

Преподаватели:

лекции - Забров Александр Александрович

Лабораторные работы:

Среда 12<sup>00</sup> с 30.10 по 11.12

Литература:

1. "Материаловедение" под ред. Арзамасова В.Н. 1986г.
2. "Материаловедение" изд-во МГУ 2001 г.

авторы - преподаватели кафедры

Лекции: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10  
11 12 13 14 15 16 17

МВ(1)

Лекция №1.

1  
5.09

Материаловедение - наука о строении и св-вах материалов, а также о превращениях, происх. в них при разл. технол. операциях - термобработка, литье, обраб. давлением, осветление, облужение и т.п.

Строение и св-ва твердых тел.

Твердые тела: аморфные и кристаллические.

Аморфные тела.

- нет порядка в расп. элементарных частях, из кот. сост. тело
- нет  $\epsilon^0$  плавления (с изменением  $\epsilon^0$  изменяется вязкость)
- сост. неустойчиво, часто наз. переохлажденной жидкостью
- могут переходить в кристалл.

Примеры: стекло, янтарь, воск

Переход в крист. сост. ведет к изменению свойств (полупрозрачность стекла).

Кристаллические тела.

Жидкие кристаллы сост. из цепочек (спиральной) молекул, кот. под действием разл. видов энергии могут ориентироваться в жидкости. Ориентация сопр. изменению котр. преломления света.

Мыльная вода - типичный пример жидких кристаллов.

Строение и св-ва твердых кристаллических тел.

Размер и строение атома.  
Тип связи. Тип крист. решетки.  
Наибольшие разл. дефектов.  
Хим. состав.

Структура крист. тела.

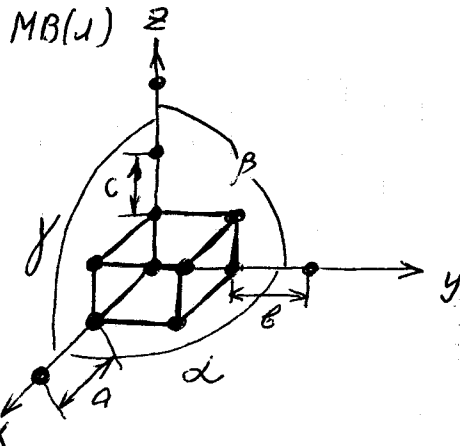
Структура делится на макроструктуру - св-ва видны невооруженным глазом  
микроструктуру ( $10^{-7} - 10^{-10}$  м).  
Микроструктуру можно наблюд. с помощью оптич. и эл. микроскопа.  
Тонкая структура ( $10^{-10} - 10^{-12}$  м).  
Изучение при помощи рентгена

Наука, изучающая крист. строение тв. тел, наз. Кристаллографией.

Элементы кристаллографии.

Тв. крист. тело имеет строгий порядок расп. атомов, строго опред.  $t^0$  тлвления.

1. Кристаллическая решетка.



тип объема крист. решетки, облад. всеми св-вами тела, наз. элементарной ячейкой. Кристалл получится трансляцией (повторением) эл. ячейки по 3-м простр. направлениям // самой себе.

1.  $a, b, c$  - период крист. решетки
2.  $\alpha, \beta, \gamma$  - углы между гранями  
 $a=b=c, \alpha=\beta=\gamma=90^\circ \Rightarrow$  куб
3.  $n$  - число атомов данной эл. ячейки

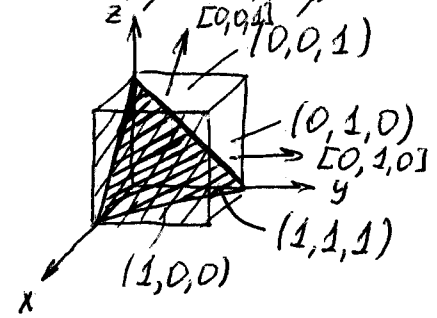
для простого куба  $n = 8 \cdot \frac{1}{8} = 1$

4.  $k$  - координационное число - кол-во атомов, нах. на ближайшем одинаковом расстоянии от любого выбранного

для простого куба  $k=6$

5.  $\eta = \frac{V_{атм}}{V_{эт}}$  - коэффициент компактности  
(0,34; 0,52; 0,68; 0,74)

6. Кристаллографические индексы (индексы Миллера) служат для опред. плоскостей и направлений в крист. решетке



1) индексы плоскостей (h, k, l), где  $h = \frac{1}{m}$ ;  $k = \frac{1}{n}$ ;  $l = \frac{1}{p}$ , где

m, n, p - отрезки, отсекаемые данной пл-тью по осям x, y, z в целых единицах периода a, b, c

{(1,1,1)} - все пл-ти (единичные)

2) индексы направления [u, v, w], где u, v, w - коорд. вектора (конца вектора) в целых ед. периода

Напр.,  $\perp$  к пл-ти, имеет те же индексы, что и пл-ть

{[1,1,1]} - все напр. [1,1,1]

3) поры крист. решетки (металлические пр-ва)

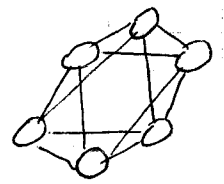
а) тетраэдрическая пора



$R = 0,22 r_{ат}$

МВ(1)

б) октаэдрическая пора



$R_{окт} = 0,41 r_{ат}$

4) плоскости плотнейшей упаковки крист. решетки

Типы связей и связи в тв. крист. телах.

От типа связей зав. тип крист. реш.,  $t^{\circ}$  плавления, механ. св-ва, физич. св-ва.

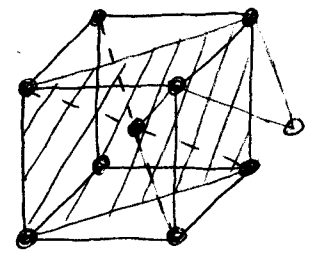
Сущ. 4 типа связей:

- а) металлическая связь
- б) ковалентная связь
- в) ионная связь
- г) молекулярная связь.

Металлический тип связи.

Связь между металлами. Связь сильная, не направленная. Сущ. за счет сил эл.-стат. притяжения. Типы крист. решеток:

1) объемно-центрированный куб: железо, хром, вольфрам, ванадий, ниобий и др.



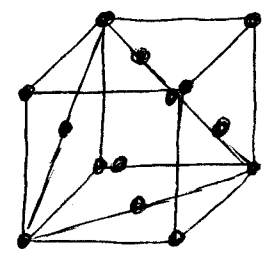
$a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 $n = 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 = 2$   
 $k = 8$

ОЦК (К8)

$\eta = 0,68$

-Т.к. - это плотнейшей упаковки - (1,1,0)

2) грани - центрированный куб



$a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 $n = 8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4$

$k = 12$   
 $\eta = 0,74$

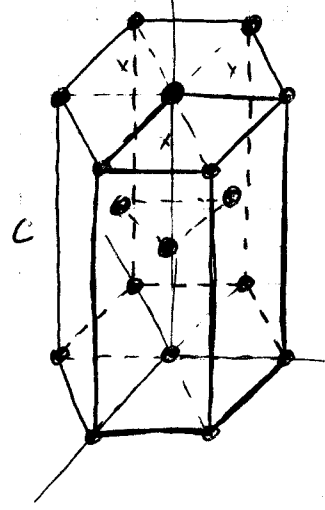
ГЦК (К12)

Fe, Al, Cu, Ag, Au, Pt

ПГУ - (1,1,1)

3) гексагональная решетка

3) гексагональная решетка



неэлементарная  
ячейка  
(3 элементар. ячейки)

$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ$   
 $\gamma = 120^\circ$

если  $\frac{c}{a} = 1,633$

ГПУ Г12

Mg, Co

если  $\frac{c}{a} > 1,633$  Г6

Cd, Zn

если  $\frac{c}{a} < 1,633$  Г6

Be, Ti

ПГУ - (0001)

Поллиморфизм.

Поллиморфизм - суц. нескольких типов крист. решетки у одного элемента.

Fe, Co, Ti, Zr, Sn

Модификация суц. в опред. интервале температур.

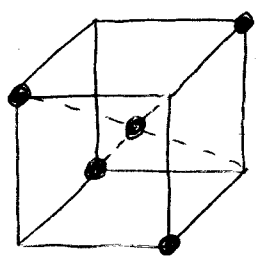
Fe до 911 °C Fe<sub>α</sub> - ОЦК (К8)  
 911 - 1392 °C Fe<sub>γ</sub> - ГЦК (К12)  
 1392 - 1530 °C Fe<sub>δ(α)</sub> - ОЦК (К8)

Ковалентный тип связи.

C, Si, Ge, Sn (эл-ты IV группы)

Обобществление пар э-нов между 4-мя соседями.

"Алмаз"



$a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 $K = 4$   
 $\eta = 0,34$

1/8 часть эл. ячейки

Ковалентная связь - единственная из всех направленная связь. Связь сильная / высокая  $\epsilon_m$ . Эл-ты с ковал. типом связи - полупроводники.

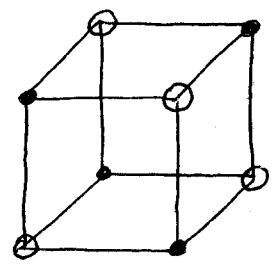
Ионный тип связи.

Связь между металлом и неметаллом. Осущ. за счет эл.-стат. связи между  $\oplus$  (металл) и  $\ominus$  (неметалл).

MB(1)

NaCl

реш. "Шпинель"



• Na<sup>+</sup>  
 ○ Cl<sup>-</sup>

$a = b = c$   
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$   
 $K = 6$

1/8 часть эл. ячейки

Связь сильная, ненаправленная. Высокая хрупкость

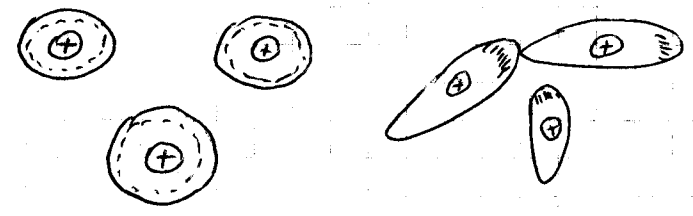
Соединения с ионным типом связи как правило диэлектрики. К ним же относятся оксиды.

Молекулярный тип связи.

Связь между нейтр. молекулами за счет слабых сил Ван-дер-Ваальса.

Силы Ван-дер-Ваальса - силы мгновенной поляризации, слабые, мерцающие. Низкая  $\epsilon_m$ .

I<sub>2</sub>, сухой лед



## Строение и свойства сплавов

Сплав - сложное крист. тело, сост. из двух или более хим. эл-тов, кот. наз. компонентами данного сплава.

Способы получения сплава

- 1) плавление и смешивание компонентов
- 2) порошковая металлургия
- 3) напыление в вакууме
- 4) конденсация
- 5) диффузия

Сплавы созд. с целью получения заданных свойств.

Сложное соед. наз. фазой сплава. Рассч. только твердые фазы.

Фаза сплава - однород. часть сплава по структуре, хим. составу крист. решетки, св-вам, имеющая границу раздела, при переходе кот. меняется структура и св-ва.

Фазы - чистые компоненты, кот. не взаимодействуют. В природе такого не существуют.

2 типа (основных) твердых фаз:

- 1) твердые растворы
- 2) промежуточные фазы

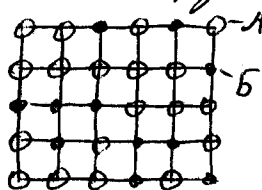
Твердый р-р - фаза простого состава. На основе крист. реш. одного из компонентов-растворителя.

МВ(1)  
Твердый р-р - фаза с новыми типами крист. решетки, не похожими на компоненты.

В зав. от того, в каком месте крист. реш. р-ря находится атом растворимого компонента, т.е. р-р бывают 2 типов:

- 1) замещение
- 2) внедрение

Твердые растворы замещения.



○ A - растворитель  
● B - растворимый

A(B) - тв. р-р замещения  
обозн.  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$

Растворимость зав. от 2 факторов:

- 1) размеры атомов
- 2) валентность

С увел. растворимости период кр. реш. тв. р-ра (р-ря) может увеличиваться, уменьшаться или ост. неизменным, если атомы растворимого компонента ~~равны~~ соотв. больше, меньше или равны атомам р-ря.

Могут быть тв. р-ры замещения некот. растворимости (Fe-Ni, Ni-Cr, Au-Ag, Ag-Ni и др.). 3 обяз. условия:

- 1) компоненты должны иметь один и тот же тип решетки
- 2) р-р-р должны отличаться не более 5-7%
- 3) одна и та же валентность

Раст. атомов раств. компонента - статистически (хаотично). Но для нек. сплавов при опред. усл. может происх. упорядочение. Такая стр-ра наз. сверхструктура с экстрем. измен. св-в.

Сплавы имеют более высокие мех. св-ва по сравн. с чистыми св-вами. С увел. раств. увел. электропроводности сплава, достигая макс при 50%/50%.

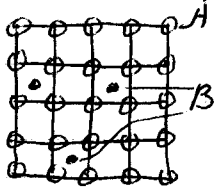
ТВ. растворы внедрения.

Атомы раств. эл-та раст. в порах крист. решетки.

$$R_{\text{окт}} = 0,41 \text{ ат}$$

$$R_{\text{тетр}} = 0,22 \text{ ат}$$

Растворитель - металлы, внедряется в поры металлы не может. Раств. эл-тов - H, N, C, B.



ТВ. р-р внедр. А(В) - обозн. а, б, г, д, е

Сталь - типичн. представитель.

Растворимость всегда ограничена. Период крист. решетки увел. с увел. растворимости.

для  $\text{Fe}_\gamma$  - ГЦК - раств. С = 2,14%

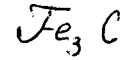
$\text{Fe}_\alpha$  - ОЦК - раств. С = 0,02%

МВ(1)

То, что не явл. ТВ. р-ром - промет. фаза. Промет. фаза имеет особ. тип крист. решетки.

Промет. фаза:

- 1) почти полн. состава
- 2) перем. состава

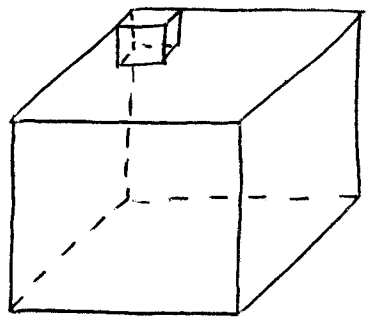


Fe - ОЦК  
C - "Алмаз"

пром. фаза  $\text{Fe}_3\text{C}$  - сложная ромб. решетка

ТВ. р-ры внедр. прочнее, чем ТВ. р-ры замещения.

Лекция №3.  
Дефекты крист. тел.  
Идеальные кристаллы.

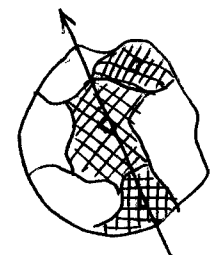


Идеальный кристалл точно повт.  
форму эл. ячейки.

Анизотропия - разность св-в по  
разным направлениям монокристалла

Реальные кристаллы.

Имеют произв. форму, поликристал-  
лические. Ориентация произвольная.



Отдельно взятый  
кристаллик в поликрист.  
теле наз. зерном.

Поликристаллич. тела квазиизотропны:  
сумма разноориентированных зерен  
усредняется.

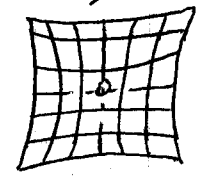
Реальные кристаллы отлич. от  
идеальных наличием дефектов.

Дефекты:

- 1) точечные (нуль-мерные)
- 2) линейные (одномерные)
- 3) поверхностные (двухмерные)
- 4) объемные

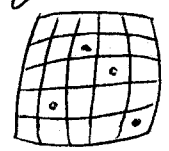
1. Точечные - вакансии и внедренные  
атомы.

Вакансии - отсутствие атома в  
крист. решетке.



$10^{10} - 10^{11} \text{ 1/см}^3$

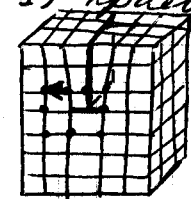
Внедренные атомы



2. Линейные дефекты - дислокации -  
ряд атомов, смещ. с положения  
равновесия в крист. решетке в  
р-те дефекта упаковки.

Дислокации:

- 1) краевые



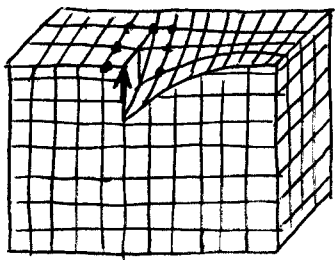
экстремальность

обози.  $\perp, \tau$

Под действием напряж. экстре-  
мальность может смещаться

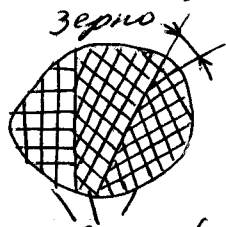
- 2) винтовые





Вектор Бюргера - замыкающий в-р при обходе дислокации по замкнутой контуре. Если в-р расп. в  $m$ -ти контура - краевая, если в-р  $\perp$   $m$ -ти - винтовая

3. Поверхностные дефекты - границы зерен, границы блоков зерен (полигона)



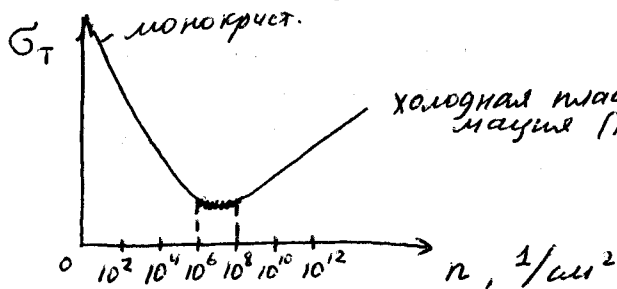
малый угол разориентации

блоки (полигона)

4. Объемные дефекты - микропоры и микротрещины

Влияние дефектов на свойства кристаллических тел

Влияние дефектов неоднородно.



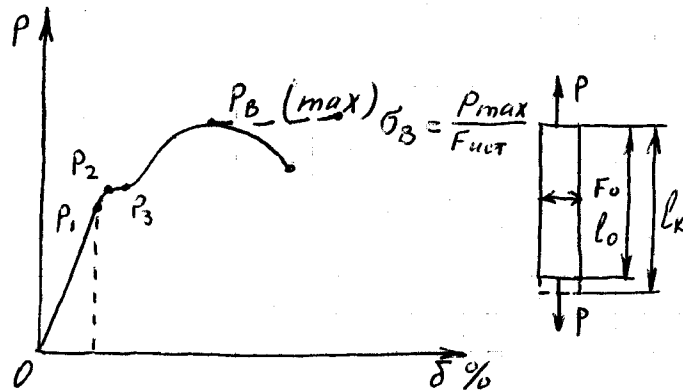
МВ(4)

9

Формирование структуры при пластич. деформации металлов и сплавов.

Пластич. деформация - изм. формы, размеров под действием касат. напряжений при сохр. объема.

Пластич. деформация моно- и поликристаллов.



$$\sigma_1 = \frac{P_1}{F_0} \text{ - предел пропорциональности}$$

$$\sigma_2 = \frac{P_2}{F_0} \text{ - предел упругости}$$

( $\sigma_{02}$  - условный предел упругости)

$$\sigma_3 = \frac{P_3}{F_0} \text{ - предел текучести}$$

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0} \text{ - условный предел прочности}$$

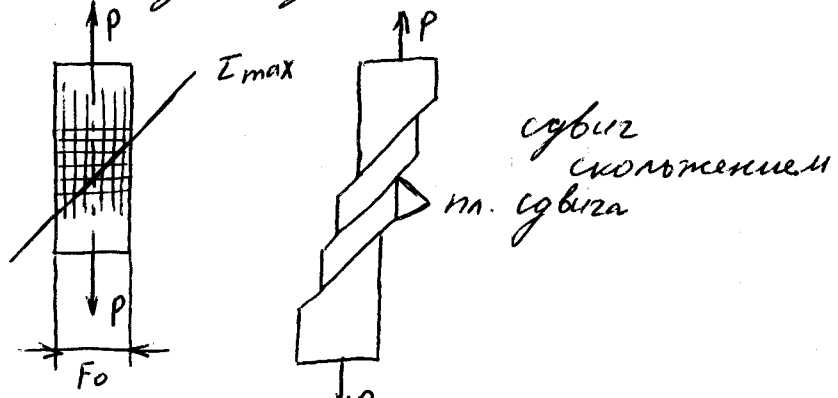
$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% \text{ - относ. удлинение при растяж.}$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\% \text{ - относ. сужение при статии}$$

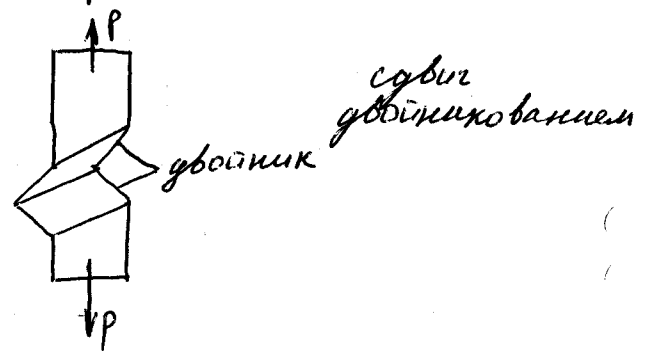
### Механизм пластич. деформации

Пластич. деф. начинается при напряжениях выше предела текучести. Может происх. 2 процесса:

- 1) сдвиг скольжением
- 2) сдвиг двойникованием



сдвиг скольжением  
пл. сдвига



сдвиг двойникованием  
двойник

### Механизм.

$\tau = 0,16 \sigma_{сдв}$  - теоретически

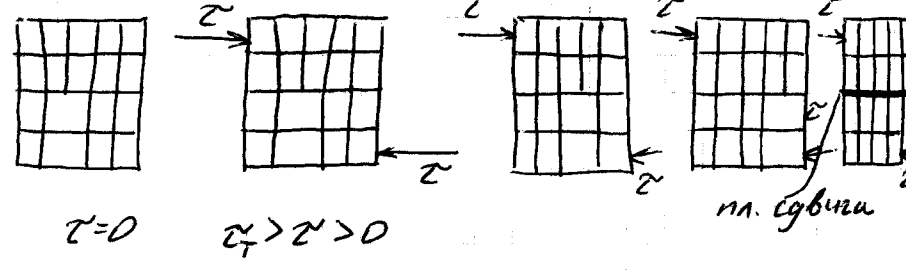
$\tau = \sigma_{сдв} \cdot 10^{-4}$  - практически

Сдвиг происх. последоват., эстафетным смещением атомов в пл-ти сдвига.

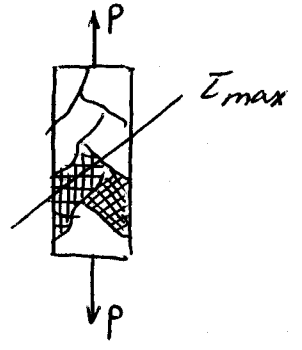
МВ(ш)

В пл-ти сдвига перемещаются дислокации.

Механизм пластич. деформации - сдвигово-дислокационный - предст. собой сдвиг одной части кристалла по отношению к другой путем перемещения дислокации в пл-ти сдвига.



### Пластич. деформация поликристаллов.

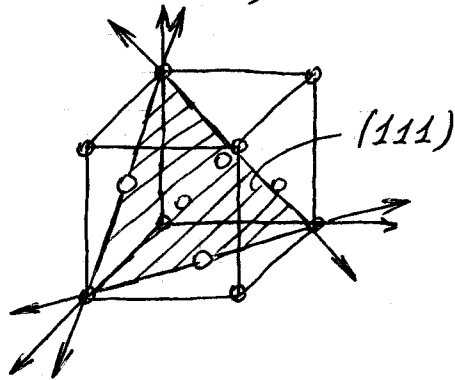


Пласт. деф. всегда идет с наим. напряжением по пл-там плотнейшей упаковки (ОУК - (110), ГУК - (111), Гекс - (0001)). Мин. расст. между атомами.

Пластичность зав. от кол-ва пл.плоти упаковки и напр. Трещин. числа ГППУ на кол-во направлений деф. наз. системой пластич. деф.

ОЦК - (110) Система скольж. 48

ГЦК - (111) Система скольж. 12



Первая деф. начнется в том зерне, где ППЧ совп. с макс. напряжением.

МВ (1)

Лекция №4.

11  
19.09

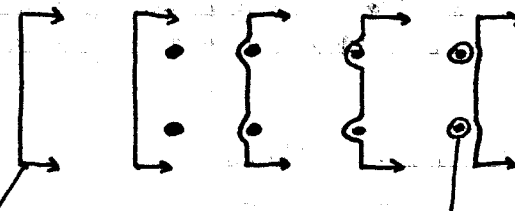
Монокристаллы более пластичны, чем поликристаллические (при одном и том же числе систем скольжения). В монокристалле дислокации перемещ. на большие раст. от края до края, в поликристалле - в пределах одного зерна.

### Пластическая деформация сплавов.

- 1) однофазные сплавы
- 2) двухфазные сплавы с крупными частицами второй фазы
- 3) двухфазные сплавы с мелкодисперсными частицами второй фазы

1) Пластичность однофазных сплавов ничем не отличается от деформации поликристаллов

2) Пластичность несколько ниже, чем у однофазных, раст. между частицами больше, и дислокации могут их обойти



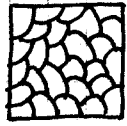
экстремальность

дислокационная петля

3) Небольшие раст. между частицами, дислокации их пропустить не могут

Изменение микроструктуры в процессе холодной пластической деформации.

$\epsilon, \%$  - степени деформации



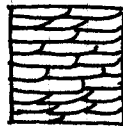
$\epsilon = 0\%$



$\epsilon = 1-2\%$



$\epsilon = 40\%$



$\epsilon = 80\%$

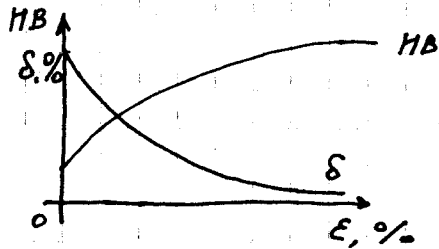
структура равноосная

появляются линии скольжения / выход дислокаций на пов-ть зерна)

зерна дробятся и вытягиваются

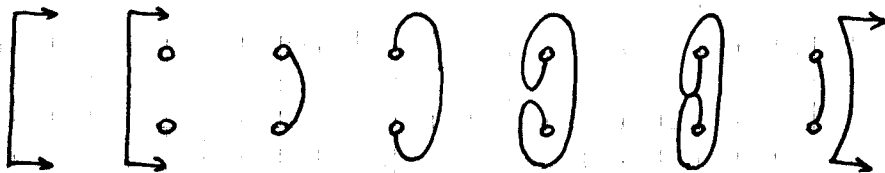
волокнистая структура (сопровождается анизотропией)

Изменение свойств в процессе холодной пластической деформации.



В процессе хол. пласт. деф. плотность дислокаций, как и др. дефектов, увеличивается, т.к. в процессе деформации генерируются новые, кол-во кот. превышает "расходование".

Источник Фрэнк - Рид:



МВ(и)

В рез-те хол. пласт. деф. твердость повышается, пластичность падает, появ. анизотропии (волокнистая структура), повышается плотность дефектов. Такое изменение св-в наз. наклепом. Дальнейшая деформация невозможна (т.к.  $\delta \rightarrow 0$ ). Для продолжения деформ. необход. снять эффект наклепа. Это можно сделать нагревом. Такой нагрев называют рекристаллизационным отжигом.

При нагреве структура будет меняться; из-за большого кол-ва дефектов состояние неустойчивое, большое кол-во свободной энергии (до 10% энергии, затрачиваемой на деформацию).

Весь процесс изменения структур делится на 2 стадии:

- 1) Возврат
- 2) рекристаллизация.
  - Возврат - самое начало нагрева; 2 стадии:
    - 1) отжиг - снимаем внутр. напряжения, микроструктура и св-ва меняются незначительно (на 10-15%)
    - 2) полигонизация (происх. не всегда) - образование полигонов при перемещении дислокаций



полигоны (субзерна)

Рекристаллизация - процесс зарождения и роста новых (недеформированных) зерен.

движущий процесс ← свободная энергия

2 стадии:

- а) первичная (рекристаллизация обработки) - полное устранение наклепа и возврат свойств до деформации
- б) собирательная - укрупнение зерен движущая сила - поверхностная энергия

Процесс рекристаллизации начинается с опред. температуры, кот. можно определить:

$$T_p = a \cdot T_{пл}$$

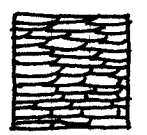
- $a = 0,1 \dots 0,2$  - для чистых металлов
- $a = 0,3 \dots 0,4$  - для технически чистых металлов
- $a = 0,5 \dots 0,6$  - для сплавов
- $a = 0,7 \dots 0,8$  - для сплавов с тугоплавкими включениями.

Для технически чистого железа:

$$a = 0,4, \quad T_{пл} = 1539^\circ C$$

$$t_p = [(1539 + 273) \cdot 0,4] - 273 = 452^\circ C$$

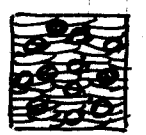
Изменение микроструктуры при нагреве.



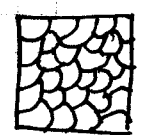
$t < t_p$



$t \geq t_p$

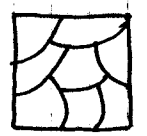


$t \geq t_p$



$t \geq t_p$

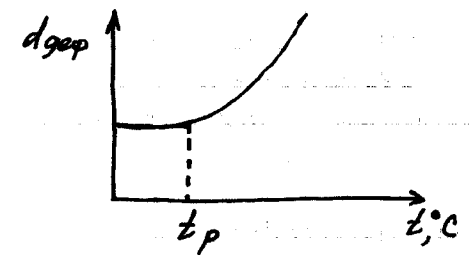
равноосная первичная рекристаллизация



$t \gg t_p$

собирательная рекристаллизация

Влияние температуры отжига на рост зерна при рекристаллизации.



Термическая обработка металлов и сплавов.

Технологическая операция, сост. из нагрева до опред. температуры, выдержки и последующего охлаждения с разл. скоростями.

Цель: изменение структуры и свойств.

Виды: отжиг, закалка, отпуск, старение, химико-термическая обработка (с целью насыщения нов-ти каким-либо элементом, например углеродом; цементация, никелирование).

## Отжиг.

Отжиг - нагрев металлов и сплавов до опред.  $t^\circ$ , выдержка с последующим медленным охлаждением вместе с печью.

Цель - получение равновесной структуры.

Отжиг - не упрочняющая термическая обработка.

Виды (в зависимости от температуры):

- 1) низкотемпературный для снятия внутренних напряжений - проводится после литья, сварки
- 2) рекристаллизационный - проводится после холодной пластич. деформации для снятия наклепа и восстановления свойств
- 3) диффузионный (высокотемпературный) - с целью выравнивания хим. состава, как правило после литья (гомогенизация).

## Закалка.

Закалка - нагрев до опред. температуры, выдержка с последующим быстрым охлаждением.

Цель: получение неравновесной неустойчивой структуры, прочност при этом может повышаться существенно и понижаться в зависимости от типа сплава.

Закалка относится к упрочняющим видам термобработки, но одна как правило не применяется. Применяется либо вместе с отпусккой, либо вместе со старением.

## Отпуск.

Отпуск - нагрев закаленного сплава, выдержка с последующим охлаждением на воздухе.

Цель: получение заданных свойств в зависимости от назначения.

Закалка + отпуск - упрочняющий вид обработки, часто применяющийся для стали.

## Старение.

Старение - нагрев закаленного сплава, выдержка опред. время и охлаждение.

Цель: упрочнение.

Закалка + старение - упрочняющая термобработка.

Применение того или иного вида термической обработки зависит от типа сплава и назначения.

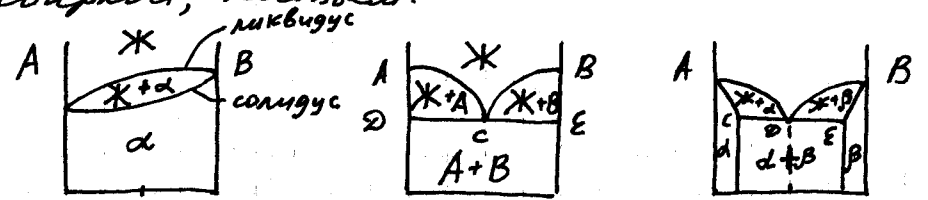
Сплавы бывают 3 типов:

I. Сплавы, не имеющие превращений в твердом состоянии.

II. Сплавы, имеющие превращения в твердом состоянии, вызванные:  
 1) переменной растворимостью компонентов друг в друге.  
 2) эвтектическими превращениями (полиморфизм)

Термическая обработка сплавов, не имеющих превращений в твердом состоянии.

Сплавы данного типа не упрочняются термообработкой. Эти сплавы хорошо обрабатываются давлением, сваркой, литьем.



100% A 0% A  
 0% B 100% B

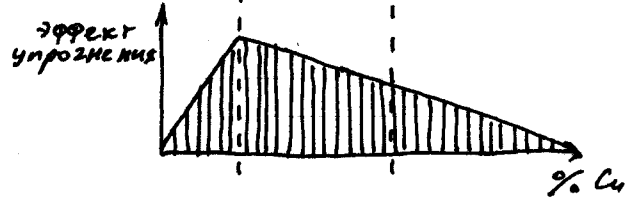
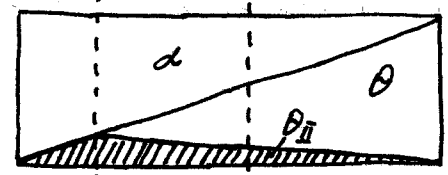
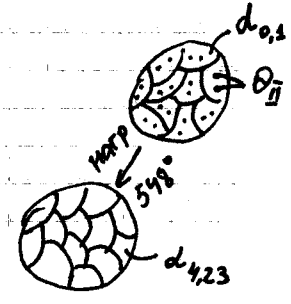
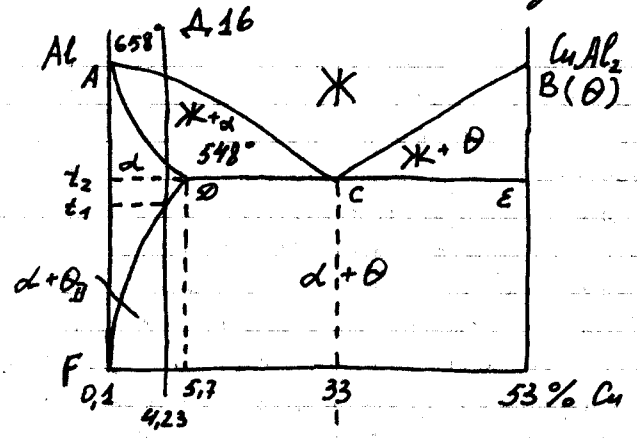
ФСЕ - линия эвтектики

- а) безграничное растворение друг в друге
- б) не растворимость
- в) на основе эл-та А

К данным сплавам применяется только отжиг.

МВ(и)

Термическая обработка сплавов с переменной растворимостью компонентов в твердом состоянии.



ФД - линия переменной растворимости компонентов в пределах от 0,1 при комнатной темп-ре до 5,7 при 548 °C

ФII - вторичная фаза

Растворимость меди в тв. р-ре и увеличивается, содержание меди в alpha повышается за счет р-рения ФII.

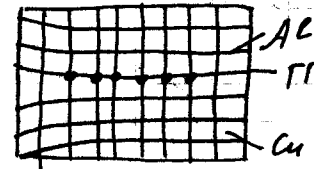
Начиная с t2 и ниже растворимость меди будет уменьшаться, это сопровождается ФII пока не 0,1% Cu при комнатной темп-ре.

Растворение  $\Theta_{II}$  при нагреве и выделение при охлаждении происходит в твердом состоянии и только путем диффузии.

Диффузионные процессы - инерционные, т.е. требуют времени для своего протекания. Поэтому если с  $t = 548^\circ$  быстро охладить (закалка), то в твердом р-ре сохранится вся ранее растворенная медь. Получится пересыщенный р-р  $\alpha$ -структура неустойчивая, метастабильная, стремящаяся к распаду на  $\alpha$  и  $\Theta_{II}$ .  
 Распад пересыщенного р-ра  $\alpha$  наз. старением, приводящим к значительному повышению прочности.

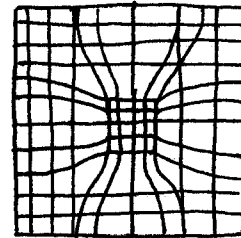
Старение при комнатной  $t^\circ$  - естественное, при повышенной - искусственное. Прочность при старении повышается за счет образования 3 типов выделений:

1) зона Гинье-Трестана (ГТ) - область кристаллической решетки, обогащенная медью



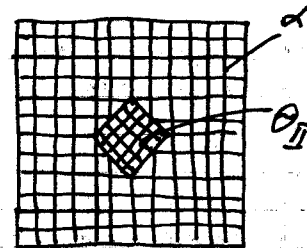
Для выделения зон ГТ нужна минимальная энергия. Приводит к повышению прочности (препятствие перемещению дислокации).

2) образование метастабильной  $\Theta$ -фазы



не имеет границ раздела

3) выделение стабильной фазы



приводит к упрочнению

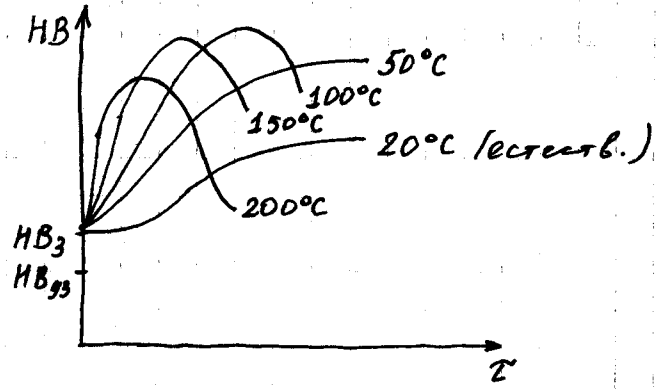


Все 3 типа выделений не явл. последовательно перх одиными оди в другой. Это конкуррующие процесы. Преимущество того или иного зависит от двух основных факторов.

- 1) степень пересыщения - чем больше, тем менее устойчив пересыщенный твердый раствор
- 2) температура старения - чем выше, тем больше выделений, требующих тах энергии.

Из трех выделений упрочняется больше тот, которого больше.

Кинетика старения.



Чем выше темп. старения, тем быстрее достигается тах.

Падение твердости (перестаривание) происходит в результате коагуляции (в рез-те укрупнения ранее выделенных частиц).

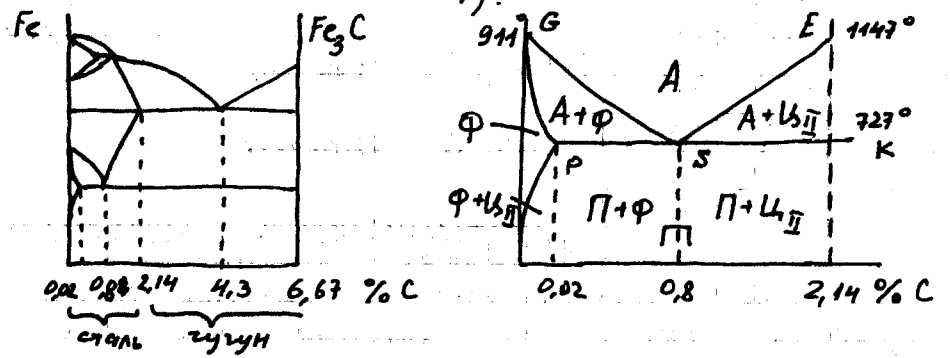
Температура старения должна быть не ниже температуры эквализации.

Стабилизация: ее цель - получить стабильную структуру, чтобы св-ва не изменялись в процессе работы детали.

Максимальную твердость стареющих сплавов можно получить термодинамической обработкой:

- закалка
- холодная пластическая деформация
- старение при  $t < t_{\text{эвтектизации}}$

Термическая обработка сплавов с эвтектическими превращениями (стали).



A - аустенит: твердый раствор углерода в Fe<sub>γ</sub>-ГЦК. Растворимость до 2,14% C при 1147°C.

φ - феррит Fe<sub>α</sub>(C). Растворимость до 0,02% C при 727°C.

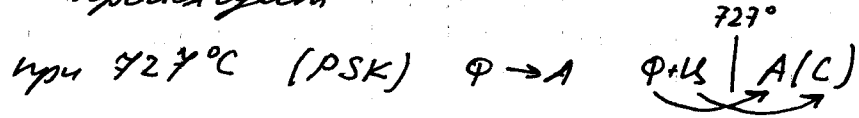
ψ - Fe<sub>3</sub>C - цементит

P, S, K - эвтектика (при термическом превращении аустенита в перлит

A<sub>3</sub> → Перлит (φ<sub>p</sub> + ψ<sub>k</sub>).

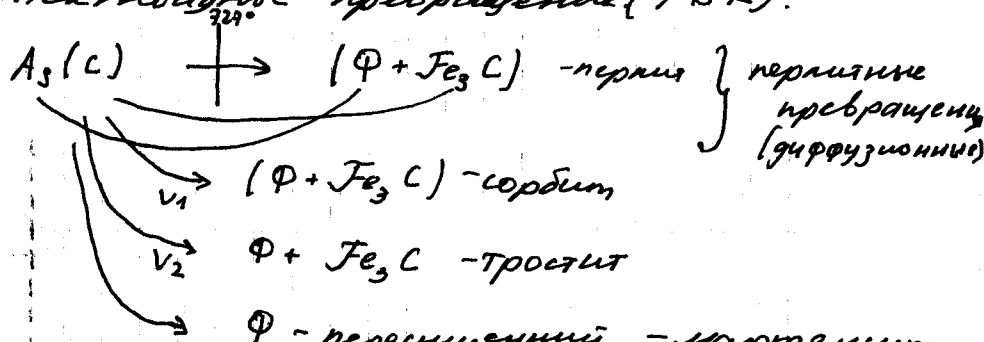
Преобразование в сталих при нагреве.

Сталь 0,8% C - перлит ( $\Phi_{0,006} + \text{Ц}$ ), до 727°C никаких превращений не происходит



2 процесса: диффузионный и полиморфный

При медленном охлаждении происходит эвтектоидное превращение (PCK).

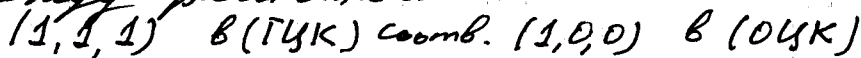


$\Phi$  - пересыщенный - мартенсит (без диффузионной подвижности, сывогового характера)

При увеличении скорости охлаждения аустенит распадается на ферритно-цементитную смесь.

$V_{кр}$  - скорость, начиная с которой диффузионные процессы не идут.

Для того, чтобы произошло мнов. сывоговое мартенситное превращение, необход. структурное соответствие между решетками.



мартенсит - пересыщенный твердый р-р углерода в  $\text{Fe}_\alpha$ , решетка - не ОЦК,

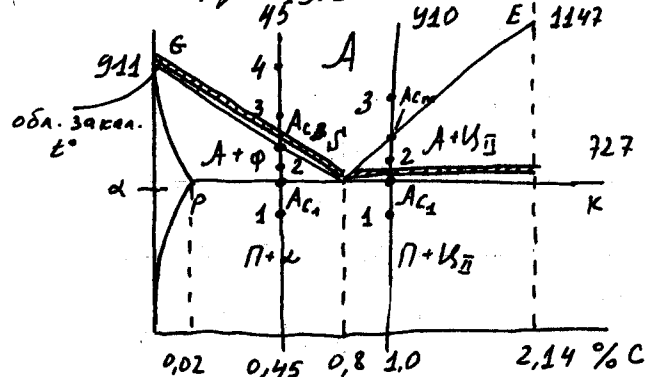
МВ(1) а тетрагональная:  $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

$\frac{c}{a} > 1$  - степень тетрагональности (характеризует степень пересыщения). Чем выше степень пересыщения, тем выше твердость мартенсита.

Лекция № 7.

3.10.

Влияние  $t^\circ$  нагрева на структуру и св-ва стали при закалке.



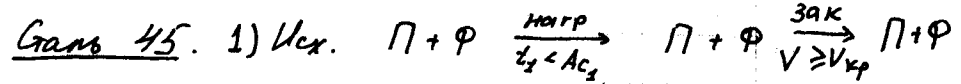
Сталь до 0,8% C - доэвтектоидные стали.

Сталь 0,8% C - эвтектоидная.

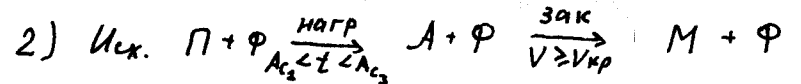
Сталь более 0,8% C - заэвтектоидные

Доэвтектоидные стали.

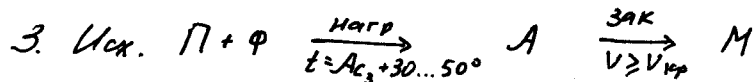
Критические точки: при нагреве  $A_{c1}, A_{c2}$ , при охлажд.  $A_{r1}, A_{r2}$



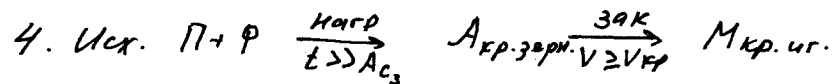
структура и свойства не меняются



неполная закалка



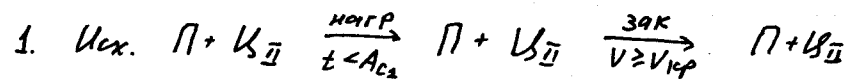
наилучшие св-ва при закалке



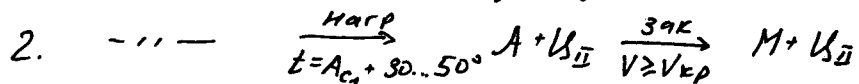
перерыв.

Вывод: оптимальная  $t^\circ$  нагр. для закалки азбтектоидных сталей равна  $t_{зак} = A_{c3} + 30 \dots 50^\circ C$

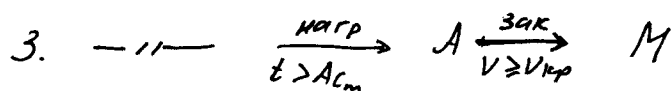
азбтектоидные стали.



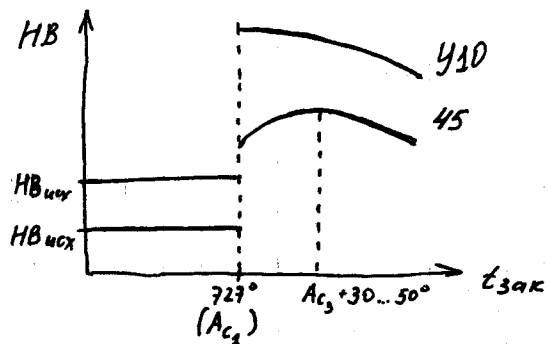
неизменн структура и св-ва



оптимальная температура



Вывод: для азбтектоидной стали  $t_{зак} = A_{c2} + 30 \dots 50^\circ C$ .



МВ(ч).

Упрочняющей терм. обраб. сталей явл. закалка с послед. отпуском.

Сущ. 3 вида отпусков (в зав-ти от  $t^\circ$  нагрева и нагреваемия)

1) Низкий отпуск - 120 - 250°C.

При низком отпуске зак. стали структура и твердость не сзм., снимается только внутр. напряжение.



2) Средний отпуск - 300 - 450°C



Твердость уменьшается, повышается пластичность.

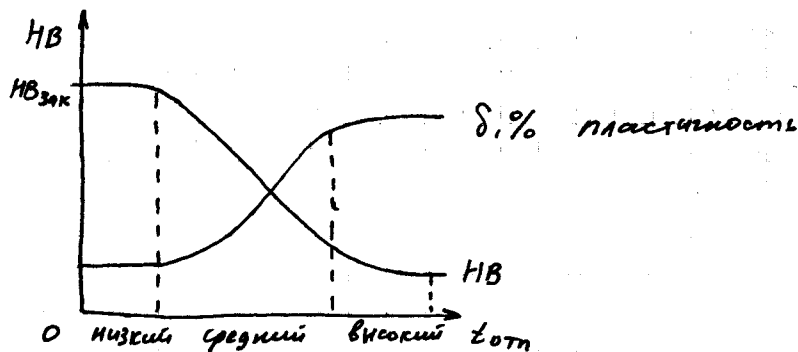
3) Высокий отпуск - 500 - 680°C



Твердость еще ниже, но пластичности еще выше.

азбтек. стали (инструментальные) - закалка + низкий отпуск.

азбтек. стали (конструктивные) - закалка + любой из 3 видов отпуски в зав-ти от нагреваемия.



## Химико-термическая обработка.

### Термообработка в к.-л. среде.

Цель: насыщение пов-ти металла или сплава к.-л. эл-том при нагреве. Получение заданных св-в, структуры в тонком поверхностном слое.

Назначение: повышение износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости и т.д. вплоть до декоративных свойств.

Название процесса по эл-ту, которым насыщают. Например: цементация (насыщение пов-ти углеродом), азотирование, нитроцементация (N+C), диффузионная металлизация (насыщение металлом): хромирование, барирование, силицирование и т.д.

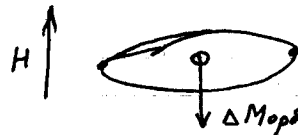
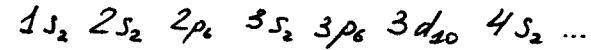
## Материалы с особыми физическими свойствами.

### ЛММ.

1. Магнитные материалы.
2. Материалы с особыми эл. св-вами (провод, полупровод, диэлектрики).
3. Материалы с особыми тепл. и упр. св-вами.

## Магнитные материалы.

Магнитные св-ва материалов определяются строением атома, т.е. магн. момент атома сост. из магн. моментов составляющих его частиц (ядра и электронов).



Магн. момент атома:

$$M_{атома} = M_{ядра} + M_{орб} + \sum M_{электр.}$$

$M_{ядра}$  - величина пренебрежимо малая, ее можно не учитывать.

$M_{орб}$  возникает за счет движения эл-нов по орбитам. Направлен против внешнего магн. поля.

$H$  - внешнее магн. поле А/м

$\Delta M_{орб}$  - диамагнитная сост. атома

$M_{электр}$  создаются за счет вращения эл-нов вокруг собств. осей и наз. спиновыми магн. моментами. Как правило имеют определяющее значение.

При помещении макрообъема во внешнее магн. поле могут быть разл. случаи.

$M$  - намагничиваемость

$$M = k_m \cdot H$$

$k_m$  - коэффициент магн. восприимчивости

В зав-ти от величины  $k_m$  все материалы делятся на диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики. Отдельная группа (вне зав-ти от  $k_m$ ) - антиферромагнетики, отг. случая кот. ферромагнетики.

Диамагнетики.

Be, Zn, Pb, Cu, Ag, Ge, Si, алмаз, стекло, полимеры, инертные газы.

$$k_m = - (1 \cdot 10^{-4} \div 1 \cdot 10^{-7}), \quad k_m < 0$$

Металлы - материалы, у кот. четное кол-во электронов. В магн. поле  $H$  каждому спиновому моменту эл-на соотв. антинаправленный, поэтому сумм. магн. момент равен 0. Диамагн. составляющая (орб. моменты) напр. против внешн. пол. Орб. моменты сум. для любог материалов.

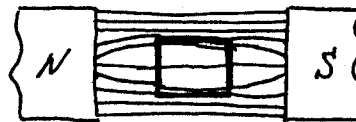
Парамагнетики.

K, Na, Al, Mo, W, Ti, Pt

$$k_m = (1 \cdot 10^{-2} \div 1 \cdot 10^{-5}), \quad k_m > 0$$

Парамагнетики имеют нечетное число эл-нов, поэтому по крайней мере 1 эл-н в атоме не скомпенсирован. В магн. поле эти спиновые моменты расп. хаотически, поэтому их сумма - величина незначительная.

диамагнетики

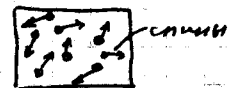


поле ослабляется

парамагнетики



поле усиливается



10.10.

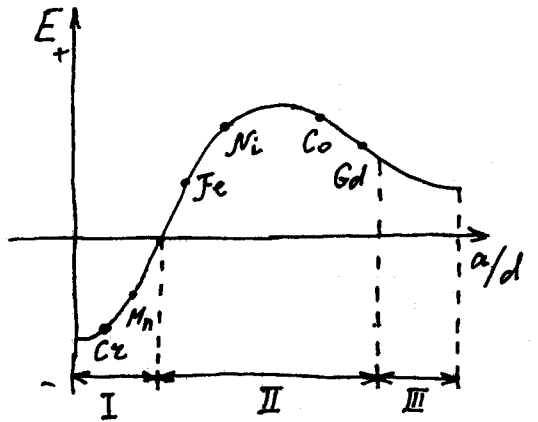
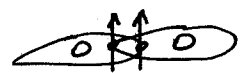
Лекция 18.

Ферромагнетики:

$k_m \gg 1$  до  $10^6$

Такой  $k_m$  объясняется энергией магн. вз-ия между атомами. Если энергия большая и положительная - это ферромагнетики.

Энергия обменного вз-ия



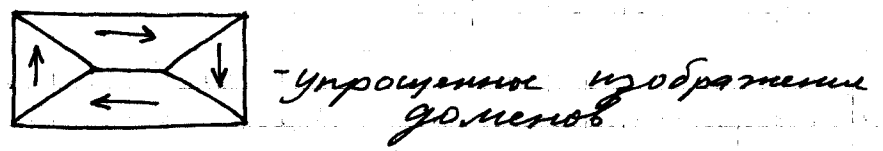
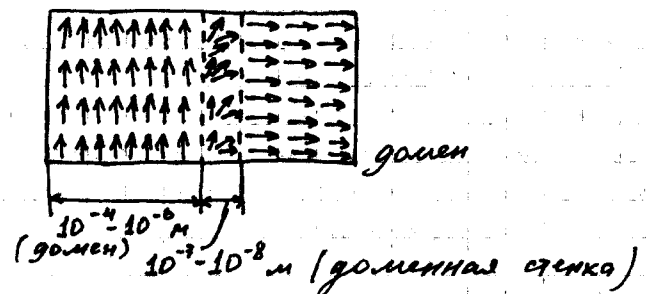
a - период решетки  
d - диаметр нескомпенсированной орбиты (негетное кал-во эл-нов).

I - антиферромагнетики (спиновые моменты противоположно направлены)  
 $\Sigma M = 0$

Частный случай антиферромагнетиков: если в одном направлении спинов больше, чем в другом, то  $\Sigma M > 0$  - ферромагнетики.

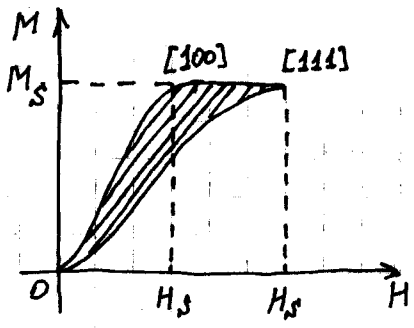
МВ(1)

II - Ферромагнетики  $k_m$  до  $10^6$  (спиновые моменты направлены в одну сторону, причем целыми областями). В результате большой энергии образ. области самопроизвольного намагничивания - домены.



Доменная стенка может смещаться под действием внешнего магн. поля. При нагревании ферромагнетиков увелич. амплитуда колебаний атомов, увелич. разориентация спиновых моментов. При опред.  $t^\circ$  они будут расположены хаотически в пределах одного домена парамагнетик. Эта  $t^\circ$  наз.  $\theta$ -точкой Кюри.

Намагничивание монокристалла ферромагнетика проис. с разл. затратами энергии по разным направлениям.



где  $M_s$  - намагниченность насыщения  
 $H_s$  - поле насыщения  
 Разность работ наитруднейшего и  
 наимегчайшего направления намагни-  
 зивания наз. константой кристаллографной  
 магнитной анизотропии (K).

$$K_{Fe} = 4,2 \cdot 10^4 \frac{Дж}{м^3}$$

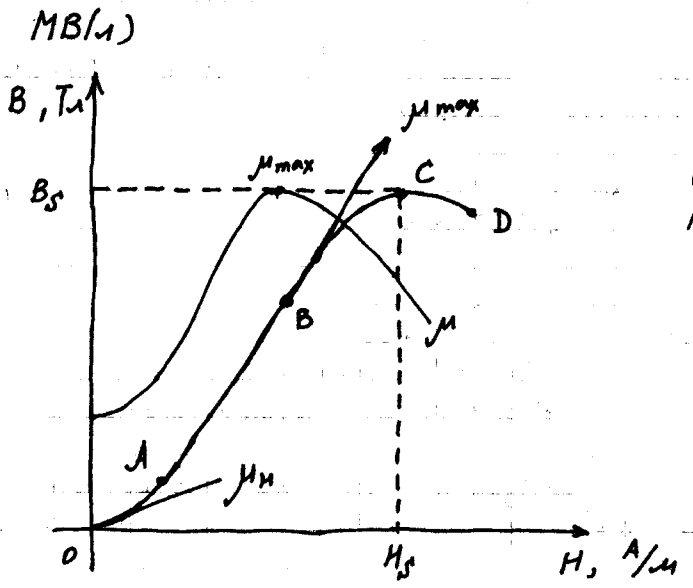
Эта разность пропорц. площади.  
 Поликристаллические ферромагнетики  
 квазиизотропны (микроизотропны)  
 из-за произв. ориентации отдельных  
 зерен кристаллов.

III - область парамагнетиков

Ферромагнетики.

Процесс намагничивания и  
 перемагничивания ферромагнетиков.  
 Магнитные характеристики.

Намагничивание.



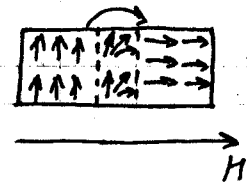
C - max  
 $H_s$  - поле насыщения

H - внешнее магн. поле  
 B - магн. индукция - плотность  
 магн. потока внутри материала

$$B = \mu_0 (M + H)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Гн}{м}$$

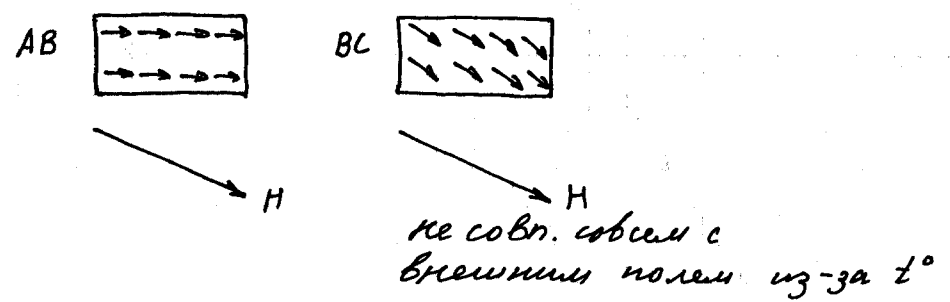
Участок CA: индукция появляется  
 за счет упругого смещения доменной  
 стенки.



При снятии внешнего магн.  
 поля стенка возвращается в прежнее  
 положение.

Участок AB: необратимое смещение  
 доменной стенки. Это самый  
 интенсивный участок.

Участок BC - поворот векторов вдоль внешнего магн. поля.



Участок CD - доворот до совпадения векторов с вектором внешнего магн. поля.

OC - техн. намагничивание  
CD - истинное намагничивание или гистерезис.

В области техн. намагничивания OC проис. лин. изменение ферромагнетика при сохранении постоянного объема. Линеиная магнитострикция - удлинение.

$\lambda = \frac{V_k - V_0}{V_0}$  - коэф. лин. магнитострикции

На участке CD проис. изменение объема. Это тоже магнитострикция, кот. наз. объемной.

$\lambda_v = \frac{V_k - V_0}{V_0}$  - коэф. объемн. магнитострикции

$\lambda$  при  $H \leq H_s$

$\lambda_s$  при  $H > H_s$

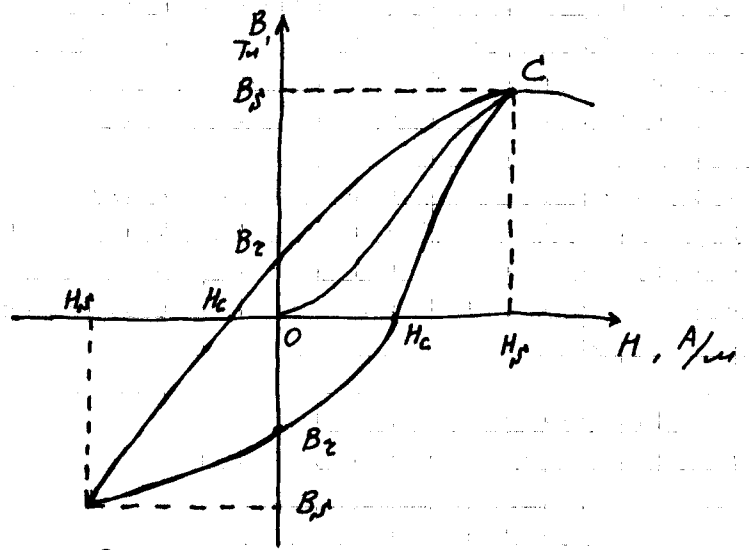
MB(ч)

$\mu$  показывает интенсивность возрастания индукции

$\mu = \frac{B}{H}$  - коэф. магн. проницаемости

При поле  $H=0$   $\mu_n$ .

Перемагничивание ферромагнетика.



При  $H=0$  магн. индукция  $B \neq 0$ ,  $B = B_z$  - остаточная магн. индукция.

$H_c$  - коэрцитивная сила - величина внешн. магн. поля, затраченная на размагничивание ферромагнетика  $B=0$ .

Величина коэрц. сил  $\sim$  дефектам строения в структуре.

Прямая намагничивание OC - первичное намагничивание - она не повторяется. Этим перемагничивание идет по контуру - по петле. Это петля Гистерезиса



Расход - работа, затраченная на перемагничивание ~ площади внутри петли Гистерезиса, наз. потерями на перемагничивании.

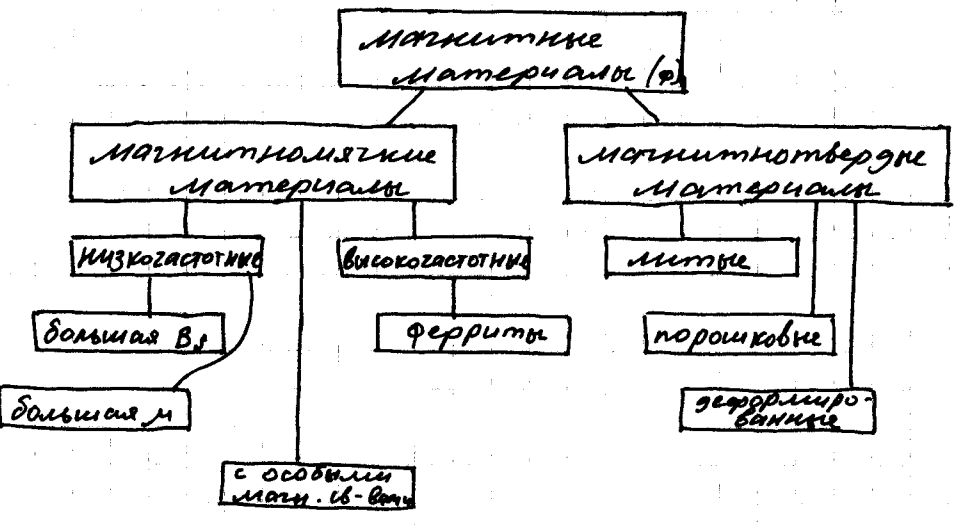
Работа на перемагнич. тем меньше, чем уже петля, тем меньше коэф. сила, т.е. тем меньше дефектов.

Все магн. хар-ки делится на 2 группы:

1) структурнонезависительные:  $M_s, \lambda_s, B_s, K, \theta$  зависят только от хим. состава ферромагнетика. Изменением структуры их изменить нельзя.

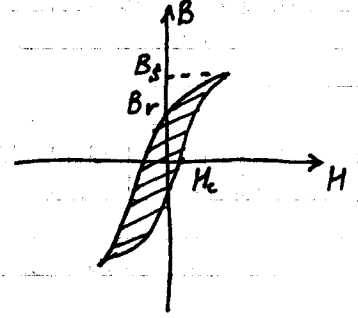
2) структурнозависительные:  $M, H_c, B_r, H_s$ . Они зависят и от состава, и от структуры. Их можно изменить изменением структуры.

### Классификация магнитных материалов

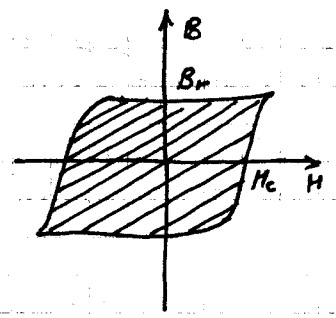


Магнитные материалы (ферромагнетики) делят на магнитотвердые и магнитномягкие по величине коэрцитивной силы. Работают на перемагничивание при разл. частотах: от 1-2 Гц до 1000 МГц

Магнитотвердые материалы как правило служат для удерж. магнитов; если перемагнитить, то высокочастотные. Намагнич. в сильных полях в пределах 500-1000 А/м.



Кривая Гистерезиса (петля) для магнитномягкого материала



Кривая Гистерезиса (петля) для магнитотвердого материала

## Магнитные материалы

Коэрцитивная сила  $\sim 100 \frac{A}{M}$ .

Плотность насыщения  $\sim 5 \cdot 10^4 \frac{A}{M}$ .

Высокая магн. проницаемость:  
 $\mu_n = 30 \dots 50 \frac{MГН}{M}$ ,  $\mu_{max} = 300 \frac{MГН}{M}$

При повышении частоты перемагничивания возникает 3 вида потерь энергии:

1. Потери на перемагничивании пропорциональны площади петли гистерезиса, для магнитных материалов невелики.
2. Тепловые потери, обусловленные появлением вихревых токов Фуко

$$\rho = \frac{A \cdot B_m^2 f^2 d^2}{\rho} \frac{Вт}{кг} - \text{тепл. потери}$$

A - коэффициент

$B_m$  - амплитуда магн. индукции

f - частота перемагничивания (Гц)

d - толщина ферромагнетика (м)

$\rho$  - удельное сопротивление (Ом·м)

$$\rho = \frac{R \cdot l}{S}$$

3. Потери, возникающие при высоких частотах. Объясняются тем, что при сверхвысоких частотах магн. индукция по фазе отстает от напряженности внешнего магн. поля. Это приводит к тому, что  $\mu = \mu_1 + i \mu_2$ .

MB(и)

$\tan \delta = \frac{\mu_2}{\mu_1}$  - потери на перемагничив. при выс. частотах

$\uparrow f \rightarrow \uparrow \mu_2, \downarrow \mu_1$

$\tan \delta \leq 0,1$  - допустимые потери

По величине  $\rho$  и  $\tan \delta$  магнитные материалы делят на 2 вида:

- низкочастотные
- высокочастотные.

## Низкочастотные

магнитные материалы.

Их делят на 2 группы:

- низк. магнитные материалы с большой индукцией  $B_s$
- низк. магнитные материалы с высокой магн. проницаемостью  $\mu$ .

И. м. м. с большой индукцией насыщения  $B_s$ .

Применяются в магнитопроводах с частотой до 400 Гц.

К ним относят:

- 1) Железо разл. степеней чистоты
- 2) Нелегированные электротехнические стали
- 3) Легированные электротехнические стали.

Железо применяется для изготовления аппаратуры с частотой  $f = 1-2 \dots 50$  Гц.

У железа макс. высокая индукция насыщения  $B_s$  до 2,5 Тл.

	% C	$H_c$ , А/м	$B_s$ , Тл
1. Карбоцидное железо	< 0,01	6,4	
2. Электролитическое железо + вакуумный переплав	0,01 - 0,015	7,2	$\leq 2,5$
3. Электролитическое железо	0,02	28	
4. Технически чистое железо	до 0,04	64	

Нелегированные электротехнические стали.

Применяются как железо: для магнитопроводов.

Марки: 10895, 10864, 10832  
20895, 20864, 20832

- 1 - горячекатанная лист. сталь
- 2 - холоднокатанная лист. сталь
- 0 - нет легированных эл-тов, заметно влияющих на св-ва ( $B_i$  - < 0,04%)
- 8 - код (цифра) коэрцитивной силы, т.е. данная марка с гарантированной коэрц. силой
- 2 пош. цифра - величина коэрц. силы, А/м.

У железа, и легир. стали имеют общий недостаток - малое электро-сопротивление, это приводит к большим потерям. Поэтому частота для них ограничена 50 Гц.

Для расширения диапазона частоты необходимо повысить  $\rho$ . Это возможно путем легирования кремнием. При этом 1% кремний повышает  $\rho$  на 0,52 мкОм/м. ( $\rho$  железа и легир. сталей < 0,1 мкОм/м). Отсюда возникает класс легированных электротехнических сталей.

Применение: сердечники трансформаторов, динamosы, генераторы и т.д. при частотах 50 - 400 Гц.

Как правило листовые. Имеют существенный недостаток: легирование  $B_i$  повышает хрупкость.

Горячекатанная лист. изотропная			
Марка	d, мм	$R_{1.5/50}$ , кг	$B_s$ , Тл
1311	0,50	5,1	1,48
1411	0,50	4,4	1,48
1511	0,50	3,5	1,45
Холоднокатанная изотропная			
2011	0,65	9,0	1,6
2111	0,65	10,0	1,6
2211	0,65	7,0	1,5

Низкоуглеродистое аморфное

3411	0,5	2,4	1,7
3416	0,3	0,23	1,8

Обозначения:

- 1 - ГК
- 2 - ХК И
- 3 - ХК А

Вторая цифра - содержание Ni:

- 0 - менее 0,4%
- 1 - 0,4 - 0,8%
- 2 - 0,8 - 1,8%
- 3 - 1,8 - 2,8%
- 4 - 2,8 - 3,8%
- 5 - 3,8 - 4,8%
- 4,8% - предел

Третья цифра -

- 1 - индекс (код) потерь  $\frac{BT}{кг}$   $P_{1,5/50}$  (при индукции 1,5 Тл и частоте 50 Гц)

Четвертая цифра - больше индекс потерь (чем ~~меньше~~, тем меньше потери).

50KΦ2 - сплав Fe-Co-V  
48% 50% 2%

$B_s = 2,3 \text{ Тл}$

$B_s$  до 3,0 Тл у редкоземельных металлов, это связано со строением атома.

МВ(ч)

Низкоуглеродистые магнитные материалы с высокой  $\mu$ .

Намагничиваются в слабом поле:  
 $H_s \leq 100 \text{ А/м}$ .

Имеют очень высокую магн. проницаемость.

Применение: радиотехника, телевидение.

К ним относ. 2 группы сплавов:

- 1) Перманол (Fe-Ni)
- 2) Альсифер (Fe-Al-Ni)

Перманол.

Содержит от 45% до 83% Ni.

Р больше, чем у железа. Очень пластичные сплавы, это позволяет изгот. лист толщиной несколько мкм.

Недостатки перманолов - высокая чувствительность к внешним магн. полям.  $B = 5 \text{ МТл}$  снижает  $\mu$  в 5 раз и повышает критическую силу  $H_c$  в 2 раза.

В зав-ти от содержания Ni меняются св-ва перманолов. Их делят на:

- низоникелевые
- высоконикелевые

Низоникелевые перманолы (45 - 50% Ni).

MB(и)

Лекция №10.

Пермаплой с прямоуг. сетлей Густерезиса.

Применение: эл. техника, реле, перемножители.

2 способа получения прямоуг. сетли:

1. Холодная пласт. деформ. при кот. образ. кристаллограф. <sup>Текстура</sup> ~~структура~~, т.е. направленности плоскостей. Направление труднейшего и легчайшего намагничивания. Намагни. в легком напр. создает прямоуг. сетлю Густерезиса. Способ годится и для металла, и для сплава.
2. Термоманнитная обработка - нагрев и подл. закалка в сильном магн. поле, создает кристаллограф. магн. текстуру. Данным методом годится только для сплавов и непригоден для чистых Fe, Ni, Co.

Кэф. прямоуоальности сетли:

$$\alpha = \frac{B_z}{B_s}$$

При качественной обработке  $\alpha = 0,9 \div 0,93$ .

Пермаплой, обр. этими способами приобр. прямоуг. сетлю и изменяют марку.

50Н  $\xrightarrow{\text{ХТФ}}$  50НП  
 65Н  $\xrightarrow{\text{терм. магн.}}$  65НП  
 79НМ  $\xrightarrow{\text{терм. магн.}}$  79НМП

Марка	$M_n, \frac{MГН}{M}$	$M_{max}, \frac{MГН}{M}$	$B_s, Tл$
45Н	2,9	31	1,5
50Н	3,8	32	1,5

Недостаток - низкое  $\rho$ .  
Легировуют эл-топми: Mo, Cu, Ce, Si.

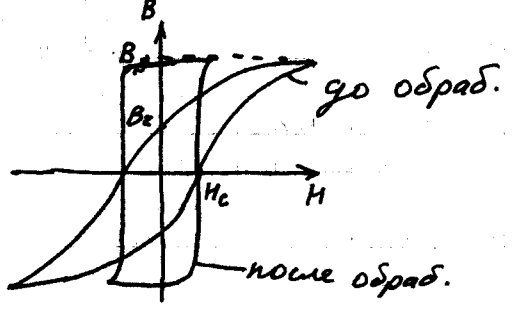
50НХС - легированный Ce и Si

Высоконикелевые пермаплой (79-83% Ni)

79НМ	25	190	0,75
81НМ	28	300	0,50

С увеличением сог. Ni  $\mu$  возрастает. При этом уменьшается  $B_s$ .

Пермаплой с прямоуоальной сетлей Густерезиса.



Альсидер Fe-Al-Si (Al 5,4%, Si 9,6%)

Высокая магн. проницаемость.  
 $K=0, \lambda_s=0.$

Преимущество: альсидер дешевле перманганов.  
 Недостаток: хрупкость, обработка только литье.

Высокочастотные магнитные материалы.

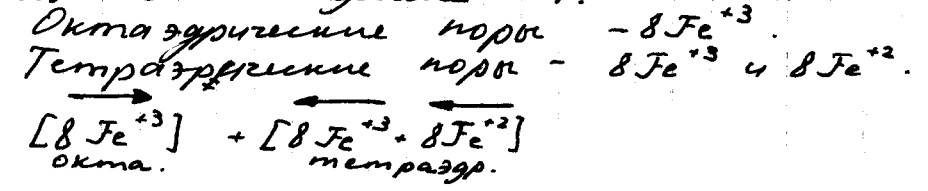
Применение: радиотехника при радиогаммах, высоких и сверхвысоких частотах до 1000 МГц и более.

Осн. вид потерь - тепловые потери.

$$\rho = \frac{A B_m^2 f^2 d^2}{\rho} \frac{Вт}{кг}$$

Уменьшение потерь - выбор материала с высокой электросопротивленем. Все материалы с металлик. связью не годятся. Подходят лишь материалы с ионик. типом связи.  
 Оксиды:  $\rho \geq 10^{22} \text{ Ом}\cdot\text{м}.$

МВ(ч) Природный высококач. магнитолегк. материал явл. магнетит:  $Fe_3O_4$ . :  $FeO$  и  $Fe_2O_3$  ( $Fe^{2+}O \cdot Fe^{3+}_2O_3$ ).  
 Ионный тип связи, решетка типа "шпинель" построена 32 ионами кислорода, а ионы железа нах. в порах гатной крист. решетки. Ионов Fe в сумме 24.



Данный тип относится к антиферромагнетикам с магн. моментом больше нуля (ферримагнетики), ферриты.

В результате большой асимм. термич. обменного вз-ия спиновые магн. моменты в октаэдр. порах антипараллельны спиновым магн. моментам в тетраэдр. порах, но сумм. магн. момент не равен 0, т.к. в тетраэдр. порах состоит в 2 раза больше.

Ионы 3-х валентного железа компенсируют друг друга, сумм. магн. момент опред. спиновыми магн. моментами 2-х валентного железа.

Изгот. ферриты прессованием и спеканием при высокой  $t^\circ$  порошков оксидов  $ZnO, MnO, NiO, BaO, CoO$  с добавлением оксидов др. 2-х-вал. металлов с целью повысить магн. момент и электросопротивление.

Св-ва ферритов зависят от хим. состава,  $t^\circ$  и условий прессования, кол-ва пор.

Предельная частота:

$t_d \delta \leq 0,1$  ( для ответственных случаев  $t_d \delta \leq 0,02$  )

Ферриты для радиочастот.

Предельная частота - до 200 МГц.

2 типа:

- 1. Mn-Zn
- 2. Ni-Zn

Низкочастотные ферриты.

- 1. Mn-Zn:

$f < 3 \text{ МГц}$  ,  $\rho = 10^3 - 10^5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$

- а) без добавок  
4000 нм , 1000 нм

4000 - начальная магн. прониц. мн  
 H - низкочастотный  
 M - марганец-цинковый

- б) с добавками (CoO)  
1000 нмЗ

3 - с добавками

- 2. Ni-Zn:

$f \leq 200 \text{ МГц}$  ,  $\rho = 10^8 - 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{см}$

- а) без добавок  
1000 нм , 400 нм  $f \leq 2 \text{ МГц}$

- б) с добавками  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (избыток)  
300 нм , 600 нм  $f \leq 100 \text{ МГц}$

МВ(и)

- в) с добавками CoO  
100 ВЧ , 30 ВЧ2  $f \geq 200 \text{ МГц}$

H - никель-цинковый  
 ВЧ - высокочастотный

Ферриты для военных частот.

Частота - 200 - 800 МГц.

Хим. состав :  $\text{Li}_2\text{O} \cdot 5\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Решетка типа "чипинель".

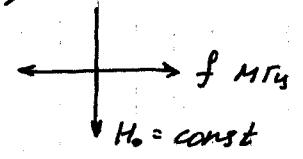
$\rho = 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

$(\text{Ba Co})\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  - решетка ГТУ.

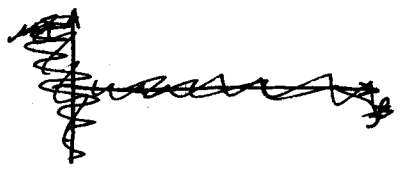
Ферриты для сверхвысоких частот.

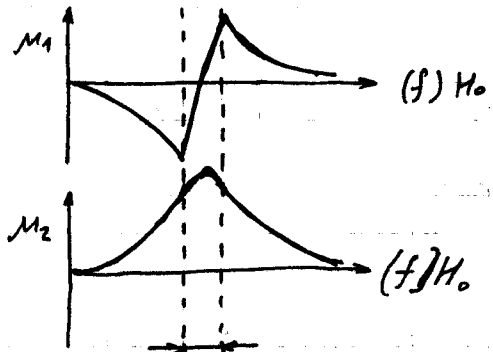
Частота - более 800 МГц.

Появляются потери ферромагнитного резонанса. Частота более 800 МГц совпадает с частотой прецессии электрона.



$t_d \delta = \frac{M_2}{M_1}$





$\Delta H_0$  - интервал, в кот. сильно возрастают потери

Ферриты СВЧ

1С41, 3С44

1,3 - длина волны в см

$\Delta H_0 = 40 \frac{кА}{м}$  при  $f = 9200 МГц$

30С41, 80С44

$\Delta H_0 = 12 \frac{кА}{м}$  при  $f = 3000 МГц$

$\Delta H_0$  как в прямой зависимости от дефектности, тем "идеальнее" решетка, тем меньше потери.

Для СВЧ применяются ферриты - гранаты (ферриты со структурной императой граната).

Их состав:  $3Me_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$   
 Me - редкоземельные металлы (Sm, Gd, Jt)  
 Структура монокристаллическая.

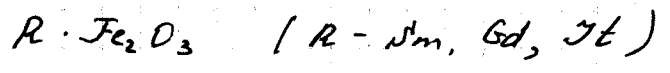
08КГ

0,8 см - длина волны  
 Г - гранат

МВ(а)

Орторомбиты.

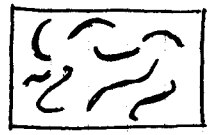
Орторомбитическая решетка:  
 $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



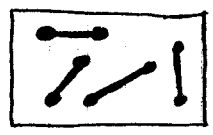
При опред. частоте в тонких метал. пластинках  $\sim 30 \mu m$  в  $\perp$  магн. поле возникает несколько типов магн. моментов вплоть до цилиндрических.



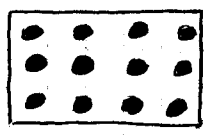
Типы доменов



лабиринт



полосчатые



цилиндрические магн. домены (ЦМД)

ЦМД характерны высокой плотностью информации.

Ферриты с прямоугол. петлей Гистерезиса.



Прямоуг. петля появ. при спечении и охлажд. феррита в магн. поле.

10 BT, 30 BT, 100 BT

$\alpha = \frac{B_z}{B_s} = 0,9 \div 0,93$



BT - вычислит. техника

10, 30, 100 - коэрцитивная сила,  $\frac{A}{м}$ .

Магнитномягкие материалы со спец. магн. св-вами.

Магнитные материалы с большим коэф. объемной магнитострикции  $\lambda_s$ .

Применение: источники ультразвука, головки звукозаписи, волноводы.

Никель.

$$\lambda_s = -37 \cdot 10^{-6}$$

Недостаток - низкое сопротивление  $\rho$  этого  $N_i$ .

Fe + 13% Al

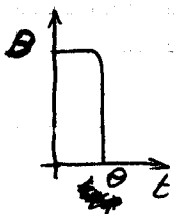
$$\lambda_s = 45 \cdot 10^{-6}$$

Fe + 50% Co :  $\lambda_s = 70 \cdot 10^{-6}$

Fe + Pt :  $\lambda_s = 204 \cdot 10^{-6}$

Терромагнитные сплавы.

Ферромагнетики с резкой зав-тью точки Кюри от  $t^\circ$  нагрева.

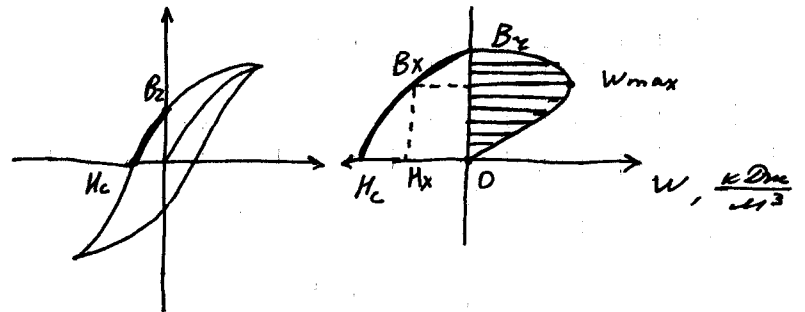


Fe + 30-35% Ni  
 $\theta = 100^\circ C$

Магнитотвердые материалы.

Применение: узлы постоянных магнитов.

Намагничиваются в сильных полях:  
 $H_s > 1000 \frac{KA}{м}$   
 $H_c \leq 560 \frac{KA}{м}$   
 $B_r = 0.5 \div 1.0 Тл$



Удельная магнитная мощность (энергия):

$$W = \frac{BH}{2} \quad \frac{кДж}{м^3}$$

$$B=0 \Rightarrow W=0$$

$$H=0 \Rightarrow W=0$$

Макс. величина магн. мощности зависит от 3 факторов:  $B_r$ ,  $H_c$  и коэф-та выпуклости кривой размагничиваемости.

Размагничивание, так же как и намагничивание, начинается со смещения доменной стенки (самого левого процесса). Чтобы устранить легкое размагничивание, необход. мелкокристаллич. структура, чтобы размер зерна соотв. размеру

одного домена. В этом случае доменной стенки не будет, а ее роль будет выполнять граница между зернами. Кроме того, намагнич и рывмаги. не имеет анизотропии.

Величина одного домена опред. по К, О, М<sub>д</sub>; для Fe d = 0,05 мкм.

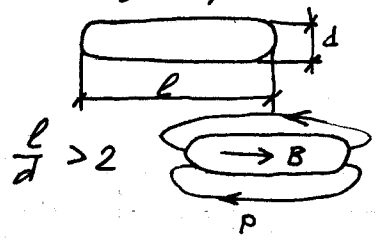
Легче намагничивать в направлении труднейшего намагничивания, H<sub>c</sub> больше.

Анизотропии (виды):

1. Кристаллографическая (К) - зав-ть от строения кристаллической решетки.

- H<sub>ск</sub> для Fe - 40  $\frac{кА}{м}$
- Co - 480  $\frac{кА}{м}$
- Ni - 11  $\frac{кА}{м}$

2. Анизотропии формы



Анизотропии феррит

- H<sub>сф</sub> для Fe - 850  $\frac{кА}{м}$
- Co - 700  $\frac{кА}{м}$
- Ni - 252  $\frac{кА}{м}$

3. Магнитная ударная анизотропия - связана с H<sub>с</sub>. При небольших ударных напряжениях возникают трудности с обвешной магнито-стрикцией.

- H<sub>с2</sub> для Fe - 48  $\frac{кА}{м}$
- Co - 48  $\frac{кА}{м}$
- Ni - 320  $\frac{кА}{м}$

H<sub>c</sub> = H<sub>ск</sub> + H<sub>сф</sub> + H<sub>с2</sub>

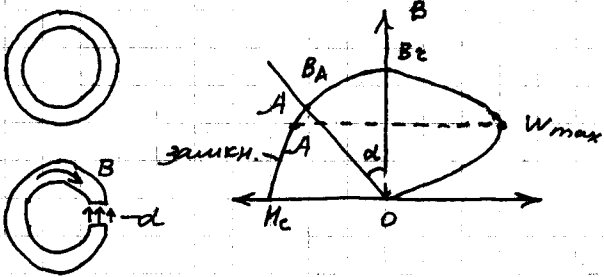
Магнитные материалы - Fe, Ni, Co.

Для сплавов 2 и более фаз:

- 1) у сплава ферромагнитная основа и неферромагнитные включения: макс. энергия будет, когда макс. кол-во ферр. основы, размер зерен кот. однодоманные неравноосной формы, а включения выполняют роль отдушенной стенки
- 2) у сплава неферр. основа (матрица) и ферр. включения: макс. мощность при макс. содерж. ферр. включения однодоманного строения и неравноосной формы.

Температурная стабильность опред. стабильность свойств при нагреве ферромагнетика.

Истории св-ва ферромагнетиков опред. на замкнутых (кольцевых) образцах.



Появляется размагничивающий фактор  $\alpha$ , кот. уменьшает  $B_z$ .

$B_A$  - катушечная магн. индукция  
A - рабочая точка магнита

Положение раб. точки A зав. от размеров, массы и межполюсного расстояния.

Темп. стабильность пост. магнитов проверяют на уменьшении  $B_A$  при нагреве до опред.  $t^\circ$ .

$$S_B = \frac{B_{A0} - B_{At}}{B_{A0} \cdot \Delta t} \cdot 100\%, \text{ где}$$

$S_B$  - темп. стабильность  $B_A$  в %  
 $B_{A0}$  - катушечная магн. индукция до нагрева  
 $B_{At}$  - " " при температуре  $t$   
 $\Delta t$  - разность температур

Темп. стабильность будет зависеть от положения точки Кюри, от строения кристалла (величина зерна) и химического состава. Чем меньше грани у доменной стенки, тем выше темп. стабильность.

Магнитотвердые материалы классифицируют по технологии получения:

- 1) литые
- 2) порошковые
- 3) деформированные

1) Литые МТМ - сплавы (Fe-Ni-Al с добавлением Si, Co, Ti, Nb)

- Обозначения литых МТМ:
- Ni - Н
  - Al - Ю
  - Si - Д
  - Co - К
  - Ti - Т
  - Nb - Б

Данные сплавы пригодны для изготовления только литых магнитов, поэтому возникают 2 трудности:

- 1) литые трудно получить однодоменные зерна. Поэтому при литье проще получить стабильную структуру
- 2) эти материалы очень хрупкие и не поддаются механ. обработке.

Высокая темп.-ра Кюри у литых, поэтому они температурно стабильны. Они применяются в акустических системах (динамики), постоянных магнитах.

Марка	$W, \frac{кДж}{м^3}$	$H_c, \frac{кА}{м}$	$B_z, T$
ЮНД4	3,6	40	0,5
ЮНД8	5,1	44	0,4
ЮНДК18	9,1	55	0,9
ЮНДК35Т5Б	18,0	96	0,75
ЮНДК35Т5БА	36,0	110	1,02 - амизотр.

2) Порошковые МТМ

Изготавливаются из ЮНДК. Их после литья измельчают в мелкодисперсный порошок, прессуют и сплавляют при 1200 °C. Можно так получить мелкозернистую структуру. Из них изгот. более мелкие постоянные магниты.

Марка	W, $\frac{кДж}{м^3}$	H <sub>c</sub> , $\frac{кА}{м}$	B <sub>r</sub> , Тл
ММК1	3	24	0,6
ММК6	5	44	↓
ММК7	10	47	
ММК11	16	118	0,7

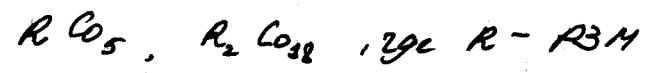
ММК - магнит металлокерамический

Магнитобердаке ферриты. Их изгот. из порошков оксидов Fe, Co, Ba. Размер зерен близкий к однодоменной.

- Ba - размер зерна ~ 1,5 мкм
- BaO · 6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - бариевые ферриты "Б"
- CoO · 6Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - кобальтовые ферриты "К"

Марка	W, $\frac{кДж}{м^3}$	H <sub>c</sub> , $\frac{кА}{м}$	B <sub>r</sub> , Тл
6 БИ40	3	40	0,2
28 БА190	14	190	↓
10 КА165	5	165	
14 КА135	7	135	0,3

МТФ явл. магнитодизэлектриками. Они явл. хорошими работниками в перим. магн. полях. Макс. магнитной мощностью благодаря порошковые магниты с РЗМ (редкоземельные металлы) - Sm, Yt, Pr.



МВ(л)

Эти фазы - промежуточные, затем их итирают до однодоменного состава. Затем берут Sm-Co сплав, расплавляют и смешивают с порошком этих промежуточных фаз. Это делается для получения монолитного (без пор) магнита.

Марка	W, $\frac{кДж}{м^3}$	H <sub>c</sub> , $\frac{кА}{м}$	B <sub>r</sub> , Тл
КС37	55	1300	0,7
КС37А	65	1000	↓
КСП37	65	800	
КСП37А	72	640	0,8

К - Co, С - Sm, последние цифры к Sm (%)  
А - анізотропний.

СП37 - Sm + Pr = 37%

3) Деформированные МТМ

Их изготавливают из пластичных Fe, Co, Ni, Mo (с добавками Si, V). Магниты изгот. из них методом пластической деформации. Изготавливаются для массивных магнитов. У них велика W.

Марка	W, $\frac{кДж}{м^3}$
Хромко 30X25K	7,7
Викаллой 50X13Ф	8,8
Кумико	6,5
Кумидре	6,7
Платинакс (78% Pr, 22% Co)	40

Ф - V (ванадий)

Самые дешевые и маломощные магниты из углеродистой стали с Cr, Co, ...

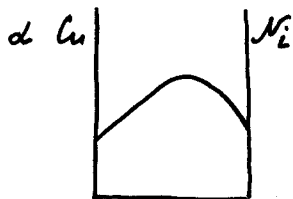
Марка	W, $\frac{KДж}{м^3}$
EX3	1,2
EX5K5	1,6
EX9K15M2	2,4

E - электротехнические магниты  
X - Cr, K - Co

Сплавы с особыми тепловыми свойствами.

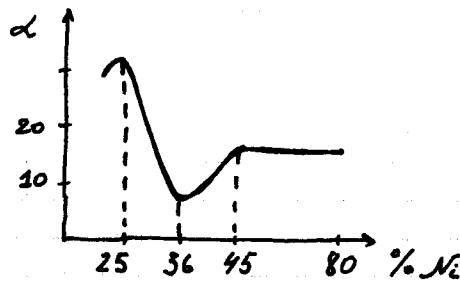
- 1) Сплавы с малым или заданным коэф-том температурного расширения. Их наз. инвары (инвариантные) - не меняют свой объем при нагревании
- 2) Сплавы с малым или заданным теплов. коэф. модуль упругости - эливары - остаются неизменными модуль упругости.

Fe-Ni (29-45% Ni) - это твердые растворы, неограниченно растворяются друг в друге.



сплавы неинвариантного типа

МВ(л)



сплавы инвариантного типа

$\alpha_{min}$  при 36% Ni  
 $\alpha_{max}$  при 25% Ni

Этот эффект имеет ферромагнитную природу и связан с большой магнитострикцией парапроцесса ( $\lambda_s$ ). Для этих материалов не применяются внешние магн. поля. Св-ва инвариантности и эливарности сохраняют при внешнем поле.

У инваров доменная структура и каждый домен самопроизвольно намагничен до насыщения - до парапроцесса, а следовательно каждый домен уже увеличен в объеме до  $\lambda_s$ . Получается, что этот объем сразу уже увеличен до  $\lambda_s$ .

Для неферромагнетика - размер:

$$A_t = A_0(1 + \alpha t), \text{ где } A_t - \text{объем при } t^\circ$$

$A_0$  - при н. темп-ре  
 $\alpha$  - коэф. темп. расшир.

Для инваров:

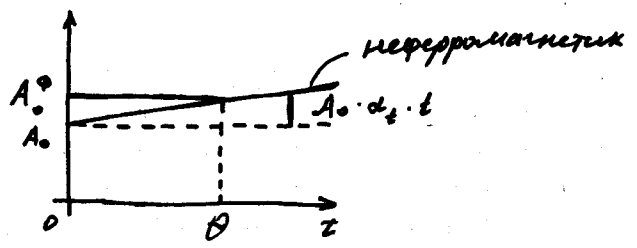
$$\alpha = \alpha_t + \Delta \quad (\Delta \sim \lambda_s)$$

$\alpha_t$  - как для неферромагн.

$A_t = A_0 (1 + (\alpha_t + \Delta) t)$  или

$A_t = A_0 + A_0 \alpha_t t + A_0 \Delta t$

С повышением  $t^\circ$   $\alpha_t > 0$ , а  $\Delta < 0$ .  
Если при нагревании  $A_0 \alpha_t$  увеличивается как у любых тела с той же интенсивностью, с кот. уменьшается  $A_0 \Delta t$ , то размер обвела остается неизменным.



Точного размера ферромагнетика узнать невозможно.

Инвар 36Н  $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$   
 $t \in (-60^\circ\text{C} \dots +100^\circ\text{C})$

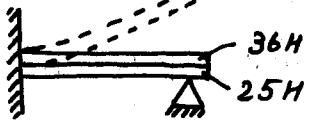
Добавка к никелю, чтобы уменьшить  $\alpha$ :  
32НКД - суперинвар (с Со и Си)  
 $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ ;  $t \in (-60^\circ\text{C} \dots +100^\circ\text{C})$   
Их применяют для герметичных вводов.

33НК  $\alpha = (32,5 \div 33,5) \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$   
 $t \in (-70^\circ\text{C} \dots +470^\circ\text{C})$

Применяется для корпусов со стеклом

29НК - Ковар  $\alpha = (28,5 \div 29,5) \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$

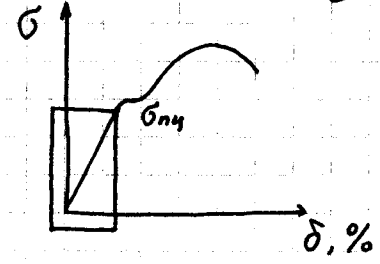
47НД  $\alpha = (46 \div 48) \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  - платина  
 $t \in (-70^\circ\text{C} \dots +470^\circ\text{C})$



Биметаллическое реле

2) сплавы с малым или заданным температурным коэффициентом модуля упругости.

Изготовление прецизионных элементов: мембраны, шрифты, датчики высот, давления, растяжки осциллографов, пружины. Модуль упругости остается неизменным или задан.

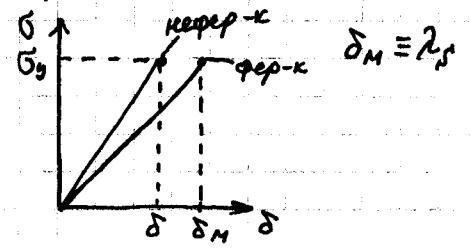


$E = \frac{\sigma_y}{\delta_y}$  - модуль упругости

С повышением  $t^\circ$  у всех сплавов, кроме элинваров,  $E$  уменьшается, т.к. увеличивается  $\delta$ .

Fe-Ni (29-45% Ni) - элинвары

Природа элинварности ферромагнитного характера и связана с большой обвемной магнитоупругой парaproцесса. Наималогибание элинвара (доменов) происходит под действием внешних напряжений, поэтому  $\lambda_s$  наз. магнитоупругой парaproцесса.



$\lambda_s$  уменьшает  $E$ .

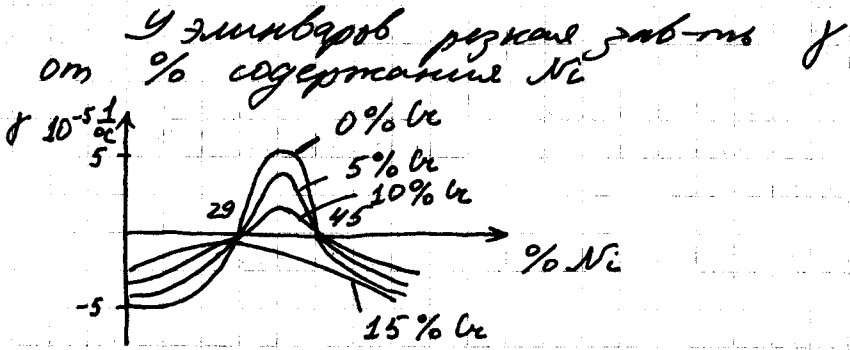
$$E_{\phi} = \frac{\sigma_y}{\delta + \delta_M} \quad E_{\phi} = E_{неф} - \Delta E$$

$$E_{\frac{1}{2}} = E_{20} (1 + \gamma t) \quad \gamma - \text{тепл. коэф. модуля упр.}$$

$$E_{\phi} = \frac{\sigma_y}{\delta + \delta_M}$$

С повышением  $t^{\circ}$   $\delta$  увел. (тепл. расширение) это приводит к уменьшению  $E$ , а  $\delta_M$  уменьшается,  $E$  возрастает. Если эти изменения идут с одной интенсивностью, то  $E = const$ .

36H



Получить сплав с заданным  $\gamma$  очень сложно.

Экстремумы можно сгладить добавкой Ce.

36HX (36% Ni, 12% Ce) - лучший состав

$$\gamma \approx 0 \frac{1}{^{\circ}C}$$

Но этот сплав имеет низкую точку Кюра и низкую механ. прочность.

MB(1)

Упрочение не удается (термообработкой), т.к. нет фазовых превращений. Чтобы создать такую возможность, сплав легируют Ti и Al, имеющими перем. растворимость в тв. р-ре, это дает возможность упрочнить закалкой + старением.

36HXTЮ - более прочный сплав.

Но в рез-те легирования понижается точка Кюра и эливар перестает быть ферромагнетиком. Чтобы повысить точку Кюра, увел. кол-во Ni и снижают кол-во Ce.

42HXTЮ Ce - 5-6%, Ti - 2-3%,  
44HXTЮ Al - 0.5-1.0%

$$\gamma = 1.5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}C}, \quad \theta \text{ до } 100^{\circ}C$$

Во внешнем магн. поле св-ва илварности и эливарности пропадают.

Материалы с особыми электрическими свойствами.

В зав-ти от величины удельного электросопротивления  $\rho$  все материалы с точки зрения эл. свойств делят на:

$\rho = 10^{-8} - 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  - проводники

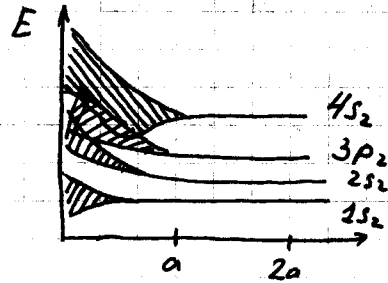
$\rho = 10^{-5} - 10^2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  - полупроводники

$\rho = 10^8 - 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$  - диэлектрики

# Теория электрической проводимости.

Деление на проводники, полу-проводники и диэлектрики связано с электронным строением и б-цм эл. поля решетки с носителями заряда.

$1s_2 2s_2 2p_6 3s_2 3p_6 3d_{10} 4s_2 \dots$



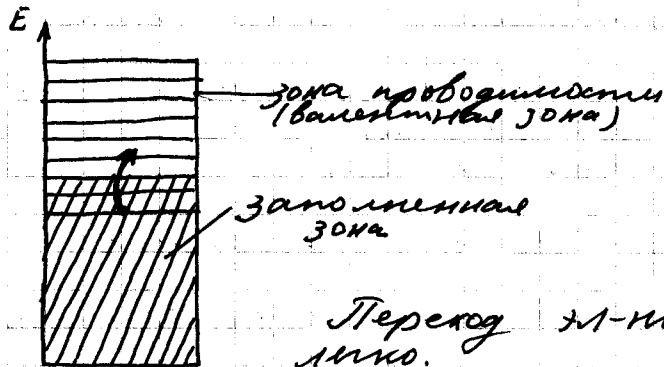
Вблизи ядра энерг. линии расщепляются. Перекрываются энерг. области.

Cu, Ag, Au, Al, Ni

Fe, Co - переходные металлы. Не заполнен 3d подуровень, p несколько выше.

Эл. проводимость зависит от типа связи в крист. решетке.

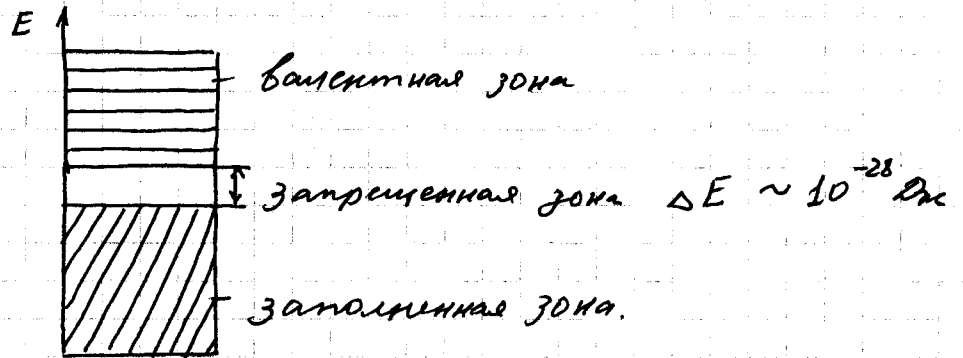
## Металлический тип связи.



Переход эл-нов осущ. легко.

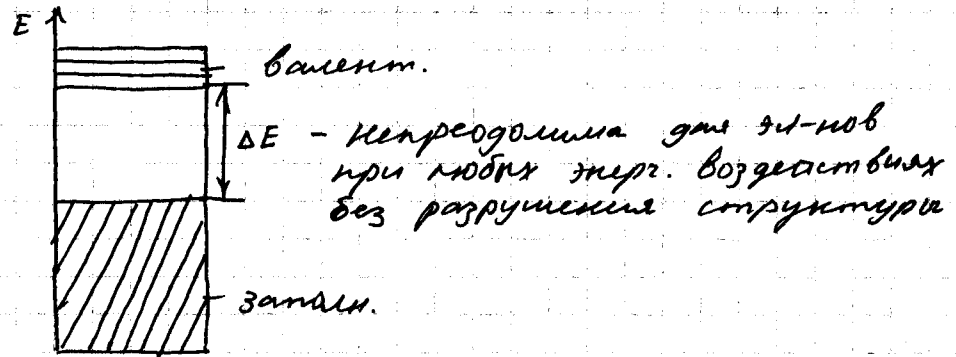
МВ(л)

## Ковалентный тип связи.



При энерг. воздействиях эл-ны могут преодолевать  $\Delta E$  ( $\Delta U, t^\circ$ , облучение, облучение и т.п.).  
Материалы - полупроводники.

## Ионный тип связи.



Влияние разл. факторов на эл. проводимость.

T. с повышением T  $\rho$  повышается.

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \alpha_p T)$$

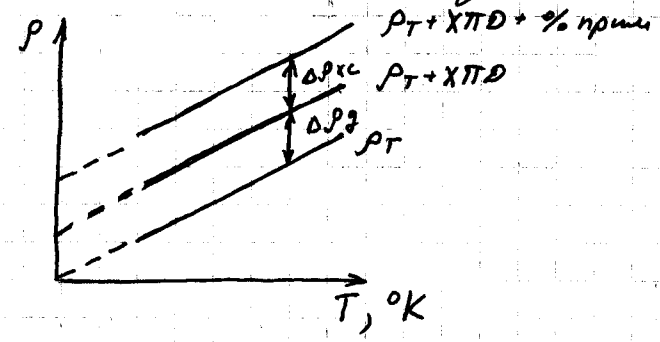
с повышением T увел. тепловые колебания атомов (фононы), нарушается



периодичность крит. решетки и уменьшается длина свб. пробега эл-на, что сопровождается повышением  $\rho$ .

Влияние холодной пластической деформации. ХТД создает повышенную плотность дефектов, нарушает периодичность. Определенная деформ. дает приrost  $\rho$ .

Влияние хим. состава проводников. Увеличение концентрации примесей также повышает  $\rho$  на  $\Delta\rho_{xc}$ .



### Проводниковые материалы.

В зав-ти от назначения и величины  $\rho$  они делятся на 5 групп.

1. Металлы и сплавы высокой эл. проводимости
2. Сплавы с малым переходным электросопротивлением - припои
3. Сверхпроводники
4. Контактные материалы с малым переходным  $\rho$
5. Сплавы с повышенным  $\rho$

Металлы и сплавы высокой эл. проводимости.

Требования:

- 1) низкое  $\rho$
- 2) высокий предел прочности  $\sigma_B$
- 3) высокая пластичность
- 4) высокая технологичность
- 5) коррозионная стойкость
- 6) износостойкость

	Ag	Cu	Al	Al	Fe
$\rho, \text{мКОм}\cdot\text{м}$	0,006	0,017	0,022	0,028	0,096
$\alpha\rho, \text{ } 1/^\circ\text{C}$	—	—	0,004	—	—

Основные проводниковые материалы Cu, Al, Fe. Электропроводимость Cu принята за 100%.

### Медь.

- М005 ( $\Sigma \text{примесей} \approx 0,01\%$ )
- М05 ( $\Sigma \text{примесей} \approx 0,03\%$ )
- М1 ( $\Sigma \text{примесей} \approx 0,1\%$ )

ХТД повышает  $\rho$  до 0,018, но при этом  $\approx 6-1,5$  раз увеличивает прочность.

Медь идет на изготовление проводов. Толщина до 5-6 мм.

### Алюминий.

#### Применение:

- 1) монтажные провода
- 2) фольга (особенно конденсаторная фольга)

#### Марки

АД02 ( $\Sigma$  прим. = 0,02%)  
 АД000, АД00, АД0 (0,2%, 0,3%, 0,5% примесей)

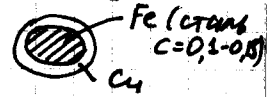
Если заменить медный провод алюминиевым, то гибкость было бы и по тем сопротивлению, но диаметр  $Al$  был в 1,3 раза больше и при этом масса в 2 раза меньше. Недостатками явл. низкая прочность (60 МПа) и увеличить его можно только ХТД. При этом  $\sigma_{врем}$  повышается в 2 раза, но на 10% повышается электросопротивление. Из сплавов применяют  $Al-Mg-Si$  - они заменяют чистый  $Al$ .

### Железо.

Применяют в биту, рельсы и др.

Достоинства: только прочность.  
 Применяются низкоуглерод. стали ( $C = 0,1 - 0,15\%$ ).  $\sigma_{в} = 300 \text{ МПа}$

Биметаллические проводники производятся для передачи высокочастотных токов.



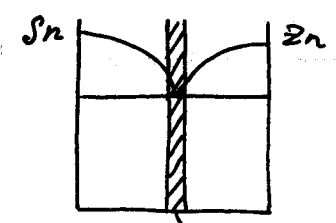
### Припой.

Это материалы с малым переходным электросопротивлением. Он нужен для пайки - поэтому в месте контакта сопр. меньше, чем у самого провода.

#### Требования к ним:

- 1) должна быть хорошая адгезия и когезия
- 2) температура плавления должна быть ниже  $t_{пл}$  деталей
- 3) у припоя должна быть малый интервал кристаллизации

В качестве припоя применяют олово, свинец, цинк.



диаграмма

обычно выбирают такой состав

В зависимости от  $t$  кристаллизации:

- 1) низкотемпературные
- 2) высокотемпературные

1) Низкотемпературные припой (припой системы  $Sn-Pb$ )

ПОС - припой олово-свинцовый

ПОС 18, 30, 40, 50, 61, 90 (% Sn)  
 $t_{пл} = 183^\circ C$  (самый распр. ("третник"))  
 ("третник")

$\rho = 0,14 - 0,21 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$

Применяется для пайки меди и ее сплавов.

Sn - Zn

ПОУС 40, 60, 70, 90 (% Sn)

$t_{пл} \approx 199^\circ\text{C}$

Применяется для пайки Al и его сплавов.

В особых случаях нужен припой  $t_{пл} < 100^\circ\text{C}$ : Bi - Pb - Sn - Cd (сплав Вуда).

Чем ниже  $t_{пл}$ , тем меньше механ. прочность.

2) Высокотемпературные припои  $t_{пл} \geq 700^\circ\text{C}$

Cu - Zn, Cu - P, Cu - Ag

Применяются для пайки шин (крупных токопроводов). Основное достоинство - высокая механ. прочность. При такой пайке происходит диффузия.

Cu - Zn

ПМЦ 36, 48, 54 (% Cu)

$t_{пл} = 825 - 880^\circ\text{C}$

$\rho = 0.03 - 0.04 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$

Применяется для пайки медных изделий.

МВ(л)

Cu - P

ПМФ7 (% P)

Этим припоем можно паять без флюса.

Cu - Ag

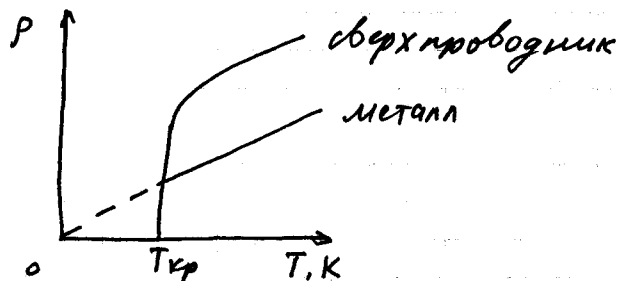
ПСР 10, 45, 61, 72 (% Ag)

Применяется для пайки любых проводов.

Сверхпроводники.

Это сплав с  $\rho = 0$ , т.е. в замкнутой цепи ток течет бесконечно долго. В настоящее время известно более 30 элементов и 1000 сплавов - сверхпроводников.

При абс. нуле любой металл или сплав является сверхпроводником.



Теория сверхпроводимости.

При достижении  $T_{кр}$  сверхпроводимость объясняется тем, что происх. образование пар  $e^-$  с разными спинами, поэтому такая пара становится нейтральной во всех отношениях и перестает взаимодействовать с полем.

решетки и движется в ней беспрепятственно и неограниченно долго. С точки зрения магн. св-в сверхпроводник явл. идеальным диамагнетиком. Т.о. проверяют металл, когда он переходит в сверхпроводимость.

Для сверхпроводников хар-ны критические хар-ки:  $T_{кр}$ ,  $H_{кр}$ ,  $J_{кр}$  (плотность тока). При повышении любой из них сверх. критически переходит в обычный.

№6  $T_{кр} = 9,17 \text{ K}$  ( $-263,83 \text{ }^\circ\text{C}$ )  
Сплав №6 -  $\text{Ti} - \text{Zr}$  Марки 65BT, 35BT  
(% №6)  
 $T_{кр} = 9,7 \text{ K}$ ;  $J_{кр} = 2,8 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{м}^2}$ ;  $H_{кр} = (6 \div 7) \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{м}}$

Применение:

- 1) создание сверхмощных магнитов (возба, ускорители частиц, генераторы). Как диамагнетик сверхпр-к примен. как гироскоп.
- 2) приборы самонавигации (в инфракрасном излучении).

Контактные материалы.

Требования: малое переходное электросопротивление

Виды контактов:

- 1) разрывные
- 2) скользящие
- 3) неподвижные

1) Разрывные (реле) - циклические размыкание и замыкание цепи.

При размыкании - замыкании возникает искра, что приводит к нагреву пятна контакта, следовательно окислению, увеличивается эл. сопр. В месте контакта это вызывает увеличение искрообразования и дальнейшего нагрева. При этом происх. перенос материала с одного контакта на другой (эрозия). Это уменьшает площадь контакта, следовательно растет эл. сопр.

В зав-ти от тока в цепи контакты делят на слабонагруженные и сильнонагруженные. К слабонагруженным относят:  $\text{Ag}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Pt}$ ,  $\text{Pd}$ . Лучшим материалом контактной явл. алюминий, т.к. его оксидная пленка не уменьшает эл. сопр.

К сильнонагруженным (высоконагруженным) относят те, кот. разбрасывают десятки тысяч болот ( $\text{W}$ ,  $\text{Mo}$  (+ $\text{Cu}$ )).

$\text{W}$  при высокой  $t^\circ$  окисляется и чешуйчатся, поэтому также применяют сплав  $\text{W} + 40-50\% \text{Mo}$ .

Также применяют сплав  $\text{W} + \text{Cu}$  (губчатый  $\text{W}$ , кот. пропитан  $\text{Cu}$ ) - контактно-тоговая сварка.

Сплав типа  $\text{CuMn} - 10$  - серебро, окисленная медь. Этот сплав при повышении  $t^\circ$  подвергают окислению. Получают композиционный материал.

2) Скользящие контакты.

Требования: износостойкость, сопр. свариванию и - особенно - искрообразованию.

Для устранения образ. искр добавляются к металлу графит:  
Cu-графит.

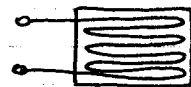
Марки МГЗ, МГБ (% графита)  
(медь)  
СГЗ, СГБ (% графита)  
(серебро)

Графит явл. смазкой при скольжении, что препятствует образованию искр.

3) неподвижные контакты  
Требования: механическая прочность.  
Обязно неподв. контакты массивные.  
Для них применяют Cu, Sn, сталь.

Ставки с повышенным электросопротивлением.

Применение: резисторы, нагрев. ЭИ-ТН, термопары, тензодатчики.

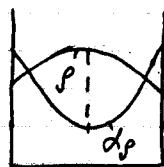
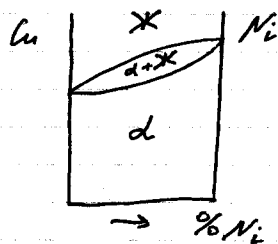


тензодатчик

Требования:

1. Высокое  $\rho$
2. Низкий температурный коэф.  $\alpha_p$
3. Минимальная термоэлектродвижущая сила в паре с медью
4. Высокая жаростойкость (для нагревателей)
5. Низкая окисляемость
6. Технологичность

Большинству этих условий удовлетв. сплавы с неогр. растворимостью компонентов друг в друге (типа Cu-Ni).



Cu-Ni-Mn  
для прецизионных (точных) резисторов

$t_p < 500^\circ\text{C}$  - предельно допустимая темп-ра

МНМ<sub>3</sub> 40-1,5 - константан

$$\rho = 0,48 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$$

$$\alpha_{\rho} = 3 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$$

Недостаток: высокая ТЭДС

МНМ<sub>3</sub> 3-12 - манганин

$$t_p < 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho = 0,43 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$$

$$\alpha_{\rho} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$$

Ag + 10% Mn + 8% Sn

$$\rho = 0,50 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$$

$$t_p = 250^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_{\rho} \approx 0$$

Сплавы для нагревательных элементов.  
Высокое  $\rho$  и жаростойкость.  
Применение: спирали, ленты и т.п.

X20H80 - нихром

$$t_p = 1100^{\circ}\text{C}$$

X23H05 - хромаль (72% Fe)

$$t_p = 1200^{\circ}\text{C}$$

Для нагрев. эл-тов с  $t_p > 1200^{\circ}\text{C}$   
применяют тугоплавкие металлы:  
W, Mo, Ta. Недостаток - не жаростойкие.  
При  $t > 1200^{\circ}\text{C}$  окисляются, образуя летучие  
оксиды, кот. испаряются. При  $t \approx 1500^{\circ}\text{C}$   
хорошо могут работать в вакууме.

МВ(1)

При  $t_p > 1500^{\circ}\text{C}$  применяется силицит  
SiC, силицит молибдена MoSi<sub>2</sub>.

### Полупроводниковые материалы.

Применение: транзисторы, микроэлементы и т.п.

$$\rho = 10^{-5} - 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

12 хим. эл-тов - полупроводники -  
простые полупроводники:

Группа	III	IV	IV	IV	IV	V	V	V	VI	VI	VII
Элемент	B, C, Si	Ge, Sn	P, As, Sb	S, Se, Te, U							

Величина запрещ. зоны:

$$\Delta E = (0,12 - 8) \cdot 10^{-10} \text{ Дж}$$

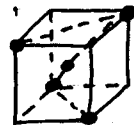
Свойства полупроводниковые материалы:

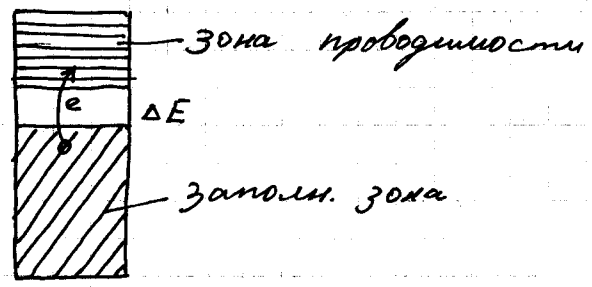
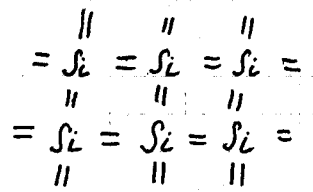
IV	IV		
A	B	- SiC	ковалент. тип связи
III	V	- ZnSb	ионно-ковалент. тип связи
A	B	- GaAs	
II	VI	- ZnS, CdS (сульфиды)	ионный тип связи
A	B	- FeO, ZnO (оксиды)	

### Теория проводимости.

IV группа. Тип связи - ковалентный.  
Решетка типа "алмаз".

Коорд. число  $K = 4$ .





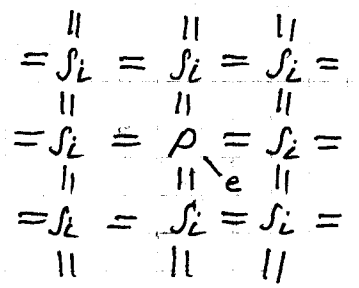
негативная проводимость (электронная) - "n" тип.

позитивная пров-ть (дырочная) - "p" тип.

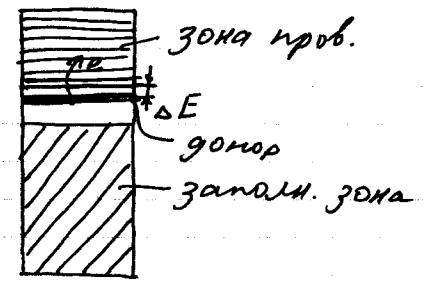
Такая пров-ть, вызванная нарушением связи в крист. решетке, наз. собств. проводимостью полупроводников и имеет второстепенное значение.

Осн. виды проводимости явл. кристальная пров-ть.

Примеси делятся на 2 вида:  
- примеси, кот. "поставляют" эл-ны в качестве носителей - донорные примеси (примеси с большей валентностью)

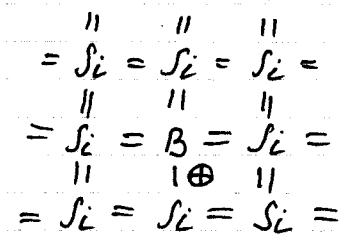
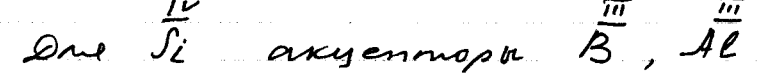


e - носитель заряда  
p - типа

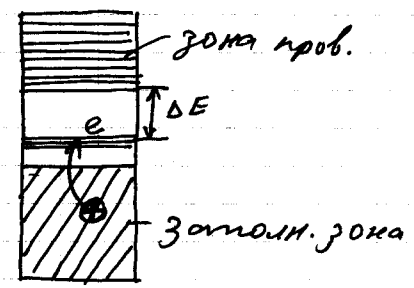


Доноры образуют подуровни в затрещ. зоне, но вблизи зоны пров-ти.

- примеси, кот. явл. поставщиками дырок, наз. акцепторами. Их валентность ниже, чем у осн. эл-та.



Акцепторы образ. подуровни в затрещ. зоне, но вблизи затолненной зоны.



### Характеристики полупроводниковых материалов.

$$\rho = 10^{-3} - 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

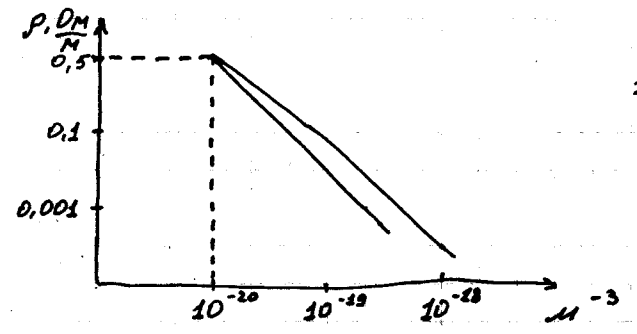
Примесная проводимость имеет основное значение, в отличие от собственной.

$$\rho = \frac{1}{e} (N_n \mu_n + N_p \mu_p)$$

$e$  - заряд электрона  
 $N_n, N_p$  - концентрация  $n$  и  $p$  примесей (доноров и акцепторов)  
 $\mu_n, \mu_p$  - подвижность носителей тока

Тем больше конц. примесей, тем меньше сопротивление, т.к. энергия ионизации примесей гораздо ниже.

### Влияние примесей



$10^{-19} \frac{1}{\text{м}^3} - 10^{-7} \% \text{ прим.}$

### Влияние факторов нар.

С повышением  $t^\circ$ , содержание примесей  $\rho$  уменьшается  $\Rightarrow$  нужны сверхпроводники с большим  $\rho$ .



Подвижность кол-во носителей, прох. через поверхность в 1 м<sup>2</sup> за 1с при разности потенциалов 1В.

$$\mu = 0,38 \frac{1 \cdot \text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

$$\rho = 0,18 \frac{1 \cdot \text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}$$

Повышение t°, случайные примеси, дефекты уменьшают подвижность => нужен монокристалл.

Время жизни - время от момента возникновения до его рекомбинации.

$$\tau_{жизни} \leq 10^{-5} \text{ с}$$

Дефекты, случайные примеси снижают время жизни.

Диффузионная длина пробега носителя - длина пробега за время жизни L = 0,2 - 3,0 мм.

Дефекты, слуг примеси уменьшают длину L.

Вывод: необходим сверхчистый монокристаллический полупроводник.

Кристаллофизические методы получения сверхчистых полупроводниковых материалов.

1. Металлургический  
Ac 99,999%  
примеси 0,001%
2. Метод испарения и конденсации
3. Метод ректификации
4. Метод сублимации (испарение без жидкого состояния).

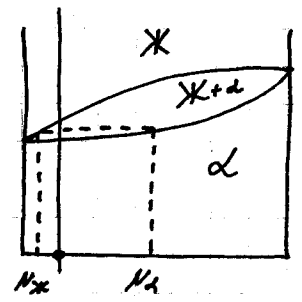
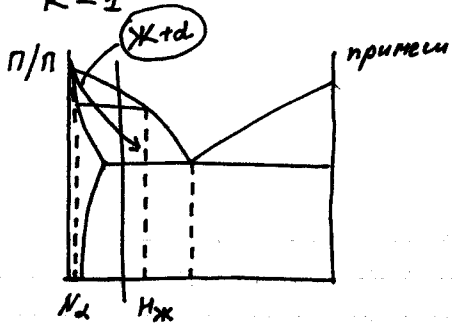
Кристаллофизические методы основаны на коэффциенте распределения примесей.

$$K = \frac{N_d}{N_x} = \frac{\text{конц. в тв. фазе}}{\text{конц. в жидк. фазе}}$$

K=1 (труднее всего очистить полупроводник)

K > 1

K < 1

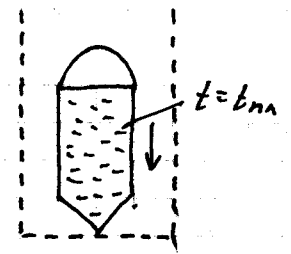
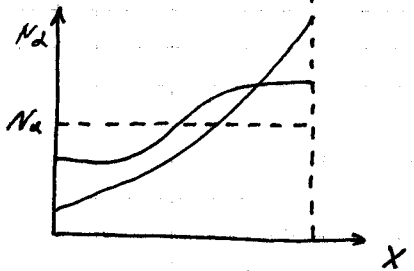
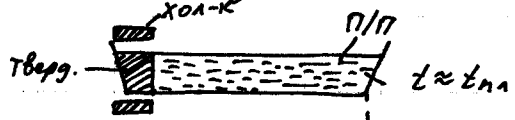


$$K = \frac{N_d}{N_x} < 1$$

$$K = \frac{N_d}{N_x} > 1$$

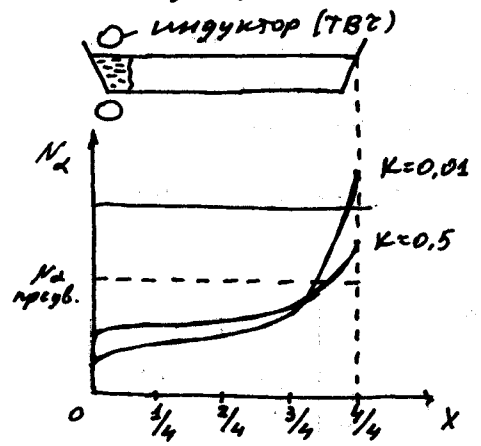
Способ очистки зависит от коэф. распр. примеси.

1. Метод направленной кристаллизации



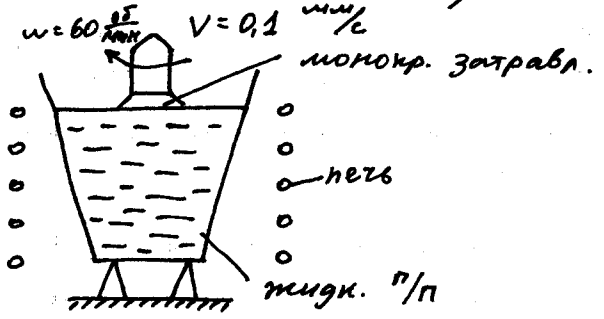
Множественное отрезание "грязного" конца. Получается чистый, но не монокристаллический полупроводник.

2. Метод зонной очистки

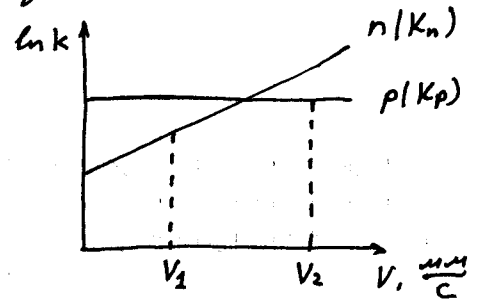


ТВЗ - ток выч. частот

3. Метод Захарьского - позволяет получать монокристаллическое строение - вытягивание монокристалла из расплава

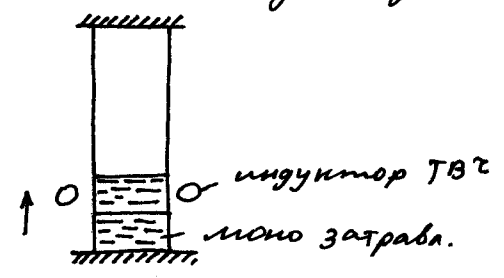


Образующийся монокристалл будет наследовать все дефекты заправки. По мере вытягивания монокристалла концентрация оставшейся жидкости возрастает.



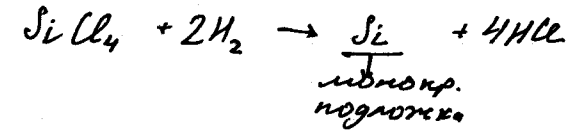
От скорости вытягивания зависит коэф-т распредел. примеси.

4. Метод бестигельной зонной очистки для хим. активных эл-тов полупроводников



Для изгот. приборов необх. пластинка, оптимальная толщина кот. находится в пределах  $\Delta = 30 \dots 50$  мкм

5. Метод этилхлоридных пленок (метод этилации)



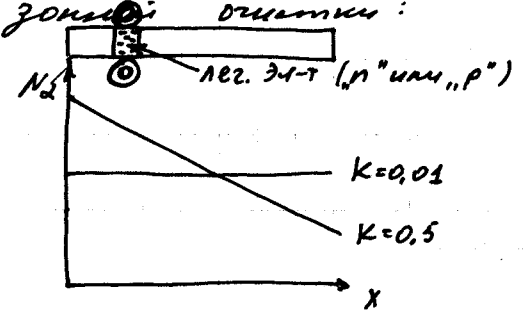
Образование пленок методом конденсации из газов.

Легирование П/П и получение р-п и р-п-р переходов.

Легирование проводится с целью создания опред. св-в проводимости акцепторами р и донорами.

Методы легирования основаны на методах очистки. Кол-во легирующей эл-та, создающей опред. проб-ты зависит от коэф. распределения К данных примесей.

Если легирование проб. по методу зонной очистки:



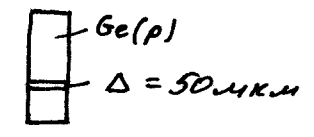
л.э.  $10^{-5} - 10^{-7} \%$  - необх.

$$K = \frac{N_d}{N_{ж}}$$

если  $K=0.01$  доб.  $10^{-3} - 10^{-5} \%$

Ост. требования к легированию: равномерное распрд. эл-та в кол-ве, не превышающем допустимое.

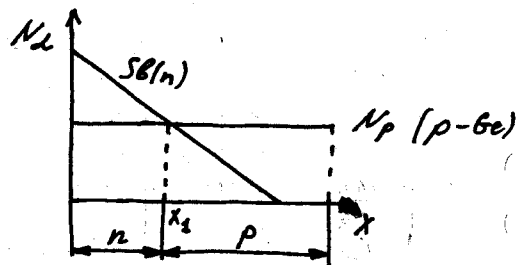
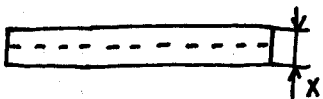
Если легирование проб. по методу Захарьского, то в этом случае кол-во легирующей эл-та будет опред. скоростью вытягивания.



# Получение p-n и p-n-p переходов.

## 1. Диффузионный способ.

Пластика Ge с поверхности насыщается Sb.

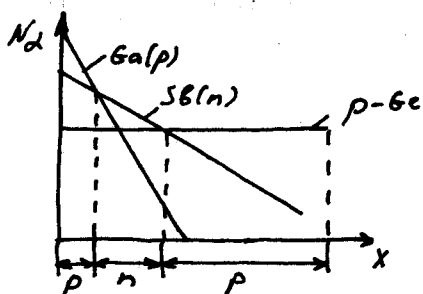


p-n проводимость

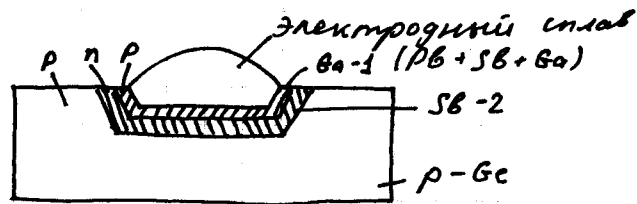
Недостаток: неравномерное распределение по пов-ти.

Получение p-n-p перехода осуществ. одновр. насыщением лемп. ~~полупроводника~~ и донорами, и акцепторами. Донор - Sb, акцептор - Ga.

Метод основан на разном коэф. диффузии (у Sb выше, чем у Ga). За одно и то же время Sb диффундирует на большую глубину пластины.



## 2. Сплавно-диффузионный способ получения p-n-p переходов.

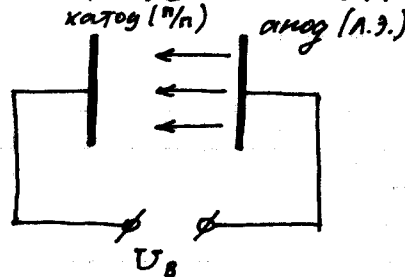


1. Нагрев до  $t^\circ = 760^\circ\text{C}$ , процесс расплавления электродного сплава
2. Пожаром  $t^\circ$  до  $720^\circ\text{C}$  и выдерживают 10 часов

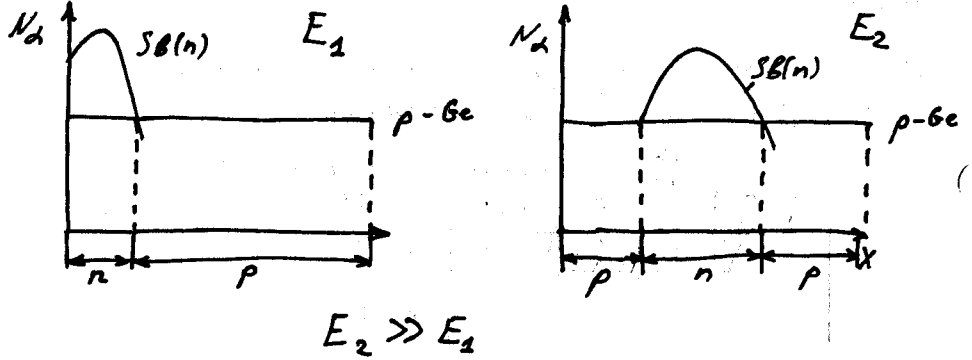
При расплавлении пов-ть насыщается Ga. При выдержке внутрь проникает Sb.

3. При эпитаксиальном методе лемп. Zn-типа добавляется в газовый объем и наряду с получением монокрист. пленки происходит ее легирование.

4. Ионно-плазменный способ. Заключается в бомбардировке в плазме тлеющего разряда лемп. Zn-типа p или n типа.



Если энергия плазмы невелика ( $E_1$ ), то p-n-тип; если велика, то p-n-p.



Большая величина запрещ. зоны, преодолены кот. носители тока не могут (за искл. разрушения диэлектрика).  
Диэлектрики могут работать как в низких частотах э. тока, так и в высоких частотах.

Характерной особенностью диэлектриков явл. их способность к поляризации, т.е. способность образ. внутр. поле под действием внешнего.

Поляризация - смещение зарядов внутри материала под действием напряженности внешнего э. поля  $E$ , В/м. Поляризация оценивается диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_0}$$

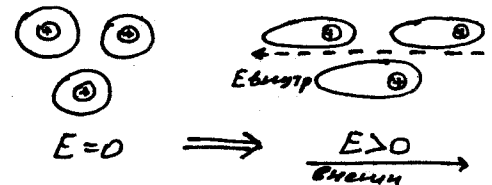
где  $\epsilon_0$  - емкость конденс. с диэлектриком  
 $\epsilon_d$  - емкость конденс. с вакуумом

$$\epsilon = 10 \dots 100000$$

Виды поляризации.

1. Электронная
2. Ионная
3. Ионно-релаксационная
4. Дипольно-релаксационная
5. Спонтанная (самополяризуемая)

Электронная поляризация - смещение электронных оболочек под действием  $E$



Эл-Т	Тип пров.	Лег. эл-т	Марка	$\rho \cdot 10^2$ Ом.м	Л.мм (сн.ф. гр.)
Ge	n	-	ГЭ40/30	36-44	3,0
	p	Ga	ГЭГ 5/30	4,2-5,7	1,0
	n	SB	ГЭС 10/30	8-12	1,0
Si	n	-	КЭ 150/0,3	100-200	0,3
	p	-	КЭ 40/0,2	30-50	0,2
	n	P	КЭФ 7,5/0,5	6-9	0,5
	p	B	КЭБ 7,5/0,5	6-9	0,5

Э - электронный, Д - дырочный (соответв. проводимость)

### Диэлектрики.

В данном разделе будут рассм. только твердые диэлектрики - стекла, пластмассы, керамики.

Назначение:

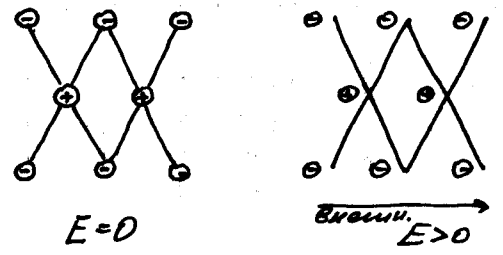
1. Установочные (электротехнические) - изоляторы
2. Конденсаторные (радиотехнические)

$$\rho = 10^8 - 10^{20} \text{ Ом.м}$$

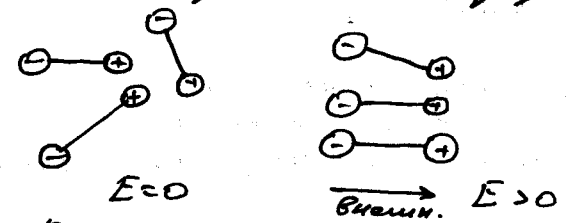
Быстродействие эл. поляризации  $10^{-15}$  с.

Эл. поляризация не зависит от частоты внешнего эл. поля.

Ионная поляризация - смещение ионов под действием  $E$ . Если ионы смещ. на расст. меньше периода крчот. решетки, то это и есть ионная поляризация. Время быстрого действия  $10^{-23}$  с; она не зависит от частоты  $E$ . Если ионы смещ. на расст. больше периода, то поляризация наз. ионно-релаксационной. время быстрого действия  $10^{-5}$  с; она зависит от частоты внешнего поля.



Дипольно-релаксационная - хаотичная ориентация диполей под действием  $E$



Всегда зависит от частоты  $E$ . время быстрого действия - величина, завис. от строения дипольного дипольного момента,  $t_0$ .

Степень поляризации и величина  $\epsilon$  нах. в большой зависимости от  $t_0$  и  $E$ . С повышением  $t_0$   $\epsilon$  при разных видах поляризации меняется по-разному, т.е. температур. коэф. диэлектр. прониц.  $\epsilon$  различен для разных видов поляризации.

Для электр. поляризации  $\epsilon < 0$ . При пост. кп. ве эл-нов объем диэлектр. увеличивается, кол-во зарядов на единицу объема уменьшается.

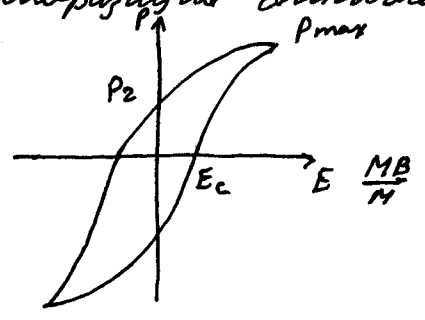
При ионной поляризации  $\epsilon > 0$ , т.к. при нагревании повышается подвижность ионов.

При дипольно-релакс. поляризации  $\epsilon$  сначала положит., а затем отриц. по мере повышения  $t_0$ .

В пот. стадии нагрева повышается подвижность диполей,  $\epsilon > 0$ , а затем увел. амплитуда темп. колебаний, что приводит к дезориентации,  $\epsilon < 0$ .

Самостоятельная поляризация характерна только для сегнетоэлектриков. Самонпрзв. образование доменов. Эти домены без внешнего эл. поля  $E$  ориент. хаотически, так что внутр. поле равно 0. Во внешн. поле происходит ориентация доменов, в связи с чем  $\epsilon$  достигает  $10^5$ .

В переменном эл. поле напр.  $E$  поляризация описывается петлей гистерезиса.



При опред. значении  $t^{\circ}$  поляризуемость  
исчезает. Эта температура - точка Кюри.

Сегнетоэлектрики - как правило  
конденсаторные.

Электрическая проводимость  
диэлектриков.