# 2 ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Проводниками электрического тока могут служить твёрдые тела, жидкости, а также ионизированные газы – плазма.

*Твёрдыми* проводниками являются металлы, металлические сплавы и некоторые модификации углерода. К *жидким* проводникам относятся расплавленные металлы, расплавленные химические соединения (в частности оксиды и соли), а также электролиты – водные растворы солей, кислот, щелочей и органических соединений.

Как правило, температура плавления металлов высока, за исключением ртути, у которой она составляет минус 38,9 °С; поэтому при комнатной температуре в качестве жидкого металлического проводника может быть применена только ртуть. Температуру плавления ниже 100 °С имеют галлий, натрий, калий, рубидий и цезий. Другие металлы являются жидкими проводниками лишь при повышенных или высоких температурах.

Механизм прохождения тока по металлам в твёрдом и жидком состояниях обусловлен движением свободных электронов, вследствие чего их называют проводниками с электронной электропроводностью или проводниками **первого** рода. Электролитами, или проводниками **второго** рода, являются растворы (в основном водные) кислот, щелочей и солей, а также расплавы ионных соединений. Прохождение тока через такие проводники связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов и/или молионов, в результате чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза. Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряжённостях электрического поля не являются проводниками, но ионизированный газ представляет собой особую проводящую среду, называемую *плазмой.*

В физике, химии и технике проводящие материалы классифицируют по различным признакам. В пособии проводниковые материалы подразделяются на следующие группы.

1 Металлы высокой электропроводности.

2 Различные металлы.

3 Сплавы высокого сопротивления.

4 Сплавы различного назначения.

5 Сверхпроводниковые материалы.

6 Неметаллические электропроводящие материалы.

## 2.1 Классическая и волновая модели электропроводности металлов

Для объяснения механизма продвижения электронов по металлу раньше использовали *классическую* теорию идеального электронного газа, а в настоящее время применяют *квантовую*теорию взаимодействия электронов с атомами вещества.

По представлениям *классической*электронной теории металл выглядит как совокупность положительно заряженных шариков-ионов, промежутки между которыми заполнены электронным газом, состоящим из свободных коллективизированных электронов (рисунок 2.1, *а*). Электронный газ считается идеальным, а значение средней кинетической энергии свободных электронов – пропорциональным температуре. При температуре 0 К свободные электроны неподвижны, а при увеличении температуры они приходят в состояние непрерывного хаотического движения (это показано пунктирными стрелками). По грубым оценкам средняя скорость электронов при комнатной температуре должна быть около 100 км/с.

Рисунок 2.1 – Схемы для пояснения механизма протекания тока по материалу металлического проводника в соответствии с

классическими (*а*) и волновыми (*б*) представлениями об электроне

*а*)

*б*)

Под действием электрического напряжения электроны получают некоторую добавочную скорость направленного движения, и в проводнике возникает электрический ток. Электроны движутся с ускорением, при этом они периодически сталкиваются с ионами, отдавая накопленную энергию. Плотности тока 1 А/мм2 в меди соответствует средняя скорость дрейфа электронов 0,6 мм/с. При столкновениях с ионами кристаллической решётки, электроны выравнивают температуру металла, этим обеспечивается его высокая теплопроводность (подробнее о классической теории электропроводности в [учебнике](#_Список_литературы) [1, с. 28–31]).

Классическая модель электропроводности металлов проста и наглядна, однако не учитывает волновых свойств электронов; классическая теория не в состоянии объяснить ряд физических явлений, в частности явление *сверхпроводимости.*

*Квантовая*теорияэлектропроводности металла предполагает распределение валентных электронов по энергетическим уровням в соответствии с *принципом Паули*, по которому в квантовой системе две (или более) тождественные частицы с полуцелым спином не могут одновременно находиться в одном и том же состоянии. Множество энергетических уровней, разрешённых для электронов в спокойном состоянии, создаёт валентную зону; максимальный уровень энергии, который может иметь электрон в валентной зоне данного материала при 0 К, называют *уровнем Ферми*; в типичных случаях он составляет 3–15 эВ. Электроны нижних энергетических уровней в электропроводности не участвуют, электрический заряд переносят только «быстрые» электроны верхних энергетических уровней, количество которых составляет доли процента (подробнее в [учебнике](#Лит1) [1, с. 31–34]). На [рисунке 2.1, *б*](file:///H%3A%5C%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8B%20%D0%B8%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F%20%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%5C%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%201%20%D0%9F%D0%A0%20%D0%B8%20%D0%9F%D0%9F%20%D0%BC%D0%B0%D1%82-%D0%BB%D1%8B.docx#Рис2_1) медленные электроны показаны бледными, а быстрый электрон – жирным. С точки зрения корпускулярно волнового дуализма движение свободных электронов в металле рассматривают как распространение плоских электронных волн, длина и частота которых определяются соотношением де Бройля. Волна де Бройля интерпретируется как волна вероятности, она условно изображена на [рисунке 2.1, *б*](file:///H%3A%5C%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%20%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8B%20%D0%B8%20%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%8F%20%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%B0%D0%B6%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%5C%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%201%20%D0%9F%D0%A0%20%D0%B8%20%D0%9F%D0%9F%20%D0%BC%D0%B0%D1%82-%D0%BB%D1%8B.docx#Рис2_1). В строго периодическом электростатическом поле идеальной кристаллической решётки при 0 К электронная волна должна распространяться без затухания и отражения, другими словами, поток электронов должен проходить через идеальный металл без потери энергии и рассеивания. В реальных условиях, из-за тепловых колебаний ионов и флуктуации поля, электроны во время движения теряют часть энергии, передавая её кристаллической решётке в виде квантов упругих колебаний – *фононов*– отчего движение электронов замедляется, а металл нагревается.

*Сверхпроводимость* – это движение электронов без потери энергии. Сверхпроводимость возможна, если в энергетическом спектре проводника между валентной и свободной зонами существует очень узкая запретная зона – *энергетическая щель*– ширина которой оценивается в пределах от 10–4 до 10–3 эВ. Явление сверхпроводимости объяснили в 1957 г. Л. Купер, Д. Бардин и Д. Шриффер (теория БКШ, Нобелевская премия 1972 г.). Электроны, имеющие противоположные направления импульса и спина, энергия которых близка к уровню Ферми, связываются в пары, называемые *«куперовскими»*. Грубая оценка показывает, что в такие пары объединяются около 10–4 от общего числа электронов. Пары постоянно распадаются и вновь создаются, но в целом энергия электронов при объединении снижается, и они образуют так называемый «электронный конденсат». Получая некоторый избыток энергии – фонон – электроны куперовской пары периодически обмениваются им, используя кристаллическую решётку как посредник. Под действием электрического поля куперовская пара электронов может передвигаться без потерь энергии. При взаимодействии с кристаллической решёткой один электрон отдаёт фонон, а другой его тут же забирает без потерь, если энергия фонона совпадает с шириной энергетической щели.

## 2.2 Влияние температуры металла на его электропроводность

При снижении температуры утихают колебания кристаллической решётки, это облегчает прохождение электронов и электропроводность металлических проводников возрастает, а сопротивление уменьшается. Рассмотрим график типичной зависимости удельного электрического сопротивления проводника от температуры на примере меди ([рисунок 2.2](#Рис2_2)). В широком диапазоне температур увеличение сопротивления пропорционально увеличению температуры, на графике это выглядит как прямолинейный наклонный участок.

300

600

 0

1500

900

нОм·м

*Т* →

100

200

10

30

0,1

 ρ0

ρ т

 0

1083 ˚С

17 нОм·м

К

Рисунок 2.2 – Зависимость удель­ного

электрического сопротивле­ния меди ρ

от температуры

↑ ρ

ρ

П

л

а

в

л

е

н

и

е

К

Рост сопротивления представляет собой повышение рассеяния электронов из-за усиления тепловых колебаний ионов и связанной с ними флуктуации электростатического поля кристаллической решётки. Относительное изменение удельного электрического сопротивления при изменении температуры на один градус Кельвина называют *температурным коэффициентом*удельного электрического сопротивления; обозначают какαρ, у меди αρ = 4,33 · 10–3 К–1. Для большинства металлов αρ составляет несколько тысячных долей на кельвин; от 0,9 · 10–3 К–1 у ртути, до 6,7 · 10–3 К–1 у никеля.

В пределах прямолинейного участка температурной характеристики справедливо соотношение

ρ2 = ρ1[1 + αρ(*Т*2– *Т*1)]*,*

где ρ1 и ρ2 – значения удельных электрических сопротивлений,

 соответствующих значениям температуры *Т*1 и *Т*2;

 αρ – температурный коэффициент удельного электрического

 сопротивления.

В особо чистых металлах при сверхнизких температурах наблюдается *криопроводимость*, при этом сопротивление стремится к значению ρ0, называемому остаточным сопротивлением (этот участок показан на [рисунке 2.2](#Рис2_2) в увеличенном виде). Остаточное сопротивление, обусловленное примесями и дефектами структуры, в тысячи раз ниже, чем сопротивление при комнатной температуре. Правило Матиссена позволяет представить удельное электрическое сопротивление проводника ρ как сумму тепловой составляющей ρт и остаточного сопротивления ρ0,

ρ = ρт + ρ0,

где ρт – тепловая составляющая удельного электрического сопротивления;

 ρ0 – остаточное удельное электрическое сопротивление.

Тепловая составляющая сопротивления ρт растёт пропорционально значению температуры, на [рисунке 2.2](#Рис2_2) она показана прямой наклонной линией. Остаточное сопротивление практически не зависит от температуры (на рисунке ρ0 – горизонтальная линия). У некоторых металлов в области сверхнизких температур, ниже 10 К, возможна скачкообразная потеря сопротивления – сверхпроводимость. Металлическую медь в сверхпроводящее состояние перевести не смогли, однако оксид меди является основой купратных сверхпроводников.

В правой части графика, при температурах, близких к плавлению, также возможно нарушение линейности, особенно у ферромагнитных материалов. Это связано с перегруппировками электронов в оболочках и изменением формы кристаллов, т. е. представляет собой проявление полиморфизма.

При плавлении меди, в результате уменьшения плотности и нарушения кристаллического порядка, её удельное сопротивление возрастает в 2,4 раза. Для большинства металлов такое увеличение происходит в пределах от 1,5 до 3 раз; исключение составляют галлий и висмут, плотность которых при плавлении возрастает, а удельное электрическое сопротивление уменьшается.

## 2.3 Влияние примесей и других структурных дефектовна электропроводность металлов

Примеси снижают электропроводность в любом случае, даже если электропроводность металла примеси выше, чем у основного металла; это вызвано нарушением правильности структуры. Степень снижения электропроводности зависит от количества и состава примеси. Если ввести в медь серебро в количестве 0,5 %, то её электропроводность уменьшится на 1 %. Добавка в медь такого же количества кадмия снизит её электропроводность на 2 %, а цинка – на 5 %.

Примеси других элементов влияют на электропроводность меди гораздо заметнее. Для снижения электропроводности меди вдвое достаточно присутствия любой из перечисленных добавок: 1,2 % никеля; 1,1 % олова; 0,8 % алюминия; 0,4 % бериллия; 0,2 % железа или кремния; 0,1 % фосфора. Экспериментально установлено, что при малом содержании примесей удельное сопротивление металла возрастает пропорционально увеличению количества атомов каждой из примесей, таким образом, эффекты от влияния нескольких различных примесей складываются.

Собственные дефекты структуры металла – вакансии, атомы внедрения, дислокации, границы зёрен – также увеличивают его удельное электрическое сопротивление.

Для оценки химической чистоты и структурного совершенства металлов используют значение остаточного сопротивления ρ4,2, измеренное при температуре жидкого гелия (4,2 К), а также параметр β, равный отношению значений сопротивления при комнатной температуре (300 К) и при температуре жидкого гелия:

β = ρ300 / ρ4,2.

Для наиболее чистых металлов, получаемых в настоящее время (со степенью чистоты 99,99999 %), параметр β достигает порядка 105.

Заметное влияние на удельное сопротивление металлов и сплавов оказывают искажения, вызываемые напряжённым состоянием материала. Например, при всестороннем сжатии у большинства металлов удельное сопротивление уменьшается. Это объясняется сближением атомов и уменьшением амплитуды тепловых колебаний решётки. При упругомрастяжении и кручении межатомные расстояния увеличиваются, что вызывает возрастание ρ.*Пластическая деформация* и *наклеп* всегда повышают удельное сопротивление металлов и сплавов, однако это повышение, даже при значительном наклепе чистых металлов, составляет единицы процентов.*Термическая закалка* приводит к повышению ρ, что связано с перестройкой кристаллической решётки и появлением внутренних напряжений. При рекристаллизации металлического изделия путём термической обработки (отжига) удельное электрическое сопротивление материала может быть снижено до первоначального значения за счёт снятия внутренних напряжений.

## 2.4 Металлы высокой электропроводностиширокого применения

У металлов высокой электропроводности удельное электрическое сопротивление в нормальных условиях не превышает 100 нОм·м. Наиболее распространёнными среди них являются медь, алюминий и железо. Высокой электропроводностью обладают также многие тугоплавкие металлы, большинство драгоценных и ряд других металлов, а также некоторые сплавы, в частности сплавы меди – бронзы и латуни. Температура плавления *t*,°С, плотность Мг/м3 и удельное электрическое сопротивление ρ, нОм·м основных металлов электротехники приведены в таблице 2.1.

*Таблица 2.1* – **Температура плавления, плотность и удельное электрическое сопротивление основных металлов электротехники**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Металл | *t*, °С | Плотность,Мг/м3 | ρ,нОм·м | Металл | *t*, °С | Плотность,Мг/м3 | ρ, нОм·м |
| Алюминий | 657 | 2,70 | 28 | Никель | 1455 | 8,90 | 73 |
| Вольфрам | 3380 | 19,30 | 55 | Олово | 232 | 7,29 | 120 |
| Железо | 1539 | 7,87 | 98 | Палладий | 1554 | 12,02 | 110 |
| Золото | 1063 | 19,30 | 24 | Платина | 1769 | 21,43 | 105 |
| Индий | 157 | 7,31 | 90 | Ртуть | –38,9 | 13,55 | 958 |
| Иридий | 2447 | 22,65 | 54 | Свинец | 327 | 11,40 | 210 |
| Кадмий | 321 | 8,65 | 76 | Серебро | 962 | 10,49 | 16 |
| Медь | 1083 | 8,94 | 17 | Хром | 1890 | 7,19 | 210 |
| Молибден | 2623 | 10,20 | 57 | Цинк | 420 | 7,13 | 59 |

**Медь**

*Медь* является первым и основным проводниковым материалом. Удельное электрическое сопротивление стандартной меди при комнатной температуре составляет 17,241 нОм·м, что соответствует удельной электропроводности 58 МСм/м. Электропроводность других металлов и сплавов часто оценивают в процентах от электропроводности стандартной меди. Только серебро имеет электропроводность выше, чем медь, однако, оно тяжелее, а главное – гораздо дороже. Плотность меди 8,94 · 103 кг*/*м3, она достаточно прочна; предел прочности мягкой (отожжённой) меди от 260 до 280, а твёрдой – от 360 до 390 МПа.

Медь плавится при температуре 1083 °С, а кипит при 2567 °С.

Химическая стойкость меди достаточно высока. Даже в условиях высокой влажности медь окисляется на воздухе значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах.

Медь удобно обрабатывать, она легко прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до нескольких микрон (мкм). Медь удобно паять, слабая оксидная плёнка на поверхности меди легко разрушается флюсами, для пайки можно использовать как мягкие, так и твёрдые припои.

*Получение меди.* Медь получают путём переработки сульфидных руд. После ряда плавок руды и обжигов с интенсивным дутьём медь, предназначенная для электротехнических целей, обязательно проходит электролитическую очистку. Побочный продукт электролиза – шлам – представляет собой ценное сырье, т. к. содержит драгоценные и редкие металлы. Полученные в процессе электролиза катодные пластины переплавляют в болванки, из которых прокатывают листы или протягивают проволоку.

При холодной протяжке получают твёрдую (твёрдотянутую) медь, которая маркируется МТ. Благодаря влиянию наклёпа твёрдая медь имеет высокий предел прочности при растяжении и малое относительное удлинение при разрыве, а также твёрдость и упругость при изгибе; проволока из твёрдой меди несколько пружинит. Если же медь подвергнуть отжигу, т. е. нагреву до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, то получится мягкая (отожжённая) медь, которая маркируется ММ. Мягкая медь сравнительно пластична, обладает малой твёрдостью и небольшой прочностью, но большим относительным удлинением при разрыве и малым удельным сопротивлением. Отжиг меди производят в специальных печах без доступа воздуха, чтобы избежать окисления.

*Марки меди.* В качестве проводникового материала используют медь М1 и М0. Маркировка произведена по содержанию примесей в основном металле (соответственно не более 0,1 % и не более 0,05 %).

Специальные*электровакуумные*сорта меди не содержат кислорода. Их получают из электролитической меди, переплавленной в вакууме или в защитной атмосфере восстановительного газа СО. Значительное ухудшение механических свойств меди вызывает водород. При взаимодействии водорода с кислородом, присутствующим в технической меди в виде закиси Cu2O,образуется вода,разрушительно действующая на медь. После водородного отжига прочность меди может уменьшиться в несколько раз.

Недостатком меди является её подверженность атмосферной коррозии с образованием оксидных и сульфидных плёнок, которые являются полупроводниками и в контакте с медью образуют выпрямительныеэлементы. Вследствие односторонней проводимости окисленная медь непригодна для слаботочных контактов. Скорость окисления быстро возрастает при нагревании, однако прочность сцепления оксидной плёнки с металлом невелика. При высокой температуре в электрической дуге оксид меди разлагается, обнажая металлическую поверхность. Механическое отслаивание и термическое разложение оксидной плёнки вызывает повышенный износ медных контактов при сильных токах.

*Применение меди.* Медь применяют в силовой электротехнике для изготовления проводов, кабелей, шин распределительных устройств, обмоток трансформаторов, электрических машин, токоведущих деталей приборов и аппаратов, анодов гальванических ванн; медные проволоки и ленты используют в качестве экранов кабелей. Твёрдую медь употребляют в тех случаях, когда нужна особенно высокая механическая прочность, твёрдость и сопротивляемость истиранию, например, для изготовления контактных проводов, коллекторных пластин. Если же требуется хорошая гибкость и пластичность, а прочность не имеет особого значения, то предпочтительнее мягкая медь, например, для гибких шнуров и монтажных проводов.

Из специальных электровакуумных сортов меди изготавливают детали магнетронов и других приборов СВЧ, аноды мощных генераторных ламп, некоторые типы волноводов и резонаторов. Кроме того, медь используют для покрытия тонкой плёнкой (фольгирования) гетинакса и текстолита, а также применяют в микроэлектронике в виде осаждённых на подложки плёнок, играющих роль проводящих соединений между функциональными элементами схемы.

*Сплавы меди.* Кроме чистой меди в качестве проводниковых материалов применяют сплавы меди с цинком (*латуни*), а также *бронзы* – сплавы меди с другими металлами – оловом, фосфором, бериллием, кадмием и т. д., здесь может присутствовать и цинк. Электропроводность медных сплавов несколько ниже, а механическая прочность и химическая стойкость значительно выше, чем у чистой меди.

В наименовании бронзы присутствует название того металла, добавка которого в основном определяет её свойства. *Фосфористую бронзу* применяют как припой для пайки меди; *бериллиевую бронзу* особой прочности (до 1350 МПа) применяют для изготовления пружин и пружинящих контактов. Из *кадмиевой* бронзы, электропроводность некоторых марок которой достигает до 95 % от электропроводности меди, изготавливают коллекторные пластины электродвигателей и генераторов, контактные провода электротранспорта и детали других скользящих контактов.

Латуни содержат до 43 % цинка по массе и маркируются по количеству содержащейся в них меди; Л68 и т. п. Латуни прочнее, чем медь, и устойчивее к коррозии, поэтому широко применяются для изготовления штырей и гнёзд разъёмных контактов, а также в качестве твёрдого припоя для пайки меди – ПМЦ (припой медно-цинковый).

**Алюминий**

*Алюминий* является вторым по значению проводниковым материалом электротехники, важнейшим из лёгких металлов (его плотность 2,7·103 кг*/*м3). Удельное сопротивление электротехнического алюминия 28 нОм·м, что в 1,63 раза больше, чем у меди. Однако, если сделать из 1 кг алюминия и из 1 кг меди провода одинаковой длины, площадь сечения алюминиевого провода будет в 3,3 раза больше, а сопротивление в 2 раза меньше, чем у медного. Это позволяет считать, что электропроводность у килограмма алюминия в 2 раза выше, чем у меди. Стоит алюминий гораздо дешевле меди, это делает его самым выгодным проводниковым материалом и стимулирует замену меди алюминием, несмотря на его недостатки – малую прочность (предел прочности мягкого алюминия достигает 80, а твёрдого – до 160 МПа), а также ломкость и химическую активность.

Алюминий – металл серебристо-белого цвета, его поверхность покрыта прочной плёнкой оксидаAl2О3, которая является полупроводником *n*-типа, а по удельному сопротивлению близка к диэлектрикам. Эта плёнка предохраняет алюминий от коррозии, но создаёт большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов, а также делает невозможной пайку алюминия обычными методами. Для разрушения оксидной плёнки при пайке алюминия применяют специальные припои и флюсы, а также вибрацию жала паяльника с частотой ультразвука под слоем расплавленного припоя.

Оксидная изоляция прочна механически и нагревостойка. Температура плавления алюминия равна 657 °С, а оксидной плёнки – около 2050 °С. Слой оксида толщиной 0,03 мм имеет пробивное напряжение около 100 В. Плотные оксидные слои на поверхности алюминиевой фольги или провода получают с помощью электрохимической обработки (анодирования). Такая изоляция широко применяется в оксидных (электролитических) конденсаторах. Из анодированных алюминиевых проводов и шин, без применения дополнительной межвитковой изоляции, изготавливают различные обмотки, отличающиеся высокой нагревостойкостью.

Важнейшее значение имеет контакт алюминия и меди. Если область контакта подвергается воздействию влаги, то возникает местная гальваническая пара с довольно высоким значением ЭДС, вследствие чего алюминиевый проводник разрушается, превращаясь в белый порошок оксида. Поэтому места соединения медных проводников с алюминиевыми должны быть тщательно защищены от увлажнения (их покрывают изолентой и пропитывают лаком, и т. п.).

Алюминий широко распространён в природе. Его получают электролизом глинозёма Al2О3  в расплаве криолита Na3AlF6 при 950 °С. Прокатку, протяжку и отжиг алюминия производят по технологиям, аналогичным соответствующим операциям для меди. Из алюминия высокой чистоты можно прокатать очень тонкую (6–7 мкм) фольгу.

*Марки алюминия.* Для электротехнических целей используют алюминий технической чистоты АЕ, содержащий не более 0,5 % примесей. Проволока из алюминия АЕ, отожжённая при температуре 350 ± 20 °С, обладает при 20 °С удельным сопротивлением не более 0,029 мкОм·м при прочности 90 МПа. Алюминий высокой чистоты А97 (не более 0,03 % примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги, используемой в качестве обкладок и для изготовления корпусов электролитических конденсаторов. У алюминия особой чистоты А999 примеси не превышают 0,001 %, его используют для плакирования (покрытия тонким слоем) проводов из алюминия марки АЕ с целью придать им особую стойкость к коррозии.

С целью упрочнения в алюминий добавляют до 0,5 % магния, до 0,7 % кремния и до 0,3 % железа, при этом получают сплав под названием *альдрей*. За счёт образования мелкодисперсного соединения Mg2Si прочность альдрея достигает 350 МПа при ρ = 31,7 нОм·м.

**Железо и проводниковый биметалл**

Удельное сопротивление технически чистого железа 98 нОм·м, а у сталей и чугунов (сплавов железа с углеродом) ещё выше. Приблизительно считают, что электропроводность стальных проводов в 7 раз меньше, чем медных и в 4 раза меньше, чем алюминиевых при той же площади сечения. Однако механическая прочность железа высока (более 700 МПа) и оно дёшево. Железо используют в виде стальных проводов воздушных линий электропередачи малой мощности, элементов заземления и заземляющих проводников, а также железнодорожных и трамвайных рельсов. В ряде случаев удобно применять проводниковый *биметалл*, который представляет собой стальную сердцевину, покрытую слоем меди или алюминия. Его применяют для проводов линий связи, шин распределительных устройств, ножей рубильников и в других местах, где требуется сочетание высокой электропроводности и прочности. В биметалле медь или алюминий защищают железо от окисления; в других случаях, с целью защиты от коррозии, железо покрывают цинком или другими металлами. Цинк не только не допускает кислород к железу, но и осуществляет электрохимическую защиту. Даже если на цинковом покрытии есть царапины, железо не будет окисляться до тех пор, пока не окислится весь цинк.

## 2.5 Различные металлы и их применение

**Тугоплавкие металлы**

К *тугоплавким* относятся металлы с температурой плавления выше, чем у железа (1524 °С). Как правило, они химически устойчивы при низких температурах, но становятся активными при повышенных; эксплуатация их при высоких температурах может быть обеспечена только в атмосфере инертных газов или в вакууме.

В плотном виде тугоплавкие металлы чаще всего получают методами порошковой металлургии – прессовкой и спеканием порошков. В электронной технике применяют различные технологии обработки чистых тугоплавких металлов: плавка электронным или лазерным лучом, зонная очистка, плазменная обработка и др. В электротехнике и электронике нашли широкое применение вольфрам, молибден, тантал, ниобий, хром и рений.

*Вольфрам* – очень тяжелый, твёрдый металл серого цвета. Из всех металлов вольфрам обладает наиболее высокой температурой плавления (3380 °С). Для него характерна высокая внутрикристаллическая прочность при очень слабом сцеплении между отдельными зёрнами. Поэтому спеченные изделия, обладающие мелкозернистым строением, хрупки и легко ломаются.

В результате механической обработки ковкой и волочением вольфрам приобретает волокнистую структуру (этим объясняется гибкость тонких вольфрамовых нитей). При нагревании тянутого вольфрама до высоких температур начинается процесс рекристаллизации, т. е. укрупнение зёрен. Для замедления этого процесса в вольфрам добавляют оксид тория Th2О3, который образует прослойки между зёрнами и вследствие этого препятствует росту кристаллов. Для повышения устойчивости формы раскалённых вольфрамовых нитей в них добавляют оксиды кремния, алюминия, кальция.

Из вольфрама изготавливают нити накаливания осветительных ламп и многие детали электровакуумной техники; его используют в мощных электрических контактах в композиции с медью или серебром, а также в качестве электрода при аргонно-дуговой сварке.

*Молибден* **(**температура плавления 2623 °С) отличается пластичностью. Для улучшения структуры и повышения механической прочности в молибден вводят оксиды кремния, тория и другие присадки. Из молибдена изготавливают сетки и электроды электронных ламп, рентгеновских трубок и различные вспомогательные детали электровакуумных приборов с напряжённым тепловым режимом.

Молибден используется также в качестве нагревательных элементов электрических печей. Такие элементы в защитной атмосфере могут устойчиво работать при температурах 1700 °С, при которых процессы рекристаллизации ещё слабо выражены.

*Тантал*(3014 °С) легко поглощает газы, становясь при этом хрупким, поэтому требует спекания в вакууме. Благодаря высокой пластичности из тантала легко вытянуть тонкую проволоку и прокатать фольгу. Из тантала изготавливают аноды и сетки генераторных ламп, катоды прямого и косвенного накала и другие детали. Тантал используют в вакуумной технологии в качестве испарителей при осаждении тонких плёнок различных веществ. Тонкие плёнки тантала напыляют на диэлектрик при производстве резисторов.

Особое значение тантал имеет при производстве конденсаторов. Широкое применение получили электролитические и тонкоплёночные конденсаторы с изоляцией из оксида тантала Та2О5. Благодаря большому значению диэлектрической проницаемости (ε = 25) такие конденсаторы обладают большой удельной ёмкостью.

*Ниобий* (2477 °С) по свойствам близок к танталу, высокопластичен и хорошо поглощает газы. Конструктивные детали из ниобия одновременно поддерживают вакуум в электровакуумных приборах.

У ниобия небольшая работа выхода электрона, поэтому из него изготавливают катоды прямого накала мощных генераторных ламп.

Ниобий отличается наивысшей температурой сверхпроводимости. Интерметаллиды ниобия используют как сверхпроводящие материалы, а ниобаты бария, натрия и других металлов – в акусто- и оптоэлектронике как лазерные материалы.

*Хром* (1890 °С) – весьма распространённый элемент, благодаря стойкости к окислению он используется для защитного покрытия изделий, в том числе эксплуатируемых при повышенных температурах. Хромирование производят электролитическим путём, либо с помощью насыщения хромом поверхностных слоёв стальных изделий посредством диффузии из внешней среды.

Хром входит в состав большого количества сплавов для нагревательных приборов, термопар, конструкционных нержавеющих, жаропрочных сталей и магнитных материалов. Из тонких плёнок хрома изготавливают резисторы и адгезионные подслои для контактных площадок и токопроводящих соединений в интегральных микросхемах, а также светонепроницаемые слои фотошаблонов.

*Рений*(3180 °С) – один из редких и очень тяжелых металлов. Он отличается удачным сочетанием свойств, удовлетворяющих большинству требований электровакуумной техники; в атмосфере водорода и во влажной среде он испаряется в меньшей степени, чем вольфрам. В радиоэлектронике рений применяют для защиты от коррозии и износа деталей из меди, серебра, вольфрама, молибдена. Тонкие плёнки рения используют для создания прецизионных резисторов в интегральных схемах. Их получают в высоком вакууме путём испарения электронным лучом и осаждения на подложку.

**Драгоценные металлы**

К драгоценным металлам относят золото, серебро, платину и металлы платиновой группы – палладий, иридий, родий, рутений и осмий. Это наиболее химически стойкие металлы; они встречаются в природе в виде самородков, представляющих в основном смеси этих металлов, а также как примеси присутствуют в различных рудах. В результате металлургической, химической и электролитической переработки удается получить металлы очень высокой чистоты: золото – 99,998 %; платину – 99,9998 %; серебро – 99,999 %; палладий – 99,94 %.

*Золото* – высокопластичный блестящий металл жёлтого цвета. В электронной технике золото используют как контактный материал, а также для коррозионно-устойчивых покрытий резонаторов СВЧ и внутренних поверхностей волноводов. Золото добавляют в полупроводники для повышения рабочей частоты.

*Серебро* – белый, блестящий металл, с наименьшим удельным электрическим сопротивлением (16 нОм·м). Серебро применяется в широкой номенклатуре контактов в аппаратуре разных мощностей. Высокие значения удельных теплоёмкости, теплопроводности и электрической проводимости серебра обеспечивают по сравнению с другими металлами наименьший нагрев контактов и быстрый отвод теплоты от контактных точек.

Серебро применяют также для непосредственного нанесения на диэлектрики в качестве электродов при производстве керамических и слюдяных конденсаторов; для этого применяют методы испарения электронным лучом и осаждения в вакууме либо вжигания. Серебром покрывают внутренние поверхности волноводов для получения слоя высокой проводимости, с этой же целью серебрению подвергают проводники высокочастотных катушек индуктивности.

*Платина* – белый металл с наибольшей химической стойкостью, прекрасно поддаётся механической обработке, вытягивается в очень тонкие нити и ленты. В отличие от серебра платина не образует сернистых плёнок при взаимодействии с атмосферой, что обеспечивает платиновым контактам стабильное переходное сопротивление. Вследствие малой твёрдости платина редко используется для контактов в чистом виде, но служит основой для контактных сплавов. Наибольшее применение нашли сплавы платины с иридием. Они не окисляются, имеют высокую твёрдость, малый механический износ, допускают большую частоту включений, однако дороги и применяются в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую надёжность контактов при малых напряжениях и слабых токах.

Платину применяют для изготовления термопар, рассчитанных на рабочие температуры до 1600 °С (в паре со сплавом платинородий). Особо тонкие нити из платины диаметром около 0,001 мм для подвесок подвижных систем в электрометрах и других чувствительных приборах получают многократным волочением биметаллической проволоки «платина – серебро» с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте (на платину азотная кислота не действует).

*Палладий*способен интенсивно поглощать водород. Водород проникает в палладий при сравнительно низкой температуре (от 150 до 300 °С) и избыточном давлении от 0,015 до 0,1 МПа. При нагреве палладия в вакууме в диапазоне температуры от 350 до 500 °С водород вновь выделяется в чистом виде. Твёрдый палладий поглощает более чем 850-кратный объём водорода по отношению к собственному объёму. Выделенный из палладия чистый водород используют в топливных элементах для получения электричества за счёт его окисления кислородом, им также наполняют газоразрядные приборы.

Палладий и его сплавы с серебром и медью применяют в качестве материалов для изготовления слаботочных контактов. В отожженном состоянии палладий обладает весьма хорошими механическими свойствами: предел прочности при растяжении – до 200 МПа, относительное удлинение при разрыве – до 40 %.

*Иридий* используют для покрытия поверхностей изделий (иридирование), а также в качестве добавки в платину с целью повысить прочность и износостойкость контактов. Из чистого иридия изготавливают тигли для выращивания монокристаллов, ответственные детали контрольно-измерительных приборов.

До 1960 г. международным эталоном метра служил изготовленный из платиноиридиевого сплава брус, находящийся в Международном бюро мер и весов в Севре. На одной из плоскостей этого бруса нанесены два штриха, на расстоянии 1 м друг от друга.

*Родий и рутений***,** наряду с палладием, используют для защитных покрытий контактов, а родий в сплаве с платиной – для термопар.

*Осмий* – компонент сверхтвердых и износостойких сплавов с иридием (детали особо точных приборов, прецизионно малые контакты), с вольфрамом и молибденом (катоды термоионных диодов).

**Остальные металлы по порядку таблицы Менделеева**

*Литий*применяют в качестве анодов гальванических элементов и аккумуляторов; ЭДС одного литиевого элемента больше 3 В.

*Бериллий* используют для повышения прочности и упругости меди (бериллиевая бронза). Бериллий слабо поглощает рентгеновское излучение, поэтому из него изготавливают окошки рентгеновских трубок (через которые излучение выходит наружу). Бериллий обладает самой высокой электропроводностью из всех металлов при температуре жидкого азота (77,4 К), однако дорог, дефицитен и сложен в обращении (очень жёсткий и ядовитый).

Пары *натрия* используются в осветительных лампах. Натрий обладает наибольшим отношением электропроводности к плотности; известны попытки делать из него очень лёгкие провода с использованием пластиковой оболочки.

*Магний* добавляют в алюминий для упрочнения (альдрей и другие сплавы), используют в патронах и смесях для термитной сварки.

*Калий* применяют для электродов химических источников тока.

Оксид *скандия* применяют в ферритах и искусственных гранатах. Ортофосфат скандия – основа флуоресцирующих составов.

Гидриды *титана* и дисульфид TiS2 применяют в источниках тока; титанаты – основной компонент конденсаторной керамики.

*Марганец* используют в манганинах, ферритах, сталях, а также в виде плёнок для защиты от коррозии.

*Кобальт* используют в качестве составной части многих магнитных и жаростойких сплавов.

*Никель*– серебристо-белый коррозионно-устойчивый металл. Он широко применяется в электровакуумной технике в качестве материала для арматуры электронных ламп и некоторых типов катодов. Кроме этого никель используют в качестве компонента ряда магнитных и проводниковых сплавов, в аккумуляторах, а также для защитных и декоративных покрытий изделий из железа.

*Цинк* используют в качестве электродов гальванических элементов и аккумуляторов и для металлизации бумаги в конденсаторах. Цинком покрывают железо для защиты от коррозии, он входит в состав латуни и припоев для пайки алюминия.

*Галлий* входит в состав полупроводников и легкоплавких припоев.

Пары*рубидия*используют в разрядных трубках и лампах низкого давления. *Стронций* входит в состав геттеров и эмиссионных покрытий радиоламп. *Иттрий* – компонент сверхпроводниковой керамики; оксид иттрия, активированный *европием*, – красный люминофор цветных телевизоров. Диоксид *циркония* – пьезоэлектрик, в виде монокристаллов (фианит) используется в лазерах.

*Кадмий* используют в качестве электродов гальванических элементов и аккумуляторов, а также в составе бронз и легкоплавких припоев и для антикоррозионных покрытий.

*Индий* используют как контактный материал для подключения к кристаллам, акцепторную примесь и составную часть полупроводников, добавку в легкоплавкий припой и легкоплавкие сплавы, применяемые в предохранителях.

*Олово* входит в состав бронз, оловянно-свинцовых и оловянно-цинковых припоев; оловянную и оловянно-свинцовую фольгу используют в качестве электродов конденсаторов.

*Сурьму* добавляют в пластины свинцовых аккумуляторов и в припои; она также используется как составная часть полупроводниковых соединений.

*Цезий* – компонент различных фотокатодов, фотоэлементов, фотоэлектронных умножителей и электронно-лучевых трубок.

*Барий* в сплаве с алюминием – основа геттеров (газопоглотителей для электровакуумной техники); титанат бария используют в пьезоэлементах, в малогабаритных конденсаторах и в лазерах.

*Лантан* – легирующая добавка к алюминиевым, никелевым, кобальтовым сплавам; интерметаллид LaNi5 применяют в аккумуляторах; оксисульфид и алюминат лантана – компоненты люминофоров.

*Редкоземельные металлы (неодим, самарий, гадолиний*и др.) используют при изготовлении постоянных магнитов, люминофоров, лазерных кристаллов; *прометий* – как источник радиоактивного излучения в миниатюрных атомных батарейках; *диспрозий*в соединении с йодом (DyI3) – в лампах для уличного освещения.

*Гафний* применяется в качестве электродов катодных трубок и в газоразрядных трубках высокого давления. Оксид гафния – наилучший материал для изоляции в интегральных микросхемах.

*Ртуть*используют для изготовления жидких катодов ртутных выпрямителей; контактов датчиков, переключающихся при изменении наклона и давления. Парами ртути наполняют колбы газоразрядных ламп (ртутных, люминесцентных, ультрафиолетовых).

*Таллий*– компонентполупроводников.

*Свинец* используют для оболочек кабелей, прокладываемых в условиях агрессивных воздействий (в шахтах, морской воде и т. п.), пластин аккумуляторов, защиты от радиации, в припоях.

*Висмут* используют в легкоплавких припоях. Сплавы висмута и марганца идут на изготовление мощных постоянных магнитов.

*Торием* покрывают вольфрамовые электроды для аргонно-дуговой сварки.