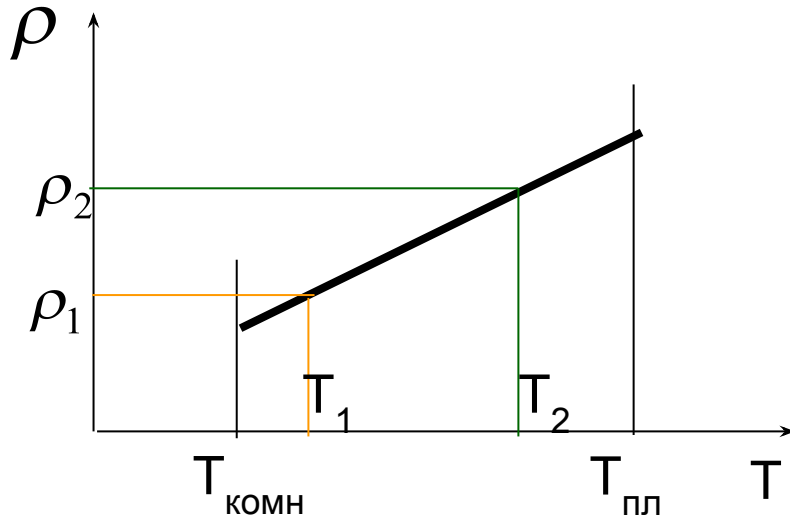


Температурная зависимость удельного сопротивления чистых металлов



$$\alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \quad \text{- уменьшается при росте температуры}$$

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_{\rho} (T_2 - T_1)]$$

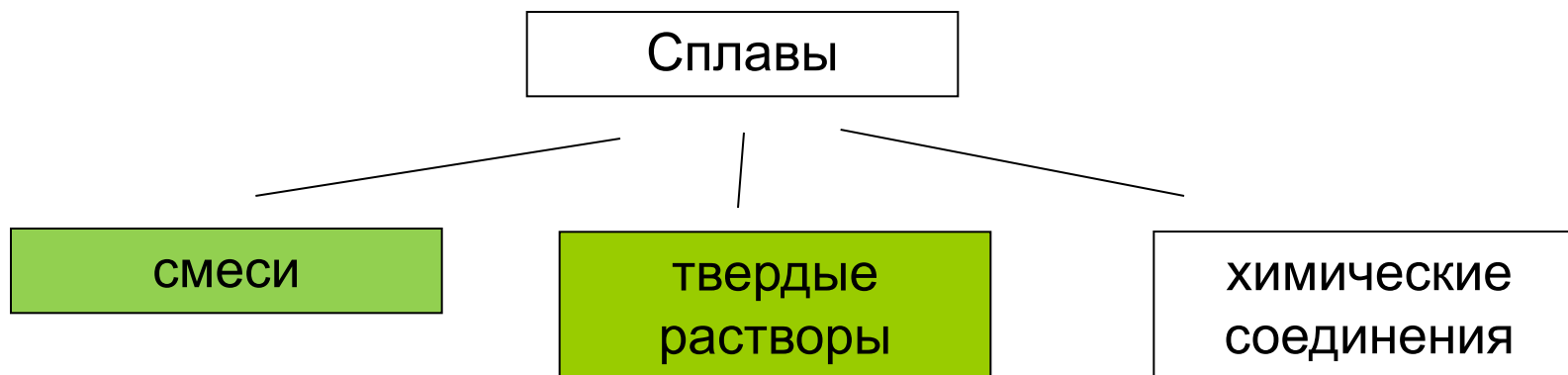
В идеальном кристалле электрон движется без столкновений, т.е. $\rho = 0$.

Чем больше дефектов – тем больше удельное сопротивление ρ .

При повышении температуры подвижность электронов падает из-за рассеивания на тепловых колебаниях кристаллической решетки

Электрические свойства металлов с примесями и сплавов

Металлические сплавы – вещества, получаемые сплавлением двух или нескольких компонентов



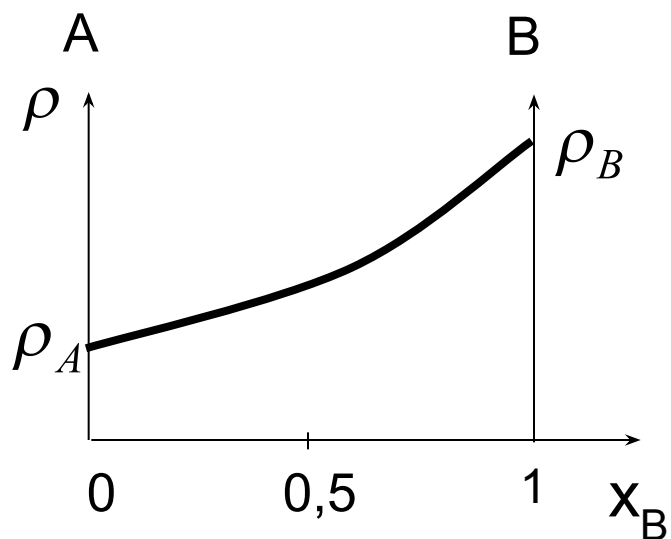
Двухкомпонентный сплав

x_A и x_B - содержание компоненты А и В

$$x_A + x_B = 1$$

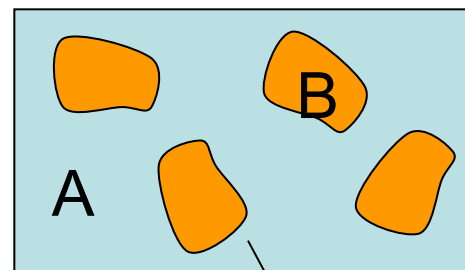
Электрические свойства металлов с примесями и сплавов

Смеси



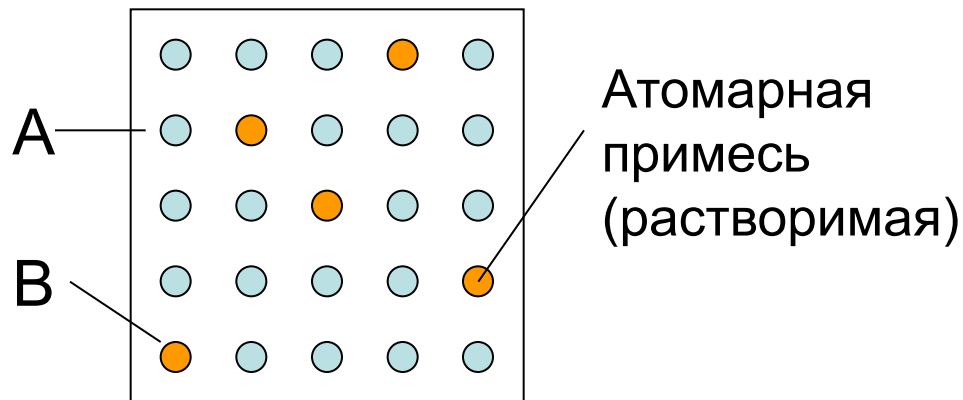
Зависимость удельного сопротивления от содержания «порошковой» примеси

x_A и x_B - содержание компоненты A и B



«Порошковая»
примесь
(нерастворимая)

Электрические свойства металлов с примесями и сплавов



Любая атомарная примесь увеличивает удельное сопротивление металла

$$\rho = \rho_T + \rho_{ост}$$

правило Маттисена

ρ - полное уд. сопротивление металла с примесными атомами

ρ_T - уд. сопротивление чистого металла, обусловленное рассеиванием электронов на тепловых колебаниях

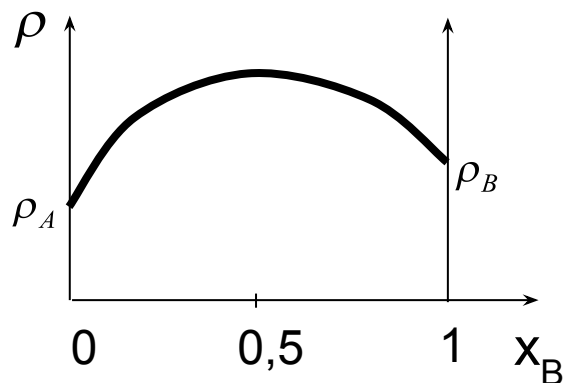
$\rho_{ост}$ - уд. сопротивление, обусловленное рассеиванием электронов на атомах примеси

Электрические свойства металлов с примесями и сплавов

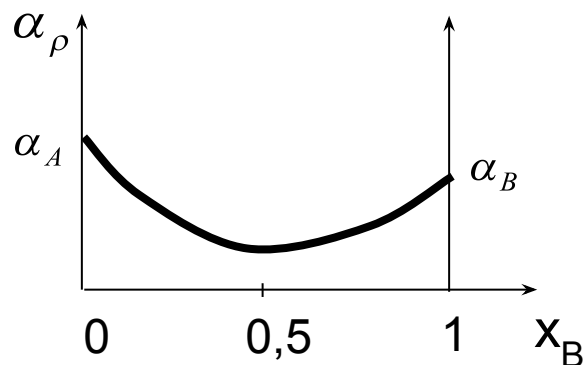
Для двухкомпонентного сплава $\rho_{ост} = C x_A x_B = C x_B (1 - x_B)$

В случае низкой концентрации одного из компонентов ($x_B \rightarrow 0$)

$$\rho_{ост} = C x_B$$



Зависимость удельного сопротивления от примеси

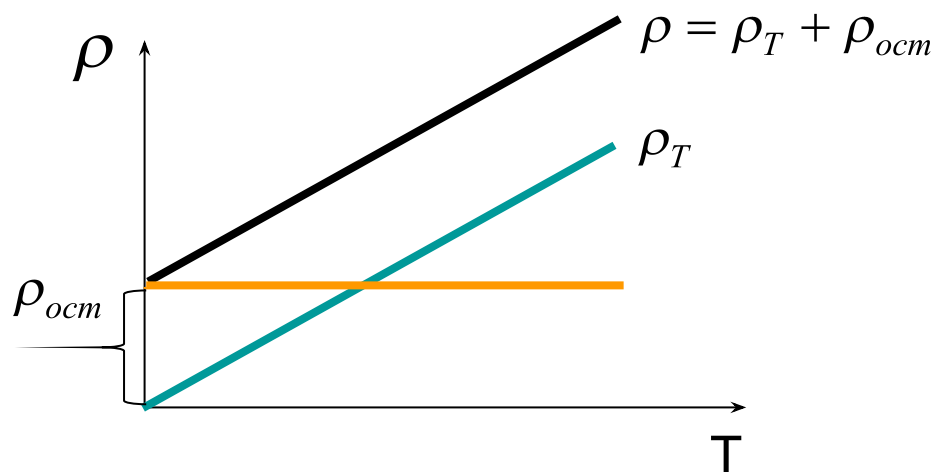


Зависимость ТКр от содержания примеси

Удельное сопротивление сплавов больше, чем чистых металлов, а температурный коэффициент удельного сопротивления меньше

Электрические свойства металлов с примесями и сплавов

Температурная зависимость удельного сопротивления чистого металла и сплава



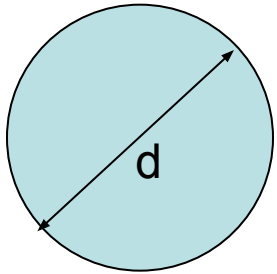
$$\alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta\rho}{\Delta T}$$

α_{ρ} — в примесных металлах меньше, чем в чистых

При $T = 0$ удельное сопротивление чистого металла ≈ 0 , уд. сопротивление металла с примесями равно $\rho_{ост}$

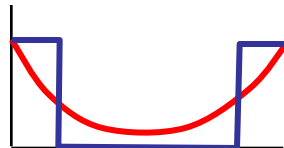
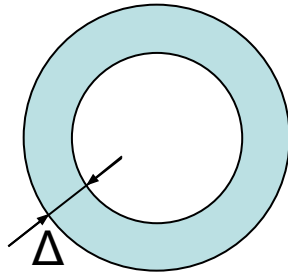
Сопротивление проводников на высоких частотах

$f < 1000 \text{ Гц}$



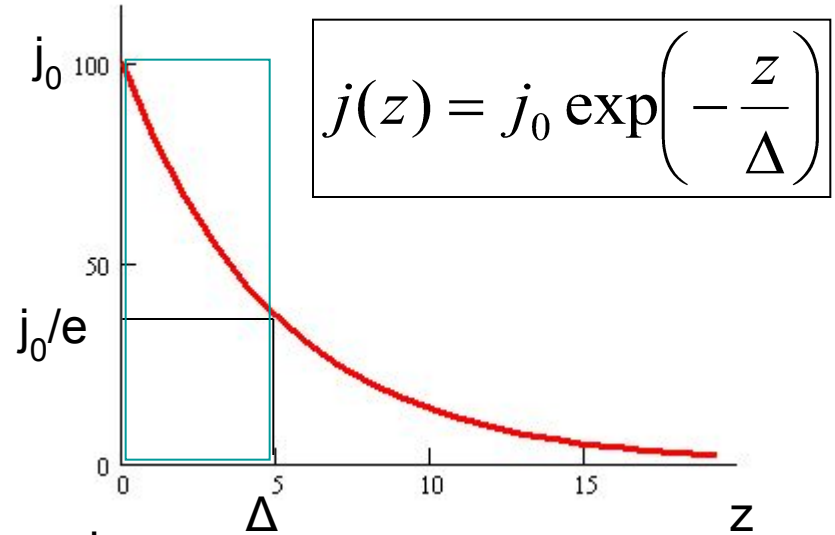
$$S_1 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$f > 1 \text{ МГц}$



$$S_2 \approx \pi d \Delta$$

- при $\Delta \ll d$



Активное сопротивление проводника на высоких частотах выше, чем при постоянном токе из-за уменьшения площади, по которой протекает ток

Сопротивление проводников на высоких частотах

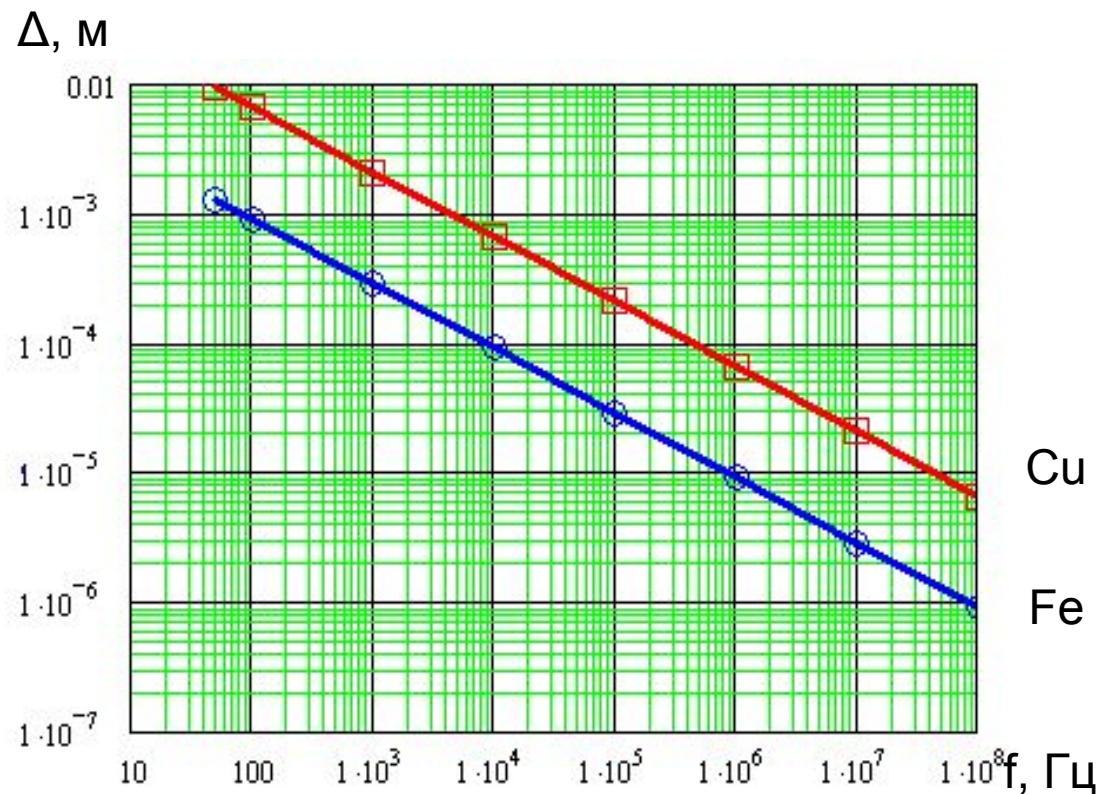
$$\Delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu}}$$

- глубина проникновения
электрического поля в проводник

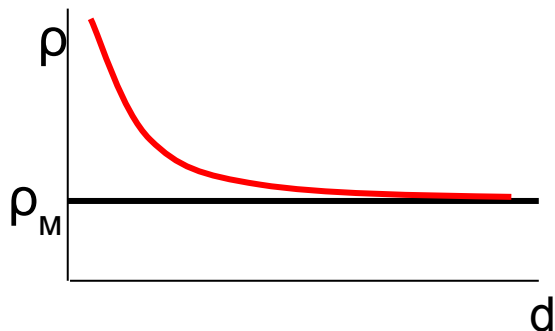
ρ - удельное сопротивление;
 f - частота;
 μ_0 - магнитная постоянная;
 μ - магнитная проницаемость

Cu

f	Δ
50	9 мм
1000	6 мм
100 КГц	0,2 мм
10 МГц	20 мкм



Сопротивление тонких металлических пленок

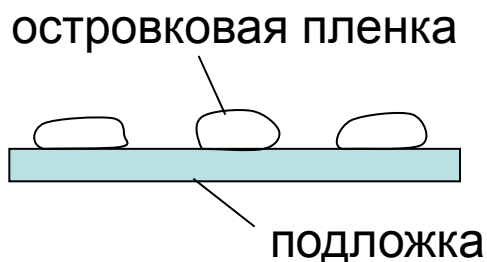
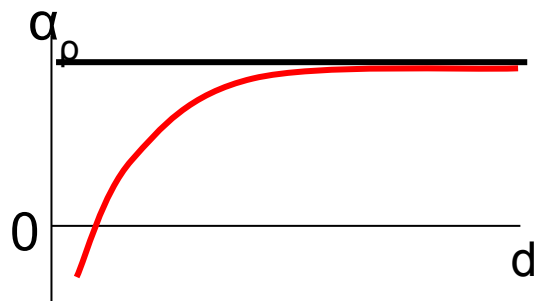


Размерный эффект (зависимость свойств от размеров) связан с возрастающей ролью поверхности по сравнению с объемом.

Удельное сопротивление тонких пленок больше, а ТКР меньше чем у массивных образцов

Причины:

- высокая дефектность пленки (примеси и границы)
- при малых толщинах – островковая пленка



Виды тонкопленочных резисторов

$$R_s = \rho_s \frac{L}{a}$$



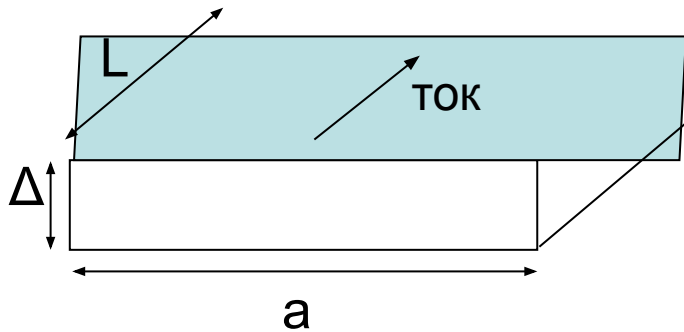
обычный



меандр

Поверхностное сопротивление тонких слоев

Удельное поверхностное сопротивление
или сопротивление квадрата поверхности



$$R = \rho \frac{L}{\Delta a} = \frac{\rho}{\Delta} \cdot \frac{L}{a}$$

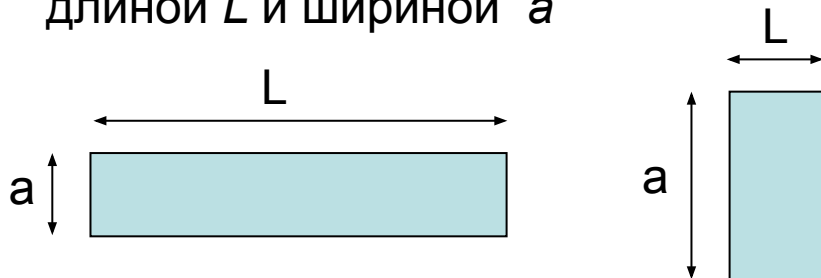
Обозначение: ρ_s
(иногда R_s)

Размерность: Ом
(иногда Ом/□)

Сопротивление квадрата поверхности (если $L = a$)

$$\rho_s = \frac{\rho}{\Delta}$$

Полное сопротивление поверхностного слоя
длиной L и шириной a



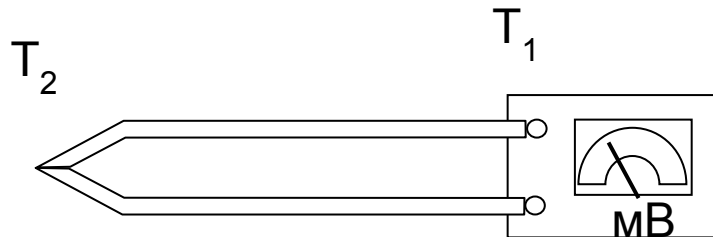
$$R_s = \rho_s \frac{L}{a}$$

$$\frac{L}{a}$$

- число квадратов в
направлении протекания тока

Термоэлектродвижущая сила

Схема устройства термопары



Показания мВ (термо-э.д.с.)

$$U_T = \alpha_T (T_2 - T_1)$$

α_T -относительная
удельная термо-э.д.с.

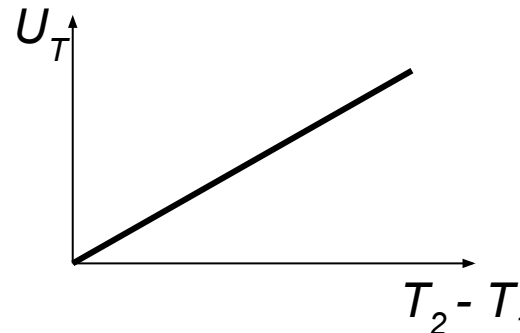
α_T^A

металл	,мкВ/К
Al	-1,3
Cu	+1,8
Ag	+1,5
Ni	-19,3
Cr	+18

$$\alpha_T = \alpha_T^A - \alpha_T^B$$

α_T^A, α_T^B -абсолютные удельные термо-э.д.с.

Градуировочная зависимость термопары



Материалы высокой проводимости

Свойство	Медь	Алюминий
Уд.сопрот., мкОм · м	0,0168	0,0265
ТКр , К ⁻¹	$4,33 \cdot 10^{-3}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Плотность, кг · дм ⁻³	8,92	2,7
Т плавл., °С	1083	660
Мех.прочность, МПа	215	50
Твердость, МПа	400	150

Уд.сопр.: Ag - 0,015, Pb - 0,190, Au - 0,0225 Fe - 0,1 мкОм · м

Материалы высокой проводимости

Применение:

Медь

- провода, кабели, обмотка,
- фольгированный текстолит
- в гибридных микросхемах

Окись меди –полупроводник
 $\Delta E = 2,2$ эВ

Алюминий

- провода, кабели
- оксидные (электролитические) конденсаторы
- в интегральных микросхемах

Окись алюминия – диэлектрик

Сплавы

Латунь Cu - Zn

Бронза Cu - Sn (Al, P, Be и др)

Дюраль

Al - Mn, Al - Mg,

Сплавы высокого сопротивления

Применение и предъявляемые требования:

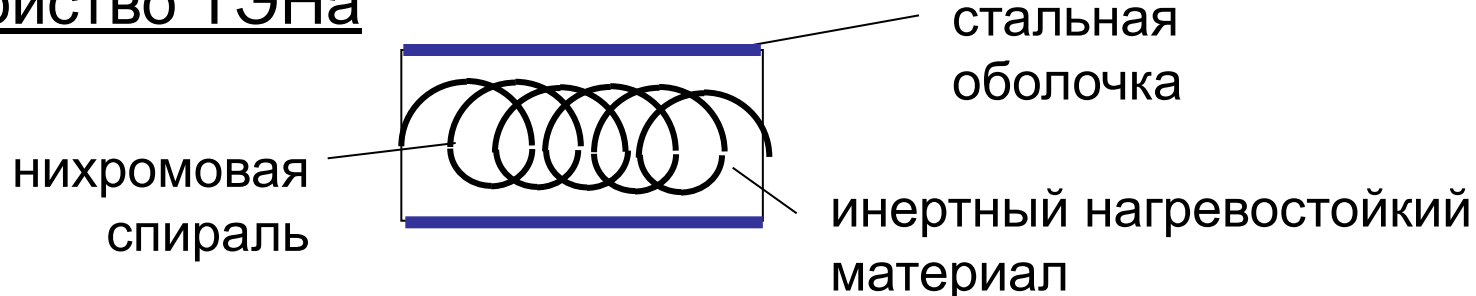
Резисторы
(низкий ТКР)

Нагреватели
(высокая нагревостойкость)

Основные свойства сплавов высокого сопротивления

Сплав	Состав	ρ , мкОм · м	α_ρ , 10^6 , K ⁻¹	предельн. рабочая темпер., °C
Манганин	Cu - Mn - Ni	0,42	5 – 30	100 – 200
Константан	Cu - Ni	0,48	– (5 – 25)	450 – 500
Нихром	Ni - Cr	1,0	100 – 200	1000

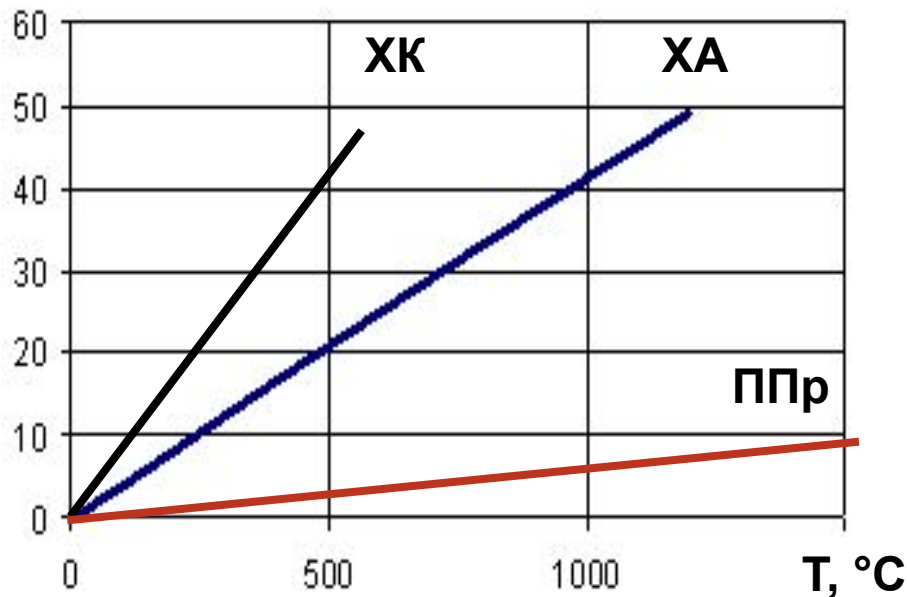
Устройство ТЭНа



Сплавы для термопар

хромель (90% Ni, 10% Cr);
копель (56% Cu, 44% Ni);
алюмель (95% Ni, +Al, Si, Mn);
платинородий (90% Pt, 10% Rh);

U_T , мВ



Обозначения термопар

ХК хромель - копель

ХА хромель – алюмель

ППр платина –
платинородий

Припой

Пайка предназначена для создания механического или электрического контакта.

При пайке места соединений нагревают, припой расплавляется, растекается и заполняет зазоры между соединяемыми деталями.

Мягкие ($T_{пл} < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

ПОС припой оловянно-свинцовый

ПОС 20 (20% олова)

Твердые ($T_{пл} > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

ПМЦ припой медно-цинковый

медно - фосфористые

ПСр припой серебряный

Легкоплавкие ($T_{пл} < 145\text{ }^{\circ}\text{C}$)

вводят в состав припоя **индий, кадмий, висмут**

Назначение флюса –
обеспечить смачивание
поверхности припоем и
защиту от окисления

Припои

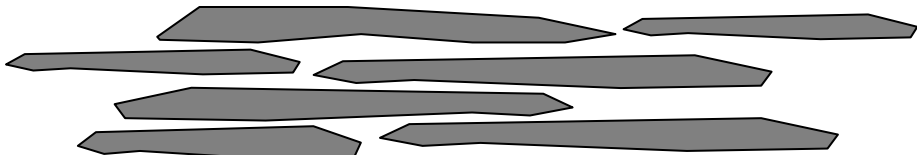
Марка	Содержание элементов, %						Т пл. °С
	Sn	Pb	Sb	Bi	Cd		
ПОСС 4-6	3-4	90-92	5-6				265
ПОСК 50-18	50	30-34	0,2		18		222
ПОСВ 33	33,4	33,3		33,3			130
Сплавы Розе	15,5	32		52,5			95
	25	25		50			94
		40		52	8		92
Сплав Вуда	12,5	25		50	12,5		60

Sn – олово, Pb – свинец, Sb - сурьма, Bi - висмут, Cd - кадмий

Тугоплавкие материалы

$T_{\text{плавл}}$	Применение
W 3400 °C	катоды, нити накаливания (в вакууме)
Ta 3000 °C	
Mo 2620 °C	
Nb 2500 °C	
Cr 1900 °C	
Ti 1670 °C	

Зернистая структура вольфрама



Неметаллические проводящие материалы

Углеродистые материалы:

графит, сажа

Свойства графита:

- $T_{пл} = 3900\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $\rho \approx 10\text{ мкОм} \cdot \text{м}$
- нагревостойкость
- легко обрабатывается

Проводящие окислы:

SnO_2 двуокись олова,

In_2O_3 окись индия

Свойства окислов:

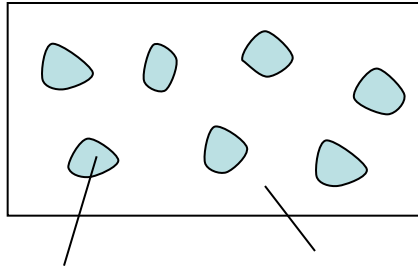
- $\rho \approx 100\text{ мкОм} \cdot \text{м}$
- прозрачность

Применение:

- нагреватели,
- электроды для дуговых ламп,
- щетки электр. машин

- прозрачные проводящие покрытия,
- прозрачные электроды

Неметаллические проводящие материалы (композиционные)



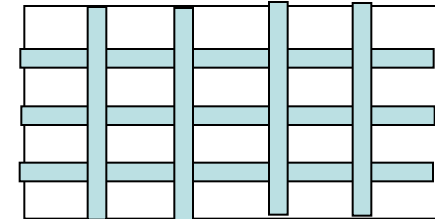
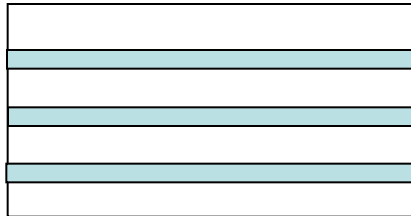
проводник диэлектрик

Керметы

Cr – SiO₂

Ag - стекло

высокоомные
резисторы



Контактолы

Ag - смола

графит - клей

токопроводящие клеи

Применение: