами и равномерностью распределения.

*Графитизацией* называется процесс выделения графита при кристаллизации или охлаждении сплавов железа (Fe) с углеродом (C). Графит может образовываться как из жидкой фазы при затвердевании чугуна, так и из твёрдой фазы. Образование графита происходит согласно диаграмме «железо (Fe) – графит (C)».

Так как графит содержит 100% углерода (C), а цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) — 6,67%, то жидкая фаза и аустенит по составу более близки к цементиту ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), чем к графиту (C). Следовательно, образование из жидкой фазы цементита и аустенита должно протекать легче, чем графита. Поэтому белые чугуны образуются при быстром охлаждении.

С другой стороны, при нагреве цементит ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) разлагается на железо (Fe) и углерод (C). Следовательно, графит является более стабильной фазой, чем цементит.

#### **Возможны два пути образования графита в чугуне:**

1) Непосредственное образование графита из жидкой фазы. Такое образование возможно при наличии в жидкой фазе центров кристаллизации графита (центров графитизации) и при очень медленном охлаждении расплава.

2) При разложении ранее образовавшегося цементита ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).

Влияние скорости охлаждения на процесс графитизации обусловлено тем, что графитизация чугуна является диффузионным процессом и протекает медленно.

**Большая длительность процесса графитизации обусловлена необходимостью протекания следующих стадий:**

1) образования центров графитизации в жидкой фазе или аустените; 2) диффузии атомов углерода (C) к центрам графитизации; 3) роста выделений графита.

Структура чугунов зависит от степени графитизации, т. е. от того, сколько углерода находится в связанном и свободном состоянии.

## **Тема №6. Термическая обработка материалов**

### **Вопрос 1. Структурно-фазовые превращения в стали в результате термической обработки**

Любой вид термической обработки состоит из комбинации четырёх основных структурно-фазовых превращений, в основе которых лежат стремления системы к минимуму свободной энергии.

**К этим превращениям относятся:**

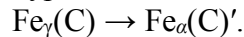
1) Превращение при нагреве перлита в аустенит ( $\text{P} \rightarrow \text{A}$ ), происходящее при нагреве выше критической температуры  $A_1$  (выше линии  $\text{PSK}$ ), при которой минимальной свободной энергией обладает аустенит  $\text{A}$



2) Превращение при медленном охлаждении аустенита в перлит ( $\text{A} \rightarrow \text{P}$ ), происходящее при охлаждении ниже температуры  $A_1$  (ниже линии  $\text{PSK}$ ), при которой минимальной свободной энергией обладает перлит:



3) Превращение при быстром охлаждении аустенита в мартенсит ( $A \rightarrow M$ ), происходящее при быстром охлаждении ниже температуры неустойчивого равновесия



4) Превращение мартенсита в перлитные структуры ( $M \rightarrow P$ ), происходящее при любых температурах, т. к. свободная энергия мартенсита больше, чем свободная энергия перлита



### Превращение перлита в аустенит

Согласно левой нижней части диаграммы железоуглеродистых сплавов при нагреве стали превращение перлита в аустенит происходит при температуре  $A_1$  (линия  $PSK$ , температура  $727^\circ\text{C}$ ). Превращение перлита в аустенит в точном соответствии с диаграммой состояния «Fe-Fe<sub>3</sub>C» происходит лишь при очень медленном нагреве. Превращение основано на диффузии углерода (C), сопровождается полиморфным превращением железа  $\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\gamma$ , а так же растворением цементита в аустените.

При нагреве доэвтектоидной стали (исходная структура феррит + перлит) и переходе через критическую точку  $A_1$  перлит превращается в аустенит, т. е. образуется структура феррит + аустенит. При дальнейшем повышении температуры феррит постепенно превращается в аустенит, и по достижении температуры, соответствующей критической точке  $A_3$  (линия  $GS$ ), структура стали состоит из однородного аустенита.

На скорость превращения перлита в аустенит влияют многие факторы: температура нагрева, скорость нагрева, дисперсность исходной структуры, пластинчатая или зернистая форма цементита, химический состав стали.

Температура нагрева определяет время превращения, так как с увеличением степени перегрева уменьшается размер критического зародыша аустенита, увеличиваются скорость возникновения зародышей и скорость их роста.

Механизм превращения перлита в аустенит представлен на рис. 1.

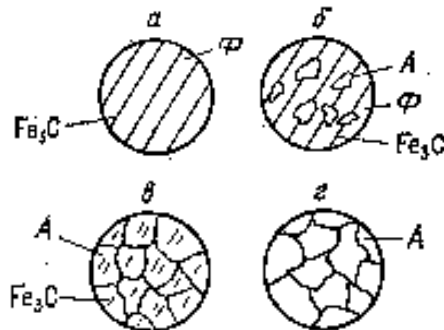


Рис. 1. Механизм превращения перлита в аустенит.

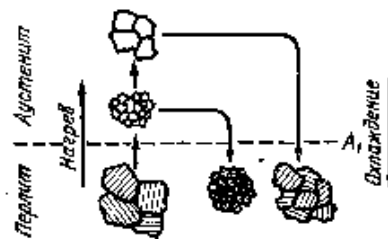


Рис. 2. Схема изменения зерна перлита в зависимости от температуры нагрева аустенитного зерна

### Рост зерна аустенита при нагреве

При нагреве стали выше температуры  $A_1$  зёрна аустенита получают мелкими (начальное зерно аустенита). В процессе дополнительного нагрева или длительной выдержки при данной температуре происходит рост зерна аустенита (рис. 2). Схема изменения зерна перлита в зависимости от температуры нагрева аустенитного зерна представлена на рис. 2. Рост величины зёрен аустенита происходит тем в большей степени, чем выше температура нагрева. Движущей силой роста является разность свободных энергий мелкозернистой (большая свободная энергия) и крупнозернистой (меньшая свободная энергия) структуры аустенита.

Начальная величина зерна — величина зерна, определяемая размером зерна в момент окончания перлитно-аустенитного превращения.

При нагреве до достаточно высокой температуры наследственно мелкозернистая сталь может иметь даже более крупное зерно аустенита, чем наследственно крупнозернистая сталь. Поэтому введено понятие действительной величины зерна.

*Действительная величина зерна* — размер зерна при комнатных температурах, полученный после той или иной термической обработки. Она тем больше, чем больше исходное зерно аустенита, т. е. зависит от температуры последнего нагрева и продолжительности выдержки при этой температуре.

Неправильный режим нагрева (нагрев сталей значительно выше линии *GSE* диаграммы «Fe-Fe<sub>3</sub>C») может привести либо к *перегреву*, либо к *пережогу* стали. Следствием этого является образование крупного действительного зерна.

*Перегрев* получается, когда нагрев доэвтектоидной стали значительно выше температуры *A<sub>3</sub>* (линии *GSE* диаграммы «Fe – Fe<sub>3</sub>C») приводит к интенсивному росту зерна аустенита. Такая структура называется *видманитеттова структура* (по имени учёного А. Видманштеттена см. рис.3б) и характеризуется пониженными механическими свойствами. Перегрев можно исправить повторным нагревом до оптимальных температур с последующим медленным охлаждением.



Рис. 3. Микроструктура углеродистой стали 35 в зависимости от температуры нагрева ( $\times 100$ ): *а* — без перегрева; *б* — перегрев; *в* — пережог

*Пережог* имеет место, когда температура нагрева приближается к температуре плавления и металл в течение длительного времени находился при высокой температуре в окислительной атмосфере печи. При этом наблюдается окисление и частичное оплавление границ зёрен, что резко снижает прочность стали. Излом такой стали камневидный (рис. 3в). Пережог — неисправимый брак, устранить который можно только переплавкой стали.

## Вопрос 2. Диффузионная металлизация как вид ХТО, её виды, режимы и назначение

*Диффузионная металлизация* — химико-термическая обработка, в основе которой положен процесс диффузионного насыщения поверхностных слоёв стальных изделий различными металлами: алюминием (Al), хромом (Cr), цинком (Zn), бором (B), молибденом (Mo) и др., а также кремнием (Si).

Проводится диффузионная металлизация для защиты изделий от коррозии и повышения их жаростойкости, износостойкости и твёрдости. Осуществляется она в твёрдых, жидких и газообразных средах.

Диффузионную металлизацию подразделяется на: *твёрдую диффузионную металлизацию*, *уазовую диффузионную металлизацию* и *жидкую диффузионную металлизацию*.

Среди методов диффузионной металлизации наибольшее применение получили алитирование, хромирование, силицирование, борирование и др. При насыщении поверхностных слоёв деталей хромом (Cr) процесс диффузионной металлизации называют *хромированием*, алюминием (Al) — *алитированием*, кремнием (Si) — *силицированием*, бором (B) — *борированием*. Рассмотрим каждый из этих процессов.

*Алитирование* — поверхностное насыщение низкоуглеродистой стали алюминием (Al) для повышения её коррозионной стойкости. Алитированные детали сохраняют жаростойкость до температуры 900°C. При алитировании алюминий (Al) диффундирует в сталь и образует твёрдый раствор с железом (Fe). Повышение коррозионной стойкости происходит благодаря образованию плотной плёнки окиси алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), предохраняющей металл от окисления.

В зависимости от среды, в которой производится процесс, различают алитирование в твёрдой, жидкой и газообразной среде, а также электролитическое алитирование.

*Хромирование* — процесс поверхностного насыщения поверхностного слоя стали хромом (Cr) с целью повышения твёрдости, износостойкости и придания ей высоких кислотоупорных, антикоррозионных и жаростойких свойств. При хромировании обеспечивается высокая стойкость против газовой коррозии до 800°C, а также стойкость против коррозии в воде, морской воде и кислотах. Хромированию подвергают низкоуглеродистые и легированные стали при 950 – 1150°C в течение 10 – 15 ч в зависимости от требуемой толщины упрочнённого слоя.

*Силицирование* — процесс поверхностного насыщения стали кремнием (Si), обеспечивающий повышение её кислотоупорности (в соляной, серной и азотной кислотах), жаростойкости (окалиностойкости) и увеличение устойчивости против износа. Силицированию подвергают детали, применяемые в химической, бумажно-целлюлозной, нефтяной и других отраслях промышленности (валики насосов, трубопроводы, детали теплообменников, клапаны, арматура и т. д.). Толщина слоя после силицирования — 0,3 – 1,0 мм.

Силицирование обычно проводят при нагреве в газовой среде, в ретортах, при разложении паров хлорида кремния (SiCl<sub>4</sub>). Нагрев осуществляется до температур 950 – 1050°C с выдержкой в течение 2 – 5 часов. В результате силицирования получается слой толщиной 0,6 – 1,4 мм с твёрдостью HV200 – 300. Жаростойкость детали до 800 – 850°C.

*Борирование* — процесс насыщения поверхностных слоёв стальных изделий бором (B), благодаря чему обеспечиваются высокая твёрдость, износостойкость и коррозионная стойкость материала детали в различных средах. Наибольшее распространение получило электролитное жидкое и газовое борирование, осуществляемое при 850 – 950°C в течение 6 – 8 ч.

Борированные слои характеризуются исключительно высокой твёрдостью (1800 – 2000 HV) и высоким сопротивлением износу из-за образования боридов железа (FeB, FeB<sub>2</sub>), однако эти слои очень хрупкие.

Борированная сталь отличается большей теплостойкостью до температуры 900°C и жаростойкостью до температуры 800°C. Недостатком борирования является то, что борированные слои отличаются повышенной хрупкостью. Борированию можно подвергать любые стали.

### **Вопрос 3. Поверхностная закалка, лазерная термическая и химико-термическая обработка**

#### **Поверхностная закалка**

Поверхностная закалка — это процесс термической обработки, который состоит в нагреве поверхностного слоя стального изделия до температуры выше линии  $A_{C3}$  для доэвтектоидной стали и до температуры выше линии  $A_{C1}$  для заэвтектоидной.

Поверхностная закалка предназначена для повышения твёрдости, износостойкости и предела выносливости поверхностного слоя обрабатываемых изделий. В результате такой закалки сердцевина остаётся вязкой, благодаря чему изделие воспринимает ударные нагрузки.

Поверхностная закалка осуществляется очень быстро и поэтому на поверхности детали не образуется окисленного слоя (окалины). Так как при этом нагревается и охлаждается поверхностный слой детали, коробление детали незначительное.

Нагрев под поверхностную закалку производят следующими способами: 1) токами высокой частоты (ТВЧ); 2) в расплавленных металлах или солях; 3) пламенем газовых или кислород-ацетиленовых горелок; 4) лазерным излучением.

Наибольшее распространение получил метод поверхностной закалки при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ).

При нагреве ТВЧ используется явление индукции и поверхностного распределения индуцированного тока в детали. Так, если в переменное электромагнитное поле поместить замкнутый проводник электрического тока, то в проводнике возникают переменные (вихревые)

токи. Характерным является распределение тока по сечению проводника. Если постоянный ток при прохождении по проводнику распределяется равномерно по его сечению, то распределение переменного тока по сечению проводника неравномерное. Плотность протекающего переменного тока значительно больше у поверхности, чем во внутренних слоях проводника. Такое неравномерное распределение переменного тока в проводнике называется *поверхностным эффектом*. Вследствие поверхностного эффекта проводник нагревается на определённую глубину от поверхности.

**Различают следующие способы заковки с индукционным нагревом:**

- 1) одновременный нагрев и охлаждение всей поверхности; этот метод применяется для изделий, имеющих небольшую упрочняемую поверхность (инструменты, валики, пальцы);
- 2) непрерывно-последовательный нагрев и охлаждение; этот метод применяют для заковки длинных валов, осей и т. д.;
- 3) последовательный нагрев и охлаждение отдельных участков; данный метод используют при заковке шеек коленчатых валов (последовательный нагрев и заковка одной шейки за другой), кулачков распределительных валов и т. д.

**Преимуществами поверхностной заковки ТВЧ являются:**

- 1) регулируемая глубина закалённого слоя;
- 2) высокая производительность и возможность автоматизации;
- 3) отсутствие на поверхности детали обезуглероживания и окалинообразования;
- 4) минимальное коробление детали;
- 5) по сравнению с обычной заковкой сталь, закалённая при нагреве ТВЧ, имеет следующие преимущества: более мелкозернистая структура; более высокая твёрдость; более высокая износостойкость; более высокая прочность при относительно меньшем понижении вязкости; более высокий предел выносливости (предел усталостной прочности).

**К недостаткам поверхностной заковки ТВЧ следует отнести:**

- 1) высокая стоимость технологического оборудования, в частности индуктора, являющегося индивидуальным для каждой детали;
- 2) малая применимость заковки ТВЧ к условиям единичного производства, что вызвано первым недостатком.

### **Лазерная термическая обработка**

*Лазерная термическая обработка* (ЛТО) также применяется для поверхностного упрочнения деталей. Лазерная технология обеспечивает повышение производительности труда, точности и качества обработки, представляет практически безотходную технологию, удовлетворяющую требованиям по экологической защите окружающей среды.

*Лазеры* — оптические квантовые генераторы (ОКГ), позволяющие получать электромагнитные излучения чрезвычайно высокой концентрации энергии. Длина волн, генерируемых ОКГ, находится в световом диапазоне от ультрафиолетовой области спектра до инфракрасной ( $\alpha = 0,1 - 70$  мкм). Лазерное излучение распространяется очень узким пучком и характеризуется высокой концентрацией энергии. Источниками генерируемой энергии служат твёрдые тела (рубины, алюминиевые граниты, иттрий, стёкла) и газы (He, Ar, Ne, CO<sub>2</sub>).

Применение лазеров для термической обработки основано на преобразовании световой энергии в тепловую. В основу работы лазеров положено усиление электромагнитных колебаний счёт индуцированного излучения атомов. Высокая концентрация энергии в световом потоке ОКГ позволяет нагреть поверхность до температурного диапазона термообработки за очень короткое время.

Глубина упрочнённого слоя при нагреве на CO<sub>2</sub>-лазере (при мощности 5 кВт) колеблется от 0,3 до 1,0 мм, а на импульсном лазере — 0,1 – 0,15 мм.

Механизм ЛТО заключается в фазовом превращении материала после его скоростного нагрева до температур выше температур фазовой перекристаллизации (вплоть до температур плавления) с последующим быстрым охлаждением обработанной зоны путём отвода теплоты за счёт теплопроводности материала изделия. Скорость охлаждения при температуре нагрева

ниже температуры плавления составляет ( $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , при кристаллизации из жидкого слоя —  $106^{\circ}\text{C}/\text{с}$  (что в  $10^3$  раз больше скорости обычной закалки).

ЛТО позволяет повысить твёрдость и износостойкость упрочняемых материалов, а также предел контактной выносливости  $\sigma_H$  и предел выносливости при изгибе  $\sigma_{\text{и}}$ . Твёрдость зависит от концентрации углерода и легирующих элементов в стали (при постоянном режиме обработки). Методом ЛТО хорошо упрочняют средне- и высоколегированные углеродистые и инструментальные стали. Стали с низким содержанием углерода и высокопрочные низколегированные стали лазерной термической обработкой упрочняются плохо. ЛТО практически не влияет на предел прочности  $\sigma_B$  и предел текучести  $\sigma_T$  сталей.

На сегодняшний день лазерная обработка считается перспективным методом поверхностного упрочнения изделий сложной формы, работающих в условиях износа и усталостного нагружения.

### **Лазерная химико-термическая обработка**

Насыщение легирующими элементами при лазерной химико-термической обработке (ЛХТО) происходит путём диффузии и массопереноса в твёрдой фазе, из плазмы, и жидкой фазы, при этом возможно конвективное и чисто механическое перемещение расплава в зоне воздействия лазерного импульса.

При ЛХТО на поверхность изделия различными способами предварительно наносят легирующие элементы. Наибольшее распространение среди способов нанесения легирующих элементов получили: 1) накатка фольги из легирующего материала; 2) электролитическое или химическое осаждение; 3) напыление; 4) электроискровое легирование; 5) нанесение порошков или обмазок. ЛХТО обычно осуществляется в режиме расплавления.

Свойства зоны легирования зависят от концентрации легирующих элементов и получения фаз различной степени стабильности и дисперсности, образующихся в процессе охлаждения. Строение и состав зоны термического влияния определяются режимом лазерного облучения: плотностью мощности излучения, временем его действия, числом импульсов, а также концентрацией легирующих компонентов в обмазке.

В настоящее время получены положительные результаты по цементации, азотированию, борированию и диффузионной металлизации железа и стали, а также металлов, не имеющих полиморфных превращений (Al, Ni, Cu и др.).

При цементации железа образуется двухслойная зона, состоящая из белого слаботравящегося слоя с равномерной твёрдостью  $HV1400$  и расположенного за ним слоя с микротвёрдостью  $HV1000$ .

Диффузионная металлизация железа возможна при легировании различными металлами. Однако повышение твёрдости достигается только при растворении ванадия (V), ниобия (Nb), титана (Ti) и вольфрама (W).

Высокая износостойкость и кавитационная стойкость получены при лазерном азотировании из обмазок на стали 38Х2МЮА и 15ХМФ.

После лазерного борирования зона термического воздействия имеет твёрдость в зависимости от режима обработки  $HV1100 - 2100$ . При таком упрочнении достигается высокое сопротивление изнашиванию при различных схемах приложения нагрузки и различных условиях трения. Легирование бором (В) снижает коэффициент трения материала, повышает его износостойкость.

## **Тема №7. Цветные металлы и их сплавы**

### **Вопрос 1. Медь и сплавы на её основе**

Цветные металлы и их сплавы обладают рядом ценных свойств, и широко применяются как конструкционные материалы в машиностроении, авиастроении и других отраслях

промышленности. Наиболее распространенные промышленные цветные металлы — медь, алюминий, магний и титан.

Цветные металлы и сплавы являются более дорогими и дефицитными материалами по сравнению с чёрными металлами. Однако, из-за хорошего сочетания физико-механических свойств, область применения в технике этих материалов непрерывно расширяется. Переход промышленности на сплавы из легких металлов значительно расширяет сырьевую базу. Титан, алюминий, магний можно получать из бедных и сложных по составу руд и отходов производства.

### **Медь и её свойства**

Медь Cu — металл характерного красного цвета с плотностью  $\rho = 8940 \text{ кг/м}^3$  (8,94 г/см<sup>3</sup>) и температурой плавления 1083°C, температура кипения 2567 °C. Медь имеет гранецентрированную кубическую кристаллическую решётку (ГЦК) с параметром решётки  $a = 3,61 \text{ \AA}$ . Удельное электрическое сопротивление меди равно 0,0178 мкОм·м. Земная кора состоит на 0,01% из меди.

*Из меди можно изготовить проволоку  $\varnothing 0,02 \text{ мм}$ , а лист толщиной 2,6 мкм.*

### **Свойства меди:**

- 1) Высокая электро- и теплопроводность;
- 2) Устойчива против атмосферной коррозии и коррозии в пресной и морской воде, благодаря образованию на её поверхности тонкой защитной плёнки.
- 3) Медь хорошо обрабатывается в холодном и в горячем состояниях. Электропроводность и теплопроводность меди являются её наиболее ценными физическими свойствами, благодаря чему она находит широкое применение в электротехнике, электронике, приборостроении, двигателестроении, различного рода теплообменниках, литейном производстве.

### **Механические свойства меди относительно низкие:**

- 1) предел прочности составляет  $\sigma_b = 220 - 240 \text{ МПа}$  (22 – 24 кг/мм<sup>2</sup>);
- 2) относительное удлинение  $\delta$  — 15...25%;
- 3) твёрдость HB45.

Поэтому в качестве конструкционного материала медь применяется редко. Повышение механических свойств достигается созданием различных сплавов на основе меди.

По ГОСТ 859 – 41 техническую медь в зависимости от степени чистоты разделяют на шесть марок: М00 (99,99% Cu), М0 (99,95% Cu), М1 (99,9% Cu), М2 (99,7% Cu), М3 (99,5%Cu), М4(99% Cu).

Примесями меди, содержание которых допускается в тысячных и сотых долях процента, являются висмут Bi, сурьма Sb, мышьяк As, железо Fe, никель Ni, свинец Pb, олово Sn, сера S, цинк Zn и др. Из них висмут Bi, свинец Pb, сурьма Sb затрудняют обработку меди давлением в горячем состоянии, а содержание  $C > 2\%$  и S придают ей хладноломкость. Все примеси, особенно фосфор P, мышьяк As, олово Sn, снижают электропроводность меди.

Технически чистую медь широко применяют в электротехнической промышленности для изготовления проводов, кабелей, шин и других токопроводящих деталей. Кроме того, медь применяют в машиностроении, судостроении, котлостроении для теплообменников и в других областях. В большом количестве медь используют для изготовления важнейших конструкционных сплавов — латуней и бронз, а также в качестве наносимого покрытия в электрохимии.

### **Сплавы меди**

Различают две группы медных сплавов: *латуни* — сплавы меди с цинком, *бронзы* — сплавы меди с другими (кроме цинка) элементами.

**Латуни «Cu-Zn»** — двойные или многокомпонентные сплавы меди, основным легирующим элементом которых является цинк Zn.

В зависимости от количественного соотношения меди и цинка латуни имеют цвет от красноватого до светло-жёлтого. Практическое применение латуни с содержанием цинка до

45%. Повышение содержания цинка до 45% приводит к увеличению предела прочности  $\sigma_b$  до 450 МПа. Максимальная пластичность имеет место при содержании цинка около 37%.

**По способу изготовления и назначению изделий различают латуни:**

- 1) **деформируемые** (листы, ленты, проволоку, трубы и т. д.);
- 2) **литейные** (литые изделия).

**Деформируемые латуни** маркируются буквой Л, за которой следует число, показывающее содержание меди в процентах, например в латуни Л62 содержится 62% меди и 38% цинка.

Если кроме меди и цинка, латунь содержит другие элементы, то после буквы Л ставятся условные обозначения этих элементов в виде букв (О — олово, С — свинец, Ж — железо, Ф — фосфор, Мц — марганец, А — алюминий, Ц — цинк и т. д.), а затем цифры, указывающие на среднее содержание элемента. То есть, количество этих элементов обозначается соответствующими цифрами после числа, показывающего содержание меди.

*Например, сплав ЛАЖ 60-1-1 содержит 60% меди, 1% алюминия, 1% железа и 38% цинка. Сплав ЛАЖМц 66-6-3-2 содержит 66% Cu, 6% Al, 3% Fe и 2% Mn, остальное — 23% Zn.*

Обрабатываемость резанием латуней улучшается путём введения в их состав свинца. В качестве примера можно привести латунь марки ЛС59-1, которую называют «автоматной латунью».

Латуни имеют хорошую коррозионную стойкость, которую можно повысить путём введения в их состав олова Sn. Например, латунь ЛО70-1 стойка против коррозии в морской воде и называется «морской латунью».

Добавка никеля Ni и железа Fe повышает механическую прочность латуни до  $\sigma_b = 550$  МПа.

Механические характеристики деформируемых двойных латуней марок Л96, Л90, Л80, Л70, Л68, Л59:  $\sigma_b = 450 \dots 600$  МПа,  $\delta = 2 \dots 5$  % (в нагартованном состоянии) и  $\sigma_b = 240 \dots 380$  МПа,  $\delta = 52 \dots 44$  % (в отожженном состоянии).

**Литейные латуни** также маркируются буквой Л. После буквенного обозначения основного легирующего элемента (цинка) и каждого последующего элемента ставится цифра, указывающая его среднее содержание в сплаве. Например, латунь ЛЦ23А6Ж3Мц2 содержит 23% цинка Zn, 6% алюминия Al, 3% железа Fe, 2% марганца Mn. Наилучшей жидкотекучестью обладает латунь марки ЛЦ16К4.

К литейным латуням относятся латуни типа ЛС, ЛК, ЛА, ЛАЖ, ЛАЖМц. Литейные латуни не склонны к ликвации, имеют сосредоточенную усадку, отливки из них получают с высокой плотностью.

Латуни являются хорошим материалом для конструкций, работающих при отрицательных температурах.

Латунь, содержащая около 15% Zn, имеет золотистый цвет, хорошую стойкость против атмосферной коррозии, и её используют вместо золота для изготовления художественных изделий.

При добавке к латуни до 1,5% олова Sn она приобретает стойкость в морской воде (морская латунь).

**Бронзы** — двойные или многокомпонентные сплавы меди с другими элементами (оловом Sn, алюминием Al, свинцом Pb, бериллием Be, кремнием Si, кадмием Cd, хромом Cr и др.). Цинк Zn в бронзах не является основным легирующим компонентом. Бронзы по способу изготовления заготовок и изделий и их назначению также разделяют на литейные и деформируемые.

### Маркировка бронз.

**При маркировке деформируемых бронз** на первом месте ставятся буквы Бр, затем буквы, указывающие, какие элементы, кроме меди, входят в состав сплава. После букв идут цифры, показывающие процентное содержание компонентов в сплаве. Например, марка БрОФ10-1 означает, что бронза содержит 10% олова Sn, 1% фосфора Р, остальное — медь Cu (89%).

**Маркировка литейных бронз** также начинается с букв Бр, затем указываются буквенные обозначения легирующих элементов и ставится цифра, указывающая его усредненное содержание в сплаве. Например, бронза БрОЗЦ12С5 содержит 3% олова, 12% цинка, 5% свинца, остальное — медь Cu.

В зависимости от основного легирующего элемента бронзы разделяют на:  
– оловянные; – свинцовые; – алюминиевые; – бериллиевые; – кремнистые и т. д.

**Оловянные бронзы** имеют наиболее широкое применение в машиностроении. В них олово Sn является основным легирующим элементом. Также в качестве легирующих добавок используют цинк Zn, свинец Pb, фосфор Р, никель Ni.

Из оловянных бронз изготавливают водяную и паровую аппаратуру, подшипники скольжения, зубчатые колёса, пружины и др.

### Вопрос 2. Алюминий и сплавы на его основе

Алюминий и алюминиевые сплавы были первыми конструкционными материалами, которые были использованы в самолётостроении. Своё назначение в самолётостроении алюминий сохранил и в настоящее время, занимая первое место среди материалов, используемых в авиационной промышленности (до 90%).

Практически нет ни одной отрасли машиностроения, в которой бы не использовали в той или иной мере алюминиевые сплавы. Их применяют в *строительных конструкциях, судостроении, железнодорожном и автомобильном транспорте, летательных аппаратах, нефтяном и химическом машиностроении, электротехнике и т. д.* Также из алюминиевых сплавов изготавливают детали холодильной и криогенной техники. Их применяют в криогенной технике, для изготовления хранилищ и ёмкостей для транспортировки жидких газов: кислорода, азота, водорода, гелия, а также в установках сжижения и хранения природного газа.

Из всех лёгких металлов алюминий характеризуется наибольшим объёмом производства, занимая в мировой промышленности второе место после производства стали. Алюминиевые сплавы имеют сравнительно невысокую стоимость.

**Алюминий Al** — металл характерного серебристо-белого цвета,

- Тип кристаллической решетки гранецентрированная (ГЦК) с параметром  $a = 4,04 \text{ \AA}$ ,
- не имеет полиморфных превращений;
- малая плотность ( $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ );
- низкая температура плавления ( $658 - 660^\circ\text{C}$ );
- высокая электро- и теплопроводность (*Электропроводность алюминия составляет 65% от электропроводности меди при значительно меньшей плотности*);
- низкая прочность  $\sigma_B = 100 - 150 \text{ МПа}$ ;
- низкая твёрдость HB25;
- высокая пластичность  $\delta = 30 - 40\%$  (*благодаря высокой пластичности, алюминий хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии*).
- высокая коррозионная стойкость в атмосферных условиях, в аммиаке, сернистом и других газах, в морской воде, азотной кислоте и других агрессивных средах (*высокая коррозионная стойкость обуславливается образованием на его поверхности плотной защитной плёнки оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Чем меньше примесей содержит алюминий, тем выше его коррозионная стойкость*).

Постоянными примесями алюминия являются железо Fe и кремний Si. Алюминий хорошо деформируется и сваривается, но плохо обрабатывается резанием. Из него прокаткой можно получать тонкую фольгу, применяемую в качестве обёрточного материала.

Алюминий высокой чистоты маркируется А99 (99,999% Al), А8, А7, А6, А5, А0 (содержание алюминия от 99,85% до 99%).

**Область применения технически чистого алюминия:**

Алюминий высокой чистоты, применяемый для лабораторных целей, содержит 99,99% Al, для технических целей — 99,50% Al.

- 1) в электротехнической и химической промышленности,
- 2) в авиа- и автостроении,
- 3) производство кабелей и токопроводящих изделий, химической аппаратуры, фольги, различных труб, прутков, листов, сортовых профилей, проволоки, поковок и т. д..
- 4) Из-за низкой прочности технический алюминий применяется для изготовления малонагруженных элементов строительных конструкций и малонагруженных деталей машин.

Все примеси алюминия, особенно **магний Mg и марганец Mn**, снижают его электро- и теплопроводность. Так, при содержании до 5% Mn электро- и теплопроводность алюминия снижаются более чем в два раза. Железо Fe заметно снижает коррозионную стойкость алюминия. Однако Mg и Mn, а также Cu, Zn, Ni и Cr упрочняют алюминиевые сплавы.

Высокая коррозионная стойкость в органических кислотах обусловила широкое применение алюминия для изготовления бытовой посуды, для транспортировки и хранения продуктов питания, поскольку в алюминиевой посуде сохраняются все витамины. Исползованная алюминиевая посуда легко подвергается переплавке, что облегчает решение проблемы переработки отходов.

Тончайший слой алюминия, нанесённый на ткань, позволяет задерживать тепловые лучи, пропуская лишь световые. Из такой ткани изготавливают палатки, защитные костюмы, комбинезоны и т. д.

### Сплавы алюминия

Сплавы на основе алюминия получили широкое применение в качестве конструкционных материалов. Эти сплавы разделяют на деформируемые и литейные.

Основными легирующими элементами в алюминиевых сплавах являются Cu, Si, Mg, Mn, Fe, Zn.

**Марганец Mn** одновременно повышает коррозионную стойкость.

**Кремний Si** является основным легирующим элементом в ряде литейных алюминиевых сплавов (силуминов), поскольку он участвует в образовании эвтектики.

**Магний Mg и марганец Mn** снижают тепло- и электропроводность алюминия.

**Железо Fe** — снижает коррозионную стойкость алюминия.

**Принцип маркировки алюминиевых сплавов следующий.** В начале указывается тип сплава: Д — сплавы типа дюралюминов; А — технический алюминий; АК — ковкие алюминиевые сплавы; В — высокопрочные сплавы; АЛ — литейные алюминиевые сплавы. Далее после этих букв указывается условный номер сплава. За условным номером следует обозначение, характеризующее состояние сплава: М — мягкий (отожженный); Т — термически обработанный (закалка и старение); Н — нагартованный; П — полунагартованный и др.

*Д* — деформируемые сплавы; *Л* — литейные сплавы; *I* — сплавы, не упрочняемые термической обработкой; *II* — сплавы, упрочняемые термической обработкой.

**В соответствии с диаграммой состояния алюминиевые сплавы по технологическим свойствам подразделяются на три группы:**

- деформируемые сплавы, не упрочняемые термической обработкой;
- деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой;

- литейные сплавы.

**Деформируемые сплавы разделяют на:**

- а) сплавы, не упрочняемые термообработкой (сплавы I);
- б) сплавы, упрочняемые термообработкой (сплавы II).

**К наиболее широко распространённым алюминиевым сплавам, упрочняемым термообработкой, относят следующие сплавы:**

- дюралюмин Д1, Д16 и другие на основе системы «Al - Cu - Mg»;
- авиаль типа АВ на основе системы «Al - Cu - Mg - Si»;
- высокопрочные сплавы типа В95 на основе системы «Al - Cu - Mg - Zn»;
- жаропрочные сплавы типа АК.4-1 на основе «Al - Mg - Ni - Si».

#### **Дюралюмин**

Наиболее распространёнными деформируемыми алюминиевыми сплавами являются *дуралюмины*. Они содержат 2,5 – 5% Cu; 0,4 – 1,8% Mg; 0,4 – 0,9% Mn, остальное — алюминий Al. Медь и магний вводят в состав сплава для его упрочнения, а марганец — для повышения коррозионной стойкости сплава. Наибольшее упрочнение такие сплавы получают после старения. Дюралюмин применяют для изготовления листов, лент, сортовых профилей, проволоки, труб и т. д.

Дуралюмин был изобретён в 1906 г. немецким учёным А. Вильмом.

**Основным достоинством дуралюминов является:**

- 1) высокая удельная прочность (*благодаря чему они относятся к числу наиболее широко применяемых материалов в самолётостроении*). Их применяют в пищевой и холодильной промышленности для изготовления ёмкостей, поплавковых камер, арматуры, трубопроводов и т. д.

**Основным недостатком дуралюминов является:**

- 1) пониженная коррозионная стойкость (*для повышения коррозионной стойкости листы дуралюмина лакируют, т. е. покрывают слоем чистого алюминия и производят совместную прокатку листов. При этом алюминий, толщина слоя которого составляет 2 – 5%, сваривается с основным металлом и защищает его от коррозии*).

**Высокопрочные деформируемые алюминиевые сплавы системы «Al – Zn – Mg – Cu»** имеют ещё более высокую прочность  $\sigma_{\text{в}} = 600 - 700$  МПа, но меньшую пластичность  $\delta = 10\%$  и используются в самолётостроении для тяжёлонагруженных деталей.

**Разработан авиационный материал — пеноалюминий**, получаемый в виде лент и листов, толщиной до 100 мм. Его изготавливают присадкой в жидкий алюминий или его сплавы порошкообразных газообразующих веществ, например гидридов титана и циркония. Гидриды вводят под давлением, но, как только начинается выделение водорода и вспенивание, давление снимают. Во избежание попадания пены, полученный пеноалюминий охлаждают опрыскиванием водой. Объёмная масса пеноалюминия 0,2 – 0,6 г/см<sup>3</sup>. Пеноалюминий можно обрабатывать резанием, клепать, прибивать гвоздями, паять.

#### **Литейные алюминиевые сплавы**

**Достоинства:**

- 1) хорошая жидкотекучесть;
- 2) сравнительно небольшую усадку.

Высокими литейными свойствами обладают сплавы, имеющие в своей структуре эвтектику. Наиболее широко распространёнными литейными сплавами являются сплавы алюминия с кремнием, называемые *силуминами*.

**По химическому составу литейные алюминиевые сплавы разделяют на пять групп:**

- 1) на основе «Al – Si» (силумины АЛ2, АЛ4 и др.);
- 2) на основе «Al – Mg» (АЛ8, АЛ13 и др.);
- 3) на основе «Al – Cu» (АЛ7, АЛ7В, АЛ12 и др.);

- 4) на основе «Al – Cu – Si» (АЛЗ, АЛЗВ, АЛ6, АЛ 10В и др.);
- 5) на основе «Al – Si – Zn» (АЛ11, АЛ16В, АЛ17В и др.) и др.

## Тема № 8. Неметаллические материалы

### Вопрос 1. Композиционные материалы

*Композиционными материалами* называют материалы, состоящие из двух компонентов и более, объединённых различными способами в монолит и сохраняющими при этом индивидуальные особенности.

Композиционные материалы обладают комплексом свойств, отличающихся от традиционных конструкционных материалов, что и предопределило их успешное применение для совершенствования современных и разработки принципиально новых конструкций.

**Для композиционных материалов характерна следующая совокупность признаков:**

- 1) состав, форма и распределение компонентов материала определены заранее;
- 2) материалы состоят из двух компонентов и более различного химического состава, разделённых в материале границей;
- 3) свойства материала определяются каждым из его компонентов, содержание которых в материале достаточно большое;
- 4) материал обладает свойствами, отличными от свойств компонентов, взятых в отдельности;
- 5) материал однороден в макромасштабе и неоднороден в микромасштабе;
- 6) материал не встречается в природе, а создан человеком.

Компоненты композиционного материала различны по геометрическому признаку. Компонент, который обладает непрерывностью по всему объёму, является *матрицей*. Компонент же прерывный, разделённый в объёме композиционного материала, считается *армирующим* или упрочняющим. Примером композиционного материала является железобетон.

В качестве матриц в композиционных материалах могут быть использованы металлы и их сплавы, а также полимеры органические и неорганические, керамические, углеродные и другие материалы. Свойства матрицы определяют технологические параметры процесса получения композиции и её эксплуатационные характеристики: плотность, удельную прочность, рабочую температуру, сопротивление усталостному разрушению и воздействию агрессивных сред.

Армирующие или упрочняющие компоненты равномерно распределены в матрице. Они, как правило, обладают высокой прочностью, твёрдостью и модулем упругости и по этим показателям значительно превосходят матрицу. Более широким понятием, чем армирующий или упрочняющий компонент, является термин «наполнитель», поскольку наполнитель в матрице помимо изменения прочности оказывает влияние и на другие характеристики композиции.

### Классификация композиционных материалов

Композиционные материалы классифицируют по геометрии наполнителя, расположению его в матрице и природе компонентов.

**Классификация композиционных материалов по геометрии наполнителя:**

- 1) с нуль-мерными наполнителями, размеры которых в трёх измерениях имеют один и тот же порядок;
- 2) с одномерными наполнителями, один из размеров которых значительно превосходит два других;
- 3) с двумерными наполнителями, размеры которых значительно превосходят третий.

**Классификация композиционных материалов по схеме расположения наполнителей:**

- 1) с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;
- 2) с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя в виде волокон, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;

3) с трёхосным (объёмным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его распределении.

#### **Классификация композиционных материалов по природе компонентов:**

- 1) композиционные материалы, содержащие компонент из металлов или сплавов;
- 2) композиционные материалы, содержащие компонент из неорганических соединений оксидов, карбидов, нитридов и др.;
- 3) композиционные материалы, содержащие компонент из неметаллических элементов, углерода, бора и др.;
- 4) композиционные материалы, содержащие компонент из органических соединений (эпоксидные, полиэфирные, фенольные и другие смолы).

Свойства композиционных материалов зависят не только от физико-химических свойств компонентов, но и прочности связи между ними. Обычно компоненты для композиционного материала выбирают со свойствами, существенно отличающимися друг от друга.

Модуль упругости композиционных материалов может изменяться в требуемом направлении в зависимости от схемы армирования. Высокая надёжность в работе конструкций из композиционных материалов связана с особенностями распространения в них трещин. В обычных сплавах трещина развивается быстро и скорость роста её в период работы конструкции детали возрастает. В композиционных материалах трещина обычно возникает и развивается в матрице и встречает препятствия на границе матрица — упрочнитель. Армирующий элемент тормозит её распространение, задерживая на некоторое время её рост.

## **Вопрос 2. Пластмассы, их общая характеристика, классификация, и назначение**

Среди новых конструкционных материалов, необходимых для ускорения технического прогресса во всех отраслях народного хозяйства, особое место принадлежит пластмассам и синтетическим смолам. Сегодня производство различной техники и машин невозможно представить без использования пластмасс и резин. Они являются не только заменителями дефицитных цветных металлов, но и самостоятельными машиностроительными материалами.

*Синтетическими полимерами* называют неметаллические материалы (пластические массы, резины, химические волокна, плёнки, лаки, клеи, герметики и др.), основой производства которых является синтез высокомолекулярных органических продуктов на базе полимерных соединений.

Полимерные высокомолекулярные соединения состоят из сотен и тысяч атомов. Гигантские молекулы этих соединений называют *макромолекулами*.

В зависимости от формы макромолекул полимерные соединения подразделяются на *линейные, разветвлённые и сетчатые (пространственные)* (рис.1).

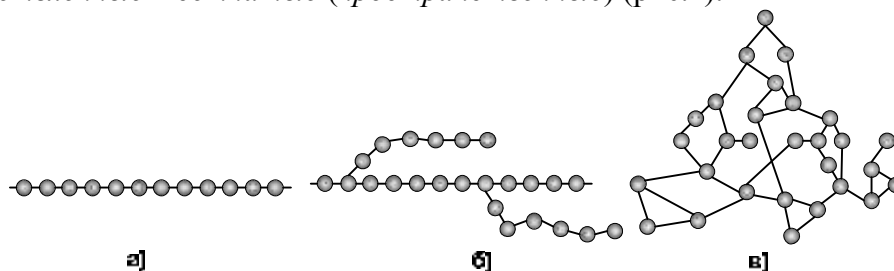


Рис.1. Строение высокомолекулярных соединений: *а* — линейных; *б* — разветвлённых; *в* — сетчатых.

У *линейных полимеров* макромолекулы представляют собой сотни или тысячи элементарных звеньев мономеров, соединённых внутримолекулярными связями в бесконечные цепи (рис. 1а). У *разветвлённых полимеров* цепи образуют ответвления, состоящие так же из элементарных звеньев мономеров (рис. 1б). У *сетчатых (пространственных) полимеров* цепи образуют пространственную сетку (рис. 1в).

Линейные и разветвленные полимеры относятся к *термопластичным*, а сетчатые — к *термореактивным полимерам*. Термопласты в отличие от реактопластов способны

многократно подвергаться пластической деформации.

**Все синтетические полимеры по типу синтеза делят на:**

- 1) полимеризационные (и сополимеризационные);
- 2) поликонденсационные высокомолекулярные соединения.

*Полимеризационные полимеры* — это полимеры, которые образованы при взаимодействии мономеров без изменения первоначального состава. К ним относятся полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид, политетрафторэтилен.

*Поликонденсационные полимеры* — это полимеры, которые образуются из нескольких мономеров в результате протекания процесса (реакции) поликонденсации. Процесс сопровождается выделением побочных продуктов (воды ( $H_2O$ ), углекислого газа ( $CO_2$ ), аммиака ( $NH_3$ )). В результате состав полимера не отвечает составу первоначальных веществ (мономеров).

### **Основные сведения о пластмассах**

Пластические массы (пластмассы) занимают особое место среди синтетических полимерных материалов. Широкое применение пластмасс обусловлено наличием у них ценных свойств.

**Пластмассы широко применяются в машиностроении благодаря высоким показателям следующих ценных свойств:**

- 1) *хорошая удельная прочность*;
- 2) *фрикционные свойства* (некоторые пластмассы обладают высоким коэффициентом трения и малым износом);
- 3) *антифрикционные свойства* (некоторые виды пластмасс, например текстолит, капрон успешно заменяют бронзу в подшипниковых узлах машин);
- 4) *оптические свойства* (некоторые ненаполненные пластические массы (органическое стекло, полистирол и др.) прозрачны и бесцветны, способны пропускать лучи света в широком диапазоне волн, в том числе и ультрафиолетовую часть спектра значительно превосходя в этом отношении силикатные стекла);
- 4) *хорошая электроизоляционность*;
- 5) *хорошая теплозвукоизоляционность*;
- 6) *высокая химическая стойкость* (пластмассы неподвержены коррозии, а многие из них и агрессивным средам);
- 7) *малая плотность* (Например: плотность пенопласта составляет  $0,015 - 0,8 \text{ г/см}^3$ );
- 8) *технологичность* (трудоемкость изготовления самых сложных деталей из пластмасс ничтожна по сравнению с трудоемкостью изготовления деталей из других материалов);
- 9) *дешевизна сырья*.

**Одновременно с указанными достоинствами пластические массы обладают следующими недостатками:**

- 1) *ограниченная теплостойкость* (основные виды пластических масс могут удовлетворительно работать лишь в сравнительно небольшом интервале температур (от  $-60$  до  $+200^\circ\text{C}$ );
- 2) *низкая теплопроводность* (теплопроводность пластических масс в  $500 - 600$  раз ниже теплопроводности металла, что создаёт трудности при их применении в узлах и деталях машин, где необходим быстрый отвод больших количеств тепла);
- 3) *низкая твердость* ( $6 - 60 \text{ кг/см}^2$  по Бринеллю);
- 4) *ползучесть* (это свойство особенно ярко выражено у термопластов (рис.3);
- 5) *малая жесткость* (модуль упругости самых жестких пластмасс - стеклопластиков на один – два порядка ниже, чем у металлов);
- 6) *старение* (пластмассы теряют свои свойства под действием следующих факторов: температуры, влажности, света, воды, длительного пребывания в атмосферных условиях.
- 7) *невысокая вязкость*.

## Компоненты пластмасс

Обычно пластмассы представляют собой сложные композиции, состоящие из нескольких веществ. Требуемые эксплуатационные свойства пластмасс получают благодаря подбору отдельных компонентов и их определенным сочетаниям.

В большинстве случаев пластмассы состоят из смолы, наполнителя, пластификатора, красителя и других добавок, улучшающих технологические и эксплуатационные свойства пластика.

### Связующее вещество

Основным компонентом всех пластмасс является *связующее* вещество (высокомолекулярное органическое соединение), которое придаёт пластмассам пластичность и способность формоваться, а затем затвердевать, сохраняя полученную форму. Некоторые пластмассы состоят только из связующего вещества (например, полиметилметакрилат — оргстекло). В качестве связующего вещества в пластмассах применяют главным образом синтетические смолы.

Для повышения механической прочности, теплостойкости, электроизоляционных и других свойств в состав большинства пластмасс вводят другой весьма важный компонент — *наполнитель*, который после пропитки связующим веществом спрессовывается в однородную массу. Кроме связующих веществ наполнителей в состав пластмасс вводят пластификаторы, пигменты и другие добавки.

Синтетические смолы используют в качестве связующего вещества в пластмассах. Их получают из веществ с низким молекулярным весом, а также из природных или ранее полученных веществ с высокомолекулярным весом. Получение высокомолекулярных синтетических смол может быть осуществлено методами полимеризации или поликонденсации.

*Наполнители* — это органические и неорганические вещества в виде порошков, волокон, листов.

**Наполнители вводят в пластмассы с целью:** Улучшения физико-механических свойств, диэлектрических свойств, фрикционных и антифрикционных свойств, повышения теплостойкости, уменьшения теплостойкости, уменьшения усадки, снижения стоимости пластмасс.

**Наполнители делятся на:** органические и неорганические.

*Органические наполнители* - это материалы на основе целлюлозы. Они снижают хрупкость смол и сохраняют малый удельный вес, однако увеличивают гигроскопичность и уменьшают термостойкость пластмасс.

*Неорганические наполнители* - это материалы, которые увеличивают хрупкость пластмасс, но повышают теплостойкость и улучшают электроизоляционные свойства. При формовании у пластмасс с неорганическими (минеральными) наполнителями усадка значительно меньше, чем у пластмасс с органическими наполнителями.

В зависимости от требуемой структуры в пластмассы могут быть введены наполнители следующих видов:

- 1) **порошкообразные** (в виде порошкообразной крошки) древесная мука, целлюлоза, слюда, кварцевая мука, сажа, графит, тальк,  $\text{TiO}_2$  и некоторые другие.
- 2) **волокнистые** (в виде различных волокон) хлопковые очёсы, асбестовое волокно, стеклянное волокно, кроме того, могут использоваться отходы тканей, бумаги, картона, древесного шпона и др. Волокнистые наполнители повышают механические свойства пластмасс, однако вследствие меньшей текучести затрудняют процессы формования и возможность изготовления изделий сложной конфигурации;
- 3) **слоистые** (в виде цельнолистовых материалов) бумагу, ткани (хлопчатобумажные, стеклянные, асбестовые) и древесный шпон. Использование слоистых (листовых) наполнителей дает возможность получать пластмассы с наиболее высокими механическими свойствами и рядом специальных параметров. Такие пластмассы называют конструкционными.

В некоторых случаях изготавливают пластмассы без наполнителей, представляющие собой или прозрачные (типа органического стекла) или отдельные непрозрачные композиции.

*Пластификаторы* – это вещества, которые уменьшают межмолекулярное взаимодействие и хорошо совмещаются с полимерами. Пластификаторы вводятся в пластмассы в количестве 10-20% для повышения эластичности, уменьшения хрупкости готового изделия (улучшают морозостойкость) и предотвращения прилипания прессматериала к стенкам пресс-формы. В качестве пластификаторов применяют различные органические вещества: стеарин, касторовое масло, олеиновую кислоту, дибутилфталаты, трикрезилфосфаты и др.

*Специальные добавки* – это смазочные материалы, красители, добавки для уменьшения статических зарядов и горючести, для защиты от плесени, ускорители и замедлители отверждения и др. Специальные добавки служат для изменения или усиления какого-либо свойства.

*Стабилизаторы* – это вещества, предотвращающие разложение полимерных материалов во время их переработки и эксплуатации под воздействием атмосферных условий, повышенных температур и других факторов.

В качестве стабилизаторов используют ароматические амины, фенолы, сернистые соединения, газовую сажу.

### **Красители**

В композиции пластмасс для придания определенной окраски вводят соответствующие красящие вещества — *пигменты*.

#### **Виды красителей:**

1) минеральные (мумия, охра, умбра, литопон, крон и др.); 2) органические (нигрозин, родамин).

Для ускорения отверждения термореактивных пластмасс в их состав перед формованием вводят *катализаторы* (перекиси, кислоты или соли).

При производстве пластмасс с пористым или ячеистым строением в их состав вводят специальные вещества — *порообразователи*.

## **Классификация пластмасс**

**Классификация пластмасс по происхождению:** органического происхождения и неорганического происхождения.

Наибольшее применение в машиностроении получили пластмассы органического происхождения.

**Классификация пластмасс в зависимости от пластической деформации при нагреве:**

- 1) термопластичные (термопласты) пластмассы;
- 2) термореактивные (реактопласты) пластмассы.

**Классификация пластмасс по диэлектрическим свойствам:**

- 1) неполярные; 2) полярные.

**Классификация пластмасс по физико-механическим свойствам при обычной температуре:**

- 1) *жёсткие*, являющиеся твёрдыми упругими веществами с высоким модулем упругости и малым удлинением при разрыве, сохраняющие форму при внешних напряжениях в условиях обычных или повышенных температур;
- 2) *полужёсткие*, являющиеся твёрдыми упругими веществами со средним модулем упругости, высоким относительным и остаточным удлинением при разрыве;
- 3) *мягкие*, являющиеся мягкими и эластичными веществами с низким модулем упругости, высоким относительным удлинением и малым остаточным удлинением;
- 4) *мягкие и эластичные*, являющиеся мягкими и эластичными веществами, с низким модулем упругости, поддающиеся значительным обратимым деформациям при растяжении — пластикаты (листы, ленты).

**Классификация пластмасс по назначению:**

1) конструкционные; 2) фрикционные; 3) антифрикционные; 4) специальные; 5) химически стойкие; 6) электроизоляционные; 7) прозрачные; 8) тепло- и звукоизоляционные; 9) уплотнительные (прокладочные); 10) декоративные.

#### **Классификация пластмасс по виду наполнителя:**

1) с порошкообразным наполнителем; 2) с волокнистым наполнителем; 3) с слоистым наполнителем; 4) без наполнителя.

### **Вопрос 3. Резины, их общая характеристика, классификация и назначение**

Современная техника не может существовать без резинотехнических изделий. Резина используется для производства автомобильных шин, изоляции проводов, водолазных костюмов, баллонов аэростатов, шлангов, надувных лодок, противогозлов и многого другого.

*Резины* — это пластмассы с редкосетчатой структурой, в которых связующим выступает полимер, находящийся в высокопластическом состоянии.

#### **Резина в отличие от других материалов обладает рядом ценных свойств:**

высокая эластичность; высокое сопротивление истиранию; высокое сопротивление разрыву; газо- и водонепроницаемость; химическая стойкость; хорошие диэлектрические свойства; небольшой удельный вес.

В резинах связующим являются каучуки натуральные (НК) или синтетические (СК). Каучукам, представляющим собой линейные полимеры, присуща высокая пластичность, обусловленная особенностями строения их молекул. Линейные и слабоветвистые молекулы каучуков имеют зигзагообразную или спиралевидную конфигурацию и отличаются большой гибкостью. Чистый каучук ползёт при комнатной температуре и особенно при повышенной, хорошо растворяется в органических растворителях. Такой каучук не может использоваться в готовых изделиях.

Для повышения упругих и других физико-механических свойств в каучуке формируют редкосетчатую молекулярную структуру. Это осуществляют вулканизацией — путём введения в каучуки химических веществ — вулканизаторов (как правило, серу S), образующих поперечные химические связи между звеньями макромолекул каучука. В зависимости от числа возникших при вулканизации поперечных связей получают резины различной твёрдости.

### **Классификация резин**

#### **Классификация резин по твердости:**

пористые (губчатые); мягкие ( $\leq 5\%S$ ); особо эластичные; средней твёрдости (10 – 15%S); твёрдые; высокой твердости; жесткие (Эбониты ( $\geq 30\%S$ )).

#### **Классификация резин по назначению:**

1) универсальные;  
2) специальные: а) масло- и топливостойкие; б) химически стойкие; в) светостойкие; г) морозо- и теплостойкие; д) газонепроницаемые; е) диэлектрические; ж) стойкие к радиации.

#### **Классификация резин по технологии изготовления:**

клееные; формованные; штампованные; литые.

#### **Классификация резин по типу и конструкции изделий:**

шинные; камерные; рукавные; протекторные; транспортные; амортизационные и др.

### **Влияние условий эксплуатации на свойства резин**

Нагрев, как правило, снижает прочностные свойства резин. Термическая стабильность резин определяется прочностью химических связей в макромолекулах и их структурой. Наиболее интенсивно, прочность уменьшается у резины на основе хлоропрена. Органические резины после нагрева (150°C) в течение 1 – 10 ч теряют прочность.

Одновременное действие на резины **температуры, озона, кислорода, нагрузки, ультрафиолетовых лучей** интенсифицирует развитие процессов старения. Резины на основе СКТ способны длительное время работать при этой температуре. Детали из резин на основе СКФ и СКТ — уплотнители подвижных и неподвижных соединений, прокладки, колпачки и т. п. — способны работать длительное время при температурах до 250 – 300°C.

При низких отрицательных температурах резины практически полностью утрачивают высокоэластические свойства и переходят в стеклообразное состояние. Уровень потери свойств больше проявляется в условиях сдвига, чем сжатия или растяжения.

Под действием ионизирующего излучения резины стареют.

**Стойкость резин к радиации зависит от:** природы каучука; среды; состава резин (наличия антирадов).

Наибольшая скорость старения под действием радиации отмечена у резин на основе СКН, СКБ, наирита и проявляется в повышении их твёрдости и уменьшении вязкости. Более низкая скорость старения наблюдается у резин на основе НК, СКИ-3. Скорость старения самым существенным образом зависит от мощности дозы облучения. В ядерной технике для изготовления уплотнительных деталей чаще применяют резины на основе СКИ и НК.

## **Тема №9. Коррозия металлов и сплавов**

### **Вопрос 1. Поведение материалов в особых условиях.**

#### **Работа материалов в условиях низких температур**

Воздействию низких температур подвергаются очень многие материалы и изделия, например трубы для газо- и нефтепродуктов, мосты, железные дороги, автомобили, летательные аппараты и т. д. В северных районах охлаждение материалов может достигать – 60°C, корпуса самолетов и космических аппаратов могут охлаждаться до температуры жидкого кислорода (–183°C). Детали и отдельные узлы холодильной и криогенной техники, которые используются для получения, хранения, транспортировки сжиженных газов, охлаждаются до температуры жидкого гелия (–269°C).

**При низких температурах у металлов наблюдаются:** 1) потеря пластичности; 2) потеря вязкости; 3) повышенная склонность к хрупкому разрушению.

Основное требование к материалам, работающим в условиях низких температур, — это отсутствие хладноломкости.

Для надёжной работы материала необходимо, чтобы температурный порог хладноломкости был ниже рабочей температуры. На склонность к хрупкому разрушению, как и при нормальных температурах, влияют концентраторы напряжений и масштабный фактор деталей.

Материалы с ГЦК решёткой, а также титан и его сплавы, обладающие ГПУ решёткой, не имеют явно выраженного порога хладноломкости, и ударная вязкость у них уменьшается плавно.

Кроме критериев хладостойкости основанием для выбора материала служат прочностные характеристики ( $\sigma_{0,2}$  и  $\sigma_b$ ), физические и технологические свойства.

Из физических свойств материалов при низких температурах интерес представляют теплопроводность и теплоёмкость. Скорость захлаживания материала зависит от теплоёмкости и теплопроводности металла, а при низких температурах, близких к жидкому азоту (–196°C) эти характеристики уменьшаются более чем в 10 раз. Скорость захлаживания материала при термоциклировании по-разному зависит от теплоёмкости и теплопроводности. Чем меньше теплоёмкость и больше теплопроводность, тем легче захлаживается криогенное оборудование и быстрее выходит на заданный режим.

Наиболее распространенными средами в криогенной технике являются кислород и водород, поэтому необходимо учитывать совместимость с ними используемых материалов.

Основные материалы, которые используются при криогенных температурах, — это углеродистые стали с ОЦК решётками, алюминий и его сплавы (АМц, АМг, АМг5 и др.), титан и его сплавы (ВТ1, ВТ5, ОТ4 и др.).

Нержавеющие стали переходного и мартенситного классов не охрупчиваются до  $-196^{\circ}\text{C}$ . Нержавеющие стали аустенитного класса пластичны и вязки до температур  $-253^{\circ}\text{C}$ .

### **Работа материалов в условиях радиационного облучения**

Радиационное облучение материалов в условиях космоса связано с огромным радиационным полем вокруг Земли. Это и корпускулярная радиация — электроны и протоны, попавшие в магнитное поле Земли, космические лучи — частицы высоких энергий, приходящие из различных областей Вселенной, и солнечные космические лучи.

В настоящее время можно сказать, что воздействие электронного и протонного излучений на металлы исследовано ещё недостаточно.

Радиационное воздействие сильнее сказывается на металлах с ГЦК решёткой, чем на металлы с ОЦК и ГПУ решётками.

**Из всех частиц наибольшее влияние на свойства конструкционных материалов оказывают нейтроны, способные из-за отсутствия заряда проникать далеко в глубь кристаллической решётки металла и вызывать в ней следующие существенные изменения:**

- 1) образование «пар Френкеля» вследствие упругого столкновения частиц с ядрами атомов металла;
- 2) нарушение электронной структуры (ионизационные эффекты) в результате столкновения частиц с орбитальными электронами;
- 3) местное повышение температуры (термический пик), связанное с упругими колебаниями решётки на пути прохождения частиц;
- 4) образование атомов новых элементов в процессе ядерного распада, а также при захвате ядром частиц;
- 5) радиационная эрозия в результате отрыва атомов с поверхности под влиянием ударов высокоскоростных пылевидных частиц окружающей среды.

Соударения частиц с атомами в узлах кристаллической решётки смещают и возбуждают другие атомы. Вследствие упругого соударения частицы с атомами она теряет часть своей кинетической энергии, зависящую от целого ряда факторов этого взаимодействия. Если при этом соударении атом приобретает дополнительную энергию и она становится больше энергии, необходимой для его смещения, то атом из узла кристаллической решётки перемещается в междоузлие. За счёт такого перемещения атома из узла решётки в междоузлие и наличия вакансии образуется «пара Френкеля».

Возникающие дефекты строения приводят к изменению следующих структурно чувствительных свойств сплавов: снижаются пластичность, вязкость, повышается удельное электросопротивление и прочность, а главным образом сопротивление малой пластической деформации ( $\sigma_{0,2}$ ).

Наиболее опасное явление, наблюдаемое при радиационном облучении, — это охрупчивание материалов. Данное явление наиболее сильно проявляется у металлов с ОЦК решёткой; так, например, критическая температура хрупкости молибдена после нейтронного облучения повышается от  $-30$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Вследствие радиационного облучения у металлов и сплавов понижаются вязкость, пластичность, сопротивление отрыву, а прочность и электросопротивление повышаются, т. е. возрастает вероятность хрупких разрушений.

### **Жаростойкость и методы, её повышения**

*Жаростойкость* — способность металлов и сплавов сопротивляться окислению и газовой коррозии при высоких температурах. Жаростойкость зависит от многих внешних и внутренних факторов. В основном за жаростойкость отвечают поверхность металла и чистота (качество) её

обработки. Полированные поверхности окисляются медленнее, так как оксиды распределены равномерно и более прочно сцеплены с поверхностью металла. Формирующаяся на поверхности оксидная плёнка достаточно хорошо защищает металл от окисления в том случае, если она плотная и не пропускает ионы кислорода, хорошо сцеплена с подложкой и не отслаивается при механических испытаниях. К металлам, которые образуют такие плёнки, относятся хром (Cr) и алюминий (Al). Оксидные плёнки типа шпинели  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  хорошо защищают от окисления при высоких температурах. Если на поверхности образуется рыхлый оксид, как у магния (Mg), то он не стоек и не защищает металл от дальнейшего окисления.

Повышение жаростойкости сплавов достигается легированием элементами (хром (Cr), алюминий (Al), кремний (Si), бериллий (Be)), образующими на поверхности непроницаемые для ионов основного металла и кислорода оксидные плёнки. Также для этих целей используются защитные покрытия, состав которых выбирается с учётом условий работы изделия и состава агрессивной среды. Структура жаростойкого материала должна быть однородной и однофазной (чистые металлы или твёрдые растворы).

Термическая обработка меняет строение сплавов и, следовательно, их коррозионную стойкость. Отжиг и нормализация приводят к формированию однофазной структуры и способствуют увеличению жаростойкости материала.

Пластическая деформация ухудшает жаростойкость, так как приводит к появлению градиента напряжений в структуре металла. Величина зерна для жаростойкого материала не существенна, поэтому эта характеристика является структурно нечувствительной.

Характеристики сплавов, стойких к коррозии при повышенных температурах, могут быть даны лишь к конкретным агрессивным средам и выбор материала решается с учётом условий работы данного изделия.

### **Жаропрочность и методы её повышения. Явление ползучести**

*Жаропрочность* — способность материала длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при воздействии механических нагрузок и повышенных температур.

Жаропрочность важна при выборе материала, когда рабочие температуры изделий превышают 0,3 температуры плавления  $T_{\text{пл}}$ . Многие детали современных паросиловых установок, металлургических печей, двигателей внутреннего сгорания, газовых турбин и других машин при работе разогреваются до высоких температур и испытывают большие нагрузки. Условия работы деталей различны. Основное значение при выборе материала имеют: 1) температура; 2) длительность работы под нагрузкой; 3) значение напряжения.

При высоких температурах ускоряются диффузионные процессы, изменяются исходная микроструктура и механические свойства материалов. С повышением температуры значительно возрастает число вакансий, увеличивается подвижность точечных дефектов. Кроме того, диффузия способствует перемещению дислокаций (линейный дефект) путём переползания, что даёт им большую «степень свободы», но также наблюдаются частичная аннигиляция дислокаций (дислокации разного знака взаимно уничтожаются), перераспределение их, что коренным образом меняет первоначальную дислокационную структуру металла.

Длительное время воздействия температуры приводит к существенным структурным изменениям: теряется прочность, полученная при термической обработке (закалка, старение), а также происходит потеря упрочнения, вызванного пластической деформацией, из-за таких процессов, как возврат и рекристаллизация.

Как уже было сказано, при высоких температурах ослабевают межатомные связи у металлов, уменьшаются модуль упругости  $E$ , временное сопротивление (предел прочности)  $\sigma_b$  и предел текучести  $\sigma_T$ .

Чем ниже температура плавления сплава, тем ниже и рабочая температура. При нагружении материала длительное время в условиях повышенных температур наблюдается процесс (явление) *ползучести*.

Если при постоянной температуре под действием постоянной нагрузки вызвать в металле напряжение даже ниже предела текучести  $\sigma_t$  и оставить его в этих условиях длительное время, то металл со временем будет деформироваться с определённой скоростью. Это явление получило название *ползучести* или *крипа*.

Основными критериями жаропрочности металлов являются *предел длительной прочности* и *предел ползучести*. Такие понятия, как ползучесть и жаропрочность, тесно связаны между собой и отделить их друг от друга не представляется возможным.

## **Вопрос 2. Стали и сплавы с особыми физико-механическими свойствами**

### **Стали и сплавы с особыми физическими свойствами**

К сталям с особыми физическими свойствами относятся: магнитная; немагнитная; сталь, обладающая высоким электрическим сопротивлением; сталь с особыми теплофизическими свойствами.

### **Тугоплавкие материалы**

*Тугоплавкие материалы.* Тугоплавкие металлы и сплавы на их основе применяют для работы при температурах более 1000°C.

Тугоплавкими называются металлы, имеющие температуру плавления выше, чем у железа. Наибольшее применение в технике находят тугоплавкие металлы, имеющие следующие температуры плавления: хром (Cr) — 1900°C, ниобий (Nb) — 2415°C, молибден (Mo) — 2620°C, тантал (Ta) — 3000°C, вольфрам (W) — 3410°C.

Расширение производства и применение тугоплавких металлов и сплавов связано с развитием атомной теплоэнергетики и ракетно-космической техники.

Сплавы на основе ниобия (Nb) и молибдена (Mo) имеют наиболее удовлетворительные технологические свойства. Кроме того, они охрупчиваются при сравнительно низких температурах (+100) — (–100)°C. Вольфрам (W) переходит в хрупкое состояние при температуре 600°C. Благодаря сравнительно высокой пластичности сплавы ниобия и молибдена имеют более широкое распространение.

Все тугоплавкие металлы имеют низкую жаростойкость. Для защиты их от окисления применяют различные покрытия. Для молибденовых и вольфрамовых сплавов применяют различные термодиффузионные силицидные покрытия.

В качестве материала для вкладышей сопел в реактивных двигателях, работающих на твёрдом топливе, применяют графит, имеющий температуру плавления 3900°C. Температура пламени в таких двигателях достигает 3500°C. Недостатком графита является низкая эрозионная стойкость, приводящая к износу сопла из-за твёрдых частиц, содержащихся в отходящих газах.

### **Магнитные и немагнитные стали и сплавы**

Магнитные стали широко применяются в электронике. В зависимости от назначения различают магнитотвёрдые и магнитномягкие сплавы.

*Магнитотвёрдые стали* служат, главным образом для изготовления постоянных магнитов. Они должны иметь высокие значения коэрцитивной силы и остаточной индукция.

*Коэрцитивной силой* называется напряжённость магнитного поля обратного знака, которая должна быть приложена к образцу для его размагничивания.

*Остаточной индукцией* называют магнитную индукцию, остающуюся в образце после его намагничивания и снятия магнитного поля.

Наиболее известные марки магнитотвёрдых сталей: EX2 (1% C, 2% Cr), EX3 (1% C, 3% Cr), EX5K5 (1% C, 5% Cr, 5% Co), EX9K15M (1% C, 9% Cr, 15% Co, 1% Mo). Буква E характеризует магнитную сталь (электротехническую). В этой стали содержатся хром (Cr), кобальт (Co), молибден (Mo).

Магнитотвёрдые стали подвергают закалке на мартенсит и искусственному старению при 100°C.

Одним из лучших материалов для магнитов является сплав альнико (8% Al, 14% Ni, 24% Co, остальное Fe). Магниты из альнико изготавливают литьём, так как они плохо обрабатываются резанием.

*Магнитомягкие стали* используются для работы в переменных полях, т. е. в условиях непрерывного перемагничивания. Поэтому они применяются для изготовления сердечников трансформаторов, роторов, статоров, магнитопроводов, электроизмерительных приборов.

Исходя из функционального назначения магнитомягкие материалы должны иметь малое значение коэрцитивной силы и высокую магнитную проницаемость. Этим свойствам отвечают низкоуглеродистые стали с добавлением 1 – 5% кремния (Si).

Обозначаются магнитомягкие стали буквой Э (Э1, Э11, Э21, Э41 и т. д.) и характеризуются высоким процентом содержания кремния (Si) (1 – 5%). Кроме магнитных сталей применяются магнитные сплавы на «Al – Ni – Co» и «Fe – Al» основе.

Высокую магнитную проницаемость имеют специальные железоникелевые сплавы — пермаллои с определенными узкими пределами содержания никеля (Ni) (около 78,5%). Магнитная проницаемость пермаллоев почти в 10 раз больше, чем низкоуглеродистого технического железа, что позволяет использовать их для приборов, работающих в слабых полях (радио, телефон). Для тех же целей разработан заменитель дорогих пермаллоев — сплав альсифер, содержащий 5,4% Al, 9,6% Si, остальное железо (Fe). Недостатком сплава является его повышенная хрупкость. Альсифер обычно используют в виде порошка или тонкостенных фасонных отливок.

*Немагнитные стали и сплавы*, например 55Н9Г9 и Н25, заменяют дорогие цветные металлы. Они применяются в приборах, где магнитные материалы могут повлиять на точность показаний.

### **Сплавы с малым температурным коэффициентом линейного расширения**

*Стали и сплавы с особыми теплофизическими свойствами* отличаются особо низким коэффициентом теплового расширения. К ним относятся сталь 18ХМТФ и сплавы инвар Н36 (содержание никеля (Ni) 36%, остальное — железо (Fe)), элинвар Н36Х8, ковар Н29К18, платинит Н48 (последний заменяет платина (Pt)). Указанные сплавы применяются для часовых пружин, камертонов, физических приборов.

Малый температурный коэффициент линейного расширения имеют сплавы системы «Fe – Ni» в интервале концентраций 29 – 45% никеля (Ni). Наименьшее значение коэффициента  $\alpha$  имеет инвар 36Н — сплав, содержащий 36% никеля (Ni) ( $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Еще более низкое значение коэффициента линейного расширения ( $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) в температурном интервале от –60 до +100°C достигается при использовании суперинвара 32НКД — сплава, дополнительно легированного кобальтом и медью (31,5 – 33% Ni; 3,2 – 4,2% Co; 0,6 – 0,8% Cu).

### **Сплавы для упругих элементов**

Для изготовления различных упругих элементов в приборостроении (сильфонов, пружин, мембран) применяют материалы с высокими упругими свойствами, не меняющимися в широком температурном диапазоне (до 200°C). К ним относят элинвар — Fe – Cr – Ni сплав, содержащий около 40% Ni, 6% Cr с добавками Ti и Al. Элинвар упрочняется в результате закалки и старения при 700°C, при котором выделяются дисперсные частицы.

Для немагнитных упругих элементов ответственного назначения стойких против коррозии, применяют бериллиевые бронзы БрБ2 после закалки с 780 – 790°C и старения при 350°C.

**Литература:**

## а) основная литература

1. Лахтин, Ю.М. Материаловедение: учебник / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. Репринтное издание. – М.: Альянс, 2013. – 528 с.
2. Шигорин, С.А. Материаловедение и технология материалов: учебник для обучающихся в вузах МЧС России по специальностям направления «Безопасность жизнедеятельности»/ С.А. Шигорин, П.В. Пучков. - 1-е изд. – Иваново: Ивановский институт ГПС МЧС России, 2012 г. – 542 с.: ил. (Гриф «Допущено» МЧС России).

## б) дополнительная литература

3. Пучков, П.В. Материаловедение и технология материалов (Лабораторный практикум): Учебное пособие / П.В.Пучков, В.В. Киселёв. – Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2011. – 166 С. (Гриф «Допущено» МЧС России).
4. Пучков, П.В. Коррозия конструкционных материалов (междисциплинарный лабораторный практикум): учебное пособие для слушателей, курсантов и студентов всех форм обучения по специальности 280705.65 «Пожарная безопасность» и направлению подготовки 280700.62 «Техносферная безопасность»/ П.В. Пучков, С.В. Тимофеева, Д.Г. Снегирёв. – Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2012. - 214 С.
5. Пучков, П.В. Методы защиты от коррозии: электронное пособие / П.В. Пучков, Д.А. Ульев, С.В. Тимофеева. 379 Мб, формат: exe, системные требования: Windows 98, NT, 2000, XP, Vista, Seven; Adobe Flash Player; 256 Мб оперативной памяти; Браузер Internet Explore.
6. Шигорин, С.А. Материаловедение и технология материалов. Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ для курсантов, слушателей и студентов, обучающихся по специальности 280104.65 – «Пожарная безопасность»/ С.А. Шигорин, П.В. Пучков. – Иваново: ООНИ ИВИ ГПС МЧС России, 2009. – 209 с.
7. Пучков, П.В. Материаловедение и технология материалов: учебно - методическое пособие для самостоятельной работы обучающихся по специальности 280705.65 – «Пожарная безопасность» и по направлению подготовки 280700.62 – «Техносферная безопасность» / П.В.Пучков, В.В. Киселёв, А.В. Топоров, В.А. Полетаев – Иваново: ООНИ ЭКО ФГБОУ ВПО ИВИ ГПС МЧС России, 2014. – 106 с.
8. 1. Арзамасов, В.Б. Материаловедение и технология конструкционных материалов: учебник/ В.Б. Арзамасов, А.А. Черепяхин. –М: Издательский центр «Академия», 2007. – 446 с.
9. Черепяхин, А.А. Технология обработки материалов: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования/А.А. Черепяхин. – 5-е изд., стер.- М: Издательский центр «Академия», 2012. – 272 с.
10. Черепяхин, А.А. Материаловедение: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования/А.А. Черепяхин. – 6-е изд., стер.- М: Издательский центр «Академия», 2013. – 272 с.