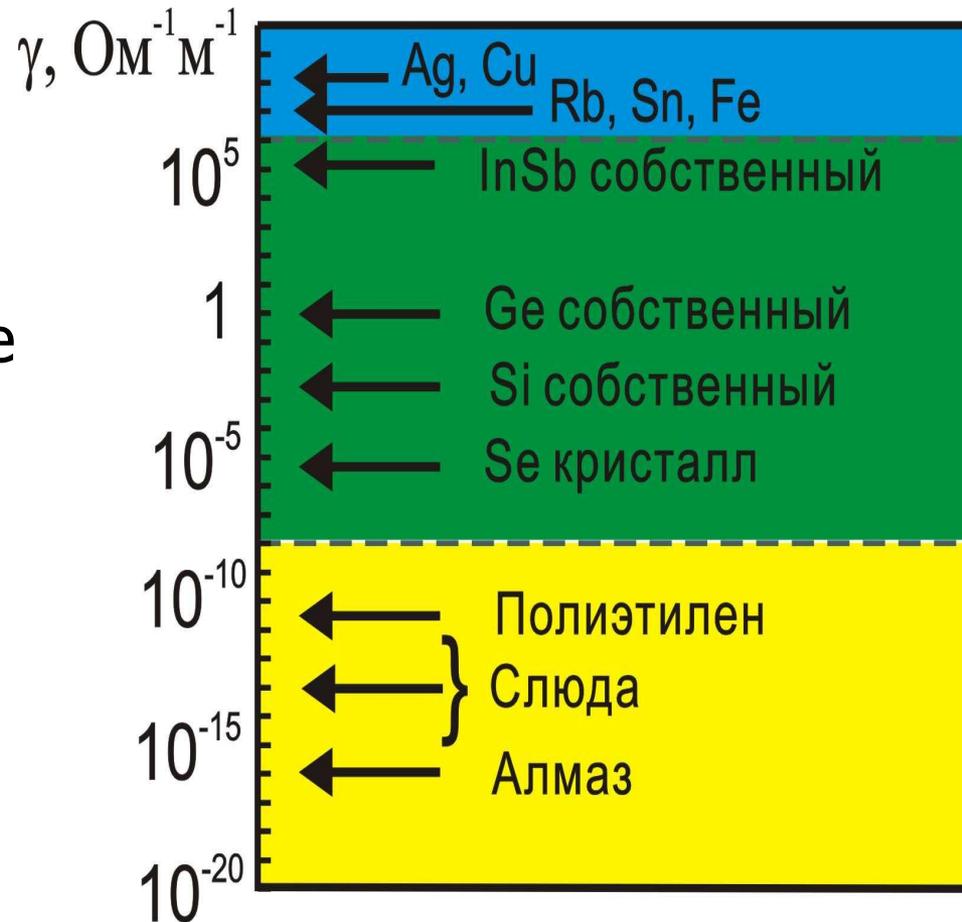


# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

# Классификация материалов по электропроводности

- $R = \rho(l / S); \gamma = 1 / \rho$ .
- По электропроводности  $\gamma$  все твердые тела можно разделить на три большие группы: **металлы**  $10^6 \div 10^8$   $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ , **полупроводники**  $10^{-8} \div 10^6$   $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ , **диэлектрики**  $< 10^{-8} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ .

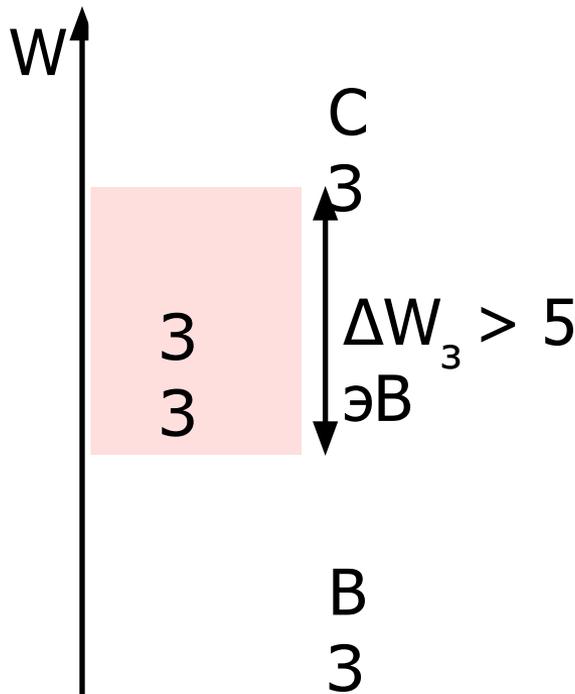


Различия в электрических свойствах разных типов твердых тел могут объясняться:

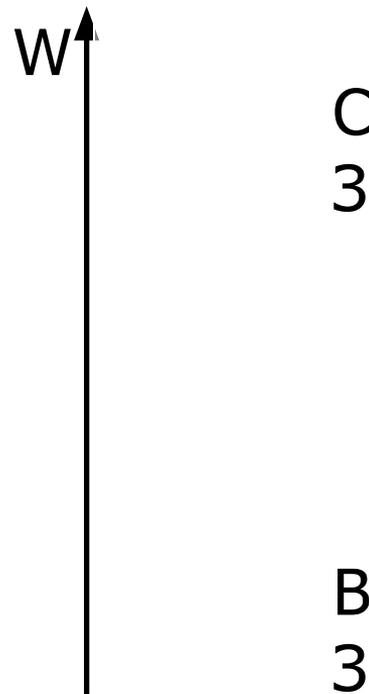
шириной запрещенных энергетических зон

различным заполнением электронами разрешенных энергетических зон

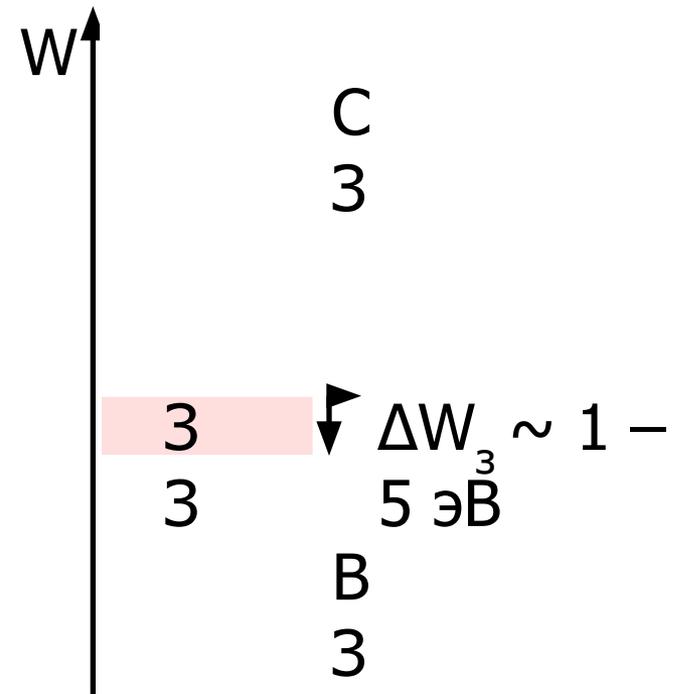
диэлектрик



проводник



полупроводник



# Проводниковые материалы

## Классификация

Материалы высокой проводимости

Контактные материалы

Припои и контактолы

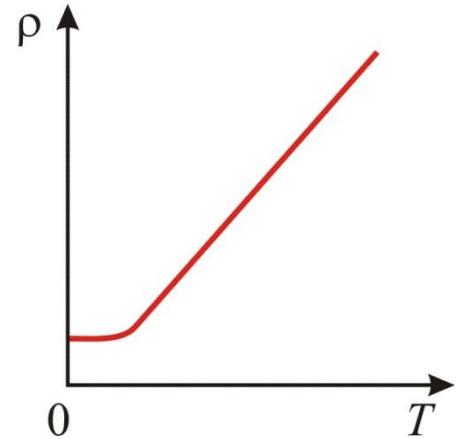
Резистивные материалы

Материалы для нагревательных  
элементов

Термоэлектродные материалы

# Влияние температуры

- Электроны в твердом теле движутся не беспрепятственно, они рассеиваются. Рассеивание будет происходить в том случае, если расстояние между рассеивающими центрами соизмеримо с длиной волны электронов. **Электроны рассеиваются из-за тепловых колебаний и на дефектах кристаллической решетки.**
- Коллективные колебания атомов в кристалле представляют собой звуковые волны, а соответствующие им возбуждения – кванты звука, **или фононы.**
- При стремлении температуры к абсолютному нулю в идеальном кристалле число фононов будет стремиться к нулю и удельное электросопротивление также будет стремиться к нулю.
- **При низкой температуре** подвижность электронов определяется рассеянием их на дефектах (в первую очередь на атомах примеси), так как длина волны электрона в металле  $\sim 10^{-10}$  м = 0,1 нм.
- **При высокой температуре** доминирует рассеяние электронов на фононах.  $\langle n_{\text{ph}} \rangle \sim T \Rightarrow \mu \sim 1/T \Rightarrow \rho \sim T$ .



# Влияние наклепа

В результате наклепа происходит искажение кристаллической структуры и возникают дефекты, которые приводят к дополнительному рассеянию электронов. Если дополнительное (остаточное) сопротивление в результате наклепа обозначить как  $\rho_h$ , то выражение для  $\rho$  можно переписать так:

$$\rho = \rho_1 + \rho_x + \rho_h.$$

- не зависит от температуры, т.е.  $d\rho / dT$  не зависит от степени деформации. Когда исчезает наклеп, например, при температуре выше температуры рекристаллизации, то исчезает и слагаемое  $\rho_h$ .

# Влияние термообработки

- **Увеличение размера зерна** приводит к уменьшению  $\rho$ , что связано с уменьшением площади межзеренных границ. Влияние размера зерна особенно существенно при такой дисперсности зерен, когда **размеры зерен** одной из фаз (например, включений) **соизмеримы с длиной волны электрона** ( $\sim 0,1 \div 1$  нм). При этом происходит значительное рассеяние электронов, а следовательно, и резкое повышение сопротивления (примерно на  $10 \div 15$  %).
- **Отжиг**, снимающий наклеп, и отжиг, увеличивающий размер зерна, должны приводить к уменьшению сопротивления и т.п.
- **Закалка**, фиксируя высокотемпературное (обычно более дефектное) состояние, приводит к возрастанию электросопротивления..

# Влияние химических соединений

- Сопротивление химического соединения выше, чем составляющих его элементов. Это связано с тем, что в результате химического взаимодействия (образование ковалентных или ионных связей) **уменьшается число свободных электронов** – носителей тока в металле. В результате химического взаимодействия металлическая проводимость вообще может исчезнуть.
- Влияние электронных соединений и фаз внедрения на электропроводность иногда схоже с влиянием химического соединения, т.е. приводит к уменьшению проводимости, но возможна и противоположная картина, когда проводимость возрастает.

# Материалы высокой проводимости

- Медь и её сплавы
- Алюминий и его сплавы
- Углеродистые материалы
- Серебро
- Золото
- Главные требования, предъявляемые к материалам высокой проводимости, – это высокая электропроводность, доступность и технологичность. Основные материалы, которые по совокупности удовлетворяют этим требованиям, это **медь, алюминий и их сплавы**.
- **Серебро** используется в оборудовании связи и проводящих системах с повышенными эксплуатационными требованиями.
- **Золото** (проволока диаметром 5÷10 мкм), широко используется, например, в электронной промышленности при производстве интегральных микросхем и полупроводниковых приборов.

# Медь

■ **Важнейшим из металлов высокой проводимости** является медь, что обусловлено совокупностью характерных для нее свойств:

- минимальное удельное электросопротивление  $\rho = 0,0172$  мкОм/м (только серебро имеет  $\rho$  примерно на 5 % меньше, чем чистая медь);
- высокая для большинства случаев практического применения механическая прочность;
- удовлетворительная стойкость к воздействию окружающей среды;
- хорошая технологичность (благодаря сочетанию прочности и высокой пластичности медь перерабатывается в фольгу, ленты, листы, шины, профили для коллекторов электрических машин, проволоку и другие изделия);
- относительная легкость пайки и сварки, что особенно важно при монтажных работах.

■ Основной **недостаток** меди – ее относительная дефицитность, обусловленная относительно малой распространенностью в

## Физические и механические свойства меди:

Температура плавления, °С	1083
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8940
Предел прочности, Мпа: Мягкой (отожжённой) Твердой (наклепанной)	200 – 250 400 – 450
Относительное удлинение, % Мягкой (отожжённой) Твердой (наклепанной)	40–50 2–4

## Маркировка меди

- Поставляемая промышленностью медь по химическому составу разделяется на марки: М00, М00б, М0, М0б, М1, М1р, М2 и др. (цифры после буквы М в **марках** меди означают чистоту, %: 00 – 99,99; 0 – 99,95; 1 – 99,9; 2 – 99,7; 3 – 99,5; 4 – 99,0; буквы: «б» – бескислородная с улучшенными механическими свойствами и наименее подверженная водородной «болезни», «р» – раскисленная фосфором, с пониженным содержанием кислорода); по механической прочности – на твердую неотожженную МТ и мягкую отожженную ММ.
- Медь выпускается в виде слитков, прутков, труб и трубок, катанки, листов и лент, проволоки и проводов различных видов, катодов, профилей и других фасонных изделий.

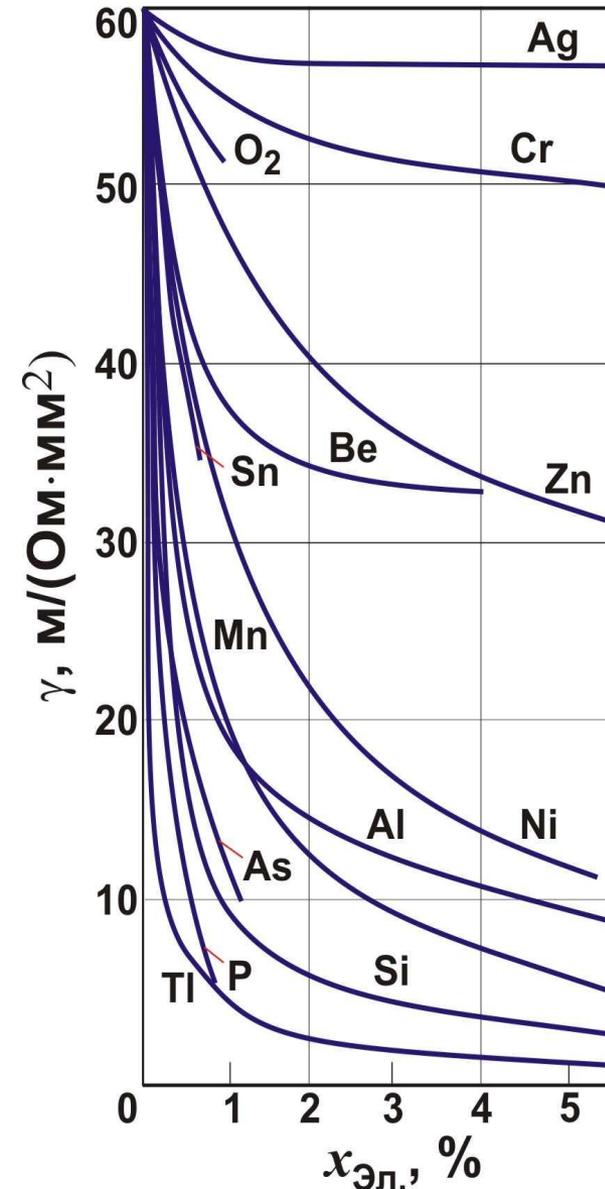
# Влияние примесей на

$\gamma_{Cu}$

- Изменение удельного электросопротивления в результате легирования с образованием твердого раствора можно приблизительно выразить соотношением  $\rho_x = a_x x(1 - x)$ , или для разбавленных растворов  $\rho_x = a_x x$ , где  $x$  – молярная доля растворенного элемента;  $a_x$  – примесный коэффициент электросопротивления, который возрастает в случае большой разницы между размерами и валентностями атомов растворимого элемента и растворителя.

- Согласно **правилу Матиссена–Флеминга** электросопротивление слабоконцентрированного твердого раствора выразится следующим образом:  $\rho = \rho_1 + \rho_x$ , где  $\rho_1$  – электросопротивление растворителя (матрицы).

- $$d\rho / dT = a_T \rho_0 + a_{Tx} \rho_{x0}$$



# Латуни – сплав меди с цинком

- **Латуни** по сравнению с медью обладают более высокой механической прочностью и повышенным удельным электросопротивлением.
- Они широко применяются для изготовления различных токопроводящих деталей электрооборудования, причем особенно часто – латуни Л68 и Л63.
- Латуни стойки к атмосферной коррозии, однако многие сплавы, содержащие более 20÷30 % Zn, склонны к растрескиванию из-за одновременного действия остаточных напряжений в изделии и коррозионного воздействия аммиака, а также сернистого газа во влажной атмосфере. Это явление называется **сезонной коррозией латуни**, так как наблюдается оно в месяцы с повышенной влажностью. Растрескивание предотвращают, проводя отжиг при 250÷350 °С для снятия остаточных напряжений.
- К электротехническим латуням относятся также латуни Л96, ЛЖМц59-1-1, ЛМц58-2, ЛС59-1, ЛК80-3.

# Латуни – сплав меди с цинком

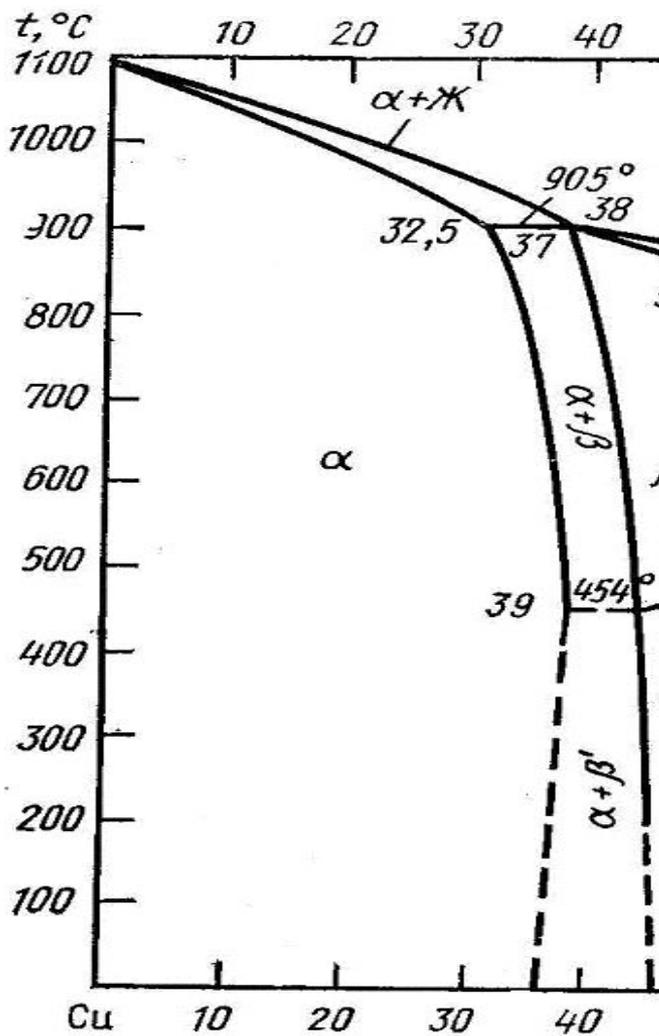
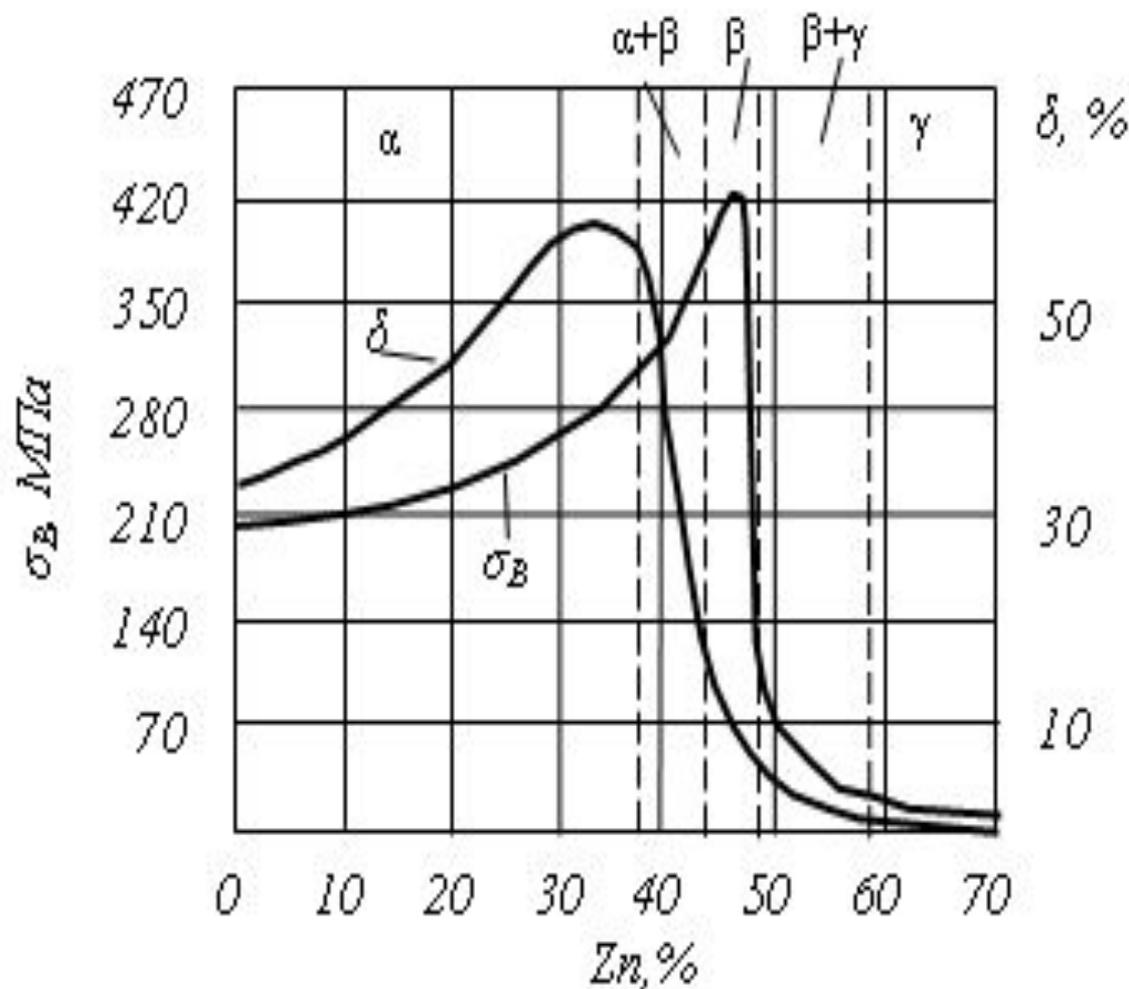


Диаграмма состояния системы «Cu – Zn»



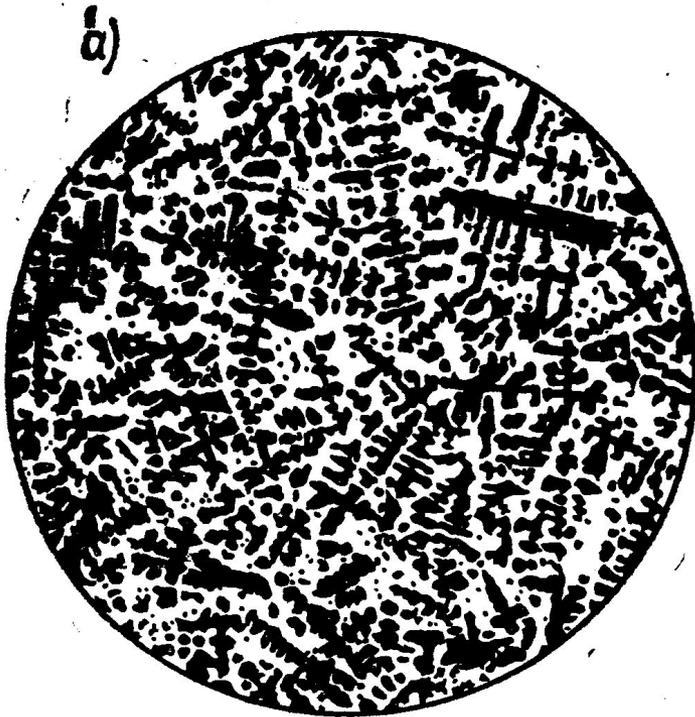
Влияние содержания цинка на свойства латуней



Микроструктура латуни:  
а) отожженной  $\alpha$ -латуни,  
б) литой  $\alpha + \beta$ -латуни

# Бронзы – сплав меди с другими элементами

- **Бронзы** по сравнению с медью обладают повышенными электросопротивлением, механической прочностью, твердостью, упругостью (как при нормальной, так и при повышенных температурах), стойкостью к истиранию.
- Для электротехники наибольший интерес представляют те бронзы, которые сочетают высокую удельную электропроводность  $\gamma$  (бериллиевая бронза Бр Б2) с прочностью и твердостью (кадмиевая и хромовая бронзы).
- Из проводниковых бронз изготавливаются контактные провода для электрического транспорта, коллекторные пластины, контактные ножи, скользящие контакты, токоведущие пружины, упругие контактные элементы, щеткодержатели, электроды, зажимы и т.п.
- Из литейных оловянных и безоловянных бронз изготавливаются литые токоведущие детали сложной формы с удельной проводимостью, составляющей  $\sim 10\%$  от проводимости чистой меди.



Микроструктура оловянной бронзы с 5% олова:

а) литая, б) отожженная

# Алюминий и его сплавы

## Физические и механические свойства алюминия:

Температура плавления, °С	660
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2700

Состояние листа	Толщина листа, мм	$\sigma_b$ , МПа, не менее	$\delta$ , %, не менее
Отожженный	1–10	60	28
Нагартованный	4–10	130	5
Горячекатанный	5–10,5	70	15

# Алюминий

- **Алюминий** является вторым после меди техническим проводником по значению удельной электрической проводимости  $\gamma$  при нормаль-ных условиях  $\rho = 0,028$  мк Ом/м.
- При пониженной температуре ( $< 70$  К)  $\gamma_{Al} > \gamma_{Cu}$ .
- **Дополнительное достоинство** алюминия в том, что он самый распространенный в природе металл. С учетом дефицитности меди роль алюминия как проводникового материала высокой проводимости возрастает.
- **Достоинства алюминия:** легкость (в 3,3 раза легче меди); высокая удельная электропроводность; пластичность; хорошая технологичность; коррозионная стойкость. Однако алюминий существенно уступает меди в механической прочности.
- Чистый алюминий **маркируется** в зависимости от химического состава: особой чистоты А999 (99,999); высокой чистоты А995 (99,995), А99 (99,99), А97 (99,97), А95 (99,95); технической чистоты А85 (99,85), А8 (99,80), А7 (99,70), А6 (99,60), А5 и А5Е или АЕ (99,50), А0 и А (99,00).
- Из алюминия АЕ, в частности, изготавливается алюминиевая электротехническая проволока марок: АТ – твердая, АПТ – полутвердая, АМ – мягкая.

- Для применения в электротехнике предусмотрены специальные марки А5Е (АЕ) и А7Е, удельное электросопротивление которых нормируется.
- Для изготовления прессованных токопроводящих жил используются специальные марки алюминия А75К, А8К, А8КУ.
- В перечисленных пяти марках резко ограничено содержание примесей Ti, V, Mn, Cr, которые резко снижают проводимость алюминия.
- Оксидная, защищающая от коррозии пленка на поверхности алюминия обладает электроизоляционными свойствами, создавая большое контактное сопротивление в месте соединения. Поэтому пайка алюминия обычными методами невозможна.
- Для пайки алюминия применяются специальные пасты-припои и ультразвуковые паяльники, разрушающие оксидную пленку. Для соединения алюминиевых проводов применяется и холодная сварка – пластическое обжатие контакта, при котором пленка окисла растрескивается и выдавливается из зоны контакта, а очищенные поверхности металла прочно соединяются.
- Алюминий применяется для изготовления электрических проводов, кабельных, тонкопленочных и других токопроводящих изделий, конденсаторов, конденсаторной фольги, электродов в разрядниках, катодов в ионных рентгеновских трубках, в выпрямителях тлеющего разряда, электродов (диафрагм и отклоняющих пластин) в электронно-лучевых трубках и т.п.

# Сплавы алюминия

- Для алюминиевых сплавов характерно сочетание легкости с повышенной, по сравнению с алюминием, прочностью. Электрические, механические и технологические свойства алюминиевых сплавов регулируются различными добавками.
- Для изготовления электротехнической проволоки, шин, фольги и других изделий применяются деформируемые алюминиевые сплавы, легированные одновременно кремнием и магнием. Из сплава АВЕ (системы Al-Mg-Si) изготавливают электротехническую проволоку. Для изготовления токоведущих шин применяется сплав АД-31 этой же системы.
- Для заливки короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей общего назначения применяется алюминий технической чистоты А5, А7, а для заливки роторов асинхронных двигателей с особыми характеристиками (повышенным скольжением, увеличенным пусковым моментом и др.) – литейные алюминиевые сплавы:  
АКМ2-1, АКЗ, АК10, АКМ4-4, АМг7, АКМ12-4, АКМц10-2, АКЦ11-12, АКМг1-9.

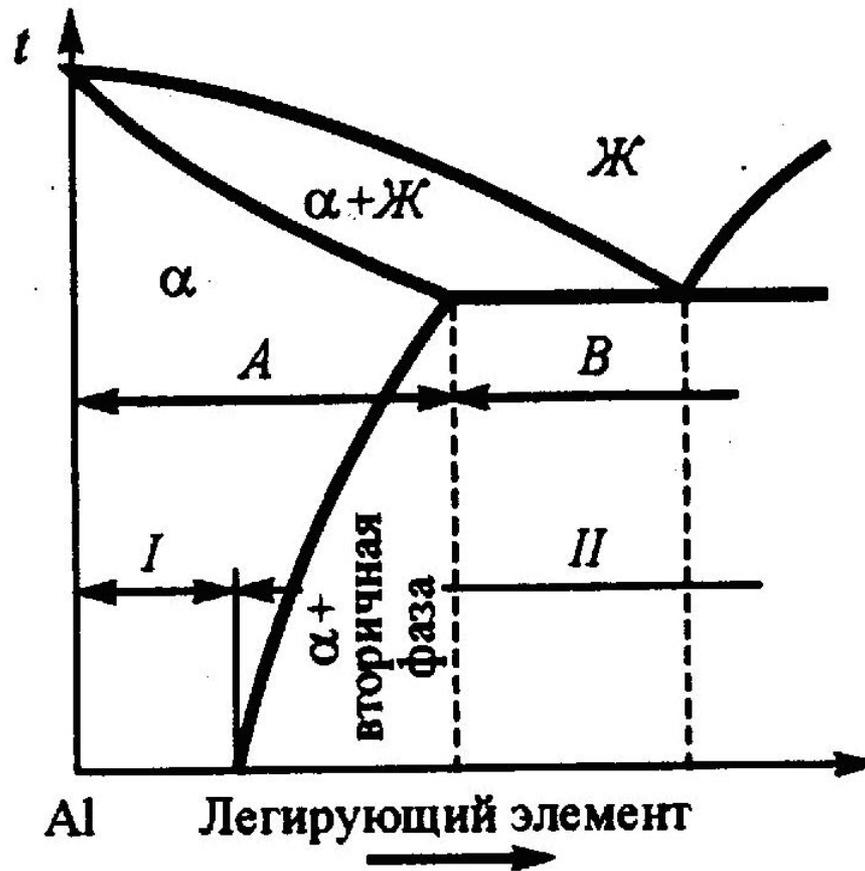


Диаграмма состояния алюминий-легирующий элемент

А – деформируемые сплавы, В – литейные сплавы,

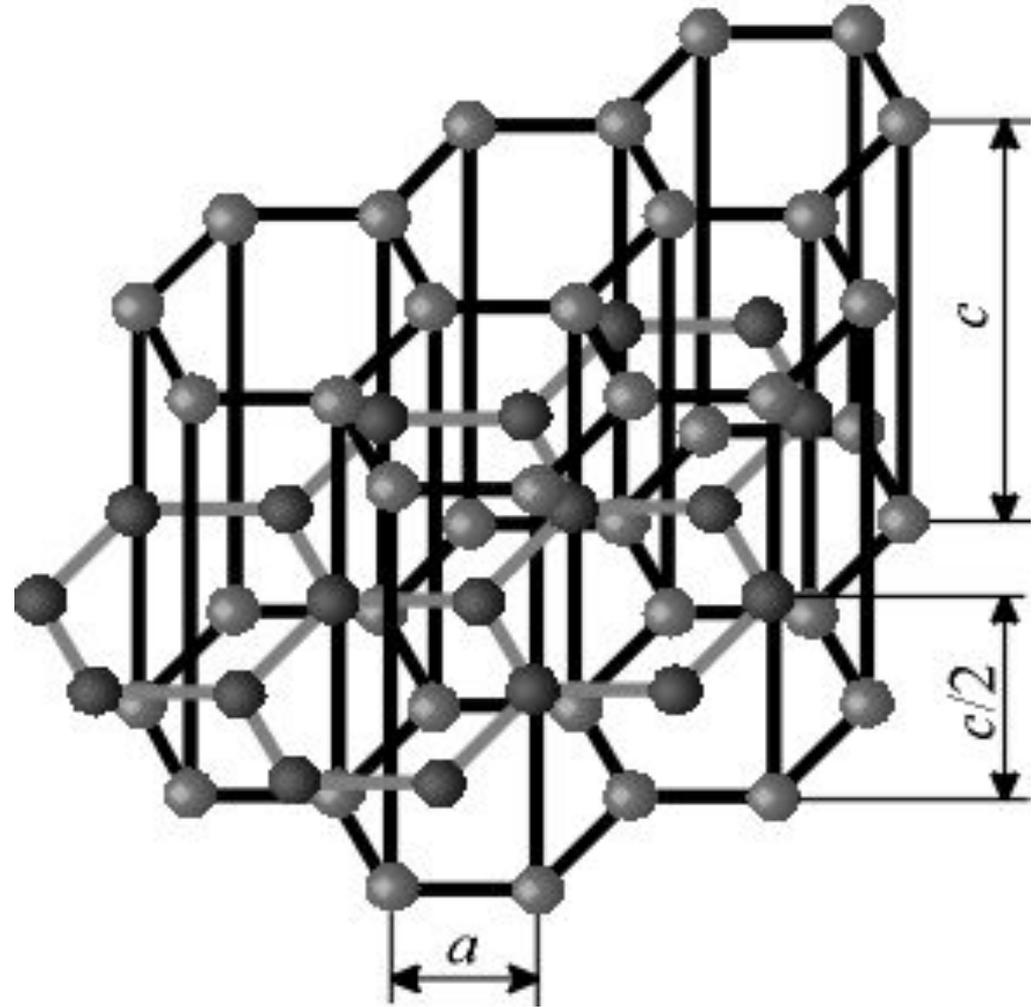
I – сплавы неупрочняемые; II – упрочняемые

термической обработкой

# Углеродные материалы

## Кристаллическая структура графита

- атомы каждого слоя (базисной плоскости) расположены против центров шестиугольников, находящихся в соседних (верхнем и нижнем) слоях; расстояние между слоями  $c/2$ ;  $a = 0,418$  нм;  $c = 0,671$  нм



# Применение графита в электротехнике

- Обладая **высокой электропроводностью**, графит обладает и **высокой теплопроводностью**, а также **термостойкостью** и **химической стойкостью**.
- Угольные и графитовые электроды, как и другие электроугольные изделия, имеют **отрицательный температурный коэффициент электросопротивления**.
- Благодаря своим электрическим и механическим свойствам (ван-дер-ваальсовы связи легко разрушаются) углеродистые материалы применяются в **электротехнике** и **радиодеталестроении** в качестве электропроводящих материалов. Из них изготавливают резисторы, разрядники для телефонных сетей, электроды (для прожекторов, дуговых электропечей, электролитических ванн), аноды гальванических элементов, нагреватели, щетки для электродвигателей и другие электроугольные изделия. Угольные порошки используют в микрофонах для создания сопротивления, изменяющегося от звукового давления.
- В качестве сырья для производства электроугольных изделий используют сажу, графит или антрацит.

# Контактные материалы

- **Электрический контакт** – место перехода тока из одной токоведущей детали в другую, способное обеспечить надежное соединение двух проводников с минимальным и стабильным электрическим сопротивлением.
- Понятие электрического контакта включает два элемента:
  - поверхность соприкосновения с высокой проводимостью,
  - конструктивное приспособление, обеспечивающее соединение.
- **Контакты по условиям работы подразделяются** на три типа: **неподвижные, коммутирующие (разрывные)** и **скользящие** (скольжение без отрыва).
- Большинство электрических контактов содержит элементы разных типов, но в замкнутом состоянии они должны удовлетворять **требованиям**, предъявляемым к **неподвижному контакту**.

# Неподвижный контакт

- **Структура площади контакта** состоит из пятиен трех видов:
  - **металлический контакт** ( $a$ -поверхность);
  - **квазиметаллический контакт**;
  - **электроизолирующий контакт**.
- **Электрическое сопротивление металлического контакта** определяется суммарным сопротивлением пары металлов, контактирующих через  $n$   $a$ -поверхностей, через которые протекает электрический ток.
- Если все  $a$ -поверхности нагружены с усилием  $P$  до предела текучести на сжатие  $\sigma_{T,сж}$  материала контактов с удельным электросопротивлением  $\rho$ , то переходное электросопротивление  $R_{п} = (\rho/2)(n\sigma_{T,сж} / nP)^{0.5}$ .
- Отсюда следует, что при плоских контактах увеличение сжимающего усилия приводит к уменьшению переходного сопротивления.
- Существенное значение имеет взаимодействие контактирующих материалов друг с другом и окружающей средой.

- **Квазиметаллический контакт** обеспечивают контактные пятна, покрытые тонкими адгезионными и хемосорбированными пленками, легко пропускающими электрический ток благодаря **туннельному эффекту**.
- **Электроизолирующий контакт** образуют пятна, покрытые изолирующими пленками оксидов и сульфидов, не пропускающих электрический ток.
- **Рабочая площадь контакта** складывается из суммы площадей пятен, образующихся при смятии выступов шероховатостей контактных поверхностей. Она значительно меньше всей контактной поверхности, представляющей собой **условную площадь контакта**.
- **Состояние шероховатостей** площади контакта непосредственно влияет на величину  $R_{\text{п}}$  и **нагрев** контакта при протекании через него электрического тока.
- Электрический ток, переходя из одного проводника в другой, при прохождении через  $a$ -поверхности, испытывает сопротивление вследствие **стягивания линий тока**.

# Коммутирующий контакт

- Электрические контакты для коммутационной аппаратуры являются токоведущими деталями и служат для **замыкания, размыкания и переключения** электрических цепей. Они могут с разной **частотой срабатывания** переходить из одного положения в другое, а также длительно находиться либо в замкнутом, либо в разомкнутом состоянии.
- По значению коммутируемого тока контакты подразделяют на **слаботочные** (сила тока  $I \leq 1\text{A}$ ) и **сильноточные** (сила тока  $I > 1\text{A}$ ).
- Основные требования к материалам для коммутирующих контактов:
  - коррозионная стойкость;
  - стойкость к электрической эрозии и износу;
  - устойчивость к свариванию;
  - износостойкость на истирание;
  - легкость обрабатываемости и прирабатываемости друг к другу;
  - высокие  $\gamma$  и  $\lambda$ ;
  - низкая стоимость.

- Для изготовления **слаботочных контактов** используются благородные и тугоплавкие металлы (Ag, Pt, Pd, Au, W, Mo) и сплавы на их основе в виде твердых растворов, в том числе дисперсионно-твердеющих и диффузионно-окисленных.
- **Сильноточные (мощные) разрывные контакты** изготавливаются главным образом из металлокерамических композиций (псевдосплавов), получаемых методами порошковой металлургии. Композиции изготавливают из меди, серебра и их сплавов с небольшими примесями некоторых других элементов и веществ (W, Ni, C, CdO, CuO).

# Скользящий контакт

- **Скользящие контакты** работают примерно в таких же условиях, что и разрывные, однако специфическим требованием для них является повышенная стойкость к механическому износу и трению.
- Скользящие контакты применяются в устройствах токосъема электротранспорта, в электрических машинах (между щетками и коллектором или контактными кольцами), в реостатах, ползунковых переключателях и других конструкциях.
- Значительный износ скользящих контактов возникает при сухом трении, если оба контакта изготовлены из одного материала или при неудачном выборе пар. Высокими качествами обладают **контактные пары**, составленные из **металлического** и **графитсодержащего** материалов.
- Для изготовления скользящих контактов широко применяются **бронзы** и **латуни**, отличающиеся высокой механической прочностью, упругостью и износостойкостью, антифрикционными свойствами, стойкостью к атмосферной коррозии.

# Припой

- **Припоями** называют присадочные металлы или сплавы, применяемые при пайке для заполнения зазора между соединяемыми поверхностями с целью получения монолитного паяного шва. Припой обладает более низкой температурой плавления, чем соединяемые металлы.
- Припой подразделяют на две группы:
  - **мягкие** – с температурой плавления  $< 300$  °С (сплавы на основе Sn, Pb с добавками Cd, Bi и др.) и  $\sigma_B = 16 \div 100$  МПа;
  - **твердые** – с температурой плавления  $> 300$  °С, отличающиеся высокой прочностью  $\sigma_B = 100 \div 500$  МПа (сплавы на основе Cu, Ag, Ni, Zn).
- Припой **выбирают** в соответствии с типом паяемого металла или металлов (если они разнородны), с требуемой удельной проводимостью, механической прочностью, коррозионной стойкостью и его стоимостью.

# Маркировка припоев

- **Название припоя** определяется металлами, входящими в него в наибольшем количестве. Если припой содержит драгоценные или редкие металлы (даже в небольших количествах), то название припоя происходит от этих металлов.
- **Маркировка** припоев начинается с буквы П – припой, далее следует наименование входящих основных элементов по первой букве их названия: О – олово, Су – сурьма, С – свинец, А – алюминий, Ср – серебро, Н – никель, Пд – палладий, Ин – индий, М – медь, Зл – золото, Г – германий, Кр – кремний, Ви – висмут, К – кадмий, Т – титан, Ф – фосфор, и затем идут цифры, указывающие процентное содержание элементов.
- Примеры: ПОС-90, ПОС-61, ПОС-40, ПОС-10, ПОСК-50-18, ПОССу-61-0,5, ПОССу-95-5, ПСр-2,5, ПСр-3, ПСр-15, ПСр-40, ПСр-45, ПМц-54, МФ1, МФ2, МФ3, АВИА1, П425А, П34А, ПСИЛО.

# Флюсы

- В процессе пайки важно избежать окисления кислородом воздуха металлов и припоя при их нагревании. В этом случае употребляют вспомогательные вещества, которые называют **флюсами**.
- Флюсы могут быть **твердыми телами** (соли, оксиды, кислоты), **растворами** (солей, кислот) и **пастами**.
- **По назначению** они делятся на флюсы для пайки **мягкими** припоями и флюсы для пайки **твердыми** припоями.
- Примеры: канифоль (ФК); канифоль с добавлением этилового спирта (90÷60 %) и ряда других компонентов (ФКСп, ФКТС).

# Требования к флюсам

- иметь температуру плавления на  $50\div 100$  °С ниже температуры плавления припоя;
- хорошо растекаться по поверхности основного металла и припоя с образованием сплошной пленки, защищающей их от вредного воздействия окружающей среды;
- уменьшать поверхностное натяжение расплавленного припоя для полного смачивания им основного металла;
- не изменять своего состава при пайке;
- легко удаляться с поверхности деталей после пайки;
- не вызывать коррозии.

# Контактолы

- **Контактолы** – электропроводящие клеи и покрытия для создания токопроводящего контакта при склеивании.
- **Контактолы** представляют собой маловязкие либо пастообразные композиции, в которых в качестве связующего используются различные синтетические смолы, а токопроводящим наполнителем служат мелкодисперсные порошки металлов или графита.
- **Выбор** связующего определяется технологическими и физико-механическими свойствами контактола.
- **Электрические свойства** контактола зависят в основном от свойств дисперсного наполнителя (проводимость, форма и размер частиц, концентрация).
- У всех контактолов с металлическим наполнителем из-за высокой плотности металла наблюдается **гравитационное расслаивание** (оседание металла в осадок), поэтому в процессе работы их необходимо периодически тщательно перемешивать.
- Пример: никельсодержащий контактол КН-3.

# Резистивные материалы

## Требования к материалам

■ **К материалам высокого сопротивления**, применяемым для токоведущих частей электроизмерительных приборов, образцовых и добавочных резисторов, предъявляются особые **требования**:

- **высокое удельное электросопротивление  $\rho$**  (для уменьшения размеров и массы);
- **малый температурный коэффициент удельного электросопротивления  $T\kappa\rho$**  (для обеспечения температурной стабильности  $\rho$ );
- **малая удельная термо-эдс в паре с медью  $\alpha_{1Cu}$**  (для уменьшения ошибок измерения вследствие возникновения паразитных термо-эдс);
- **хорошая технологичность** (для получения тонкой гибкой проволоки и других полуфабрикатов).

- Для изготовления переменных резисторов, особенно низкоомных, необходимо, чтобы резистивный материал имел **малое и стабильное во времени контактное сопротивление в паре с применяемым материалом скользящего контакта**.
- В зависимости от номинального сопротивления резистора, его назначений и условий эксплуатации в качестве **резистивного материала** используют:
  - металлы и сплавы с высоким удельным электросопротивлением,
  - оксиды металлов,
  - углерод,
  - керметы,
  - композиционные материалы.
- Резистивный материал в зависимости от типа резистора может применяться в виде:
  - **объемного элемента**,
  - **проволоки** различного диаметра,
  - **пленки**, осаждаемой на диэлектрическую поверхность.

# Медно-никелевые сплавы

## Манганин

- В наибольшей степени удовлетворяет перечисленным выше требованиям **манганин** двух марок: МНМцЗ-12 и МНМцАЖЗ-12-0,3-0,3.
- Легирование Mn приводит к малому  $TK_{\rho}$  в интервале температур  $-100 \div 100$  °С. Повышение содержания Ni снижает  $\alpha_{1Cu}$ . Добавки Al и Fe стабилизируют  $\rho$ , существенно снижая  $TK_{\rho}$ .
- Хорошая технологичность позволяет изготавливать из манганина проволоку, полосы, фольгу.

## 5.2.2. Константан и нейзильбер

- Хорошие характеристики имеет **константан** (МНМц40-1,5), который также широко применяется в электротехнике. Он сочетает высокую механическую прочность с пластичностью, что позволяет получать из него тончайшую проволоку, фольгу, ленты, полосу. По нагревостойкости константан превосходит манганин, поэтому его используют в реостатах и нагревательных элементах, работающих при температуре ниже 500 °С.
- Однако у константана очень большая  $\alpha_{1Cu}$ , что не позволяет применять его в высокоточных измерительных системах и приборах, зато обеспечивает широкое использование для изготовления медно-константановых **термопар**.
- **Нейзильбер** марки МНЦ15-20 применяется для изготовления реостатов, контактных пружин, лент и др. Он дешевле константана, но существенно уступает ему в свойствах.

# Резистивные материалы на основе Si

- **Кремниевые резистивные сплавы** марок РС-4800, РС-3710, РС-3001, РС-1714, РС-1004 предназначены для изготовления методом испарения и конденсации в высоком вакууме тонкопленочных резисторов и различных вспомогательных слоев в изделиях электронной техники.
- В **марках** сплавов буквы РС означают резистивный сплав, две первые цифры – номинальное содержание основного легирующего компонента (Cr), две вторые – номинальное содержание второго легирующего компонента (Ni, Fe).
- Многокомпонентные сплавы, состоящие из Si, Fe, Cr, Ni, Al и W (**сплавы МЛТ**), являются материалами для тонкопленочных резисторов. Эти сплавы обладают высокой стойкостью к окислителям и воздействию различных химических сред. Для увеличения  $\rho$  в состав большинства сплавов вводятся оксиды металлов. Резисторы из сплавов МЛТ получают путем термического испарения в вакууме из вольфрамовых испарителей и конденсации пленок на диэлектрической подложке.

# Материалы для нагревателей

## Металлические сплавы

- Для изготовления **электронагревательных элементов**, длительно работающих на воздухе при температурах  $1000\div 1300$  °С, применяются **жаростойкие сплавы высокого сопротивления** (из них также делаются проволочные и ленточные резисторы).
- Жаростойкие сплавы должны иметь малый  $TK_p$  и **высокое сопротивление химическому разрушению поверхности** (коррозии) под воздействием воздуха или иных газообразных сред при высокой температуре – жаростойкость. Они обладают удовлетворительной технологичностью (из них можно получать проволоку, ленты, прутки и другие полуфабрикаты); свариваемостью; достаточной **жаропрочностью** – способностью выдерживать механические нагрузки без существенных деформаций, не разрушаясь при высоких температурах.

- **Жаростойкость** этих сплавов обеспечивается устойчивостью при высоких температурах образующихся на поверхности материала оксидов и других продуктов газовой коррозии, а также плотностью оксидной пленки, защищающей внутренние слои от дальнейшего окисления. Через оксидную пленку не должна происходить диффузия кислорода, а также диффузия металла в пленку, что равносильно безостановочному окислению глубинных слоев сплава.
- Металлами, оксиды которых отвечают вышеназванным свойствам, являются Ni, Cr и Al. На их основе производят:
  - хромоникелевые сплавы (**нихромы**) – X20H80-H, X20H80;
  - хромоникелевые, легированные алюминием – XH70Ю, XH60Ю3;
  - железохромоникелевые – X15H60-H, X25H20;
  - железохромоалюминиевые (**хромали**) – X23Ю5, X13Ю4, X27Ю5Т.
- Буква H в конце марки (например, X20H80-H) означает повышенное качество, связанное с дополнительным легированием (например, редкоземельными элементами) и прецизионной технологией изготовления.

- **Хромоникелевые сплавы** сочетают высокую жаростойкость с хорошей технологичностью (изготовление лент и тонкой проволоки), причем сплавы с меньшим содержанием Cr (15÷20 %) более технологичны. Эти сплавы более жаропрочны, чем хромоалюминиевые, но в отличие от последних содержат дефицитный и дорогостоящий Ni. Частичная замена Ni на Fe (до 25÷50 %) для удешевления снижает жаростойкость этих сплавов.
- **Хромоалюминиевые сплавы** намного дешевле нихромов и отличаются повышенной жаростойкостью, однако они более тверды и хрупки, чем нихромы, а следовательно, и менее технологичны (невозможно изготовить ленту и тонкую проволоку).
- При работе печей с агрессивными средами или в окислительной атмосфере, для нагревателей используется Pt в виде проволоки или фольги. Рабочие температуры платиновых нагревателей менее 1350÷1400 °С, так как при большем нагреве происходит сильное испарение платины.
- В инертных атмосферах часто используются нагреватели на основе чистых тугоплавких металлов: W, Mo, Ta.

# Неметаллические материалы

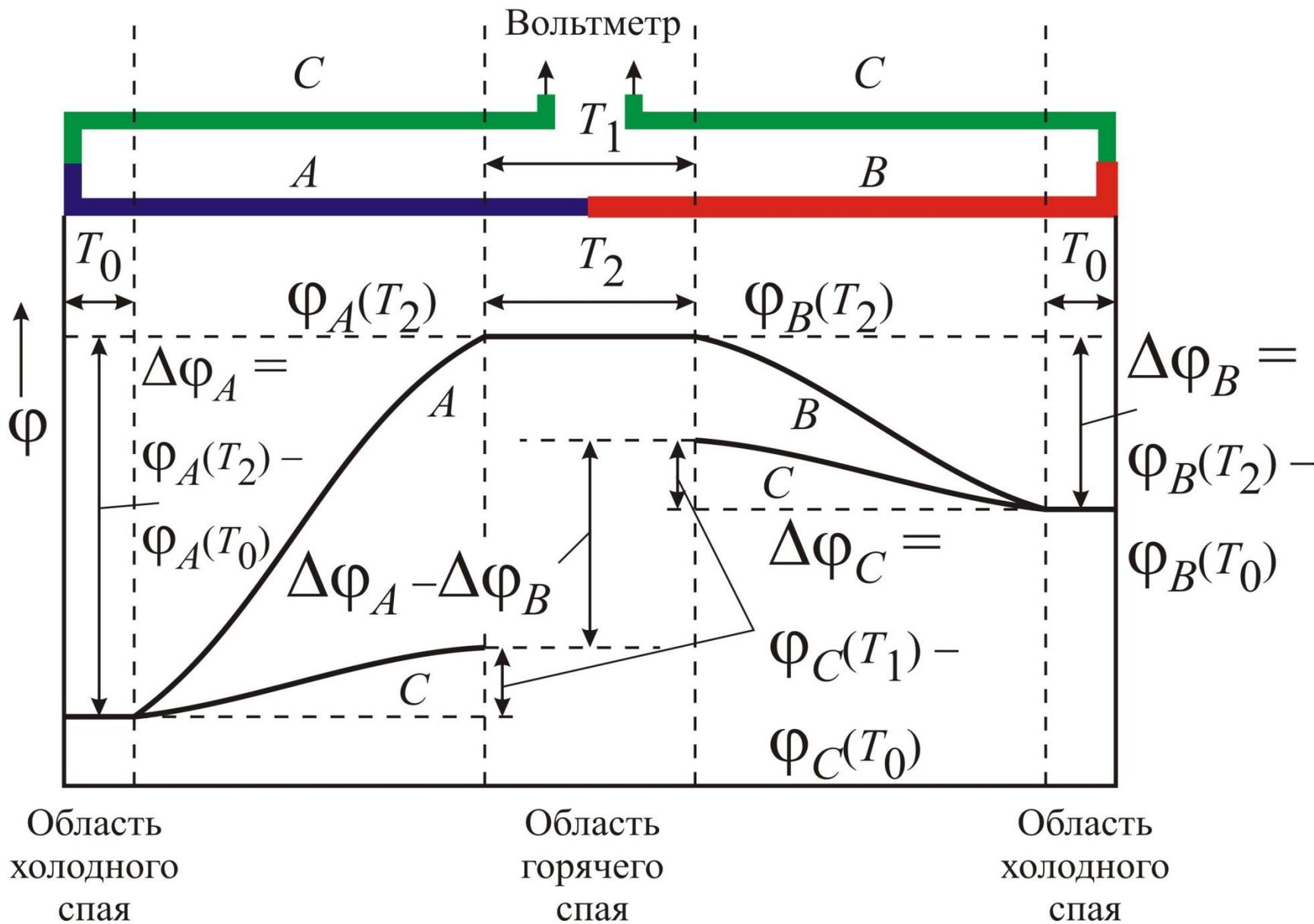
- Для изготовления нагревательных элементов электропечей широко используются карбиды и силициды некоторых тугоплавких металлов, например:  $ZrO_2$ ,  $ZrC$ ,  $NbC$ ,  $TaC$ ,  $HfC$  и др.
- Из неметаллических нагревателей чаще всего применяются силит и глобар, изготавливаемые из  $SiC$ . Рабочая температура их  $1400\div 1450$  °C со сроком службы при этих температурах  $1000\div 2000$  ч; при температуре  $1200\div 1300$  °C срок службы увеличивается в  $2\div 3$  раза.
- В электротермии широко применяется дисилицид молибдена ( $MoSi_2$ ), изделия из которого могут работать в окислительной среде до  $1700$  °C.
- Для изготовления высокотемпературных ( $1200\div 1800$  °C) нагревателей, работающих в инертной атмосфере, часто используется графит марки ППГ. Преимущества графита в том, что его можно легко очищать от летучих примесей отжигом в атмосфере  $Ar + HCl$  при  $t > 1412$  °C и не нарушать в дальнейшем чистоты процесса. Недостатком графитовых нагревателей является то, что они не могут работать в воздушной атмосфере (сгорают).

# Термоэлектродные материалы

## Термо-ЭДС

- При разности температуры в проводнике электроны диффундируют от горячего конца к холодному (**термодиффузия электронов, теплопроводность**). Избыток электронов, возникший на холодном конце проводника, приводит к градиенту электрического потенциала  $\nabla \phi$ . Отрицательный заряд на холодном конце нарастает до момента достижения динамического равновесия между числом электронов с большой энергией, диффундирующих от горячего конца к холодному под действием градиента температуры  $\nabla T$ , и числом электронов, перемещающихся от холодного конца к горячему под действием  $\nabla \phi$ .  $\nabla \phi$  существует, пока есть  $\nabla T$ , и называется **термоэлектрической ЭДС**. Отсюда следует, что термо-ЭДС не может возникнуть без  $\nabla T$ .
- Сложность связи между энергией электронов и их рассеянием приводит к тому, что термо-эдс разных металлических сплавов сильно отличаются друг от друга, что делает возможным применение этого явления для измерения температуры.

# Распределение потенциала по термопаре



# Термопара

- Действие термопары основано на **эффекте Зеебека**, гласящем, что на стыке двух различных проводников, имеющих разность температур  $dT$ , возникает ЭДС:  $u = \int_{T_0}^{T_2} a_{12} dT$ , где  $a_{12} = a_1 - a_2$  – коэффициент термо-ЭДС между данными проводниками;  $a_i$  – коэффициенты дифференциальной термо-эдс 1-го и 2-го проводников. Величина  $a \equiv a_i$  считается положительной, если возникающий в проводнике термоток течет от горячего контакта к холодному.
- **Основные требования**, предъявляемые к материалам пары термоэлектродных проводов, – это высокие и стабильные значения термо- ЭДС в диапазоне рабочих температур. Поэтому химический состав таких проводов должен выдерживаться очень точно (**прецизионные сплавы**).
- У крупных установок с большим числом термопар измерительные и опорные спаи могут быть сильно разнесены. В качестве удлинительной проволоки со стабильными характеристиками в интервале температур от 20 до 100 °С используются так называемые **компенсационные провода**.

# Примеры термопар

- **Константан** применяется для создания медь-константановых термопар (диапазон рабочих температур:  $-250 \div 300$  °С) и компенсационных проводов, например, к отрицательным электродам платинородий-платиновых термопар.
- Из медно-никелевых сплавов к термоэлектродным относится также **копель** (МНМц43-0,5); из сплавов на основе никеля – **алюмель** (НМцАК2-2-1), **хромель Т** (НХ9,5) и **хромель К** (НХ9).
- **Копель** используется, например, для хромель-копелевых ( $-50 \div 800$  °С), железо-копелевых ( $0 \div 760$  °С) и медь-копелевых термопар.
- **Хромель Т** – для хромель-алюмелевых термопар ( $-50 \div 1300$  °С).
- **Хромель К** – для компенсационных проводов.
- Для измерения высоких температур в инертной среде до  $3000$  °С широко используются **вольфрам-рениевые** термопары (W–26 % Re/W и др.).
- Для работы в агрессивных средах применяются термопары из благородных металлов, например, **платинородий-платиновые** Pt–10 % Rh/Pt, Pt–13 % Rh/Pt ( $100 \div 1600$  °С); **платинородий-платинородиевая** Pt–30 % Rh/Pt–6 % Rh ( $300 \div 1800$  °С).