

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Лекция 4. Сплавы на основе железа и специальные сплавы.
Цветные металлы и сплавы**

КЛИМЕНОВ Василий Александрович,
профессор ИШНПТ ТПУ



Содержание лекции

- › Классификация металлов, сталей и сплавов
- › Конструкционная прочность и критерии её оценки
- › Методы и механизмы повышения характеристик
- › Получение сталей со специальными свойствами. Маркировка сталей
- › Классификация и общие свойства цветных сплавов
- › Свойства и особенности титановых, алюминиевых и медных сплавов
- › Магниево- и другие сплавы цветных металлов (самостоятельно)

Классификация металлов



Сталь и чугун – сплавы железа с углеродом

Легирующие

1

Цветные

10

Черные

89

0 20 40 60 80 100

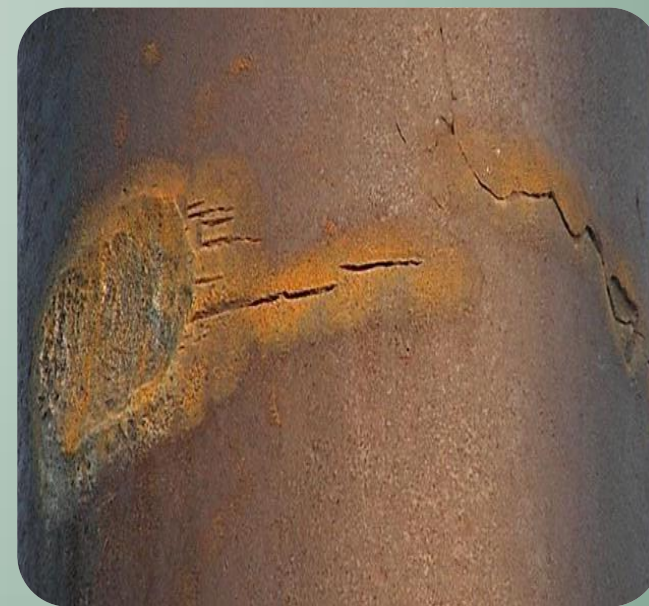
3

› **АРМКО-железо** - технически чистое **железо**, в котором суммарное содержание примесей до 0,08–0,1%, в том числе углерода до 0,02%



Минарет Кутб-Минар

› В индийской столице Дели, на площади возле минарета Кутб-Минар, стоит железная колонна, известная больше как Делийский столб, одно из «чудес света». За полторы тысячи лет своего «стояния» она так и не покрылась ржавчиной. Этот факт является поводом для многочисленных гипотез, как научных, так и фантастических



Классификация сталей



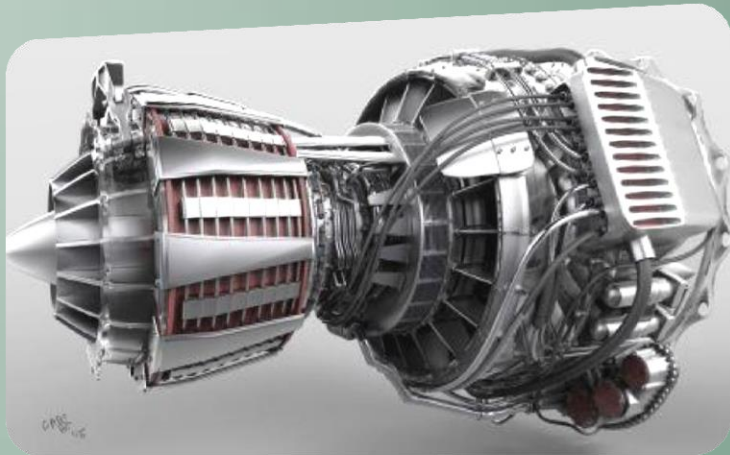
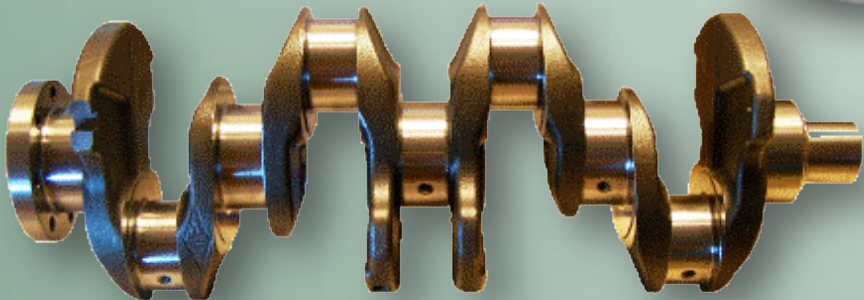
КОНСТРУКЦИОННЫЕ

Общего назначения
Повышенной прочности
Высокопрочные
Валковые
Подшипниковые
Автоматные

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ

**С ОСОБЫМИ
СВОЙСТВАМИ**

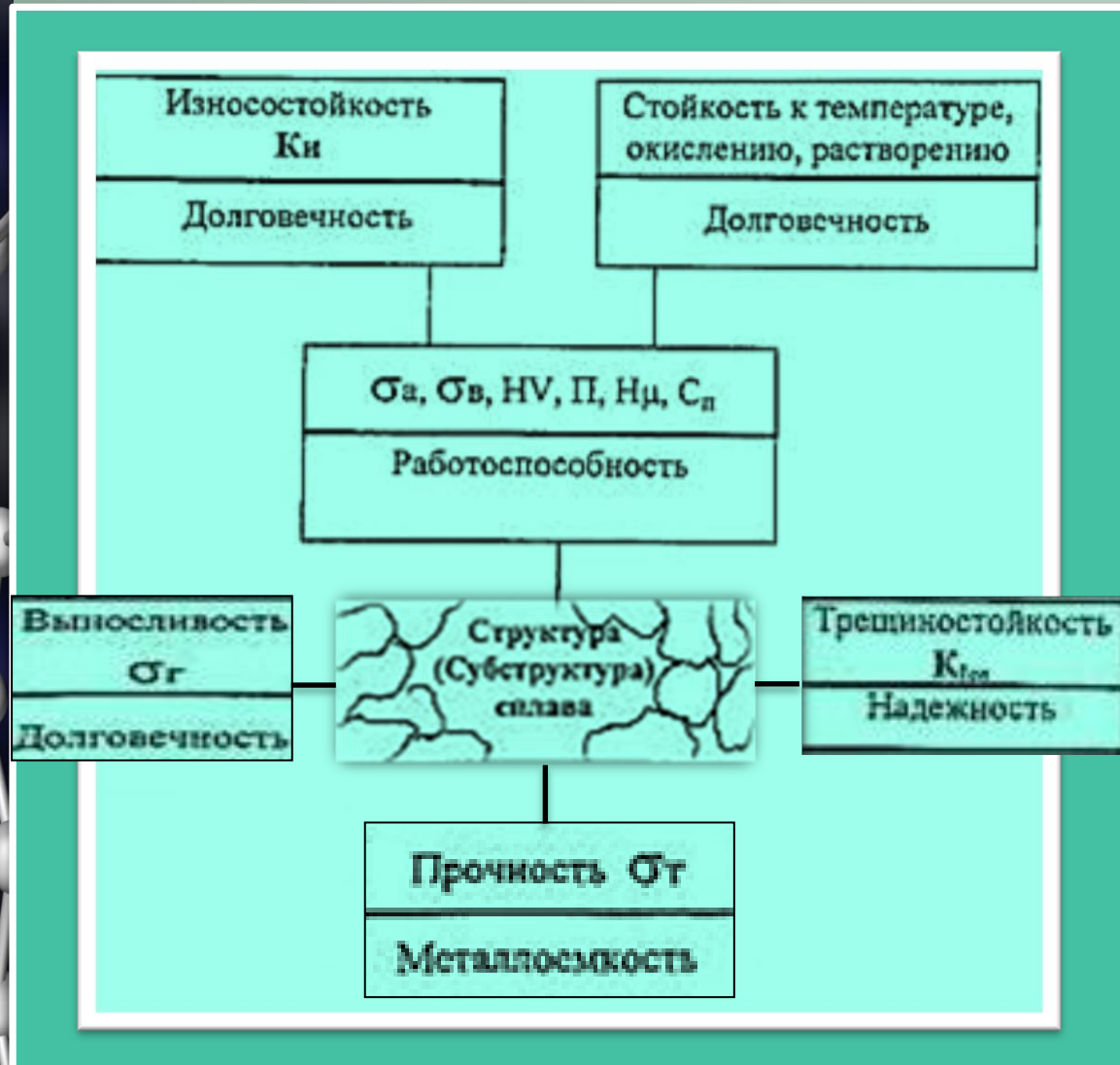
Жаропрочные
Жаростойкие
Коррозионностойкие
Теплоустойчивые



Конструкционные стали

- › **Конструкционные легированные** низко- (0,1–0,25 %) и среднеуглеродистые (0,3–0,6 %). Легирующие элементы добавляют для увеличения прокаливаемости (Cr, Mn, Mo), снижения порога хладоломкости (Ni)
- › **Автоматные** созданы для изготовления деталей в массовом производстве (крепежные изделия). Изготовление деталей - высокотехнологичный, производительный процесс, с высокими требованиями к размерам и чистоте поверхности. От материала не требуются высокие механические свойства. Состав 0,08–0,45% C, 0,3% S, 0,05% P, 0,7–1,0% Mn, Se, Ca, Pb
- › **Конструкционные общего назначения** применяются для изготовления мелких деталей, что связано с их низкой прокаливаемостью. От материала не требуются высокие механические свойства. Повышение механических свойств достигается с помощью оптимального легирования. Для изготовления деталей, подвергаемых цементации или нитроцементации, используются малоуглеродистые (до 0,25% C) низко- и среднелегированные стали. Легирование хромом (15X, 20X) позволяет применять после цементации закалку в масло вместо закалки в воду
- › **Высокопрочные мартенсито-старяющие** почти безуглеродистые сплавы железа с 8–25% Ni, 8–12% Co, 5–12% Cr, 3–6% Mo, 1–2% Ti, 1–2% Al. Кобальт повышает жаропрочность. Стали с 11–12% Cr **коррозионно-стойкие**. Корпуса ракетных двигателей и подводных лодок, стволы артиллерийского и стрелкового оружия, катапульты самолетов, шасси, батискафы, зубчатые колеса, шпиндели
- › **Метастабильные аустенитные высокопрочные повышенной пластичности - трип-стали** (transformation induced plasticity) или **ПНП-стали** (пластичность, наведенная превращением). Состав 8–14% Cr, 8–32% Ni, 0,5–2,5% Mn, 2–6% Mo, 2% Si. В результате закалки, наклепа и деформационного старения аустенита приобретают высокую прочность (1800–2000 МПа), пластичность (>20%), трещиностойкость. Силовые детали авиационных конструкций, тросы, броневой лист
- › **Рессорно-пружинные** имеют высокое сопротивление к малым пластическим деформациям при достаточной пластичности и вязкости. Состав 0,5–0,7% C и подвергается термической обработке – закалке и среднему отпуску или деформационному упрочнению (наклепу). Стали 65Г, 75, У10 - для пружин малого сечения, закаливаемых в масле и испытывающих невысокие напряжения
- › **Для шариковых и роликовых подшипников**. Хромистая сталь ШХ15 и повышенной прокаливаемости ШХ15СГ. Подшипники, работающие в агрессивных средах, изготавливаются из нержавеющей сталей с высоким содержанием хрома (95Х18, 110Х18)

Конструкционная прочность материалов и критерии её оценки



- › **Конструкционная прочность** - сочетание критериев прочности, надёжности и долговечности
- › **Долговечность** - длительное сохранение работоспособности до наступления предельного состояния при определенных условиях эксплуатации
- › **Надёжность** - сохранение во времени в установленных пределах значения всех параметров выполнения требуемых функций в заданных условиях
- › **Предел выносливости (усталости)** - выносливость материала, способность воспринимать **циклические нагрузки** в материале.
- › **Трещиностойкость — трещиностойкость:** способность **материала** конструкции сопротивляться образованию или развитию до заданных пределов в нем трещин
- › **Металлоемкость** - расход металла, необходимого для производства и технической эксплуатации изделия

Соотношение пластичности и прочности

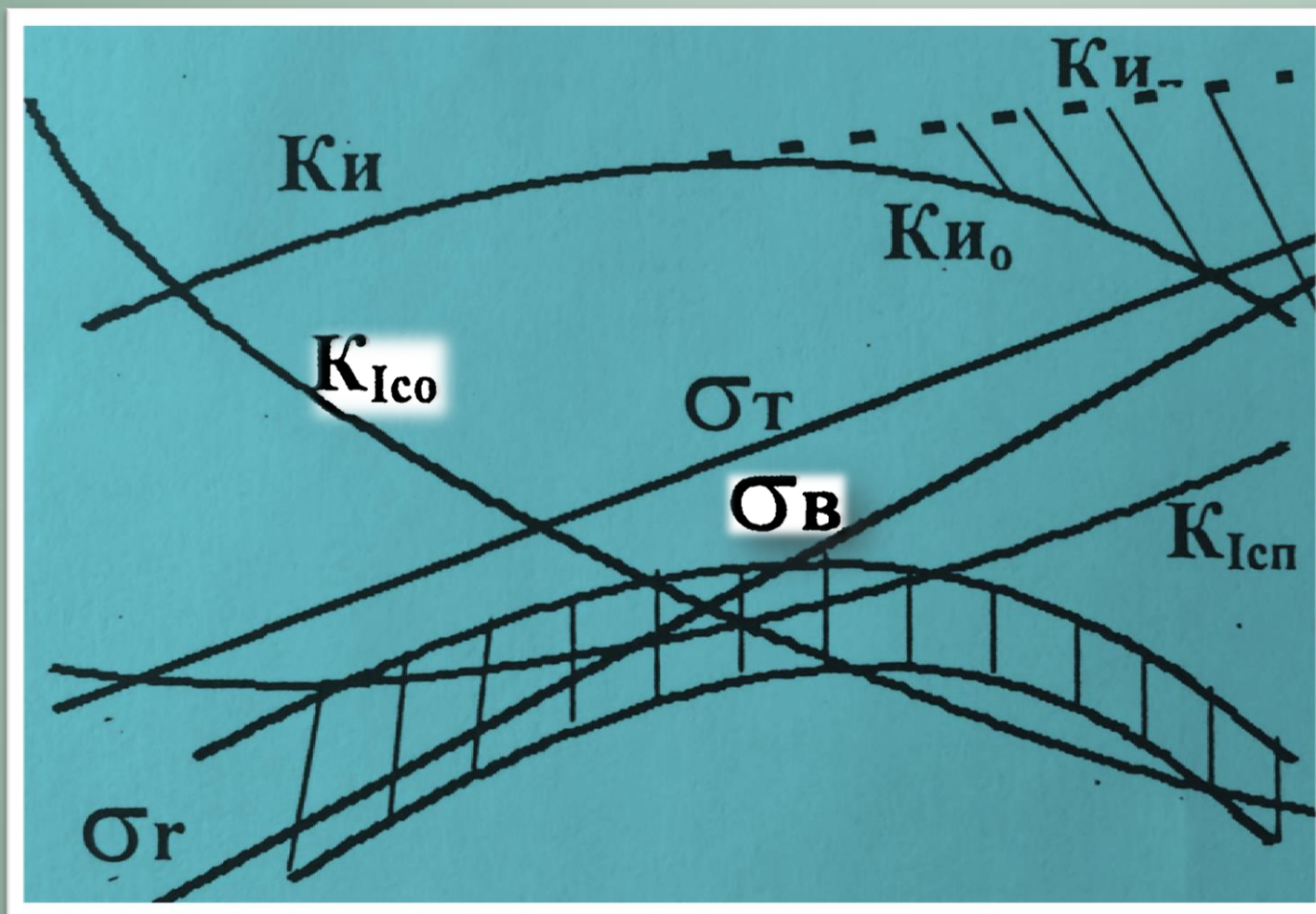


Схема зависимости механических свойств (металлоемкость, надежность, долговечность) металлов от их структурного состояния

Методы повышения прочностных характеристик и коррозии*



Легирование сталей. Виды примесей



Постоянные или обыкновенные

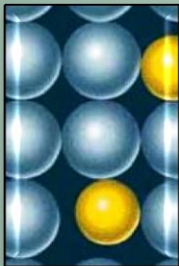
Mn, Si, Al (применяются при раскислении стали). S и P (при массовом производстве полностью освободиться от них невозможно)

0,3-0,7% Mn; 0,2-0,4% Si; 0,01-0,02% Al; 0,01-0,05% P, 0,01-0,04 S



Скрытые

Кислород, водород и азот в очень малых количествах



Случайные

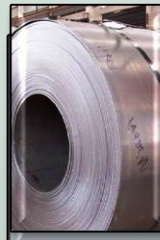
Попадают случайно или из материалов шихты (руды)

› **Аустенитные и ферритные** сплавы не имеют превращений при нагреве и охлаждении



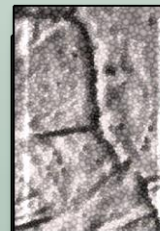
Легирующие элементы

Вводятся в определенных концентрациях для изменения строения и свойств стали. Стали - легированные



Ферритные сплавы

V, Mo, Si делают устойчивым α -состояние при всех температурах



Аустенитные сплавы

Одни элементы делают устойчивым γ -состояние от комнатной до температуры плавления

Влияние легирующих элементов на свойства сталей

- › **Хром** недефицитный широко применяемый элемент. Повышает коррозионную стойкость и твердость, способствует образованию тугоплавких оксидов. (0,3% в низко-, 0,7–3,5% в средне- и 9–35% в высоколегированных хромистых и хромоникелевых сталях)
- › **Марганец** дешевый элемент, делает сталь чувствительной к перегреву. Для измельчения зерна вводятся карбидообразующие компоненты. Используется как заменитель никеля (до 1,5%). В значительных количествах (11–14% в сталях типа Г13Л) обеспечивает высокую вязкость, износостойкость и повышенную степень наклепа
- › **Никель** (0,2–35%) сильно повышает вязкость, хладостойкость, коррозионную стойкость, пластические и прочностные свойства сталей, измельчает зерно
- › **Кремний** (1,5–2%) дешевый, не образующий карбидов элемент. Повышает жидкотекучесть, порог хладноломкости при содержании свыше 1%, тормозит снижение прочности при отпуске, ухудшает свариваемость
- › **Молибден** (0,15–0,8%), **вольфрам** (0,18–1,8%) дорогие карбидообразующие элементы. Увеличивают твердость и прочность стали при ударных нагрузках и высоких температурах, стойкость к отпуску, прокаливаемость, измельчают зерно
- › **Титан** (0,02–1%), **ванадий** (0,05–0,8%) сильные карбидообразующие элементы вводятся с хромом, никелем и марганцем. Повышают прочность, вязкость стали и измельчают зерно. Образуют карбиды, трудно растворимые при нагреве и снижающие прокаливаемость, способствуя развитию хрупкого разрушения, располагаясь по границам зерен
- › **Бор** (0,002–0,005%) **микролегирующий** элемент. Повышает прокаливаемость. Микролегирование эквивалентно легированию 1% Ni; 0,5% Cr и 0,2%

Типы химических соединений

- › В сплаве сохраняется определенное соотношение элементов. Кристаллическая решетка и свойства сплава резко отличаются от строения и свойств чистых компонентов. Состав выражается формулой A_nB_m , где А и В – компоненты, n и m – целые числа
- › **Металл-неметалл. Фазы:**
 - с **ионным** типом связи – оксиды металлов
 - с **ионно-ковалентным** типом связи образуются при взаимодействии металлов **I–III группы** с неметаллами **V–VI группы**
 - с **ковалентно-металлическим** типом связи образуются при взаимодействии **переходных металлов** с **неметаллами**. Карбиды, нитриды, бориды, гидриды
 - **внедрения** образуются при сплавлении **металлов** с **неметаллами** с малым атомным радиусом. Атомы **металла** образуют плотноупакованные **ГЦК** или **ГПУ** решетки. Атомы **неметалла** находятся в **тетра-** и **октаэдрических** пустотах
- › **Металл-металл**

Факторы, влияющие на растворимость

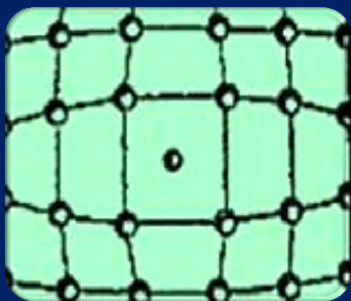
- › **Структурный** - когерентность решеток **ОЦК – ОЦК, ГЦК – ГЦК**
- › **Размерный**
 - Примеси большого радиуса → твердые растворы **замещения**
 - Примеси малого радиуса → твердые растворы **внедрения**
- › **Химический**
 - **I группа:** IA; IIA; IB; IIB; IIIB (кроме В). Внешние электроны в *s*- или *p*-состояниях. Благоприятные условия получения *sp*-связей. Преобладает функция *s*-типа, в элементах подгруппы В – *p*-типа
 - **II группа:** *d*-переходные элементы (металлы), в которых имеются условия образования *Sd* и *Spd*-гибридных орбиталей. *d*-функция максимальна в середине каждой последовательности
 - **III группа:** *4f* и *5f* – переходные элементы. *f*-электроны принимают участие в связях в элементах, стоящих в начале каждой последовательности
 - **IV группа:** IVB, VB, VIB, VIIB группы – имеются условия для образования октетов за счет ковалентной или ионной связей

› **Общий закон:** элементы с разным типом связывающих орбиталей разных групп плохо растворяются друг в друге

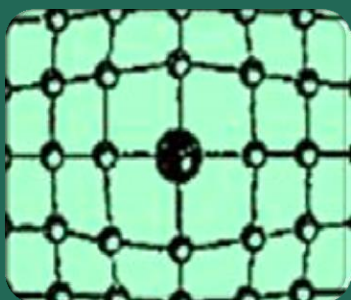
› В пределах одной группы растворимость уменьшается с увеличением разницы валентностей

› **Правило:** если в системе А и В образуется промежуточная фаза, растворимость уменьшается

Строение сплава



Твердые растворы внедрения Атомы (ионы) примеси внедряются в междоузельные позиции решетки основного элемента. Растворимость ограничена размерами пустот. Образуются при сплавлении металлов с неметаллами с малым атомным (ионным) радиусом. Предельная концентрация растворов **2–2,5 %**. С, N, В, Н



Твердые растворы замещения Размеры атомов (ионов) компонентов отличаются не более чем на **15 %**.
Упорядоченные твердые растворы -промежуточные фазы между твердыми растворами и химическими соединениями. Если замещение осуществляется в случайных местах, то растворы **неупорядоченные**

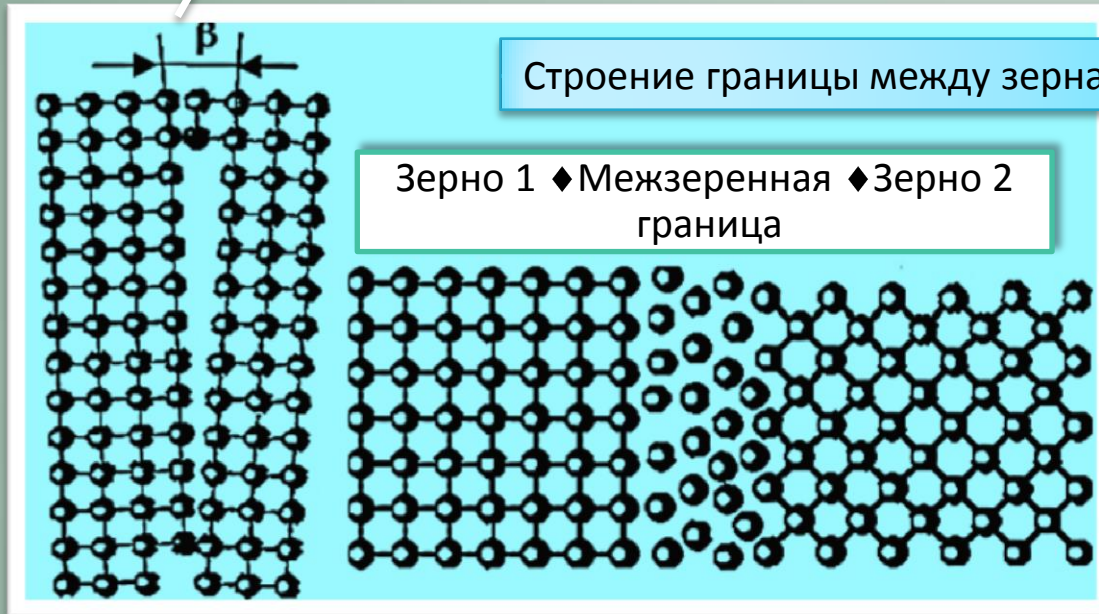


Механические смеси Компоненты не вступают в химические реакции и не растворяются друг в друге в твердом состоянии. Механическая смесь состоит из зерен с собственными кристаллическими решетками.

- › **Структура и свойства** сплава зависят от вида взаимодействия его компонентов при кристаллизации
- › Металлы в **жидком** состоянии хорошо растворяются друг в друге, в **твердом** - образуют механические смеси, твердые растворы и химические соединения

Микроструктура сплава

Угол разориентации между зернами



Малоугловая

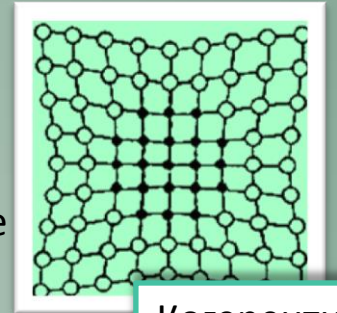


Большеугловая

- Металл состоит из кристаллов (зерен) размером **1–1000** мкм. Если углы разориентации между зернами - несколько десятков градусов, то зерна разделяет **большеугловая граница** шириной **5–15** межатомных расстояний с нарушением порядка в расположении атомов

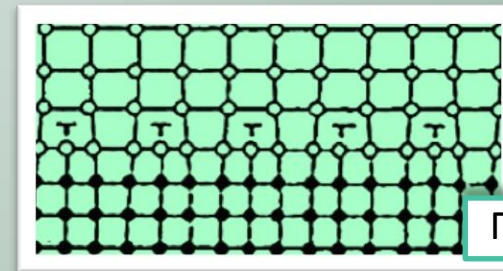
- Межфазные границы – между кристаллами разных фаз

- Когерентная** - решетка одной фазы плавно переходит в решетку другой. Несоответствие решеток дает упругую деформацию, изгиб атомных плоскостей на границе

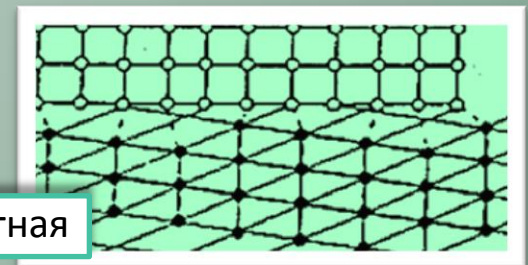


Когерентная

- Полукогерентная** - дислокации чередуются с участками сопряжения решеток 2 фаз
- Некогерентная** - когда плавное сопряжение решеток 2 фаз невозможно



Полукогерентная



Некогерентная

Основные соотношения для прочности

- › **Теоретическая прочность** - сопротивление деформации и разрушению материалов согласно физическим расчетам с учетом межатомного взаимодействия и предположения, что 2 ряда атомов одновременно смещаются относительно друг друга под действием напряжения сдвига
- › **Техническая прочность** определяется
 - пределом текучести
 - пределом упругости
 - пределом выносливости
 - модулем упругости
 - сопротивлением разрушению и временным сопротивлением

$$\sigma_{\text{теор}} = (a/d) \times (G/2k)$$

a - межатомное расстояние в направлении скольжения; d - межплоскостное расстояние; G - модуль сдвига матрицы (коэффициент пропорциональности между касательным напряжением и относительным сдвигом)

- › **Теоретическая прочность** в **100-1000** раз больше **технической**. Это связано с дефектами в кристаллическом строении - дислокациями. Прочность металлов не является линейной функцией плотности дислокаций

$$\sigma_{\text{т}} = \sigma_0 + \alpha G b \sqrt{\rho}$$

Связь между пределом текучести и плотностью дислокаций



Влияние дефектов на прочность металла, см^{-2} :
3 - 10^2-10^3 ; 4 - 10^6-10^8 ; 5 - $10^{10}-10^{12}$

Основные соотношения для прочности

- › В первом приближении **упрочнение** при образовании твердого раствора определяется по формуле **Мотта-Набарро**

$$\sigma_T = G\varepsilon^2 C$$

G - модуль сдвига; ε - параметр, зависящий от размеров атомов растворенного компонента и растворителя; C - атомная концентрация растворенного компонента

- › Зависимость предела текучести от размера зерна описывается отношением **Холла-Петча**

$$\sigma_T = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$$

σ_0 - напряжение трения, необходимое для скольжения дислокаций в монокристалле, K - коэффициент Холла-Петча, индивидуальный для каждого материала

- › При большей величине зерна **трещиностойкость** возрастает, как в стали и титане. Чем мельче зерно, тем выше **предел выносливости**

$$\sigma_R = \sigma_{R_0} + K_R d^{-1/2}$$

K_R - постоянные, зависящие от материала

- › Предел текучести при дисперсном упрочнении зависит от размера частиц и их объемной доли
Уравнение прочности в этом случае имеет вид

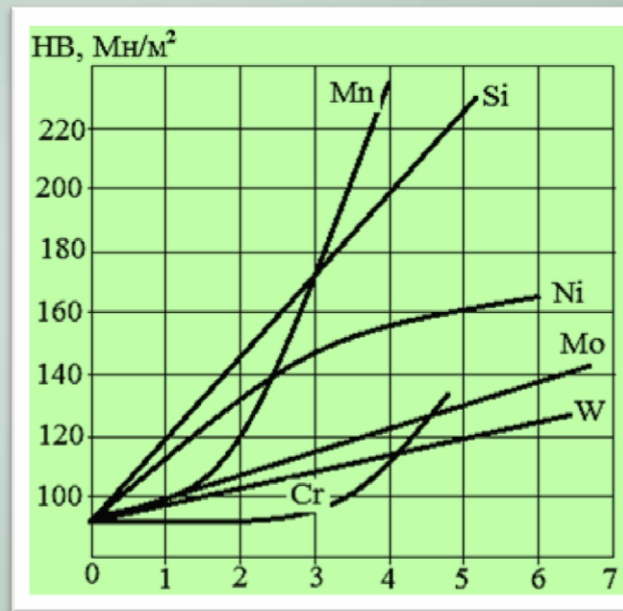
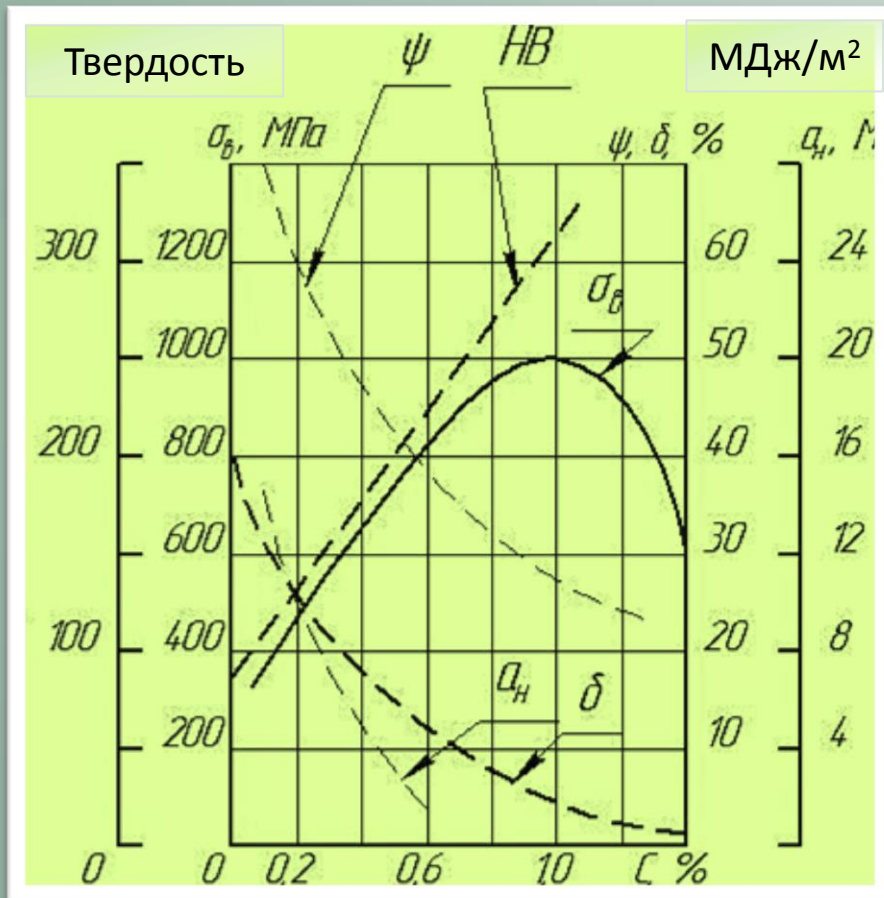
$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \sqrt{f/d}$$

σ_0 - напряжение сдвига в матрице; α - коэффициент, включающий вектор Бюргерса и модуль сдвига

Влияние легирующих элементов на прочностные характеристики сплавов железа

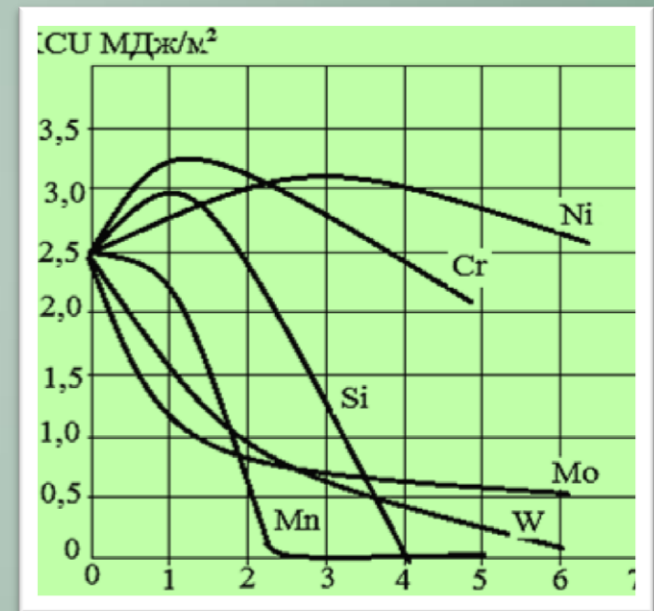
Влияние углерода на свойства стали

● Легированный феррит



Легирующий элемент, %

Твердость



Легирующий элемент, %

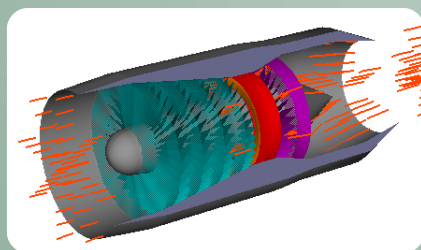
Ударная вязкость

Специальные свойства стали и сплавов

- › **Износостойкость** – сопротивление материала изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости или интенсивности изнашивания
- › **Коррозионная стойкость** - сопротивление материала **коррозии**, определяющаяся скоростью **коррозии** в данных условиях
- › **Жаростойкость** – устойчивость к коррозии при высоких температурах в **окислительной** атмосфере
- › **Жаропрочность** – сохранение прочности при высоких температурах в **инертной** атмосфере и работа без остаточной деформации и разрушения
- › **Радиационная стойкость** - стабильность структуры и свойств в условиях облучения

Стали и сплавы с особыми свойствами

- › **Жаростойкие (окалиностойкие) стали** - для изготовления деталей, работающих в ненагруженном состоянии при высоких температурах. Чем выше температура эксплуатации, тем больше скорость окисления металла и тем более жаростойкий материал требуется для их изготовления
- › При окислении металла на его поверхности образуется окисная пленка, от свойств которой зависит скорость окисления. Хорошими защитными свойствами обладают Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 . Плохими - окислы железа. Поэтому жаростойкие стали легируют хромом, алюминием, кремнием и никелем. Степень легирования зависит от условий работы. 15X5M - 600-650° С; 4X9C2 - 850° С; 12X17 - 900° С; 15X25H19C2, 36X18H25C2 - 1100° С
- › **Жаропрочные стали** для изделий, работающих при высоких температурах под нагрузкой. Поэтому данные материалы должны сохранять достаточную прочность и сопротивление деформации при высоких температурах (высокий предел ползучести)
- › При 750-800° С используются сплавы на основе Ni и Co, при 1000° С - сплавы на основе Mo (до 1500° С) и W (до 2500° С)

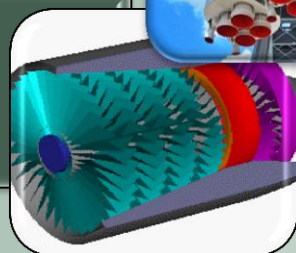


Классификация сплавов со специальными свойствами

- Газовые турбины
- Ракетные двигатели
- Космич. аппараты
- Атомные реакторы



Суперсплавы на основе Fe, Ni, Co



- Химическая
- Нефтехимическая промышленности

Коррозионно стойкие



- Атомные реакторы

Радиационно стойкие



Аустенитные никель-хромовые жаропрочные сплавы Инконель 718, Инконель 680

Аустенитные коррозионностойкие стали 12X18H10T, 08X17H13M2T

Циркониевые сплавы циркалой-2, циркалой-4, Э125, Э635

Марка	Рабочая T, °C	Предел длит. прочности, МПа		Структура	Применение
		10 ⁴ час	10 ⁵ час		
12X1MФ	560	140	110	Феррит, перлит	Трубы пароперегревателей, паропроводов, P=25,5 МПа
15X11MФ	580	200	150	Сорбит	Лопатки паровых турбин
40X10C2M	600	100		Сорбит	Клапаны ДВС
12X18H10T	700	80	250 (10 ²)	Аустенит	Пароперегреватели, трубопроводы выс. давления

Маркировка легированных сталей

- › Легирующие элементы в сталях обозначаются **заглавными буквами** русского алфавита
- › **Цифры** после букв указывают процентное содержание соответствующего элемента

Буква	Элемент	Буква	Элемент	Буква	Элемент
А	азот	К	кобальт	Т	титан
Б	ниобий	Н	никель	Ф	ванадий
В	вольфрам	М	молибден	Х	хром
Г	марганец	П	фосфор	Ц	цирконий
Д	медь	Р	бор	Ч	редкоземельный
Е	селен	С	кремний	Ю	алюминий

- › В обозначении легированных конструкционных сталей в начале марки указывается
 - двухзначное число, показывающее содержание углерода в сотых долях процента
 - легирующие элементы и их содержание в процентах. Если число не стоит, то содержание элемента не более 1,5 %
 - Например, сталь **15Х25Н19ВС2** содержит 0,15 % **С**, 25 % **Cr**, 19 % **Ni**, до 1,5 % **W** и 2 % **Si**

Нержавеющие стали

- › **Нержавеющие (коррозионностойкие) стали** устойчивы к взаимодействию с окружающей средой. Основными элементами, обеспечивающими эти свойства, являются хром и никель. Хрома необходимо 12.5%, чтобы сталь стала нержавеющей, т.к. ее электрохимический потенциал становится положительным. **20X13, 30X13, 40X13** содержат 13% хрома. Их можно закалить: 30X13 - до 40 HRC, а 40X13 - до 50HRC. Если для коррозионностойкого материала требуются высокая твердость и износостойкость, используют **высокоуглеродистую** хромистую сталь 95X18, которая после закалки и отпуска дает 60 HRC
- › Хорошие антикоррозийные свойства имеют хромо-никелевые стали, которые при закалке можно перевести в аустенитное состояние, что повышает их стойкость (**17X18H9, 08X18H10T, 10X17H13M3T**)
- › Для увеличения стойкости в кислотных средах в сталь добавляют медь (**06X23H28M3Д3**). Очень дорогие стали

- Химическая
- Нефтехимическая промышленности

**Коррозионно
стойкие**



Износостойкие стали

- › **Износостойкие стали** предназначены для работы в условиях изнашивающих нагрузок, часто при интенсивном износе. Чем выше твердость и чем выше содержание твердых избыточных карбидов, тем выше сопротивление износу. Поэтому эти стали **высокоуглеродистые** и легированы карбидообразующими элементами (Cr, W, V, Ti). **ХВГ** (0.95%С), **ХВ4Ф** (1.35%С), **Х6ВФ**(1.1%С), **9ХС**, **Х12** (2.1%С), **Х12МФ** 1.55%С). Наилучшими свойствами обладают **Х12**, **Х12МФ** и **ХВ4Ф**, т.к. много углерода и большое количество специальных карбидов
- › **Высокомарганцовистые стали** (сталь Гадфильда) **110Г13**, **120Г13** занимают особое место среди износостойких сталей
- › При нагружении (деформации) **высокомарганцовистой** стали происходит наклеп аустенита и сильное его упрочнение. Плохо обрабатывается резанием

Деформация, %	0	20	40	60	70
НВ	200	340	430	510	530

Химический состав (%) стали Гадфильда (ГОСТ 2167)

С	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	S	P
0.90-1.40	11.5-15.0	0.80-1.00	1.00	1.00	0.30	0.050	0.12

Факторы повышения характеристик

- › **Работоспособность и надёжность** при возрастающих механических и тепловых нагрузках
- › **Работоспособность и увеличение срока службы** в условиях агрессивного химического воздействия рабочей и окружающей сред
- › **Расширение сфер применения** материалов при экстремальном воздействии окружающей среды (космос, военные действия, катастрофы)
- › **Экологическая безопасность и снижение вредного воздействия** на здоровье человека



Марсоход



Робот спасатель

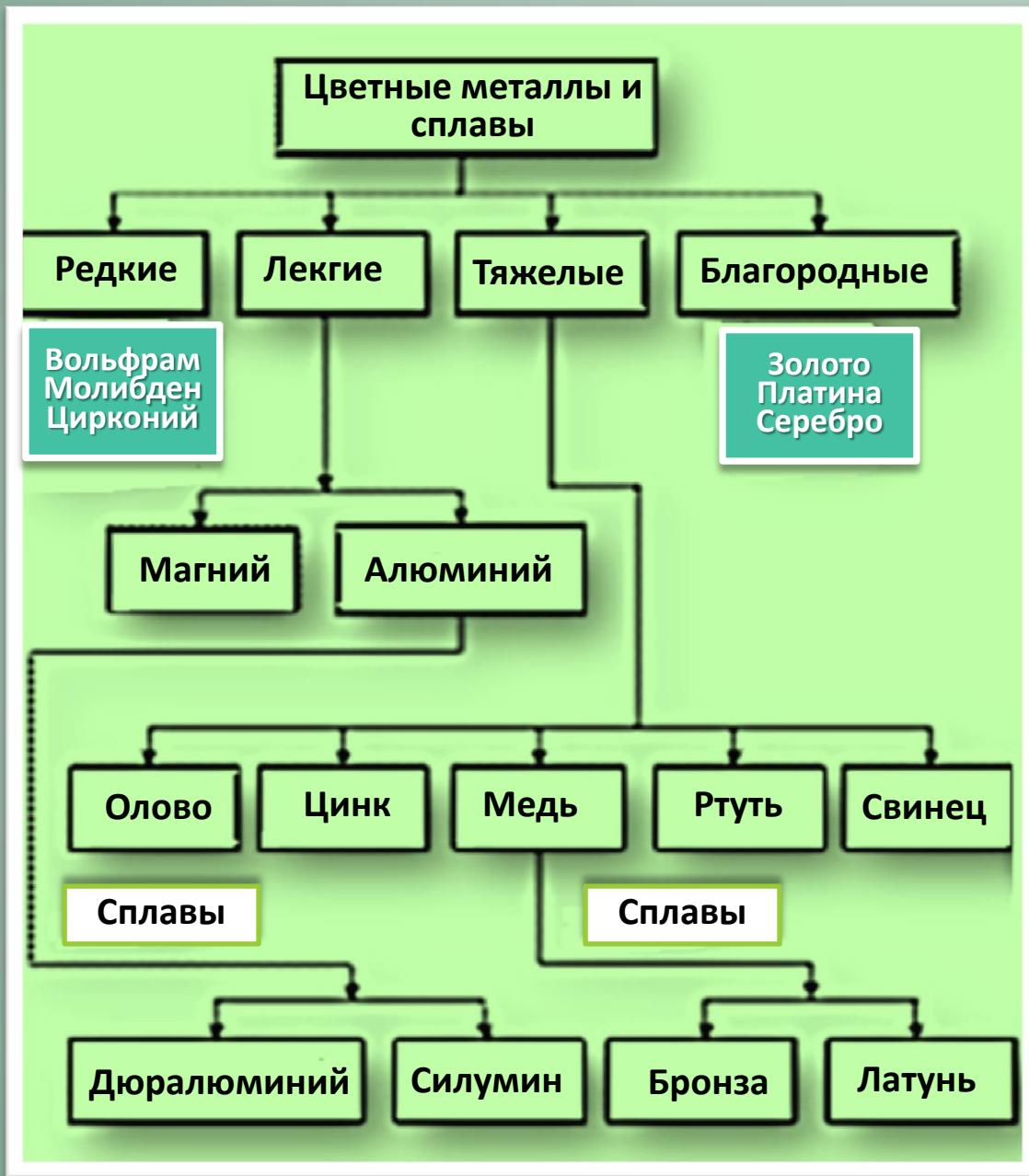
Перспективы повышения характеристик

- › Для обычных конструкционных сталей и сплавов **УВЕЛИЧИЛИСЬ ПАРАМЕТРЫ:**
 - прочность в **1,5-2** раза
 - модули упругости в **2-2,5** раза
 - **температура эксплуатации**
 - › низкотемпературных - в **1,5** раза
 - › высокотемпературных - в **1,1** раза

› Перспективные технологии

- › Повышение чистоты металла **микролегированием** и **модифицированием**, направленным на связывание вредных примесей в наночастицы
- › Объёмное **наноструктурирование** материалов
- › Формирование **иерархических** структур в условиях высокого давления (алюминий до прочности стали)
- › «**Дизайн**» кристаллических решёток

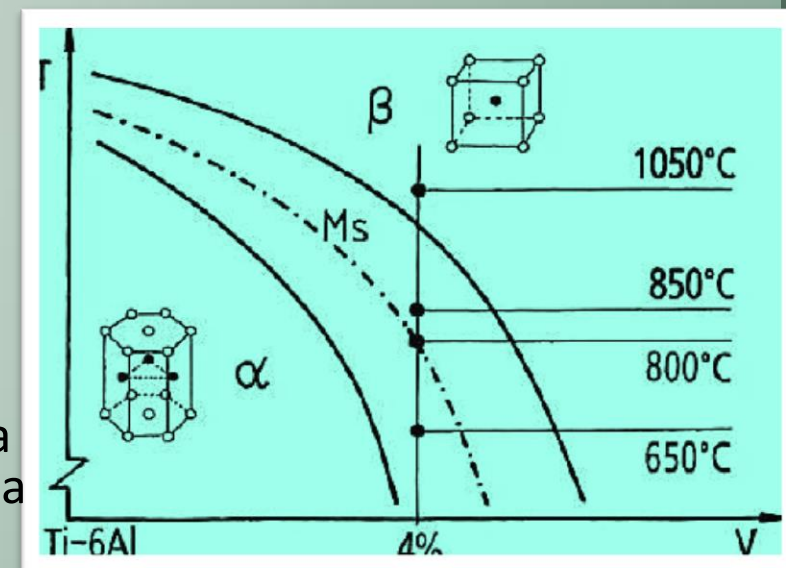
Классификация цветных металлов и сплавов



- › **Цветные сплавы** – на основе титана, алюминия, магния, меди. Более дорогие и дефицитные по сравнению с черными металлами
- › **Особенно перспективны** материалы, которые дают возможность снизить массу конструкций при повышении прочности и жесткости.
- › **Высокая коррозионная стойкость** цветных металлов обусловлена образованием на поверхности металла плотной пленки оксида
- › **При нагреве цветных металлов** выше некоторой предельной температуры они становятся химически активными элементами

Титан и его сплавы

- Титан – легкий переходный металл серебристо-белого цвета. Температура плавления **1671 °C**
- Полиморфные модификации**
 - до **882 °C** - **α -фаза** с ГПУ решеткой (**$a = 0,296$ нм, $c = 0,472$ нм**) Плотность α -фазы при комнатной температуре **4,5 г/см³**
 - выше **882 °C** - **β -фаза** с ОЦК решеткой (**$a = 0,332$ нм при 900 °C**)
- Титан – химически активный металл. В агрессивных средах обладает высоким сопротивлением коррозии, так как на поверхности образуется защитная пленка из **рутила TiO₂**
- Предел прочности Ti сплава с **W, Mo, Cr 700-1200 МПа**
- Легирование и термообработка увеличивает ее до **1800-2000 МПа**
- Низкая плотность (**4500 кг/м³**)
- Высокая твердость (**НВ > 1000**)
- Коррозионная стойкость, жаропрочность (до **400 C**)
- При низких температурах (**600 °C**) и давлении **0,1 МПа** абсорбирует большое количество водорода - **32000 см³/100 г**, а железо – **1,31 см³/100 г**. Вакуумным отжигом водород из титана можно удалить
- Основной источник водорода – **пары воды**, разлагающиеся с образованием **оксидной пленки** на поверхности титана и водорода, который распределяется между газовой фазой и твердым титаном



Титановые сплавы

- › **Легирование титана** повышает механические свойства
- › **Al, Fe, Mn, Cr, Sn, V** повышают **прочность** титана, снижая **эластичность и вязкость**
- › **Al, Zr, Mo, Sn** повышают **жаропрочность**
- › **Mo, Zr, Nb, Ta** повышают **коррозионную стойкость**
- › **Легирующие элементы**
 - по влиянию на темп. полиморфного превращения
 - › α -стабилизаторы (Al)
 - › β -стабилизаторы (Mo, V, Mn, Fe, Cr)
 - › нейтральные (Sn, Zr)
 - по структуре после отжига
 - › α -сплавы
 - › псевдо α -сплавы (5% β -фазы)
 - › $\alpha+\beta$ сплавы
 - › псевдо β -сплавы (высокое содержание α -фазы)
 - › β -сплавы

Металл	Типичный состав (масс%)	Типовые применения
α - β титановый сплав	Ti-6 Al-4 V	Легкий, очень прочный, отличная коррозионная стойкость, высокая температура плавления, хорошая стойкость к ползучести. Удобен в эксплуатации: турбовентиляторы, планеры, химический завод, хирургические имплантаты

Титановые сплавы

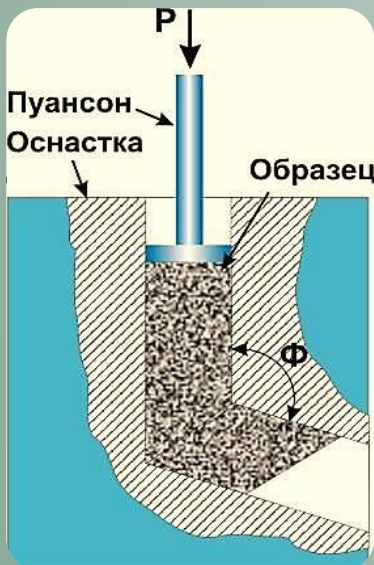
- › **Двухфазные ($\alpha+\beta$)-сплавы** - группа промышленных титановых сплавов, с более высокой пластичностью, чем α -сплавы. Термически упрочняются, обладают высокой жаропрочностью, но плохо свариваются. После закалки – ($\alpha+\beta$)-сплавы **мартенситного и переходного** класса. **Мартенситные** менее легированы, в равновесном состоянии содержат не более **25 % β -фазы**. **Переходные** (до **50 % β -фазы**) - высокопрочные как в отожженном, так и в закаленном состояниях
- › Для повышения износостойкости титановые сплавы подвергаются **цементации** или **азотированию**. **Азотирование** образует на поверхности пленку, внешне похожую на **золото** («позолоченный титан»)
- › **Основной недостаток титановых сплавов – плохая обрабатываемость резанием и низкие антифрикционные свойства**
- › Титан в большинстве случаев маркируется буквой «Т». Группа титановых сплавов, изготовленных на базе Всероссийского института авиационных материалов, обозначается аббревиатурой «**ВТ**»

Новейшие технологии повышения характеристик титановых сплавов

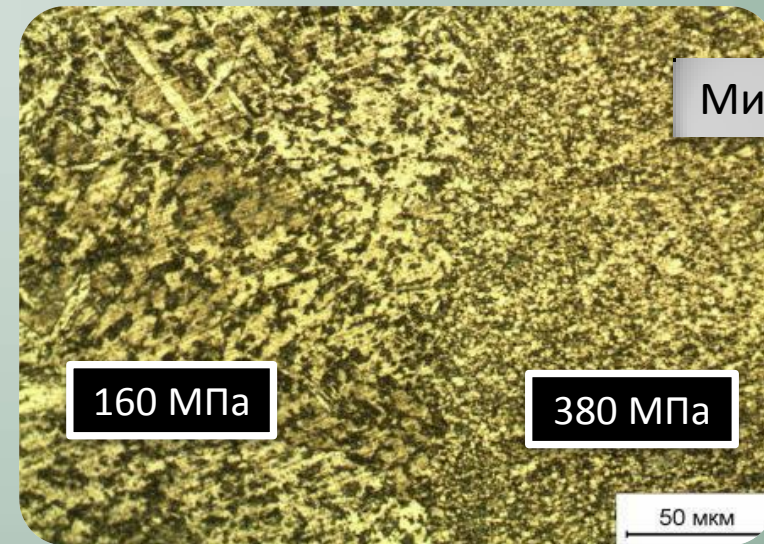
› Сплав из титана и золота (3:1) β -Ti3Au

- › Для **медицинских имплантатов** нового поколения, более прочных и долговечных
- › **Втрое** превышает прочность чистого титана
- › Химический состав золота при соответствующей обработке вместе с титаном меняет структуру последнего на атомном уровне
- › В результате обработки, атомы материала структурированы в кристаллическую решетку, что делает полученный сплав **невероятно прочным**
- › β -Ti3Au не имеет конкурентов по критерию прочности среди всех металлов. Этот сплав станет популярным и в **промышленности**

› Субмикроструктурный титан



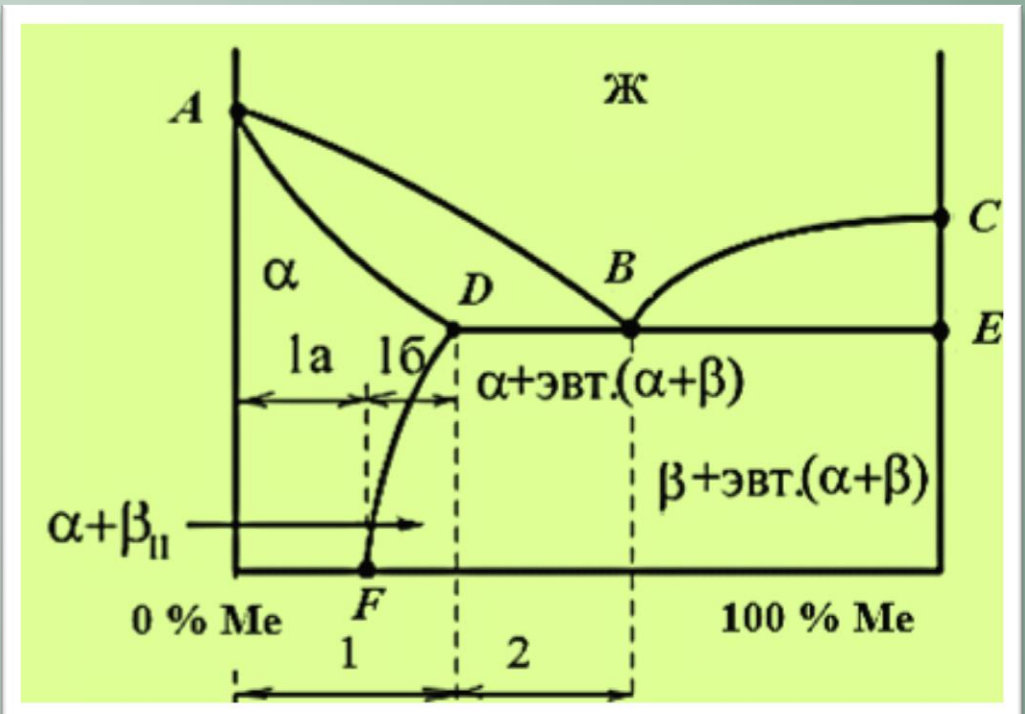
Равноканальное угловое прессование (РКУП) - метод интенсивной пластической деформации, заключается в продавливании (экструзии) материала через наклонные каналы с одинаковой площадью поперечного сечения. Процедуру повторяют несколько раз. Технология разработана в СССР (1973)



Алюминий и его сплавы

- › **Алюминий** - легкий ($\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$) серебристо-белый металл, температура плавления $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Полиморфных превращений не имеет, кристаллизуется с образованием ГЦК решетки ($a = 0,404 \text{ нм}$)
- › **Механические свойства** отожженного Al ($\sigma_B = 60 \text{ МПа}$, твердость $20\text{--}25 \text{ НВ}$) зависят от чистоты и состояния. Постоянные примеси: **Fe, Si, Cu, Zn, Ti**
- › **Al особой чистоты** (менее $0,001 \text{ \%}$ примесей) - для исследовательских целей
- › **Al высокой чистоты** ($0,005\text{--}0,05 \text{ \%}$ примесей) – для изготовления фольги, токопроводящих и кабельных изделий, химич. промышленности
- › **Al технической чистоты** ($0,15\text{--}1 \text{ \%}$ примесей) - для элементов конструкций и деталей, не несущих нагрузки
- › Обладает хорошей тепло- и электропроводностью, высокой пластичностью, легко обрабатывается давлением, сваривается газовой и контактной сваркой, **плохо** обрабатывается резанием, имеет большую литейную усадку (6 \%)

Диаграмма состояния сплавов



- 1а – деформируемые **не упрочняемые** сплавы;
- 1б – деформируемые **упрочняемые** сплавы;
- 2 – **литейные** сплавы

Металлы на основе алюминия

Типичный состав (масс%)	Типовые применения
>99 Al	Слабый, но эластичный и хороший электрический проводник: линии электропередач, фольга для приготовления пищи
Al + 4 Cu + Mg, Si, Mn	Сильный, устойчивый к старению сплав: обшивка самолетов, лонжероны, поковки, заклепки
Al + 1 Mn	Умеренная прочность, пластичность, отличная коррозионная стойкость: кровельный лист, кастрюли, корпуса банок для напитков
Al + 3 Mg 0.5 Mn	Прочный, свариваемый нагартованный лист: автоклавы, судовые надстройки
Al + 0.5 Mg 0.5 Si	Дисперсионно твердеющий сплав средней прочности: анодированные прессованные профили, например оконные рамы
Al + 6 Zn + Mg, Cu, Mn	Прочный, свариваемый нагартованный сплав: авиационные поковки, лонжероны, легкие корпуса вагонов
Al + 11 Si	Литье в песчаную форму и под давлением
Al + 3 Li	Низкая плотность и хорошая прочность: обшивка самолетов и лонжероны

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой

- › **Дуралюмины** – **Al-Cu-Mg** сплавы, в которые дополнительно вводят **Mg** для повышения коррозионной стойкости (сплав **Д16** - $\sigma_b = 540$ МПа, $\delta = 11\%$). Детали и элементы конструкций средней и повышенной прочности, с высокой надежностью и долговечностью при переменных нагрузках. **Авиа-, автомобилестроение, строительство**
- › **Ковочные** – **Al-Mg-Si-Cu** сплавы высоко-пластичны, с хорошими литейными свойствами, позволяющими получить качественные слитки для последующей обработки давлением. Сплав **АК6** - для деталей сложной формы со средней прочностью, изготовление которых требует высокой пластичности в горячем состоянии. Сплав **АК8** ($\sigma_b = 480$ МПа, $\delta = 10\%$). **Тяжело нагруженные штампованные детали**

Сплавы	Марка	Химический состав, %						
		Cu	Mg	Si	Zn	Fe	Mn	Ni
Дуралюмин	Д16	3,8–4,9	1,2–1,8	< 0,5	< 0,3	< 0,5	0,3–0,9	0,1
Авиаль	АВ	0,2–0,6	0,4–0,9	0,5–1,2	< 0,2	< 0,5	0,1–0,3	–
Ковочные	АК6	1,8–2,6	0,4–0,8	0,7–1,2	< 0,3	< 0,7	0,4–0,8	< 0,1
Жаропрочные	АК2	3,5–4,5	0,4–0,8	0,5–1,0	< 0,3	0,5–1,0	< 0,2	1,8–2,3
Высокопрочные	В95	1,4–2,0	1,8–2,8	–	5–7	–	0,2–0,6	–

- › **Авиали** – **Al-Mg-Si** сплавы менее прочны, более пластичны в холодном и горячем состояниях. Сплав **АВ** ($\sigma_b = 260$ МПа, $\delta = 15\%$) обрабатывается резанием (после закалки и старения), сваривается контактной и аргонодуговой сваркой, обладает высокой сопротивляемостью коррозии. **Листы, трубы, профили, несущие умеренные нагрузки**
- › **Жаропрочные** сплавы - сложный хим. состав, дополнительно легируют **Fe, Ni, Ti**. Сплав **Д20** ($\sigma_b = 400$ МПа, $\delta = 12\%$). **Детали, работающие до 300 °С**
- › **Высокопрочные** - **Al-Zn-Mg-Cu** сплавы. При увеличении **Zn** и **Mg** прочность повышается, пластичность и коррозионная стойкость снижаются. Добавки **Mg** и **Cr** улучшают коррозионную стойкость. Сплав **В95** ($\sigma_b = 560–600$ МПа, $\delta = 8\%$) обрабатывается резанием, сваривается точечной сваркой. **Самолето-, судостроение, тяжело нагруженные конструкции**

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой

- › **Литейные** сплавы для фасонного литья. Высокая жидкотекучесть, небольшая усадка, малая склонность к образованию горячих трещин и пористости, хорошие механические свойства и сопротивление коррозии
- › **Силумины** – **Al-Si, Al-Si-Mg** сплавы, содержат **10–13% Si**. Высокие литейные свойства, высокая плотность отливок. **Двойные** (легированные Si) и **специальные** (легированные **Mg, Cu, Mn, Ni**). **Mg, Cu** повышают упрочнение при старении. **Ti, Zr** измельчают зерно, **Mg** повышает антикоррозионные свойства, **Ni, Fe** повышают жаропрочность. Al–Si сплавы **АЛ12, АЛ9** ($\sigma_B = 200$ МПа) легко обрабатываются **резанием**. Термическая обработка упрочняет **специальные силумины**. **Средне- и крупногабаритные литые детали (корпуса компрессоров, картеров двигателей внутреннего сгорания)**
- › Высокопрочные жаропрочные **Al-Cu-Mn, Al-Cu-Mn-Ni, Al-Si-Cu-Mn** сплавы. Сплав **АЛ1** ($\sigma_B = 260$ МПа). Поршни, головки цилиндров, др. детали, работающие при повышенных температурах. Сплав **АЛ19** (Al-Cu). **Детали для работы при высоких статических и ударных нагрузках и до 300°C**
- › Коррозионностойкие **Al-Mn** и **Al-Mn-Zn** сплавы - низкие литейные, повышенные механические свойства и хорошая обрабатываемость резанием. Сплавы **АЛ8** ($\sigma_B = 350$ МПа, $\delta = 10\%$), **АЛ13** и **АЛ22**. **Отливки, работающие во влажной атмосфере (судостроение, авиация)**

Новейшие технологии получения алюминиевых сплавов

- › Выдерживают нагрузку как высокопрочная сталь
- › Исследователи из университетов Австралии, России и США провели эксперимент с
 - авиакосмическим алюминиевым сплавом марки **7075 (Zn, Mg и др. добавки)**. **Предел текучести** сплава 7075 **145-476 МПа**, в зависимости от состава и обработки
 - Тонкий диск из сплава **7075** подвергли скручиванию под давлением ок. **60 тысяч атмосфер**. Оставили образец на месяц при комнатной температуре для естественного старения. Получили **предел текучести** около **1 ГПа**, близкий к показателям высокопрочных сталей и даже выше, чем для некоторых их марок
- › **Смена структуры** материала, без изменения хим. состава, увеличила его прочность **в разы**. Зёрна алюминия хорошо подогнаны друг к другу, а добавки играют роль цемента в кирпичной кладке
- › В работе приняли участие **Максим Мурашкин** и **Руслан Валиев** из Института физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета
- › **Атомно-зондовая томография** выявила в обработанном сплаве **иерархическую структуру**. Размер кристаллического зерна уменьшился до **десятков нм**, а атомы **Zn** и **Mg** собрались в субнано и нанометровые кластеры различной формы, в зависимости от того, расположились они внутри зерна или на его границах



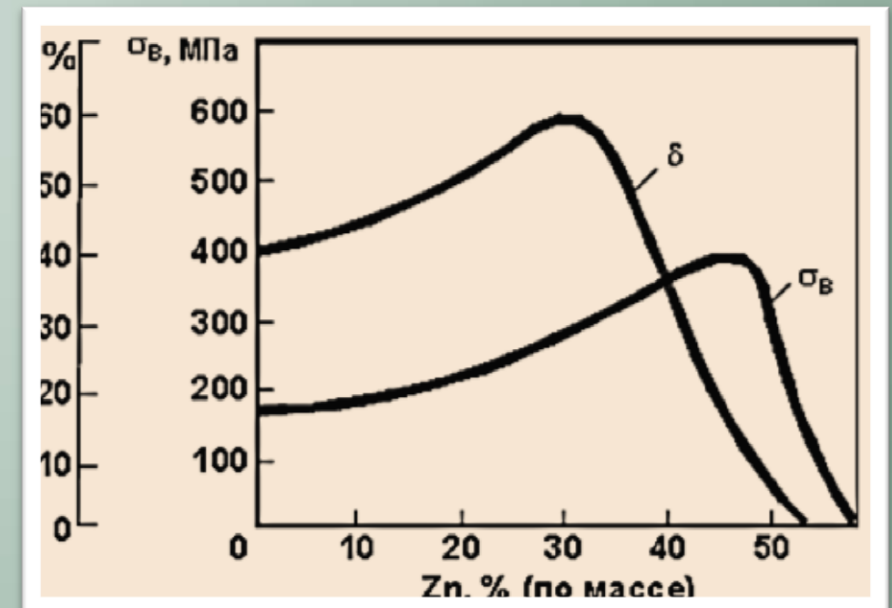
Медь и ее сплавы

- › **Медь** (от греч. «халкос» - медь) красного цвета, имеет ГЦК решетку ($a = 0,361$ нм), плотность **8,96 г/см³**, температуру плавления **1083°С**. Высокая тепло- и электропроводность. Широко применяется в **тепло- и электротехнике**. Низкие механические свойства, повышаются созданием сплавов меди; редко применяется как конструкционный материал
- › Элементы (металлы), **растворимые** в твердой меди **Al, Fe, Ni, Zn, Ag, Au, Pt, Cd, Sb**
- › Элементы, **нерастворимые** в твердой меди и образующие с ней легкоплавкие эвтектики **Pb, Bi**
- › Элементы **неметаллические** и **полуметаллические**, образующие с медью химич. соединения **P, As, O, S, Se, Te**

› Медные сплавы

- **Латуни** – сплавы **меди** с **цинком** и другими элементами. Маркируются буквой Л (латунь), затем ставится цифра, показывающая содержание меди в процентах. В специальных латунях после буквы Л буквы русского алфавита обозначают легирующий элемент: А – алюминий, Н – никель, К – кремний, С – свинец, О – олово, Ж – железо, Мц – марганец, Ф – фосфор, Б – бериллий. Цифры показывают среднее содержание меди и легирующих элементов в % (Л96 – 96 % Cu и 4 % Zn; Л68 – 68 % Cu; 32 % Zn)

- **Бронзы** – сплавы меди с другими элементами, в которых цинк не является основным. По способу изготовления различают **деформируемые** и **литейные** бронзы



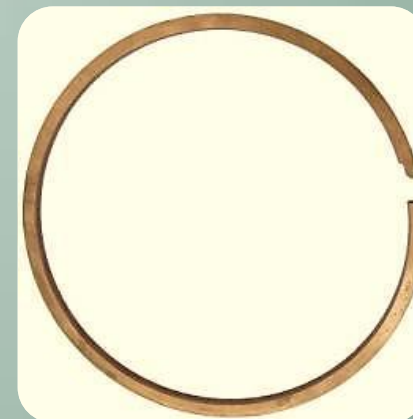
Влияние цинка на механические свойства латуни

Бронзы

- › **Оловянные** - из твердых растворов, склонны к ликвации из-за большого температурного интервала кристаллизации. Сплавы с содержанием олова более **5%** имеют **легкоплавкую фазу** (детали с хорошими антифрикционными свойствами - **подшипники скольжения**). Мягкая фаза обеспечивает прирабатываемость, **твердая** – износостойкость бронзы. Деформируемые оловянные бронзы (менее **6%** олова) обладают высокими механическими, антикоррозионными, антифрикционными свойствами. **Прутки, трубы, ленты, проволока**
- › **Алюминиевые** - заменители оловянных бронз. Сплавы с
 - **9,4% Al** - однофазный раствор (α -фаза)
 - **5,6% Al** - двухфазный раствор ($\alpha+\gamma$ -фазы)
 - **5–8% Al** имеют оптимальные свойства
 - **10-11% Al** - низкая пластичность
 - **8–9,5 % Al** закаливают для повышения прочности. **Литьем и обработкой давлением** изготавливают **малогабаритные ответственные детали (шестеренки, втулки, фланцы)**. Штамповкой изготавливают **медали и разменную монету**
- › **Кремнистые** немагнитны и морозостойки, коррозионная стойкость и механические свойства выше оловянных, высокие упругие свойства. Хорошо свариваются и подвергаются пайке
- › **Свинцовые** - высококачественный антифрикционный материал. По сравнению с оловянными - низкие механические и технологические свойства
- › **Бериллиевые** – сплавы меди с **2–5%** бериллия, для изготовления **высококачественных пружин**

Технология создания высокопрочных антифрикционных бронз с легкоплавкой фазой

- › Предназначена для изготовления уплотнений и поршневых колец, маслоплотных, экспандерных колец и других деталей
- › Преимущества
 - Износостойкость отливок выше на **25-30%**
 - Предел прочности выше на **15-20%** в сравнении с традиционными технологиями
 - **Низкая себестоимость** за счет низкого процента брака при литье отливки



Магний и его сплавы

- › **Магний** легкий ($\rho = 1,74 \text{ г/см}^3$), блестящий серебристо-белый металл с температурой плавления **650 °С**, тускнеющий на воздухе из-за образования на поверхности окисной пленки. ГПУ решетка ($a = 0,320 \text{ нм}$, $c = 0,520 \text{ нм}$). Механические свойства $\sigma_b = 115 \text{ МПа}$, $\delta = 8\%$
- › **Магниевоы сплавы** обладают высокой химической активностью и выбор металлов, пригодных для Mg легирования невелик. Сначала применялись сплавы **Mg-Al-Zn**, **Mg-Mn**. Открытие модифицирующего и рафинирующего действия **Zr**: **Mg-Zr-Zn**, **Mg-Zr** сплавы (редкоземельный элемент). Широко применяются **Mg-Th** и сверхлегкие **Mg-Li** сплавы
- › **Литейные** (МЛ) для фасонных отливок и **деформируемые** (МА) для полуфабрикатов прессованием, прокаткой, ковкой и штамповкой
- › Упрочняются **закалкой** (**380-420° С**) и **искусственным старением** (**260-300° С**) в течение **10–24 ч**. Особенность - длительная (**4-24 ч**) выдержка при нагреве под закалку. Детали из Mg сплавов обладают высокой удельной прочностью (**самолето- и ракетостроение**). Хорошо обрабатываются резанием (детали оптических приборов с очень тонкими стенками и мелкой резьбой). Чувствительны к **знакопеременным нагрузкам**, поэтому при конструировании деталей следует избегать резких переходов сечения, острых надрезов, пазов

Ключевые вопросы

- › Классификация металлов и сплавов. Конструкционные стали
- › Конструкционная прочность материалов и основные характеристики её определяющие
- › Методы повышения характеристик, теоретическая и техническая прочность. Роль легирующих элементов
- › Маркировка сталей. Стали со специальными свойствами
- › Факторы. Требуемые повышения характеристик сталей и сплавов
- › Цветные металлы. Классификация и маркировка. Применение
- › Сплавы титана, алюминия и меди. Состав и свойства
- › Другие сплавы цветных металлов



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!