

# *Проводниковые материалы*

# Классификация проводниковых материалов

□ *по способности проводить электрический ток:*

□ сверхпроводники -  $\rho=0$ ;

□ криопроводники -  $\rho \longrightarrow 0$ ;

□ металлы (чистые);

□ сплавы металлов;

□ электролиты.

□ *по области применения:*

□ металлы с низким  $\rho \leq 0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$

❖ провода, жилы кабелей, шины;

❖ обмотки электрических машин, трансформаторов, катушек электромагнитных устройств (реле, магнитных пускателей, автоматических выключателей).

□ **сплавы металлов и металлы с высоким  $\rho > 0,3 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$**

❖ изготовление резисторов;

❖ в нагревательных элементах;

❖ для изготовления нитей накала и электродов ламп.

▪ ***по агрегатному состоянию:***

□ твердые;

□ жидкие: расплавленные металлы, электролиты.

□ газообразные: плазма.

▪ ***по виду электропроводности:***

□ ***проводники I рода – с электронной электропроводностью;***

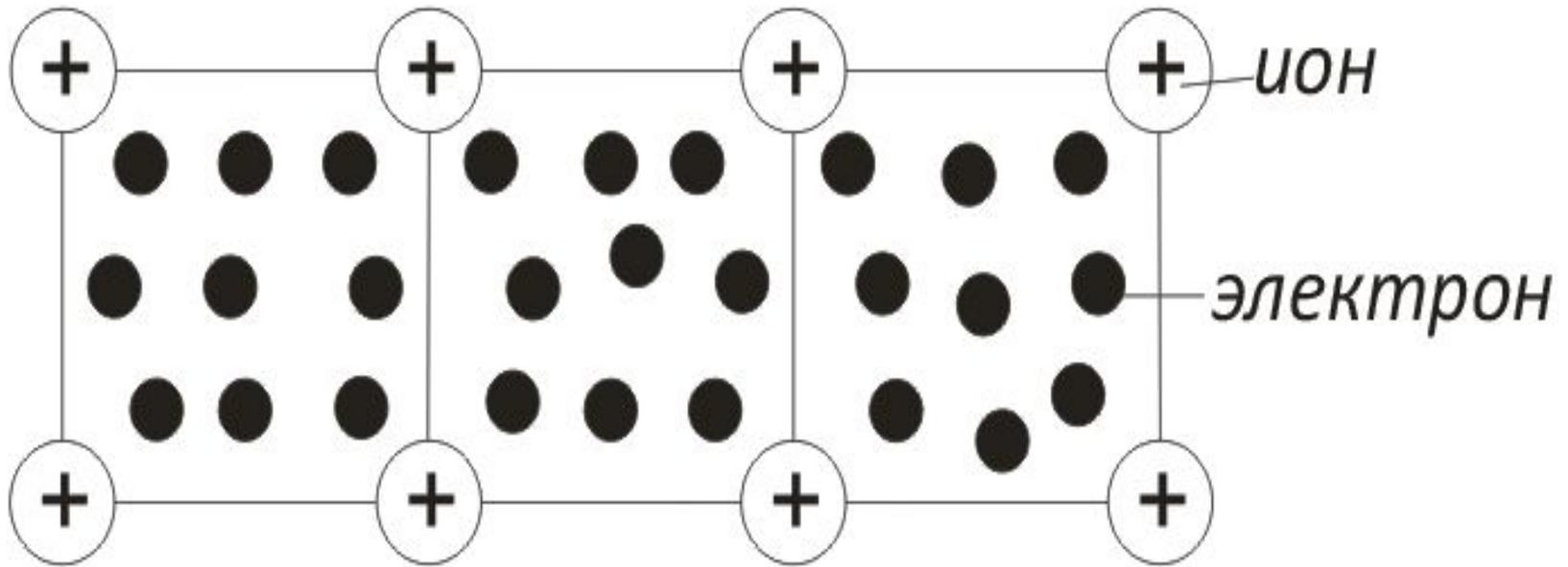
□ ***проводники II рода – с ионной электропроводностью.***

# Классификация проводников

- **Твердыми** проводниковыми материалами являются **металлы** и их **сплавы**.
- **К жидким** проводникам относятся **расплавленные металлы** и **различные электролиты**.
- Для большинства металлов температура плавления высока; только ртуть, имеющая температуру плавления около минус  $39^{\circ}\text{C}$ , может быть использована в качестве жидкого металлического проводника при нормальной температуре.  
Другие металлы являются жидкими проводниками при повышенных температурах.

- **Все газы и пары**, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля **не являются проводниками.**
- Однако, если **напряженность поля** превзойдет некоторое **критическое значение**, обеспечивающее начало **ударной и фотонной ионизации**, то газ может стать **проводником** с электронной и ионной электропроводностью.
- **Сильно ионизированный газ** при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема представляет собой особую **проводящую среду**, носящую название **плазмы.**

# Структура твердых проводников



В узлах кристаллической решетки расположены положительно **заряженные ионы**, в междоузлиях – огромное количество **свободных электронов** (электронный газ).

# Механизм прохождения тока в проводниках

- **Механизм прохождения** тока в металлах — как в твердом, так и в жидком состоянии — обусловлен **движением (дрейфом) свободных электронов** под воздействием электрического поля;
- Поэтому металлы называют **проводниками с электронной электропроводностью** или **проводниками первого рода.**

# Механизм прохождения тока в проводниках

- **Проводниками второго рода**, или электролитами, являются растворы (в частности, водные) кислот, щелочей и солей.
- Для них характерна **ионная электропроводность**, сопровождающаяся **переносом вещества**, вследствие чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза.
- **Ионные кристаллы** в расплавленном состоянии также являются **проводниками второго рода**.

# Факторы, доказывающие идеальность электронного газа

- При **длительном протекании тока** по цепи, которая состоит из **различных металлических проводников**, не наблюдается **проникновение** одного металла в другой.
- **При нагревании металлов** до высоких температур скорость теплового движения электронов увеличивается и они **могут вылетать из металла** вследствие превышения их энергии над энергией выхода электрона ( *работа выхода электрона* ).
- **При резком торможении** быстро движущегося металлического проводника **вследствие инерции происходит смещение электронного газа** в направлении движения ( **на концах проводника появляется разность потенциалов** ).

# Свойства проводниковых материалов

- ▣ **Электропроводность;**
  - ▣ **Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления;**
  - ▣ **Работа выхода электрона;**
  - ▣ **Теплопроводность;**
  - ▣ **Контактная разность потенциалов и термо-ЭДС;**
  - ▣ **Линейный коэффициент теплового расширения;**
  - ▣ **Механическая прочность;**
  - ▣ **Относительное удлинение перед разрывом.**
- 

# Электропроводность проводников

Количественной оценкой электропроводности является **удельное объемное электрическое сопротивление**, т. е. величина сопротивления проводника из данного вещества длиной 1 м и сечением 1 м<sup>2</sup>.

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l} = \frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

- ▣  $\rho$  - удельное сопротивление,
- ▣  $l$  - длина,
- ▣  $S$  - площадь поперечного сечения проводника,
- ▣  $R$  - сопротивление проводника.

# Характеристики некоторых металлов и сплавов

| Материал | Плотность, Мг/м <sup>3</sup> | Температура плавления, °С | Удельное объемное сопротивление, мкОм·м |
|----------|------------------------------|---------------------------|---|
| Серебро  | 10,50                        | 961,0                     | 0,016                                   |
| Медь     | 8,94                         | 1083,0                    | 0,017                                   |
| Алюминий | 2,70                         | 657,0                     | 0,028                                   |
| Золото   | 19,30                        | 1063,0                    | 0,024                                   |
| Вольфрам | 19,30                        | 3380,0                    | 0,055                                   |
| Олово    | 7,31                         | 232,0                     | 0,120                                   |
| Кадмий   | 8,65                         | 321,0                     | 0,076                                   |
| Латунь   | 8,3-8,8                      | 960                       | 0,02 - 0,07                             |
| Бронза   | 7,5-8,9                      | 900                       | 0,02 - 0,28                             |

## *Факторы, влияющие на электропроводность проводников*

- Диапазон значений удельного сопротивления металлических проводников (при нормальной температуре) довольно узок: **от 0,016 для серебра** и до примерно **10 мкОм\*м для железохромоалюминиевых сплавов**, т.е. он занимает всего **три порядка**.
- **Удельная проводимость** металлических проводников согласно классической теории металлов может быть выражена следующим образом:

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2m\nu_T}$$

где  $e$  - заряд электрона;  $n_o$  - число свободных электронов в единице объема металла;  $\lambda$  - средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки;  $m$  - масса электрона;  $V_T$  - средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле.

- Преобразование выражения для  $\gamma$  на основе положений квантовой механики приводит к формуле:

$$\gamma = Kn_o^{2/3} \lambda$$

где  $K$  – численный коэффициент, остальные параметры те же.

- Для различных металлов **скорости хаотического теплового движения электронов** (при определенной температуре) **примерно одинаковы**.
- **Незначительно различаются также и концентрации свободных электронов** (например, для меди и никеля это различие меньше 10 %).
- Поэтому значение **удельной проводимости** или удельного сопротивления в основном зависит **от средней длины свободного пробега** электронов в данном проводнике, которая, в свою очередь, определяется :
  - ▣ **структурой проводникового материала;**
  - ▣ **температурой.**
  - ▣ **Все чистые металлы** с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются **наименьшими значениями удельного сопротивления;**

- Любые **примеси** повышают **удельное сопротивление**.
- **Примесь** другого металла, имеющего меньшее удельное сопротивление, чем основной, повышает его сопротивление.
- Это объясняется **искажением кристаллической решетки** основного металла даже небольшим количеством примеси.
- **Кристаллическая решетка металлов искажается** не только введением примесей, но и в **результате механических деформаций**.
- В связи с этим **обработка металла**, приводящая к пластической деформации, вызывает **увеличение его удельного сопротивления**.
- В частности, это имеет место в **процессе изготовления проводов при прокатке и волочении**.

- **Число носителей заряда** (концентрация свободных электронов) в металлическом проводнике **при повышении температуры практически остается неизменным.**
- Однако вследствие **усиления колебаний узлов кристаллической решетки** с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т.е. **уменьшается средняя длина свободного пробега электрона,** уменьшается подвижность электронов и, как следствие, ***уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление.***

# Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов

- Влияние температуры на удельное электрическое сопротивление проводников характеризуется **температурным коэффициентом удельного сопротивления**:

$$TK_{\rho} = \alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

- На практике при изменении температуры в узких диапазонах удельное электрическое сопротивление при температуре **более 20 градусов** определяют по формуле:

$$\rho_t = \rho_o [1 + \alpha_{\rho} (T - T_o)]$$

## Теплопроводность проводников

- **За передачу теплоты** через материал ответственны те же **свободные электроны**, которые определяют и **электропроводность металлов** и число которых в единице объема металла весьма велико.
- Поэтому **коэффициент теплопроводности  $\gamma_t$**  металлов намного **больше**, чем коэффициент теплопроводности диэлектриков.
- Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше **удельная электрическая проводимость** у металла, тем **больше** должен быть и его **коэффициент теплопроводности**.

# Термоэлектродвижущая сила

Если **один конец** двух металлов **спаять** и **нагреть**, то между свободными концами этих металлов возникает *контактная разность потенциалов*.

- **Причина появления разности потенциалов** заключается:
  - ❖ *в различии значений работы выхода электронов* из различных металлов;
  - ❖ *в различии концентрации электронов в этих металлах и сплавах.*

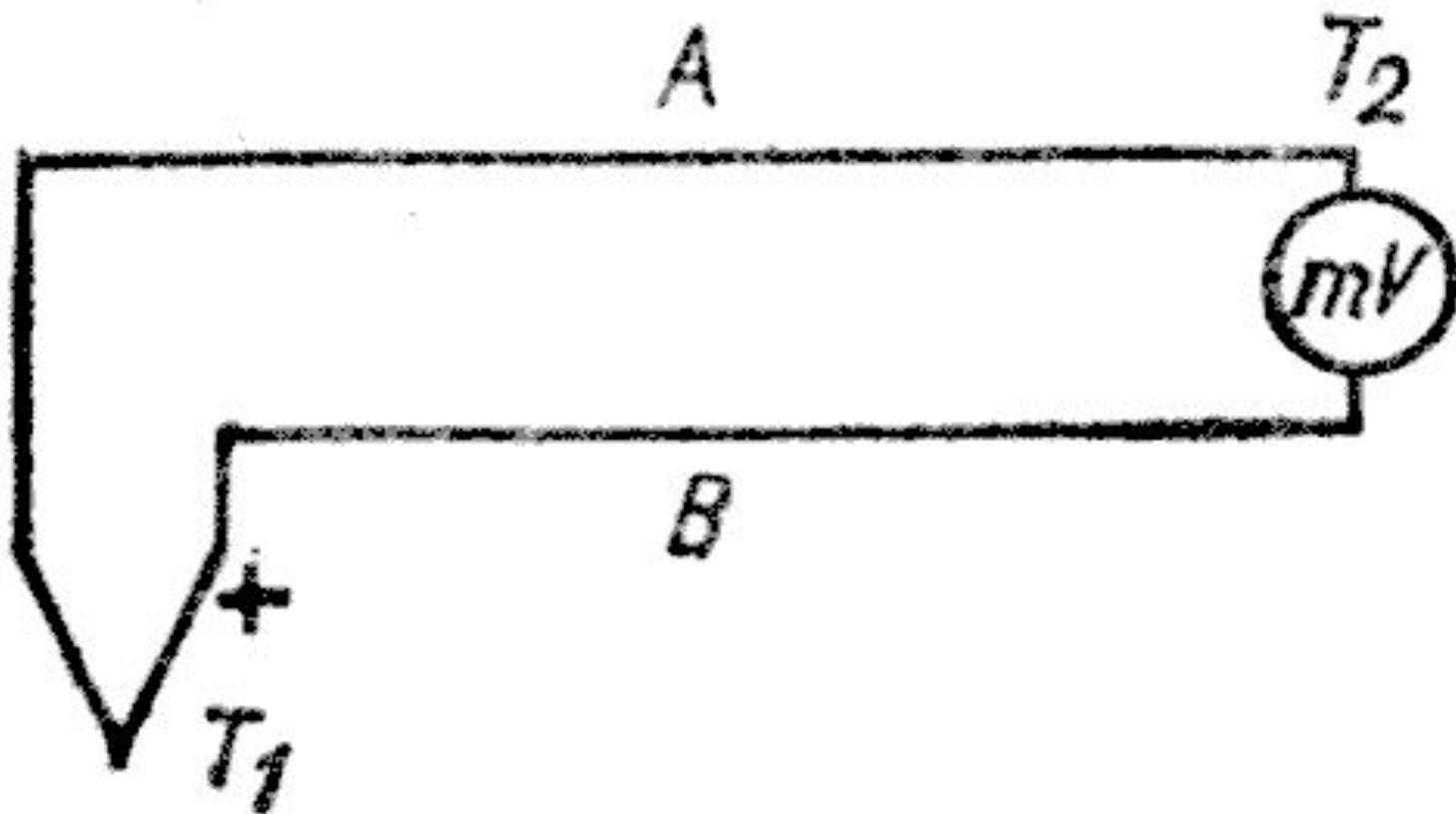
- **Контактная разность потенциалов** пары проводников определяется по формуле:

$$U = \psi (T1 - T2)$$

где  $\psi$  – постоянный для данной пары проводников **коэффициент термо-ЭДС**,  $T1$  и  $T2$  – **разность температур спаев**.

- На практике данное выражение не всегда соблюдается, и зависимость термо-ЭДС от температуры может быть **нелинейной**.

Данное свойство проводников  
используется в **термопарах**:



# Сплавы для термопар

- Сплавы для термопар имеют различные сочетания, в том числе один электрод может быть из чистого металла.
- Наиболее распространенными являются никелевые и медно-никелевые сплавы.
- Для изготовления термопар применяются следующие сплавы:
  - *Копель (56% Cu , 44% Ni);*
  - *Алюмель (95% Ni, остальное Al, Si, Mg);*
  - *Хромель (90% Ni, 10% Cr);*
  - *Платинородий (90% Pt, 10% родия).*

# Область применения различных термопар

- Термопары могут применяться для измерения следующих температур:
  - ▣ **Платина – платинородий – до 1600 °С;**
  - ▣ **Хромель – алюмель (ТХА) – до 1200 °С;**
  - ▣ **Железо – константан, железо – копель, хромель – копель – до 600 °С;**
  - ▣ **Медь – константан и медь –копель - до 350 °С;**
  - ▣ **Предельная температура, измеряемая термопарой, определяется областью линейной зависимости термо-ЭДС от разности температур.**
  - ▣ В этом случае погрешность измерений будет минимальной.

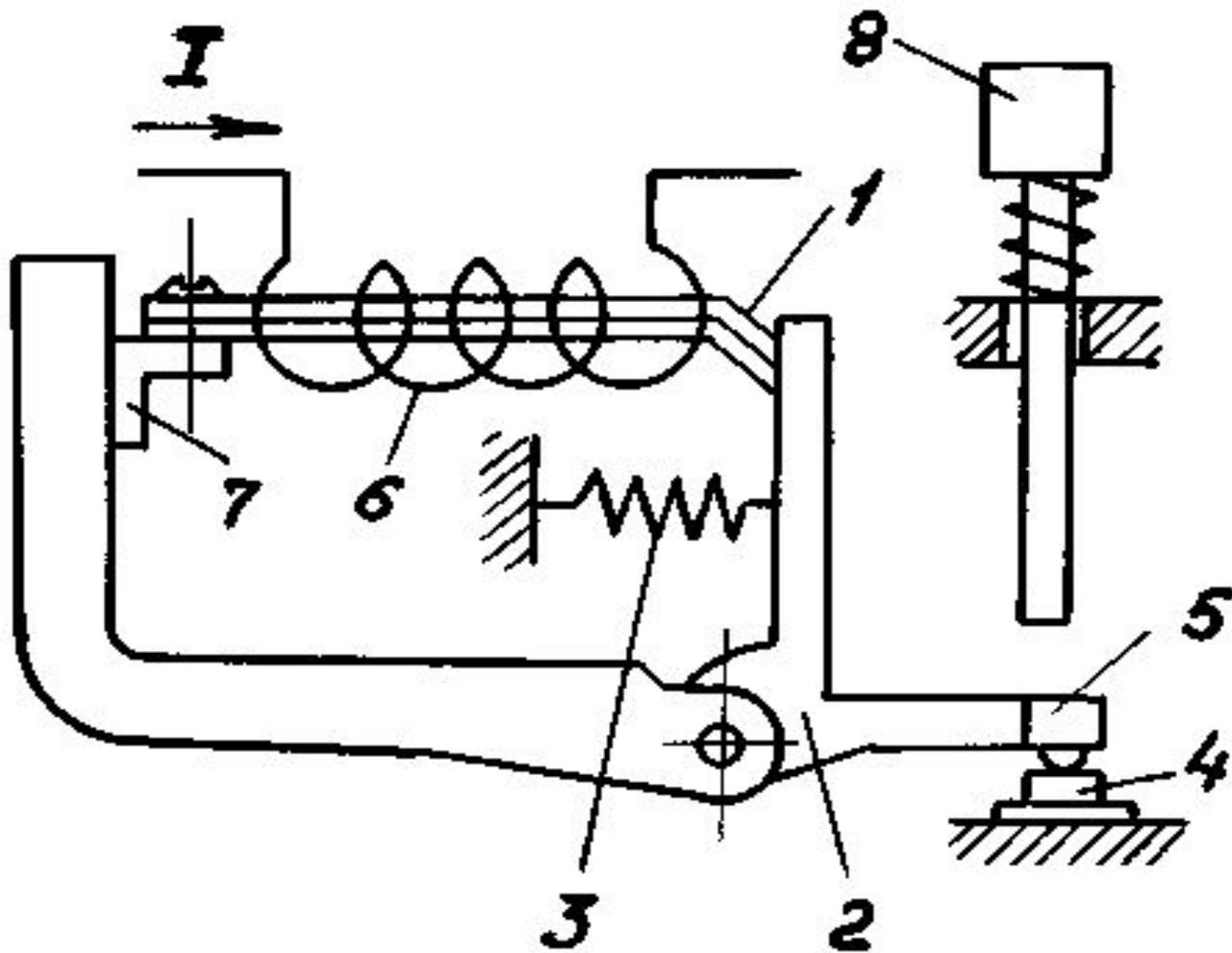
# Температурный коэффициент линейного расширения проводников

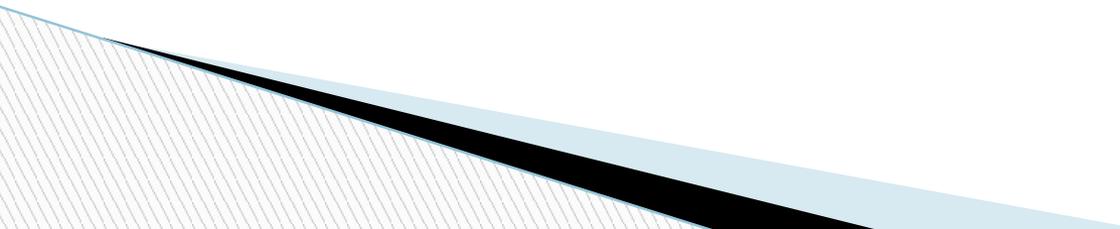
- При нагреве **до одинаковой температуры** для различных проводников характерны **разные значения увеличения их длины**, которые характеризуются **температурным коэффициентом линейного расширения** :
- **Активные проводники** – большие значения удлинения;
- **Пассивные проводники** – меньшие значения удлинения (изменения линейных размеров).
- Этот коэффициент необходимо знать, чтобы иметь возможность **оценить работу сопряженных материалов в различных конструкциях**, а также исключит растрескивание или нарушение вакуумного соединения металла со стеклом или керамикой при изменении температуры.

# Тепловые реле

- Данное свойство проводников используется в **тепловых реле**, в которых основным элементом является **биметаллическая пластина**, состоящая из двух проводниковых материалов, один из которых является **активным**, а другой – **пассивным**.
- При одинаковом тепловом воздействии разная степень удлинения проводников приводит к **деформации биметаллической пластины**, т.е. к ее изгибанию, что приводит к срабатыванию теплового реле.
- **Тепловое реле** реагирует на **избыток тепла**, возникающем при перегрузках.

## Устройство теплового реле



- **1 – биметаллическая пластина;**
  - **2 – рычаг;**
  - **3 – противодействующая пружина;**
  - **4, 5 – контакты теплового реле;**
  - **6 – нагревательный элемент;**
  - **7 – скоба;**
  - **8 – кнопка возврата реле в исходное состояние.**
- 

## Принцип работы теплового реле

- **Биметаллическая пластинка** – это наложенные друг на друга и сваренные между собой две полоски из металла **с разными коэффициентами линейного расширения**, т.е. удлиняющиеся при нагревании неодинаково.
- При нормальной температуре (между 0 и 20 °С) полоски имеют одинаковую длину, а при её повышении **пластинка 1** изгибается кверху и при определённом положении освобождает **рычаг 2**, который под воздействием **пружины 3** поворачивается и размыкает **контакты 4 и 5**.

- Очевидно, что **чем больше нагрев пластины**, тем больше и быстрее она изогнется и **тем быстрее сработает тепловое реле**.
- **Ток защищаемого электродвигателя** в тепловом реле проходит непосредственно через **биметаллическую пластинку (прямой нагрев)** или через **нагревательный элемент б (косвенный нагрев)**.
- **Величина тока срабатывания** может быть изменена путем **смены биметаллической пластины** или **нагревательного элемента** (нихромовое сопротивление) на другие, имеющие разную форму и сечение.

# Механические свойства проводников

- **Механическая прочность** - характеризуется пределами прочности при растяжении, сжатии и изгибе;
- **Относительное удлинение перед разрывом**  $\Delta l / l$  характеризует хрупкость проводниковых материалов.
- **Механические свойства** металлических проводников в большой степени зависят **от механической и термической обработки**, от наличия **легирующих добавок**.

# Материалы высокой проводимости

## Медь

### Преимущества меди

- **малое удельное сопротивление** (из всех материалов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь);
- **достаточно высокая механическая прочность**;
- удовлетворительная в большинстве случаев **стойкость** по отношению **к коррозии** (медь окисляется на воздухе даже в условиях высокой влажности значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах);
- **хорошая обрабатываемость** (медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра);
- **относительная легкость пайки и сварки.**

# Марки меди

- Марки меди зависят от количества примесей:
- **M1** содержит 99,9% меди (**0,1% примесей**);
- **M0** содержит не более **0,05% примесей**.
  - При холодной протяжке получают **твердотянутую медь (МТ)**, которая имеет:
    - **высокий предел прочности** при растяжении ;
    - **малое относительное удлинение** перед разрывом;
    - **высокую твердость и упругость** при изгибе.
  - Путем отжига получают **мягкую** (отжженную) медь (**ММ**), имеющая:
    - **малую твердость и небольшую прочность**;
    - **большое удлинение перед разрывом**;
    - **более высокую проводимость**.

## Сплавы меди

- В отдельных случаях помимо чистой меди в качестве проводникового материала применяются ее сплавы с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием.
- Такие сплавы, носящие название **бронз**, при правильно подобранном составе имеют значительно более **высокие механические свойства**, чем чистая медь:  $\sigma_p$  бронз может быть **800-1200 МПа** и более.
- Бронзы широко применяют для изготовления токопроводящих пружин и т. п.
- **Кадмиевую бронзу** применяют для контактных проводов и коллекторных пластин особо **ответственного** назначения.

- Еще большей механической прочностью обладает **бериллиевая бронза** ( до **1350 МПа**).
- **Сплав меди с цинком** — *латунь* — обладает достаточно **высоким относительным удлинением перед разрывом** при повышенном по сравнению с чистой медью пределе прочности при растяжении.
- Латунь имеет **технологические преимущества** перед медью при обработке штамповкой, глубокой вытяжкой и т. п.
- **Латунь** применяют в электротехнике для изготовления всевозможных **токопроводящих деталей сложной формы**.

# Алюминий и его свойства

- **Алюминий** является **вторым** по значению (после меди) проводниковым материалом.
- Это важнейший представитель так называемых **легких металлов** (т.е. металлов с плотностью менее  $5 \text{ Мг/ м}^3$ ):
  - ❖ плотность **литого** алюминия около  $2,6 \text{ мг/ м}^3$ ;
  - ❖ плотность **прокатанного** алюминия -  $2,7 \text{ мг/ м}^3$ .
- Таким образом, алюминий приблизительно **в 3,5 раза легче меди.**
- **Температурный коэффициент расширения, удельная теплоемкость и теплота плавления алюминия больше, чем меди.**

- Вследствие высоких значений удельной теплоемкости и теплоты плавления для нагрева алюминия до температуры плавления и перевода в расплавленное состояние требуется большая затрата теплоты, чем для нагрева и расплавления такого же количества меди, хотя температура плавления алюминия ниже, чем меди.
- Алюминий обладает **пониженными** по сравнению с медью **свойствами** — как механическими, так и электрическими.
- **При одинаковых сечении и длине электрическое сопротивление алюминиевого провода больше, чем медного, в  $0,028:0,0172=1,63$  раза.**

- Следовательно, чтобы получить алюминиевый провод такого же электрического сопротивления, как и медный, нужно взять его **сечение в 1,63 раза большим**, т.е. диаметр должен быть в **1,3 раза больше диаметра медного провода.**
- Если сравнить **по массе два отрезка алюминиевого и медного проводов одной длины и одного и того же сопротивления**, то окажется, что алюминиевый провод хотя и толще медного, но легче его **приблизительно в два раза.**

- Алюминий весьма **активно окисляется** и покрывается тонкой **оксидной пленкой** с **большим электрическим сопротивлением**.
- Эта пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но **создает большое переходное сопротивление** в местах контакта алюминиевых проводов и **делает невозможной пайку алюминия обычными методами**.
- **Для пайки** алюминия применяются специальные **пасты-припой** или используются ультразвуковые паяльники.

- В местах **контакта алюминия и меди** возможна **гальваническая коррозия**.
- Если **область контакта** подвергается действию **влаги**, то возникает **местная гальваническая пара с довольно высоким значением ЭДС**, причем полярность этой пары такова, что на внешней поверхности контакта ток идет от алюминия к меди и **алюминиевый проводник** может быть **сильно разрушен коррозией**.
- Поэтому места соединения медных проводников с алюминиевыми должны тщательно **защищаться от увлажнения** (**покрытием лаками** и тому подобными способами).

# Марки алюминия

- Для электротехнических целей используют алюминий, содержащий **не более 0,5%** примесей, марки **A1**.
- Еще более чистый алюминий марки **AB00** (**не более 0,03%** примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги, электродов и корпусов оксидных конденсаторов.
- Алюминий наивысшей чистоты **AB0000** имеет содержание примесей, не превышающее **0,004%**.

# Марки алюминия

Разные примеси в различной степени снижают удельную проводимость алюминия:

- **Добавки Ni, Si, Zn или Fe** при содержании их **0,5%** снижают  $\gamma$  отожженного алюминия не более чем **на 2-3%**.
- Более заметное действие оказывают **примеси Cu, Ag и Mg**, при том же массовом содержании снижающие  $\gamma$  алюминия на **5-10%**.
- Очень сильно снижают  $\gamma$  алюминия добавки **Ti и Mn**.

# Сплавы алюминия

- **Алюминиевые сплавы** обладают повышенной механической прочностью.
- Сплав **альдрей**, содержащий **0,3-0,5% Mg, 0,4-0,7% Si и 0,2-0,3% Fe** (остальное **Al**).
- **Сталеалюминевый провод (АС)**, широко применяемый в линиях электропередачи, представляют собой сердечник, свитый из стальных жил и обвитый снаружи алюминиевой проволокой.
- В проводах такого типа механическая прочность определяется главным образом **стальным сердечником**, а электрическая проводимость — **алюминием**.

# Железо и его свойства

- **Железо (сталь)** как наиболее **дешевый и доступный** металл, обладающий к тому же высокой механической прочностью, представляет большой интерес для использования в качестве **проводникового материала**.
- **Чистое железо** имеет значительно более высокое по сравнению с медью и алюминием **удельное сопротивление (около 0,1 мкОм\*м)**;
- Для **стали**, т. е. железа с примесью углерода и других элементов, **удельное сопротивление еще выше**.

# Железо и его свойства

- **При переменном токе** в стали как в **ферромагнитном материале** заметно сказывается поперхностный эффект, поэтому в соответствии с известными законами электротехники активное сопротивление стальных проводников переменному току выше, чем постоянному току.
- Кроме того, при переменном токе в стальных проводниках появляются **потери мощности на гистерезис**.

- Обычная сталь обладает **малой стойкостью к коррозии**:
- ❖ даже при **нормальной температуре**, особенно в условиях **повышенной влажности**, она **быстро ржавеет**;
- ❖ **при повышении температуры скорость коррозии резко возрастает.**
- Поэтому поверхность стальных проводов должна быть защищена слоем более стойкого материала.
- Обычно для этой цели применяют покрытие **цинком.**

# Применение стали

- Сталь используют в качестве материала для **проводов воздушных линий** при передаче небольших мощностей.
- Сталь используется также в виде **шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог**.
- Для **сердечников сталеалюминиевых проводов** воздушных линий электропередачи применяется **особо прочная стальная проволока**, имеющая  $\sigma_p = 1200—1500$  МПа и  $\Delta l/l = 4—5$  %.

# Сплавы высокого сопротивления

- Сплавы высокого сопротивления имеют  $\rho > 0,3 \text{ мкОм м}$

## *Требования к сплавам для электроизмерительных приборов и образцовых резисторов*

- высокая стабильность  $\rho$  во времени;
- малый температурный коэффициент удельного сопротивления;
- малый коэффициент термо-ЭДС в паре данного сплава с медью.

## *Требования к сплавам для нагревательных приборов*

- высокая нагревостойкость - рабочие температуры  $> 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- технологичность – возможность изготовления гибкой проволоки.

# СПЛАВЫ ВЫСОКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

## Характеристики некоторых сплавов

| Материал   | Плотность,<br>кг/м <sup>3</sup> | Температура<br>плавления, °С | Удельное<br>сопротивление,<br>мкОм·м |
|------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Константан | 8900                            | 1260                         | 0,4-0,5                              |
| Манганин   | 8400                            | 960                          | 0,42-0,5                             |
| Нихром     | 8200                            | 1400                         | 1,0-1,2                              |
| Фехраль    | 7300                            | 1490                         | 1,26-1,35                            |
| Хромаль    | 7100                            | 1500                         | 1,45                                 |

# Константан

Состава сплава: **58—60% меди, 32—40% никеля и 1—2% марганца.**

**Свойства константана:**

- **плотность -  $8900 \text{ кг/м}^3$ ;**
- **температура плавления -  $1260 \text{ }^\circ\text{C}$ ;**
- **удельное объемное сопротивление –  $\rho = 0,45 \dots 0,52 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;**
- **температурный коэффициент удельного сопротивления -  $\text{TK}_\rho = 14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;**
- **предел прочности -  $\sigma_p = 400 \dots 720 \text{ МПа}$ ;**
- **коэффициент термо-ЭДС с медью -  $40—50 \text{ мкВ/}^\circ\text{C}$**

# Применение константана

- **Константан** получил свое название по причине того, что температурный коэффициент удельного сопротивления (ТК $\rho$ ) очень мал, т.е. **удельное электрическое сопротивление** практически **не изменяется** с изменением температуры сплава.
- Данное свойство сплава обусловило его использование для **эталонных резисторов**.
- Т.к. в паре с медью константан имеет **значительную термо-эдс**, это обуславливает его применение в **термопарах** (изолированная константановая проволока в паре с медной применяется для термопар).

# Манганин

- Состав сплава: **84—86% меди, 2—3% никеля и 12—13% марганца.**
- Свойства манганина:
- **плотность - 8400 кг/м<sup>3</sup>;**
- **температура плавления - 960°C;**
- **удельное объемное сопротивление –  $\rho = 0,47...0,5 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;**
- **температурный коэффициент удельного сопротивления -  $\text{TK}_\rho = 2...4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ ;**
- **предел прочности -  $\sigma_p = 450...580 \text{ МПа}$ ;**
- **коэффициент термо-ЭДС с медью - 0,9—1 мкВ/ °C.**

Для увеличения удельного электрического сопротивления до **1,5—2 Ом · мм<sup>2</sup>/м** в состав манганина вводят **60—67% марганца** и **16—30% никеля** за счет уменьшения содержания меди.

# Применение манганина

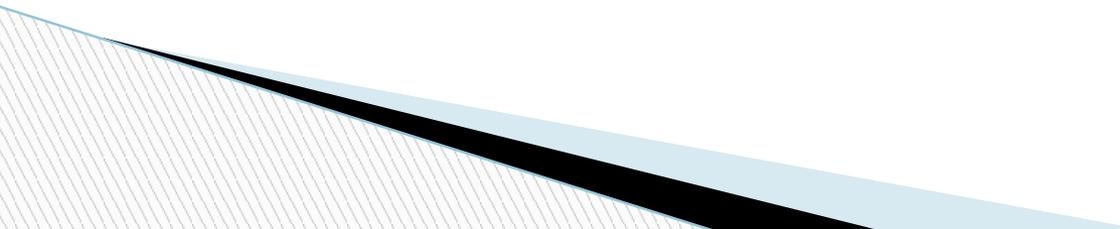
- Из манганина изготавливают мягкие (**ПММ**) и твердые (**ПМТ**) проволоки **0,02—6 мм** и ленты толщиной до **0,08 мм** и шириной до **270 мм**.
- Манганиновые изделия применяют при производстве **эталонных резисторов высокого класса**.
- Для стабилизации электрических характеристик манганиновые изделия подвергают **термической обработке в вакууме при 4006 °С** и последующей длительной выдержке при комнатной температуре, в результате чего **повышается однородность сплава и стабилизируются его свойства**.
- **Наибольшая допустимая рабочая температура** для изделий из стабилизированных сортов манганина **200° С**, из нестабилизированных — **60 - 80°С**.
- **При превышении этих температур** в манганиновых изделиях происходит **необратимое изменение свойств**.

# Сплавы для нагревательных элементов

- Для нагревательных элементов применяются сплавы на основе железа:
- **нихромы** – сплавы **Fe – Ni – Cr**;
- **ферронихромы** - сплавы с теми же компонентами, но с повышенным содержанием железа;
- **фехрали, хромали** - сплавы **Fe – Cr – Al**.
- Количество тепла от нагревательного элемента пропорционально его сопротивлению:

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

# Инженерные решения для увеличения тепла от нагревательных элементов

- Использовать сплавы с высоким удельным сопротивлением;
  - Увеличить длину проволоки в нагревательном элементе без увеличения габаритов изделия (**использование спиралей из проволоки**);
  - Использовать проволоку **малого поперечного сечения.**
- 

# Материалы с памятью формы

- Первым сплавом, обладающим памятью формы, является *нитинол*, содержащий **55% никеля** и **45% титана**.
- Он был создан **в 1962 году**, но его уникальное свойство (**термическая память формы**) было обнаружено позже.
- Деталь из сплава **«запоминает»** форму, которую она имела **при нагреве до определенной температуры** и, будучи охлажденной и деформированной, **воспроизводит эту форму при нагревании до «памятной» температуры**.

- Если проволоку из этого сплава нагреть **до температуры 360 – 420 К**, изогнуть в нагретом состоянии, охладить и распрямить (расплющить, согнуть иным образом, завязать узлом), то **при повторном нагреве до температуры около 340 К она самопроизвольно восстановит форму**, которую имела в исходном состоянии.
- Памятью формы обладают и другие сплавы: **серебро - кадмий, серебро - цинк, титан – железо, титан-никель – кобальт, медь – алюминий – никель, золото – кадмий, цирконий – рубидий, цирконий – палладий**.
- Применение: **космонавтика, электроника, медицина и другие области**.

# Контактные материалы

- Электрические контакты являются **самым слабым звеном электрической цепи** независимо от того из какого материала они выполнены.
- При соприкосновении двух металлов или сплавов возникает электрическое сопротивление, называемое **переходным сопротивлением** контакта.
- Переходное сопротивление лишь **частично зависит от удельной электрической проводимости** материала, из которого состоит площадь контакта.
- **Переходное сопротивление всегда больше сопротивлений контактируемых материалов**, а, следовательно в месте контакта **выделяется больше тепла** при протекании тока (электрические потери).

- Причиной большего нагрева контактного соединения является невозможность выполнить контактируемые поверхности абсолютно гладкими.
- Поверхность контактируемых проводников является ***кажущейся площадью контакта.***
- В действительности из-за шероховатости поверхности контактов ***фактическая площадь контактирования значительно меньше*** (соприкасаются друг с другом только самые большие выступы) и электрический ток протекает только через малые площадки ***фактического контакта.***
- Размеры площадок случайны, но их ***можно увеличить за счет усилия нажатия контактов.***
- Другой причиной является образование оксидных пленок на поверхности контактов, обладающих более высокими удельными сопротивлениями.

# Требования к контактным материалам

- ▣ *высокая дугостойкость;*
- ▣ *высокая твердость;*
- ▣ *высокая удельная электропроводимость;*
- ▣ *большой коэффициент теплопроводности;*
- ▣ *малое переходное сопротивление контакта;*
- ▣ *высокая химическая стойкость, особенно к окислению.*

## Виды контактов

- ▣ *скользящие;*
- ▣ *разрывные;*
- ▣ *неподвижные.*

# Материалы для разрывных контактов

- ▣ *Разрывные контакты предназначены для периодического замыкания и размыкания* электрических цепей в течение длительного времени (в реле, пускателях, автоматических выключателях и т.п.)
- ▣ В процессе работы разрывных контактов возникает **искра или электрическая дуга**, что вызывает их коррозию и электроэрозионный износ.
- ▣ В связи с этим материалы для разрывных контактов должен иметь:
- ▣ *небольшое переходное электрическое сопротивление;*
- ▣ *стойкость к механическому износу и электрической эрозии.*



## Разрывные контакты в слаботочной технике

▣ *Слабонагруженные контакты изготавливают из благородных металлов: золота, серебра, платины, палладия и их сплавов*, которые обладают низким переходным электрическим сопротивлением и повышенной стойкостью против окисления.

- ▣ Чистое *серебро* применяют в слабонагруженных контактах *при небольшой частоте переключений*.
- ▣ Серебро технологично при производстве проката и наиболее дешевое из всех благородных металлов.
- ▣ Серебряные контакты имеют **удельное электрическое сопротивление 0,019–0,070 мкОм м**, твердость **30–50 НВ**.

# Разрывные контакты в сильноточной технике

- Используют **тугоплавкие металлы**: вольфрам, молибден, медь, различные сплавы: Ag с Co, Ni, Cr, Mo, W, Ta, Cu.
- В качестве разрывных контактов используются **металлокерамические композиции** систем:
  - Ag-CdO;
  - Карбид вольфрама – серебро;
  - Медь – окись кадмия;
  - Серебро (медь) – графит.

# Материалы для скользящих контактов

- К материалам для скользящих контактов предъявляют те же требования, что и для разрывных, но основное требование – **высокое сопротивление свариванию**.
- Для скользящих контактов применяют композиции *из порошков меди или серебра с небольшой добавкой графита, препятствующего свариванию (МГЗ, МГ5, СГЗ, СГ5)*.
- *Цифра в марках указывает на содержание графита в процентах.*

# Свойства и применение других металлов

## *Серебро*

- В нормальных условиях  $\rho = 0,016$  мкОм м;
- Устойчиво к окислению;
- Высокие механические свойства (изготовление проводников диаметром до 15 мкм).
- ❖ **Обмотки мощных магнитов** для разделения изотопов, позволившие американцам создать в годы войны первые атомные бомбы, **были изготовлены из серебра.**
- ❖ На эти цели было израсходовано **40 тыс. тонн серебра.**

# Криопроводники

- Криопроводниками называются материалы, у которых в области низких температур удельное электрическое сопротивление уменьшается в 3 – 4 раза.
- Удельное сопротивление обычных металлов в области криогенных температур примерно на один порядок меньше, чем при комнатной температуре.
- Для достижения особо высоких значений криопроводимости необходима высокая чистота и минимальное число искажений кристаллической решетки металла.
- В качестве криопроводников наибольшее применение находят медь, алюминий и бериллий.
- Удельное сопротивление криопроводников изменяется постепенно, не скачкообразно при резком изменении температуры или магнитной индукции.

# Сверхпроводники

- В 1911 г. голландский ученый Г. Каммерлинг – Оннес обнаружил, что при охлаждении до температуры 4,2 К сопротивление кольца из замороженной ртути внезапно исчезает.
- Это внезапное исчезновение электрического сопротивления при криогенных температурах, то есть появление бесконечной удельной проводимости, называется **сверхпроводимостью**.
- Температура, при которой совершается переход вещества в сверхпроводящее состояние, называют **температурой сверхпроводящего перехода -  $T_{кр}$** .
- В настоящее время известно **27 простых сверхпроводников (чистых металлов) и более тысячи сложных (сплавов и соединений)**.