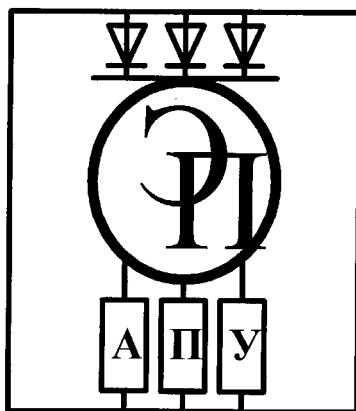


ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2016



УДК 621.315.6  
ББК 31.2  
Э 45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «16» марта 2016 г.,  
протокол № 10

Составители: канд. техн. наук, доц. Г. С. Леневский;  
канд. физ-мат. наук О. В. Обидина;  
ст. преподаватель Г. В. Лабкович

Рецензент канд. техн. наук С. В. Болотов

В методических рекомендациях приводятся краткие сведения о про-  
водниковых материалах и сплавах и методика выполнения лабораторных  
работ по определению электрических свойств.

Учебно-методическое издание

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Ответственный за выпуск	Г. С. Леневский
Технический редактор	С. Н. Красовская
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 115 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изделий  
№ 1/156 от 24.01.2014.  
Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2016



## Содержание

Введение.....	4
1 Техника безопасности.....	5
2 Лабораторная работа № 4. Исследование зависимости удельного электрического сопротивления сплавов от состава, строения, механической и термической обработки.....	6
2.1 Общие сведения.....	6
2.2 Металлические сплавы.....	9
2.3 Применение металлических сплавов.....	13
2.4 Назначение и виды термической обработки.....	18
2.5 Содержание и объём выполнения работы .....	20
2.6 Порядок выполнения работы.....	20
2.7 Содержание отчёта.....	22
3 Лабораторная работа № 5. Исследование электрических свойств материалов высокой проводимости и высокого сопротивления.....	23
3.1 Классификация проводниковых материалов .....	24
3.2 Электропроводность металлов.....	25
3.3 Влияние примесей и других структурных дефектов на..... удельное сопротивление металлов.....	27
3.4 Проводниковые материалы высокой проводимости.....	29
3.5 Общие требования и свойства резистивных материалов.....	37
3.6 Описание лабораторной установки.....	42
3.7 Содержание и объём выполнения работы.....	42
3.8 Порядок выполнения работы.....	42
3.9 Содержание отчёта.....	44
Список литературы.....	46



## Введение

В настоящее время в электротехнической промышленности применяется огромное количество материалов. При решении конкретных инженерных задач часто приходится учитывать целый набор свойств материала (электропроводность, термическую стойкость, механическую прочность, коррозионную стойкость, особенности взаимодействия с магнитным полем и т. д.).

Современное предприятие, оснащённое электрооборудованием и различной аппаратурой, характеризуется непрерывно растущей энергонапряжённостью, а также тяжёлыми условиями эксплуатации машин (высокий вакуум, низкие или высокие температуры, агрессивные среды, высокая радиация и т. д.), которые предъявляют к материалам особые требования. Для удовлетворения этих условий создано много сплавов на основе различных металлов. Свойства материала определяются его внутренним строением, которое, в свою очередь, зависит от состава и характера предварительной обработки.

При выполнении лабораторных работ студенты изучают электрические характеристики проводниковых материалов и методики их измерения, приобретают навыки для правильного использования проводников и сплавов при проектировании, ремонте, производстве, эксплуатации, испытаниях электротехнического оборудования. Устанавливают взаимосвязь между составом, строением и свойствами материалов. Изучают основные группы современных материалов, их свойства и область применения.

Результаты испытаний, их обработка и выводы оформляются в виде отчёта самостоятельно каждым студентом согласно предъявляемым к нему требованиям и обязательно представляются преподавателю к началу следующего занятия. В каждой работе имеются указания по содержанию отчёта. В отчёт по своему усмотрению студент может включить и дополнительный материал. Приводимые теоретические сведения по объёму содержащейся в них информации пригодны лишь для предварительного ознакомления с исследуемым вопросом и сознательного выполнения работы. Для фундаментального изучения явления или процесса необходимо пользоваться конспектом лекций или учебником.

Все измеренные и рассчитываемые данные (сопротивление, удельное электрическое сопротивление и др.) в отчёте должны быть представлены в единицах СИ.



## 1 Техника безопасности

1.1 Вводный инструктаж проводится со всеми студентами перед началом лабораторных и практических работ в учебных лабораториях. О проведении вводного инструктажа делается запись в журнале регистрации вводного инструктажа с обязательной подписью инструктируемого и инструктирующего.

1.2 Все работы в лаборатории могут производиться только с разрешения преподавателя, ведущего занятия.

1.3 Включение напряжения производится только после проверки схемы руководителем работы. Перед каждой подачей напряжения включающий обязан предупредить всех работающих на установке.

1.4 Необходимо соблюдать осторожность в работах, связанных с нагревом образцов, т. к. часть испытаний проводятся с использованием лабораторного оборудования с использованием высокой температуры, более 200 °С. Запрещается извлечение экспериментальных образцов из нагревательных приборов без специальных захватов.

1.5 Перед началом работы все участники должны на месте подробно ознакомиться со схемой установки, обратив особое внимание на выключатели или рубильники со стороны питающей сети, и убедиться в отсутствии напряжения на участке работы.

1.6 Запрещается оставлять без надзора установки или схемы, находящиеся под напряжением.

1.7 В случае обнаружения неисправности установки или при аварии необходимо немедленно отключить напряжение и сообщить о происшедшем руководителю работ.

1.8 При поражении работающего электрическим током нужно немедленно отключить электропитание, чтобы освободить его от соприкосновения с токоведущими частями энергоустановки. Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, следует немедленно применить искусственное дыхание, непрямой массаж сердца, вызвать врача.



## 2 Лабораторная работа № 4. Исследование зависимости удельного электрического сопротивления сплавов от состава, строения, механической и термической обработки

### *Цель работы*

1 Экспериментальное определение зависимости удельного электрического сопротивления двухкомпонентных сплавов от соотношения содержания компонентов в сплаве.

2 Экспериментальное определение удельного электрического сопротивления меди от температуры отжига.

3 Изучение влияние состава, структуры и температуры окружающей среды на электропроводность проводниковых материалов и определение типа сплава.

### *2.1 Общие сведения*

Проводниками называются вещества, удельное электрическое сопротивление которых лежит в пределах от 0,01 до 10 мкОм·м. По удельному электрическому сопротивлению металлические проводниковые материалы делятся на две основные группы:

1) металлы высокой проводимости:  $\rho$  при  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  составляет не более 0,05 мкОм·м;

2) материалы и сплавы высокого удельного сопротивления, имеющие при тех же условиях  $\rho$  не менее 0,3 мкОм·м.

К первой группе относятся преимущественно чистые металлы (медь, алюминий, серебро и др.), применяемые для изготовления обмоточных и монтажных проводов, шнуров, жил кабелей различного напряжения, шин, распределительных устройств, обмоток трансформаторов и электрических машин (электродвигатели, стартеры, генераторы).

Проводниковые материалы второй группы – это сплавы на основе меди, никеля, железа, хрома и других металлов. Эти материалы используются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания.

В качестве проводников электрического тока могут быть использованы твёрдые тела, жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Практическое применение в электротехнике нашли твёрдые проводниковые материалы на основе металлов и их сплавов. Все металлы обладают рядом свойств: специфическим блеском, хорошей электро- и теплопроводностью, способностью давать основные окислы и т. д. Химические свойства металлов определяются активностью подвижных электронов, прочно связанных с атомами.



*Кристаллическое строение металлов.* В твёрдом состоянии металлы имеют четко выраженное кристаллическое строение. Кристаллическая структура – периодически повторяющаяся в пространстве элементарная часть кристаллической решётки (элементарная ячейка). С каждой точкой ячейки связана группа атомов, которая называется базисом. Базис повторяется в пространстве и образует кристаллическую структуру. Кристаллические зёрна по внешнему виду не имеют правильной формы, состоят из монокристаллов, имеющих строго определенную геометрическую форму кристаллической решетки, где атомы, молекулы и ионы строго ориентированы в пространстве.

Одной из характеристик кристаллической решётки является компактность или степень заполненности её объёма атомами. Она определяется следующими показателями: параметр решётки, число атомов в каждой элементарной ячейке, координационное число и плотность упаковки.

Параметр решётки – это расстояние между атомами по ребру элементарной ячейки. Параметры решётки измеряется в нанометрах или ангстремах ( $1 \text{ нм} = 10 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Параметры кубических решёток характеризуются длиной ребра куба и обозначаются буквой  $a$ .

Координационное число – количество ближайших соседей данного атома.

Плотность упаковки – это отношение суммарного объёма, занимаемого собственно атомами в кристаллической решётке, к её полному объёму. Компактность решётки зависит от особенностей электронной структуры металлов и характера связи между их атомами.

Наиболее типичными формами кристаллических решёток для металлов являются: кубическая гранецентрированная (алюминий, медь, никель, свинец, золото,  $\gamma$ -железо и др. металлы), кубическая объёмно-центрированная ( $\alpha$ -железо, хром, вольфрам, молибден и др.) и гексагональная плотноупакованная (кадмий, цинк, магний, бериллий, титан и др.) (рисунок 1). В узлах кристаллических решёток находятся положительные ионы.

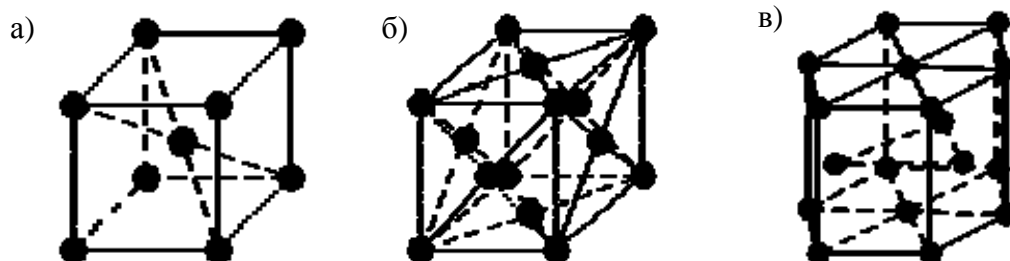


Рисунок 1 – Типы кристаллических решёток – кубическая объёмно-центрированная ОЦК (а), кубическая гранецентрированная ГЦК (б), гексагональная плотноупакованная (в)



В одиночном кристалле механические и другие свойства проявляются неодинаково в различных направлениях. Электропроводность, сопротивление сжатию и растяжению могут различаться в несколько раз. Формирование кристаллической структуры обычно происходит так, что отдельные кристаллы по отношению друг к другу ориентированы различно, что делает свойства металла практически одинаковыми во всех направлениях. *Анизотропия* – это различие свойств в разных направлениях в кристалле. В монокристалле – анизотропия. Поликристаллические вещества состоят из множества кристаллов. В поликристаллическом теле – изотропия (одинаковые свойства по разным направлениям).

Многие вещества могут образовывать кристаллические формы, имеющие различные структуру и свойства, но одинаковый состав (полиморфные модификации). *Полиморфизм* – способность твёрдых веществ и жидких кристаллов существовать в двух или нескольких формах с различной кристаллической структурой и свойствами при одном и том же химическом составе. Полиморфизм простых веществ называется аллотропией. Полиморфные модификации принято обозначать греческими буквами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ , ..., начиная с модификаций, устойчивых при низких температурах. Переход одной полиморфной модификации в другую называется полиморфными превращениями. Эти переходы происходят при изменении температуры или давления и сопровождаются скачкообразным изменением свойств.

*Кристаллизация металлов.* При переходе металла из жидкого состояния в твёрдое происходит образование кристаллов. Атомы из хаотичного разброса занимают строго определенное место в кристаллической решётке. Этот процесс можно представить следующим образом: около температуры плавления в жидком металле образуются скопления атомов, которые называются центрами кристаллизации и образуются независимо друг от друга. Растущие кристаллы имеют правильную форму. При срастании с другими кристаллами она нарушается, приобретая неправильную деформированную гроздеподобную или древовидную форму. Рост продолжается в тех направлениях, где есть доступ жидкого металла. Скорость зарождения центров кристаллизации и роста зёрен зависит от явления, называемого переохлаждением. При равновесной температуре процесс кристаллизации не происходит. При небольшой степени переохлаждения образуются крупные зёрна (центров кристаллизации мало, скорость роста кристаллов минимальна). Чем больше переохлаждение металла, тем большее количество центров кристаллизации образуется. Это приводит к формированию мелкозернистой структуры, имеющей более высокие механические показатели по сравнению с крупнозернистой. Ускорение процесса кристаллизации наблюдается, если в металле имеются нерастворимые примеси, являющиеся своеобразными центрами кристаллизации.



*Дефекты кристаллической решётки.* Локальные несовершенства (дефекты) в строении кристаллов присущи всем металлам. Эти нарушения идеальной структуры твёрдых тел оказывают существенное влияние на их физические, химические, технологические и эксплуатационные свойства. Дефекты кристаллического строения классифицируются по их геометрической форме и размерам:

- точечные – вакансии, атомы замещения и атомы внедрения (дефекты, связанные с единичными атомами);
- линейные – это дислокации, цепочки вакансий и межузельных атомов; имеют длину, значительно превышающую их поперечные размеры;
- поверхностные (двумерные); малы только в одном направлении и имеют плоскую форму – это границы зерён, блоков и двойников, границы доменов;
- объёмные (трехмерные); имеют во всех трёх измерениях относительно большие размеры – это поры, трещины.

Точечные дефекты преимущественно влияют на удельную электропроводность материалов, и в частности металлов, линейные и поверхностные дефекты (плотность дислокаций) – на механические свойства.

## **2.2 Металлические сплавы**

Металлические сплавы – это вещества, обладающие металлическими свойствами и состоящие из двух или более элементов, из которых хотя бы один является металлом. Их получают охлаждением расплавленных смесей, совместным осаждением из газовой фазы, электроосаждением из растворов и расплавов, диффузионным насыщением. Сплавы (кроме сплавов с неорганической растворимостью компонентов в твердом состоянии) представляют системы, состоящие из нескольких фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях (температуре, давлении). Фаза – это однородная часть сплава, имеющая определенный состав, свойства, тип кристаллической решётки и границу раздела, при переходе которой свойства скачкообразно изменяются. Свойства сплавов значительно отличаются от свойств металлов. У сплавов более высокая механическая прочность, удельное электрическое сопротивление, стойкость к коррозии и т. д. Например, прочность на разрыв сплава меди и цинка (латуни) в 3 раза выше, чем у меди, и в 6 раз по сравнению с цинком. Железо хорошо растворимо, а его сплав с хромом и никелем (нержавеющая сталь) устойчив в разбавленной серной кислоте. Электрическое сопротивление сплава всегда выше, чем сопротивление любого его компонента. Характер изменения электропроводности сплава зависит от фаз и структур в сплаве, что определяется диаграммой состояния. Различают однофазные сплавы (твёрдые растворы), механические смеси и химические соединения (интерметаллиды).

**Твёрдый раствор.** Почти все металлы образуют твёрдые растворы с другими металлами и неметаллами. Твёрдыми растворами являются сплавы, в которых кристаллическая решетка построена из атомов двух или большего числа компонентов, при этом один из них является растворителем, а другой – растворимым. Твёрдый раствор имеет сильно деформированную кристаллическую решетку, тип которой соответствует типу решётки одного из образующих компонентов. Твёрдые растворы могут образовываться при любом соотношении компонентов. Различают твёрдые растворы замещения и внедрения. При растворении неметаллов в металлах обычно возникают растворы внедрения. Для твёрдых растворов характерно постепенное изменение свойств с изменением их состава. Прочность и твёрдость твёрдых растворов обычно выше, а электрическая проводимость и теплопроводность ниже, чем у каждого из компонентов в отдельности. Твёрдые растворы замещения могут быть с неограниченной растворимостью и ограниченной. С неограниченной растворимостью образуются твёрдые растворы тогда, когда сплаваемые компоненты имеют одинаковый тип кристаллической решётки, близкие параметры решётки и сходные по строению оболочки валентных электронов в атомах. Например, сплавы систем: Ni–Cu, Ni–Pb, Ag–Au, Fe–Co, Fe–Cr, Ni–Co и другие. На рисунке 2, а представлена диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют твёрдые растворы с неограниченной растворимостью. Верхняя линия – это линия ликвидуса, нижняя – линия солидуса. Выше линии ликвидуса все сплавы находятся в жидком состоянии, ниже линии солидуса – в твёрдом. Между этими линиями происходит затвердевание сплавов, и здесь находятся жидкая и твёрдая фазы. Состав твёрдой фазы сплавов при данной температуре показывает линия солидуса, состав жидкой фазы сплавов – линия ликвидуса.

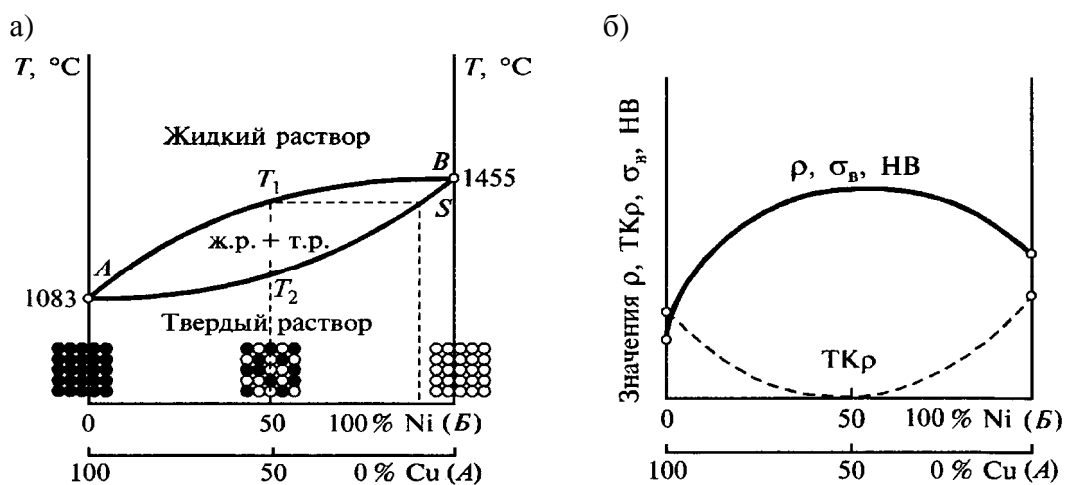


Рисунок 2 – Диаграмма состояния сплавов, образующих твёрдые растворы с неограниченной растворимостью компонентов (а), и изменение механических и электрических свойств в зависимости от состава (б)



Кристаллическая структура сплавов этой группы представляет собой решётку основного металла, в которой размещены атомы растворённого металла. Элементы таких сплавов способны к взаимному растворению как в жидком, так и в твёрдом состоянии. При затвердевании металла слиток может приобрести различную структуру, которая характеризуется большей или меньшей неоднородностью, что зависит от состава сплава, скорости охлаждения и ряда других факторов. Возникновение неоднородности связано с особенностями процесса кристаллизации сплава, компоненты которого имеют разные точки плавления. При охлаждении сплава первыми начинают выпадать кристаллы тугоплавкого компонента, и далее, в зависимости от скорости понижения температуры, формирование структуры кристаллов будет происходить более однородно при медленном и неоднородно при быстром охлаждении. Явление неоднородности структуры отдельных кристаллов называется внутрикристаллической ликвацией. Неоднородная структура сплава, обусловленная внутрикристаллической ликвацией, ухудшает его эластические свойства. Для восстановления однородности сплава его подвергают рекристаллизации, т. е. выдержке при температуре, близкой к температуре плавления.

*Механические смеси (гетерогенные структуры).* Такой вид сплава возникает в случае соединения взаимно нерастворимых металлов, но в реальных сплавах абсолютной взаимной нерастворимости компонентов не бывает. Небольшое количество одного из компонентов сплава, как правило, растворяется в другом компоненте. Многие металлы, взаимно растворимые в расплавленном состоянии, при охлаждении образуют смесь кристаллов с различной кристаллической решёткой. Каждый компонент сплава сохраняет свою кристаллическую решётку, и свойства его в основном определяются соотношением составных частей. Этот тип сплавов (например, Pb–Sb, Zn–Sn, Pb–Bi, Pb–Sn, Cu–W, Al–Si и др.) образуется при сплавлении компонентов с большой разницей атомных радиусов и значительным различием электрохимических свойств. Чем больше эти различия, тем меньше растворимость компонентов друг в друге. Температура плавления такой смеси ниже температуры плавления отдельных компонентов. На рисунке 3 приведены диаграммы состояния сплавов свинца с сурьмой.

Состав, имеющий минимальную температуру плавления, называется эвтектикой. Эвтектический сплав состоит из очень мелких кристаллов индивидуальных компонентов, характеризуется малыми размерами и однородностью кристаллов и имеет высокую твёрдость и механическую прочность. Вследствие легкоплавкости сплавы свинца с оловом применяются для припоев и подшипников.

*Химическое соединение.* Химические соединения могут возникать между металлами и металлом с металлоидом. Сплавы, образующие химические соединения одного металла с другим, называются интерметаллидами или интерметаллическими соединениями.



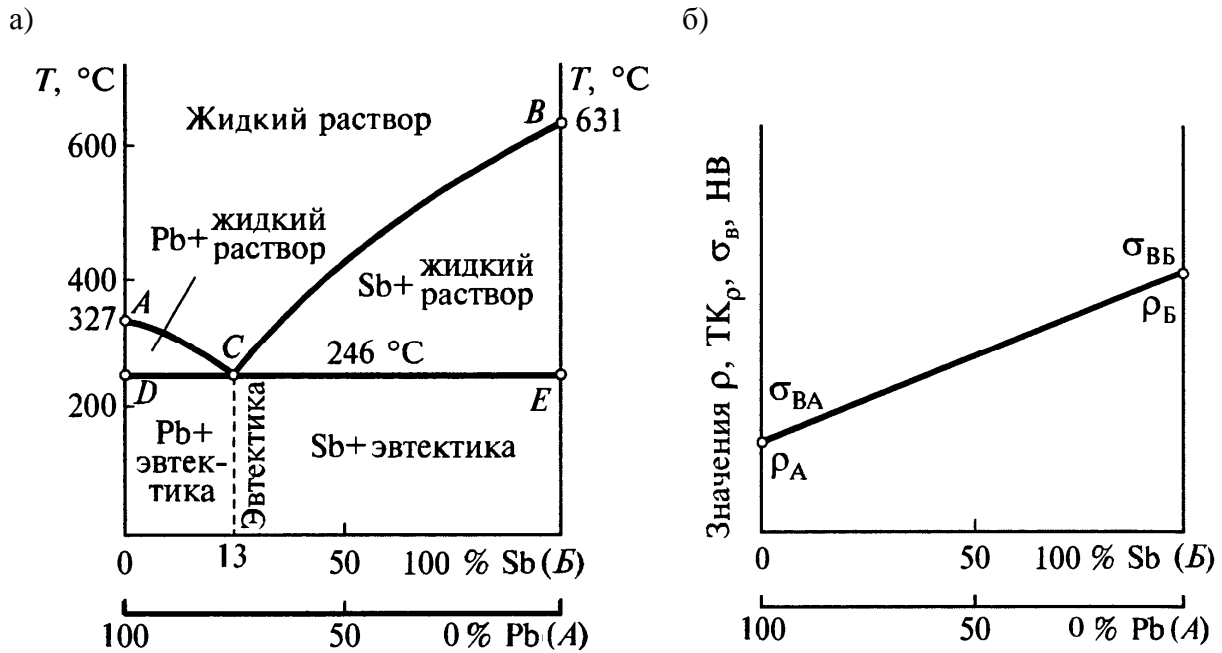


Рисунок 3 – Диаграмма состояния сплавов, образующих гетерогенные структуры (а) и изменения механических и электрических свойств в зависимости от состава (б)

В случае образования химического соединения только металлическими элементами образуется металлическая связь, а при образовании соединения металла с неметаллом – ионная.

Характерными особенностями химических соединений, образованных по закону нормальной валентности, отличающими их от твердых растворов, являются следующие:

- кристаллическая решетка отличается от решеток компонентов, образующих соединение. Атомы в решетке химического соединения располагаются упорядоченно, т. е. атомы каждого компонента расположены закономерно и по определенным узлам решетки. Большинство химических соединений имеет сложную кристаллическую структуру;

- в соединении всегда сохраняется кратное массовое соотношение элементов. В общем виде химическое соединение двух элементов можно обозначить простой формулой  $A_nB_m$ , где А и В – соответствующие элементы; n и m – простые числа. Устойчивое химическое соединение  $A_nB_m$ , состоящее из химических элементов А и В, является по существу самостоятельным компонентом, который может образовывать сплавы с каждым из входящим в него элементов (А и В);

- свойства соединения резко отличаются от свойств образующих его компонентов;

- температура плавления (диссоциации) постоянная. В отличие от твердых растворов химические соединения обычно образуются между компонентами, имеющими большое различие в электронном строении атомов и кристаллических решеток.

Примером типичных химических соединений с нормальной валентностью являются соединения магния с элементами IV–VI групп периодической системы и др.

Некоторые химические соединения металлов ( $Mg_2S$ ) отличаются твёрдостью и хрупкостью.

Диаграмма состояния сплавов, образующих химическое соединение, состоит из двух самостоятельных частей (рисунок 4). В месте соединения в точке С, называемой сингулярной, образуется устойчивое химическое соединение  $A_nB_m$ .

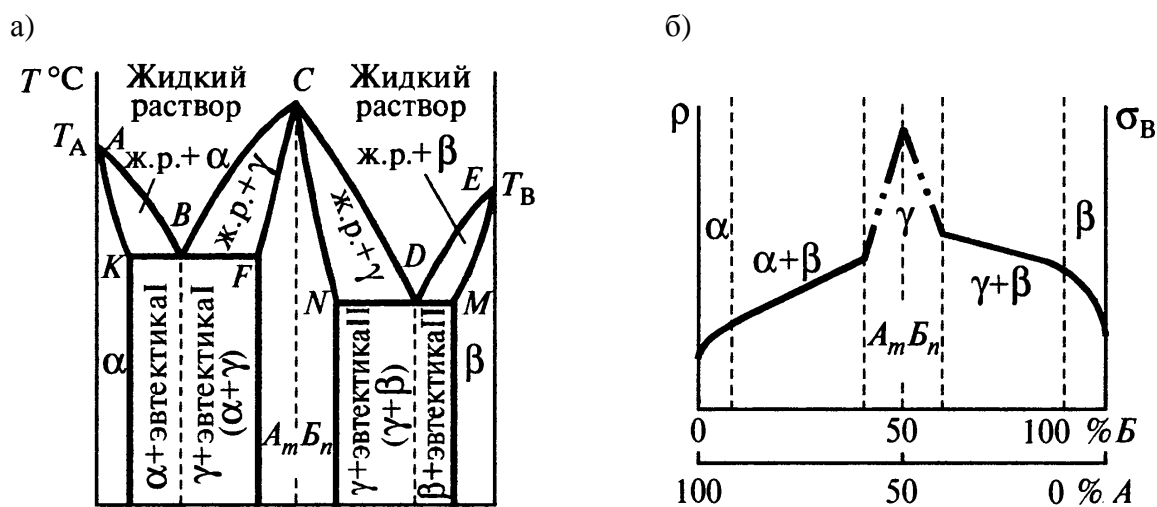


Рисунок 4 – Диаграмма состояния сплавов, образующих химические соединения (а) и изменения электрических свойств в зависимости от состава (б)

### 2.3 Применение металлических сплавов

В группу медно-никелевых сплавов входят такие сплавы на основе меди, в которых никель является основным легирующим компонентом, оказывающим решающее влияние на свойства. В зависимости от содержания никеля и других легирующих компонентов, такие сплавы обладают различными физико-механическими характеристиками: прочностью, пластичностью, коррозионной стойкостью, жаропрочностью и жароупорностью и другими свойствами.

Медно-никелевые сплавы используются в различных областях промышленности, начиная от судостроения и заканчивая изготовлением деталей прецизионных механизмов. Очень часто изделия из медно-никелевых сплавов работают в агрессивных коррозионных средах: морской воде, парах воды и других газах. Медно-никелевый сплав применяется для изготовле-

ния образцовых сопротивлений, шунтов и добавочных сопротивлений к электроизмерительным приборам, термопар.

Общим свойством таких сплавов является высокое удельное электрическое сопротивление (от 0,4 до 2,0 мкОм·м). Поэтому такие сплавы называются сплавами высокого сопротивления. Эти сплавы представляют собой твёрдые растворы металлов с неупорядоченной структурой. Основные электрические свойства ( $\rho$ ,  $\alpha\rho$ ) медно-никелевых сплавов зависят от процентного содержания компонентов в сплаве. К медно-никелевым сплавам относятся манганин, константан и нейзильбер.

Название сплава состоит из букв элементов, входящих в него. В начале ставятся буквы основных компонентов, определяющих свойства сплава, а затем буквы остальных компонентов в порядке уменьшения содержания этих элементов в сплаве. Среднее содержание элементов в сплаве указывается цифрами, разделёнными тире, сразу после буквенного обозначения сплава в том же порядке, в котором расположены буквы элементов в названии сплава. Содержание основного компонента не указывается, а рассчитывается как разность 100 % и суммарного содержания всех легирующих компонентов. Например, сплав МНЦС16-29-1,8 содержит в своём составе 16 % никеля (Н), 29 % цинка (Ц), 1,8 % свинца (С), остальное – медь (М).

Добавки других элементов в медно-никелевые сплавы в качестве легирующих компонентов или их присутствие в качестве примесей существенно влияет на механические, технологические и физико-химические свойства этих сплавов.

Алюминий значительно растворяется как в меди, так и в никеле; в сплавах служит раскислителем. Добавки алюминия несколько увеличивают прочность и пластичность, понижают температуру магнитных превращений, но не влияют на электропроводность и термо-ЭДС.

Железо облегчает процессы обработки сплавов, однако значительно понижает их жаропрочность и термо-ЭДС. Однако добавки железа к мельхиорам повышают их стойкость против ударной коррозии.

Кремний ограниченно растворим как в никеле, так и в меди и иногда применяется в качестве раскислителя. Он снижает пластичность сплавов, вызывая брак по трещинам при обработке давлением. На термоэлектродные сплавы кремний влияет отрицательно, и его содержание не должно превышать 0,002 %, в сплавах сопротивления – не больше 0,1 %.

Марганец положительно влияет на механические свойства и жаростойкость медно-никелевых сплавов. Кроме того, марганец и магний являются хорошими раскислителями, они парализуют вредное влияние серы.

Цинк является одним из основных компонентов в нейзильберах. Однако он является вредной примесью в термоэлектродных сплавах и сплавах сопротивления из-за того, что легко испаряется.





Хром растворим в никеле в твёрдом состоянии, причём при нагревании растворимость повышается. Хром повышает электросопротивление и жаростойкость.

Сера является очень вредной примесью. При затвердевании её соединения с никелем выделяются по границам кристаллитов, придавая сплаву хрупкость. При содержании серы 0,01 % сплавы легко разрушаются при обработке давлением.

Кислород также отрицательно влияет на медно-никелевые сплавы. Сплавы, содержащие кислород, склонны к «водородной болезни». Кроме того, он придаёт сплавам хрупкость.

Углерод ничтожно мало растворим в медно-никелевых сплавах. При содержании никеля 30 % растворимость углерода составляет всего лишь 0,045 %. При содержании углерода выше предела растворимости он выделяется в виде графита по границам кристаллитов, что способствует быстрому разрушению готовых изделий от интеркристаллитной коррозии.

Висмут и свинец – вредные примеси. При их содержании более 0,002 % сплавы легко разрушаются при горячей обработке давлением. Свинец вводится лишь в нейзильбер МНЦС16-29-1,8 для улучшения его обрабатываемости резанием. Но этот сплав можно обрабатывать давлением только в холодном состоянии.

Сурьма и мышьяк – вредные примеси. Они резко ухудшают обрабатываемость сплавов давлением.

Фосфор и кадмий – вредные примеси, так как они резко снижают механические, физические и технологические свойства сплавов.

*Манганин.* Сплав коричнево-красноватого цвета, состоит из 84–86 % меди, 12–13 % марганца и 2–3 % никеля, выпускается двух марок: МНМц3-12 и МНМцАЖ3-12-0,3-0,3. Он получил широкое распространение в электротехнике, в виду того, что из него изготавливают манганиновую проволоку, главное достоинство которой заключается в том, что сопротивление этого изделия почти не меняется в области комнатных температур. Помимо проволоки из сплава производят мостовые схемы, шунты, электроизмерительные приборы и образцовые сопротивления; различные провода (обмоточные с эмалевой изоляцией, провода со слоем натурального шелка и эмалевой изоляцией, изолированные провода из натурального шелка); ленты с толщиной до 0,08 мм и шириной до 270 мм.

*Константан* также является медно-никелевым сплавом, но в отличие от манганина содержит больше никеля. Состав константана: 57–60 % меди, 39–41 % никеля и 1–2 % марганца. Наименование сплава – МНМц40-1,5. Основное достоинство сплава – независимость удельного электрического сопротивления от температуры. Константан в сочетании с медью имеет высокую термо-ЭДС и поэтому не может быть применён для изготовления эталонных сопротивлений к точным приборам, так как эта дополнительная ЭДС будет искажать показания приборов. Это свойство константана ис-





пользуется при изготовлении термопар для измерения температур порядка несколько сотен градусов. Термопары «медь-константан» используются для измерения температур до плюс 500 °С, а «железо-константан» – до плюс 600 °С. Константан отличается высокой механической прочностью, сочетаемой с пластичностью, и это позволяет получать из него проволоку диаметром от 0,02 до 5 мм, фольгу, ленты, полосы.

При нагревании голой константановой проволоки до плюс 900 °С в течение нескольких секунд и последующего охлаждения на воздухе на её поверхности образуется сплошная плёнка из окислов. Эта оксидная плёнка имеет тёмно-серый цвет и обладает электроизоляционными свойствами. Такая проволока может использоваться (с естественной изоляцией между витками), например в реостатах, если напряжение между витками не превышает 1 В.

*Нейзильбер* – сплав меди с 5–35 % Ni и 13–45 % Zn. Нейзильбер, внешне напоминающий серебро, имеет очень высокие механические характеристики, пластичен и отличается высокой коррозионной стойкостью, но меньшее удельное электрическое сопротивление, чем у других сплавов. Допустимая рабочая температура нейзильбера – 200–250 °С, так как при более высоких температурах происходит диффузия цинка к границам зёрен сплава и изделия становятся хрупкими. После холодной деформации сплав приобретает упругость.

Основные электрические и механические параметры данных сплавов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры медно-никелевых сплавов

Параметры	Манганин	Константан	Нейзильбер
1 Плотность, кг/м <sup>3</sup>	8400	8900	8700
2 Удельное электрическое сопротивление, мкОм·м	0,42–0,48	0,48–0,52	0,30–0,32
3 Температурный коэффициент удельного сопротивления, ТК <sub>ρ</sub> · 10 <sup>-6</sup> , °С <sup>-1</sup>	-6...+50	-5...+25	360
4 Коэффициент термо-ЭДС в паре с медью, мкВ/°С	1–2	44–55	14,4
5 Температурный коэффициент линейного расширения, ТК <sub>l</sub> · 10 <sup>-6</sup> , °С <sup>-1</sup>	13	14,4	16,6
6 Предел прочности при растяжении σ <sub>p</sub> , Па	450–600	400–500	350–1100
7 Относительное удлинение при разрыве, %	15–0	20–40	3–30
8 Температура плавления, °С	910–960	1260	1080
9 Максимальная рабочая температура, °С	200	500	200–250



Механические смеси образуют сплавы свинца и сурьмы, свинца и олова, цинка и олова, алюминия и кремния и др.

*Припой* – металл или сплав, применяемый при пайке для соединения заготовок и имеющий температуру плавления ниже, чем соединяемые металлы. Применяют сплавы на основе олова, свинца, кадмия, меди, никеля и др. Олово и его сплавы имеют температуру ликвидуса в интервале 145–250 °С. В зависимости от температуры плавления припои подразделяются на мягкие, твёрдые и полутвёрдые:

- мягкие припои – температура плавления до 400 °С;
- твёрдые припои – температура плавления свыше 500 °С;
- полутвёрдые припои – температура плавления лежит в диапазоне от температуры плавления чистого олова до 400 °С. Мягкие и полутвёрдые припои имеют предел прочности до 50–70 МПа при растяжении и применяются для пайки токоведущих частей, не являющихся одновременно несущими конструкциями машин и аппаратов. Название припоя определяется входящими в него в небольшом количестве металлами. Наиболее распространёнными мягкими припоями являются оловянно-свинцовые с содержанием олова от 18 до 90 %, остальное – свинец (например, ПОС-61 – припой оловянно-свинцовый, содержит 61 % олова, остальное – свинец). Марка припоя выбирается из типа паяемого металла, требуемой механической прочности и коррозионной стойкости, а при пайке токоведущих частей учитывается величина удельной электрической проводимости припоя. Наиболее легкоплавкие припои содержат в своём составе висмут и кадмий. К ним относится сплав Вуда с температурой плавления плюс 60,5 °С. Стандартными твёрдыми припоями являются медно-цинковые и серебряные. Наиболее распространёнными из них являются следующие:

ПМЦ-36 – припой медно-цинковый (36 % медь, остальное – цинк (температура плавления 950 °С, используется для пайки латуни с содержанием меди до 64 %); ПСР-25 и до ПСР-70 – серебряные припои, содержащие от 25 до 70 % серебра, меди – от 40 до 26 %, цинка – от 35 до 4 % (температура плавления 600–750 °С).

Сплав медь-вольфрам предназначен для сильноточных коммутирующих контактов. Он состоит из невзаимодействующих компонентов и представляет собой смесь двух фаз. Основу составляет медь или серебро, которая обеспечивает высокую электропроводность и теплопроводность контактов, а тугоплавкая фаза в виде равномерных включений или непрерывного скелета вольфрама, графита или других тугоплавких металлов, повышает стойкость к механическому износу, электрической эрозии, термическую стойкость и препятствует свариванию контактов друг с другом.

Физические параметры фаз (плотность, твёрдость, проводимость, теплопроводность и температурный коэффициент линейного расширения) суммируются.



## 2.4 Назначение и виды термической обработки

Термической (тепловой) обработкой называются процессы, сущность которых заключается в нагреве и охлаждении изделий по определенным режимам, в результате чего происходят изменения структуры, фазового состава, механических и физических свойств материала, без изменения химического состава.

При разработке технологии термической обработки меди и её сплавов приходится учитывать две их особенности: высокую теплопроводность и активное взаимодействие с газами при нагреве. При нагреве тонких изделий и полуфабрикатов теплопроводность имеет второстепенное значение. При нагреве массивных изделий высокая теплопроводность меди является причиной более быстрого и равномерного их прогрева по всему сечению по сравнению, например, с титановыми сплавами. Медь и сплавы на её основе активно взаимодействуют с кислородом и парами воды при повышенных температурах, по крайней мере, более интенсивно, чем алюминий и его сплавы. В связи с этой особенностью при термической обработке полуфабрикатов и изделий из меди и её сплавов часто применяют защитные атмосферы, в то время как в технологии термической обработки алюминия защитные атмосферы встречаются редко. Отжиг меди и её сплавов проводят с целью устранения тех отклонений от равновесной структуры, которые возникли в процессе затвердевания или в результате механического воздействия либо предшествующей термической обработки.

Отжиг – термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла до определённой температуры, выдержке в течение определённого времени при этой температуре и последующем очень медленном охлаждении до комнатной температуры. Применяют для улучшения обработки металлов резанием, снижения твёрдости, получения зернистой структуры, а также для снятия напряжений, устраняет частично (или полностью) всякого рода неоднородности, которые были внесены в металл при предшествующих операциях (механическая обработка, обработка давлением, литьё, сварка), улучшает структуру.

Одним из видов отжига является диффузионный (гомогенизационный) отжиг, назначение которого – сделать металл однородным по структуре. При гомогенизации нагревают металл до температуры на 180–200 °С выше интервала превращений с последующим медленным охлаждением. Основными сплавами меди, нуждающимися в гомогенизационном отжиге, являются оловянные бронзы, так как составы жидкой и твердой фаз в системе медь-олово сильно отличаются, в связи с чем развивается интенсивная дендритная ликвация. В результате гомогенизационного отжига повышается однородность структуры и химического состава слитков.

Рекристаллизационный отжиг – это отжиг при температуре, превышающей температуру начала рекристаллизации, с целью устранения



наклёпа и получение определенной величины зерна; одна из распространённых технологических стадий производства полуфабрикатов меди и сплавов на её основе. При рекристаллизационном отжиге металлов, подвергнутых холодной обработке давлением, зёрна будут округляться и укрупняться, кристаллическая решётка выпрямляться, а концентрация дефектов в ней будет уменьшаться. Рекристаллизационный отжиг приводит к исчезновению наклёпа и, следовательно, удельное электрическое сопротивление снижается, возвращаясь к исходному значению перед пластической деформацией (рисунок 5). Чистые металлы, характеризующиеся сравнительно незначительным искажением кристаллической решётки, имеют гораздо меньшие значения удельного электрического сопротивления, чем металлические сплавы, кристаллическая решётка которых, как правило, сильно искажена.

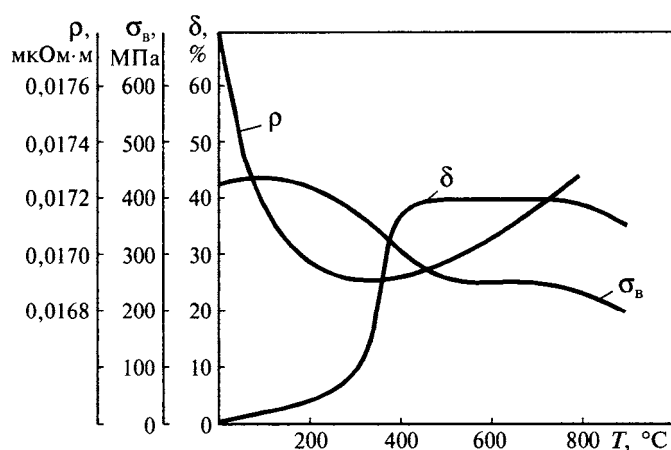


Рисунок 5 – Зависимость предела прочности на разрыв, относительного удлинения и удельного сопротивления меди от температуры отжига

Присутствие в металле примесей способствует искажению кристаллической решётки, что вызывает рост удельного электрического сопротивления. Особенно сильно искажается кристаллическая решётка и, как следствие этого, возрастает удельное электрическое сопротивление в сплавах, компоненты которых образуют твёрдые растворы (см. рисунок 2).

Пластическая деформация металлов, сопровождающаяся наклёпом, для которого характерно искажение кристаллической решётки и появления дефектов кристаллического строения, также приводит к возрастанию удельного электрического сопротивления. При этом у чистых металлов наклёп увеличивает удельное электрическое сопротивление слабо (всего на несколько процентов), тогда как у сплавов величина удельного электрического сопротивления при наклёпе может возрастать на несколько десятков процентов.

## 2.5 Содержание и объём выполнения работы

Объём проводимых испытаний определяет преподаватель, проводящий лабораторные занятия. Максимальный объём испытаний – наборы опытных образцов сплавов с известным содержанием компонентов (10 шт.) и наборы опытных образцов металлов с известными режимами обработки (10 шт.).

## 2.6 Порядок выполнения работы

2.6.1 Для измерения электрического сопротивления при выполнении лабораторной работы используется комбинированный измерительный прибор типа Щ4311 (или другой с аналогичными характеристиками).

2.6.2 Измерить электрическое сопротивление при комнатной температуре опытных образцов сплавов с известным содержанием компонентов, планшет № 1.

2.6.3 Образец подключить к зажимам комбинированного прибора.

2.6.4 Измерить электрическое сопротивление при комнатной температуре опытного образца.

2.6.5 Результаты измерений внести в таблицу 2.

2.6.6 Выполнить пп. 2.6.2–2.6.4 для остальных опытных образцов сплавов с известным содержанием компонентов, номера планшетов задает преподаватель.

2.6.7 Результаты расчётов внести в соответствующие таблицы.

2.6.8 По формуле (1) рассчитать удельное электрическое сопротивление материала для каждого образца. Геометрические размеры образцов, химический состав и другие необходимые сведения представлены на планшетах.

$$\rho = R \cdot S/l, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивления, Ом · м;

$R$  – сопротивление проводника, Ом;

$S$  – поперечное сечение проводника, м<sup>2</sup>;

$l$  – длина проводника, м.

2.6.9 Результаты исследований оформить в виде таблиц и графиков зависимостей удельного сопротивления от процентного соотношения компонентов сплава.

2.6.10 Сравнить полученные графики зависимостей сплавов с теоретическим и определить тип сплава.

*Внимание! В работе производится исследование трех типов сплавов, поэтому необходимо представить три шаблона таблицы 2.*



Таблица 2 – Результаты исследований сплава

Геометрический размер			Приближенный химический состав		R, Ом	$\rho$ , мкОм·м
L, м	S, м <sup>2</sup> (мм <sup>2</sup> )	D, мм	A, %	B, %		

2.6.11 Измерить электрическое сопротивление твёрдотянутой меди в зависимости от режима обработки, планшет № 4. Результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты исследований твёрдотянутой меди (МТ) в зависимости от режима обработки

Геометрический размер			Температура отжига, °С	Время отжига, 1 ч	R, Ом	$\rho$ , мкОм·м
L, м	S, м <sup>2</sup> (мм <sup>2</sup> )	d, мм				
				1		
				1		
				1		
				1		
				1		
				1		
				1		
				1		
				1		
				1		
				1		



## 2.7 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- цель работы;
- основные расчётные формулы и примеры вычислений с указанием размерности определяемых величин;
- таблицы результатов испытаний;
- графики зависимости удельного электрического сопротивления от процентного состава компонентов сплава  $\rho = f(\% A B)$ ;
- сравнительную оценку полученных данных в сопоставлении со справочными данными;
- график зависимости удельного электрического сопротивления от температуры отжига;
- выводы.

Определить:

- тип кристаллической решётки исходных металлов;
- тип образованного сплава;
- влияние структуры и фазового состава на электропроводность проводниковых материалов;
- область применения исследуемых сплавов в электротехнике.

### Контрольные вопросы

1 Как классифицируются проводниковые материалы по значению удельного сопротивления? Где применяются металлы высокой проводимости и сплавы высокого сопротивления?

2 Какое строение имеют металлы? Какими показателями характеризуется кристаллическая решётка?

3 Назовите основные виды кристаллических решёток для металлов, дефекты их строения.

4 Дайте определение анизотропии. Какие материалы являются изотропными?

5 В каких веществах проявляется полиморфизм? Как обозначаются полиморфные модификации?

6 У каких проводников больше электропроводность: у чистых металлов или у сплавов?

7 Как образуется мелкозернистая структура металлов и как при этом изменяется электропроводность?

8 Как образуются сплавы? Виды сплавов.

9 Какое влияние на электропроводность медных сплавов оказывает наличие в них примесей и почему?

10 Как изменяется удельное электрическое сопротивление сплавов, компоненты которых образуют неограниченные твёрдые растворы?





11 Какое влияние и почему оказывает пластическая деформация, сопровождающаяся наклёпом, на электропроводность металлических проводников?

12 Объясните, что такое «манганин», каковы его структура, свойства, термообработка, применение, маркировка?

13 Объясните, что такое «константан», каковы его структура, свойства, термообработка, применение, маркировка?

14 Как изменяются механические и электрические свойства сплавов при ограниченной взаимной растворимости компонентов? Приведите пример такого сплава.

15 Объясните, что такое «нейзильберг», каковы его структура, свойства, термообработка, применение, маркировка?

16 Как изменяются электрические и механические свойства сплавов, образующих при сплавлении механическую смесь? Приведите пример применения такого сплава.

17 Какие марки припоев Вы знаете, в чем их отличие в области применения?

18 Какая существует зависимость удельного электрического сопротивления сплава от состава и строения? Приведите примеры.

19 Укажите особенности меди и ее сплавов, которые необходимо учитывать при термообработке.

20 Объясните, как необходимо выбирать режим гомогенизационного отжига меди и ее сплавов.

### **3 Лабораторная работа № 5. Исследование электрических свойств материалов высокой проводимости и высокого сопротивления**

#### ***Цель работы***

1 Изучение физико-химических и механических свойств материалов высокой проводимости и сплавов высокого сопротивления.

2 Определение зависимостей удельного электрического сопротивления и его температурного коэффициента проводниковых материалов от температуры.

3 Определение зависимостей удельного электрического сопротивления и его температурного коэффициента медно-никелевых и резистивных сплавов от состава.



### 3.1 Классификация проводниковых материалов

Проводники электрического тока могут быть твёрдыми телами, жидкостями, а при выполнении ряда условий и газами. Твёрдые металлические проводники по величине удельного сопротивления делятся на следующие группы:

- металлы и сплавы с высокой удельной электропроводимостью  $\gamma$ ;
- металлы и сплавы со средним значением удельного электрического сопротивления  $\rho$ ;
- металлы и сплавы с высоким значением  $\rho$ ;
- сверхпроводники;
- криопроводники.

Жидкие проводники делятся в зависимости от характера электропроводимости на два рода:

- 1) проводники первого рода (электронная электропроводимость);
- 2) проводники второго рода (электронно-ионная электропроводимость).

Газообразными проводниками можно считать высокоионизированные газы, т. е. вещества, переведенные в состояние плазмы.

Все проводниковые материалы делятся на металлические и неметаллические (модификации углерода – уголь, графит, угольно-графитовые композиции и высокоионизированные газы, электролиты) материалы. По плотности металлы разделяют на лёгкие и тяжёлые. К лёгким относят те металлы, плотность которых меньше  $5 \text{ Мг/м}^3$ . Одним из наиболее лёгких металлов считается натрий, плотность которого меньше плотности воды. К тяжёлым относят подавляющее большинство металлов, используемых в технике (железо, медь, никель, олово и др.).

Металлы и сплавы используются в производстве электроустановок в качестве как конструкционных, так и электротехнических материалов.

Наиболее распространёнными проводниками являются металлы, металлические сплавы и некоторые модификации углерода. Проводниковые материалы применяются для токопроводящих элементов электроустановок: изготовления проводов, шнуров, кабелей, обмоток машин и аппаратов, линий электропередач, шин распределительных устройств и т. п.

Свойства проводниковых материалов характеризуются следующими параметрами:

- удельным электрическим сопротивлением  $\rho$ ;
- температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления  $\text{TK}_\rho$  или  $\alpha_\rho$ ;
- теплопроводностью  $\lambda$ ;
- контактной разностью потенциалов и термо-ЭДС.

Проводниковые материалы должны обладать высокой электропроводностью, чтобы не допускать больших потерь электрической энергии.



### 3.2 Электропроводность металлов

Высокая электропроводность металлов обусловлена значительной концентрацией свободных электронов. При температуре  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  удельное электрическое сопротивление металлов находится в сравнительно узком диапазоне от  $10^{-8}$  до  $10^{-6}$  Ом·м. Удельная электрическая проводимость металлических проводников на основании электронной теории металлов определяется следующим образом:

$$\gamma = \frac{n \cdot e^2 \cdot \lambda}{2m \cdot v_T}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость, См/м;  
 $n$  – число свободных электронов в единице объёма металла,  $\text{м}^{-3}$ ;  
 $e$  – заряд электрона,  $e = 1,6 \cdot 10^{-18}$  Кл;  
 $\lambda$  – средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решётки, м;  
 $m$  – масса электрона,  $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$  кг;  
 $v_T$  – средняя скорость теплового движения электронов, м/с.

Значения удельной электрической проводимости, в основном, зависят от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике, которая определяется структурой проводника и его строением, так как концентрация свободных электронов и скорость теплового движения при определённой температуре отличаются незначительно. Чистые металлы имеют более правильную кристаллическую решётку и поэтому характеризуются наименьшими значениями удельного электрического сопротивления. Примеси, дефекты кристаллической решётки приводят к уменьшению удельной электрической проводимости. Такой же вывод можно сделать, исходя из волновой природы электронов. Электронные волны, распространяемые в проводнике, теряют часть своей энергии на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с четвертью длины электронной волны. В металлическом проводнике, где длина волны электрона около 0,5 нм, микродефекты создают значительное рассеяние энергии, что приводит к уменьшению подвижности электронов и, следовательно, к уменьшению электрической проводимости. Наличие примесей и повышение температуры уменьшают подвижность электронов.

На величину удельного электрического сопротивления любого металла оказывает влияние температура. Изменение удельного электрического сопротивления проводника с температурой характеризуется температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления  $\text{TK}_p$  или  $\alpha_p$  ( $\text{K}^{-1}$ ). Если температура металла изменяется в узких пределах, то для практических целей удобно использовать кусочно-линейную аппроксима-

цию зависимости  $\rho = f(T)$ , которая позволяет определить средний температурный коэффициент удельного сопротивления:

$$TK_p = \alpha_p = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_0}{T_1 - T_0}, \quad (3)$$

где  $\alpha_p$  – средний температурный коэффициент удельного электрического сопротивления,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ,  $\text{K}^{-1}$ ;

$\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление при температуре  $T_0$ , принятой за начальную (обычно принимают  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ),  $\text{мкОм}\cdot\text{м}$ ;

$\rho_1$  – удельное электрическое сопротивление при температуре  $T_1$ ,  $\text{мкОм}\cdot\text{м}$ .

Используя значение коэффициента  $\alpha_p$ , определенное для интервала температур  $T_1 - T_0$ , можно достаточно точно найти значения  $\rho_2$  для любой температуры  $T_2$  внутри этого интервала:

$$\rho_2 = \rho_0 \cdot [1 + \alpha_p (T_2 - T_0)]. \quad (4)$$

Металлы имеют большой температурный коэффициент удельного электрического сопротивления (у большинства  $40 \cdot 10^{-4}^{\circ}\text{C}^{-1}$  и более), так что их электрическое сопротивление с температурой изменяется очень заметно. Для сплавов значение  $\alpha_c$  значительно меньше, ( $10^{-4} - 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ). При оценке температурного коэффициента удельного электрического сопротивления следует также учитывать  $TK_R$  и  $TK_I$ . Эти температурные коэффициенты связаны между собой следующими формулами:

$$\alpha_p = TK_p = TK_R + TK_I; \quad (5)$$

$$\alpha_R = TK_R = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_1 - R_0}{T_1 - T_0}, \quad (6)$$

где  $\alpha_R$  – измеренный температурный коэффициент сопротивления,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$\alpha_I$  – коэффициент линейного расширения металла,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Для чистых металлов  $TK_p \gg TK_I$  и можно считать  $TK_p \approx TK_R$ . Но для резистивных сплавов с особо малым значением  $TK_p$  значением  $TK_I$  пренебрегать нельзя.

За теплопроводность металлов отвечают те же свободные электроны, которые ответственны и за электропроводность металлов. Так как число свободных электронов в единице объема металла велико, то и коэффициент теплопроводности  $\lambda$  металлов значительно больше, чем у диэлектриков.



При равных условиях чем меньше удельное электрическое сопротивление металлов, тем больше его коэффициент теплопроводности (наглядно видно из таблицы 8).

При повышении температуры уменьшается длина свободного пробега электронов, их подвижность и уменьшается удельная электрическая проводимость, а отношение  $\lambda/\gamma$  должно возрасти. Эта зависимость описывается законом Видемана-Франца-Лоренца:

$$\lambda/\gamma = L_0 \cdot T, \quad (7)$$

где  $\gamma$  – удельная электрическая проводимость металлов, См/м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$L_0$  – число Лоренца,  $L = 2,443 \cdot 10^{-8}$ , В<sup>2</sup>/К<sup>2</sup>;

$T$  – абсолютная температура, К.

Отступлением от основных теоретических положений является случай электропроводности в тонких слоях. Для проводников в виде тонкой фольги, проволоки или пленки (например, пленки толщиной 10...1000 Å, напыляемые в вакууме на изолирующие подложки) длина свободного пробега оказывается сравнимой с наименьшим размером проводника. При высоких температурах длина свободного пробега в металлах не сильно отличается от межатомных расстояний в кристалле, поэтому на проводимость она не оказывает влияния. При уменьшении температуры увеличение длины свободного пробега ограничивается и сопротивление тонких пленок возрастает по сравнению с массивными образцами.

### ***3.3 Влияние примесей и других структурных дефектов на удельное сопротивление металлов***

Как отмечалось, причинами рассеяния электронных волн в металле являются не только тепловые колебания узлов решетки, но и статические дефекты структуры, которые также нарушают периодичность потенциального поля кристалла. Рассеяние на статических дефектах структуры не зависит от температуры. Поэтому по мере приближения температуры к абсолютному нулю сопротивление реальных металлов стремится к некоторому постоянному значению, называемому остаточным сопротивлением. Отсюда вытекает правило Маттиссена об аддитивности удельного сопротивления:  $\rho = \rho_T + \rho_{ост}$ , т. е. полное удельное сопротивление металла есть сумма удельного сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на тепловых колебаниях узлов кристаллической решетки, и остаточного удельного сопротивления, обусловленного рассеянием электронов на статических дефектах структуры. Исключение из этого правила составляют сверхпроводящие металлы, в которых сопротивление исчезает ниже некоторой критической



температуры. Наиболее существенный вклад в остаточное сопротивление вносит рассеяние на примесях, которые всегда присутствуют в реальном проводнике либо в виде загрязнения, либо в виде легирующего (т. е. преднамеренно вводимого) элемента. Следует заметить, что любая примесная добавка приводит к повышению удельного сопротивления, даже если она обладает повышенной проводимостью по сравнению с основным металлом. Так, введение в медный проводник 0,01 % ат. доли примеси серебра вызывает увеличение удельного сопротивления меди на 0,002 мкОм·м. Экспериментально установлено, что при малом содержании примесей удельное сопротивление возрастает пропорционально концентрации примесных атомов. Иллюстрацией правила Маттиссена является рисунок 6, из которого видно, что температурные зависимости удельного сопротивления чистой меди и ее сплавов с малым количеством (приблизительно до 4 % ат.) индия, сурьмы, олова, мышьяка взаимно параллельны. Различные примеси по-разному влияют на остаточное сопротивление металлических проводников. Эффективность примесного рассеяния определяется возмущающим потенциалом в решётке, значение которого тем выше, чем сильнее различаются валентности примесных атомов и металла – растворителя (основы). Помимо примесей некоторый вклад в остаточное сопротивление вносят собственные дефекты структуры – вакансии, атомы внедрения, дислокации, границы зёрен. Концентрация точечных дефектов экспоненциально возрастает с температурой и может достигать высоких значений вблизи точки плавления.

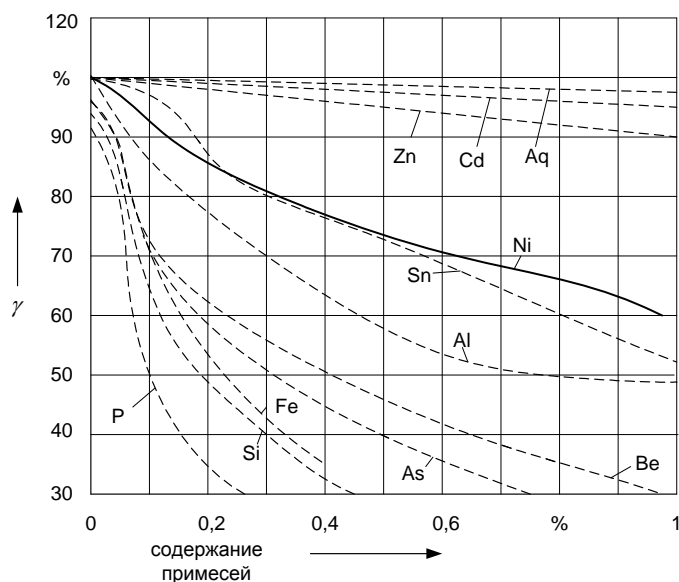


Рисунок 6 – Влияние примесей на удельную проводимость меди

Кроме того, вакансии и междуузельные атомы легко возникают в материале при его облучении частицами высокой энергии, например, нейтронами из реактора или ионами из ускорителя. По измеренному значению со-



противления можно судить о степени радиационного повреждения решётки. Таким же образом можно проследить и за восстановлением (отжигом) облученного образца. Изменение остаточного сопротивления меди на 1 % ат. точечных дефектов составляет: в случае вакансий – 0,010–0,015 мкОм·м; в случае атомов внедрения – 0,005–0,010 мкОм·м. Остаточное сопротивление представляет собой весьма чувствительную характеристику химической чистоты и структурного совершенства металлов. Большое влияние на удельное сопротивление металлов и сплавов оказывают искажения, вызываемые напряжённым состоянием. Однако степень этого влияния определяется характером напряжений. Например, при всестороннем сжатии у большинства металлов удельное сопротивление уменьшается. Это объясняется сближением атомов и уменьшением амплитуды тепловых колебаний решетки. Пластическая деформация и наклёп всегда повышают удельное сопротивление металлов и сплавов. Однако это повышение даже при значительном наклёпе чистых металлов составляет единицы процентов. Термическая закалка приводит к повышению  $\rho$ , что связано с искажениями решётки, появлением внутренних напряжений. При рекристаллизации путем термической обработки (отжига) удельное сопротивление может быть снижено до первоначального значения, поскольку происходит «залечивание» дефектов и снятие внутренних напряжений.

### ***3.4 Проводниковые материалы высокой проводимости***

К материалам этого типа предъявляются следующие требования: минимальное значение удельного электрического сопротивления; достаточно высокие механические свойства (главным образом, предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве); способность легко обрабатываться, что необходимо для изготовления проводов малых и средних сечений; способность образовывать контакты с малым переходным сопротивлением при пайке, сварке и других методах соединения проводов; коррозионная стойкость. К материалам высокой проводимости относятся металлы, имеющие удельное электрическое сопротивление при температуре плюс 20 °С не более 0,05 мкОм·м. Важнейшие проводниковые материалы высокой проводимости – медь, алюминий, серебро, и сплавы на основе меди – бронза, латунь и сплавы на основе алюминия.

**3.4.1 Медь.** Медь является одним из самых распространенных материалов высокой проводимости. Она обладает следующими свойствами: малым удельным электрическим сопротивлением (из всех металлов только серебро имеет удельное электрическое сопротивление на несколько процентов меньше, чем у меди); высокой механической прочностью; удовлетворительной коррозионной стойкостью (даже в условиях высокой влажности воздуха медь окисляется значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах);





хорошей паяемостью и свариваемостью; хорошей обрабатываемостью, сочетает в себе прочность и пластичность (медь прокатывается в листы и ленты и протягивается в проволоку).

Наличие примесей оказывает влияние на электрические, технологические и механические свойства меди. Изменение удельной электрической проводимости меди от наличия примесей показано на рисунке 6. Наиболее нежелательными примесями являются висмут и свинец. Эти элементы почти не растворяются в меди и образуют легкоплавкую эвтектику, которая при кристаллизации меди располагается вокруг зёрен. Тысячные доли процента висмута и сотые доли процента свинца приводят к растрескиванию меди при обработке ее давлением при температуре от плюс 850 до 1150 °С. Примесь серы делает ее хрупкой на холоде. Содержание серы в меди марки М1 не должно превышать 0,003 %, а в марке меди М0 – 0,002 %. Нежелательной примесью является и кислород, так как он способствует образованию оксида и закиси меди, вызывающих повышение удельного электрического сопротивления.

В качестве проводникового материала используют медь марки М1 и М0. Медь марки М1 содержит 99,9 % Cu, а в общем количестве примесей кислорода должно быть не более 0,08 %. Медь марки М0 содержит не более 0,05 % примесей, в том числе кислорода не более 0,02 %. Из меди марки М0 изготавливают особо тонкую проволоку диаметром 0,01 мм. Медную проволоку изготавливают из мягкой, т. е. отожженной при оптимальной температуре (марка ММ) и твердой не отожженной (марки МТ) меди. Механические и электрические свойства различны для мягкой (ММ) и твердой (МТ) меди и сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Механические и электрические свойства меди

Параметры	Отожженная медь ММ	Твердотянутая медь МТ
Предел прочности при растяжении $\sigma_p$ , МПа	200–280	250–500
Относительное удлинение перед разрывом $\Delta l / l$ , %	18–50	0,5–5
Плотность $d$ , кг/м <sup>3</sup>	8900	8960
Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , мкОм·м	0,0172–0,01724	0,0177–0,0180

Область применения той или иной марки меди формируется в соответствии с механическими и электрическими свойствами. Мягкая медь применяется для изготовления токопроводящих жил кабелей различного назначения, обмоточных и монтажных проводов и т. д. Твердотянутая медь применяется там, где требуется обеспечить высокую механическую прочность, твердость, сопротивляемость истирающим нагрузкам и упру-



гость: для контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин т. д. Высокая теплопроводность меди обусловила ее применение в различного рода теплообменниках, конструкциях печей для дуговой плавки таких активных металлов, как титан, цирконий, тугоплавкие металлы. Из меди делают водоохлаждаемые изложницы, поддоны, кристаллизаторы, которые обеспечивают интенсивный отвод тепла от расплава. Кроме того, медь используют для изготовления фольгированного гетинакса и применяют в микроэлектронике в виде осажённых на подложки плёнок, играющих роль проводящих соединений между функциональными элементами схемы.

*3.4.2 Классификация сплавов на основе меди.* В настоящее время различают следующие медные сплавы: латуни, бронзы, медноникелевые сплавы, специальные медные сплавы. Медные сплавы подразделяются на деформируемые и литейные, а также термически упрочняемые и термически неупрочняемые.

Латуни – сплавы меди, в которых главным легирующим элементом является цинк. Их маркируют буквой Л и числами, характеризующими среднее содержание легирующих элементов. Так, латунь Л80 содержит 80 % Cu и 20 % Zn. Если латунь легирована помимо цинка другими элементами, то после буквы Л ставят условное обозначение этих элементов: С – свинец, О – олово, Ж – железо, А – алюминий, К – кремний, Мц – марганец, Н – никель. Цифры после букв указывают среднее содержание каждого легирующего элемента в латуни, кроме цинка. Содержание цинка определяется по разности до 100 %. Так, в латуни ЛАН-59-3-2 содержится 59 % Cu, 3 % Al, 2 % Ni и 36 % Zn. В марке литейной латуни указывают не содержание меди, а содержание цинка, причем содержание легирующих элементов указывают не в конце марки, а после буквы, обозначающей элемент. Для повышения механической и коррозионной стойкости в латуни вводят алюминий, олово, марганец, железо, никель, кремний. Олово и мышьяк повышают стойкость к действию морской воды. Свинец улучшает механические свойства, облегчает обработку резанием, но снижает пластичность сплава. Железо в количестве, большем 0,03 %, придает латуням магнитные свойства. После холодной деформации прочность и твердость латуней возрастают, пластичность резко снижается. Отжиг в интервале от плюс 600 до плюс 800 °С снимает состояние наклёпа, сплав становится пластичным, его прочность и твердость уменьшаются.

Бронзами называют сплавы меди с оловом, алюминием, кремнием, бериллием и другими элементами. В настоящее время бронзами называют все сплавы меди, кроме латуней и медноникелевых сплавов. По основным легирующим элементам их подразделяют на оловянные, алюминиевые, бериллиевые, свинцовые, кремнистые и т. д. Бронзы маркируют буквами Бр, а затем указывают основные легирующие элементы и их содержание в



сплаве, так же как для латуней. Цинк в бронзах маркируют буквой Ц, фосфор – Ф, бериллий – Б, хром – Х. Так, деформируемая бронза БрАЖМц-10-3-1,5 легирована 10 % Al, 3 % Fe и 1,5 % Mn; остальное – медь. Если составы литейной и деформируемой бронз перекрываются, то в конце марки литейной латуни стоит буква Л, например БрА9ЖЗЛ.

Бронзы отличаются высокой механической прочностью, твёрдостью, упругостью как при нормальной, так и при повышенной температуре, стойкостью к истиранию. Основные типы бронз представляют собой сплавы меди с оловом (оловянные бронзы – 7 % Sn), алюминием (алюминиевые), бериллием (бериллиевые – 2,25 % Be) и другими элементами. Для электроники наибольший интерес представляют бронзы, сочетающие высокую проводимость с прочностью и твёрдостью (кадмиевые и хромовые бронзы), а также особо прочные сплавы с достаточно хорошей проводимостью (бериллиевые бронзы). Бронзы легко обрабатываются резанием, давлением и хорошо паяются. Для упрочнения детали из бронзы подвергают термической обработке: закаляют, а затем отпускают при оптимальных температурах. Проводниковые бронзы применяются для изготовления контактных проводов для электрического транспорта, коллекторных пластин, контактных ножей, скользящих контактов, токоведущих пружин, упругих контактных элементов и др.

*3.4.3 Области применения медных сплавов.* Высокотехнологичные латуни применяют для получения изделий, требующих глубокой вытяжки: гильзы, патроны, стаканы снарядов. Из этих латуней изготавливают радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны, гибкие шланги, трубы, ленты.

Латуни, имеющие красивый золотистый блеск, хорошо воспринимающие эмалировку и золочение, используют для изготовления знаков отличия, фурнитуры и художественных изделий.

Многокомпонентные, или специальные, латуни, обладающие достаточно высокой прочностью и коррозионной стойкостью, применяют в судостроении, электромашиностроении, теплотехнике.

Из латуней, легированных свинцом, изготавливают детали, работающие в условиях трения. Их используют в часовом производстве, автотракторной промышленности, типографском деле.

Об областях применения оловянных бронз свидетельствуют сами названия: пушечная бронза (Cu + 10 % Sn + 2 % Zn), колокольная бронза (~ 22 % Sn). Бронзы этого типа до сих пор применяют в машиностроении. С древних времен и до настоящего времени из оловянных бронз отливают художественные изделия (статуи, барельефы, кронштейны, люстры и т. п.). Оловянные бронзы с фосфором из-за высоких антифрикционных свойств и хорошей коррозионной стойкости применяют также в машиностроении для изготовления подпятников тяжелых кранов и разводных мостов, прокладок подшипников и втулок, гаек ходовых винтов, шестерен, червячных колес и других деталей, работающих на трение. Некоторые бронзы, в частности ле-



гированные фосфором, с высокими упругими свойствами применяют для изготовления круглых и плоских пружин.

Наибольшее распространение получили алюминиевые бронзы. Алюминиевые бронзы используют, прежде всего, как заменители оловянных. Они распространены в морском судостроении, общем машиностроении, авто- и авиастроении. Из высокопрочных алюминиевых бронз изготавливают ответственные детали: шестерни, втулки, седла клапанов, гайки нажимных винтов, подшипники, пружины и пружинящие детали, детали электрооборудования. Бериллиевую бронзу используют для наиболее ответственных назначений: плоские пружины, мембраны, детали точного приборостроения, пружинящие элементы электронных приборов и устройств, электроды сварочных машин. На менее ответственные пружины идут кремнистые бронзы. Поскольку бериллиевые бронзы не дают искр при ударе, из них делают инструмент для работы во взрывоопасных условиях. Из-за высокой коррозионной стойкости в морской воде бериллиевые бронзы применяют при прокладке кабелей по морскому дну. Свинцовые бронзы – один из лучших подшипниковых материалов. Из них изготавливают опорные и шатунные подшипники мощных турбин, авиационных моторов, дизелей и других быстроходных машин. Коррозионностойкие медноникелевые сплавы, в частности мельхиоры, и некоторые специальные бронзы применяют в установках для опреснения морской воды, в морском судостроении (конденсаторные трубы), для изготовления медицинского инструмента и деталей точных приборов. Медные сплавы применяют также в химической, нефтехимической, текстильной промышленности.

*3.4.4 Алюминий.* Алюминий является вторым после меди проводниковым материалом благодаря своей сравнительно большой проводимости и стойкости к атмосферной коррозии, пластичности, хорошей технологичности, коррозионной стойкости, легкости (в 3,3 раза легче меди). Алюминий кристаллизуется в гранцентрированной кубической решётке при 20 °С. Его удельная теплоёмкость и скрытая теплота плавления весьма значительны, поэтому для нагрева и расплавления алюминия требуются затраты большого количества тепла. Недостатками являются малая твёрдость и сравнительно с медью небольшая механическая прочность. Кроме того, алюминий обладает более высоким, чем медь, коэффициентом температурного расширения. По отношению к большинству металлов алюминий имеет отрицательный электрический потенциал и, находясь с ним в контакте, образует гальванические пары, что в присутствии влаги способствует развитию электрохимической коррозии. Оксидная плёнка обладает электроизоляционными свойствами и создает большое переходное сопротивление в месте контакта алюминиевых проводов. Поэтому пайка алюминия обычными методами невозможно. Для пайки алюминия применяются специальные пасты-припой и ультразвуковые паяльники, разрушающие оксидную плёнку. Присутствие примесей в составе алюминия существенно



снижает его удельную электрическую проводимость, а также влияет на механические характеристики. Особенно сильно повышают электросопротивление алюминия марганец, ванадий, хром и титан, мало влияют никель, кремний, цинк, железо и медь. Основные электрические и механические свойства алюминия приведены в таблице 5.

Алюминий выпускается трех марок:

- 1) алюминий особой чистоты – А999, примесей не более 0,001 %;
- 2) алюминий высокой чистоты – А95, А97, А99, А995, примесей не более 0,05 %.
- 3) алюминий технической чистоты – А5, А8, А0, примесей не более 1,0 %.

Таблица 5 – Механические и электрические свойства алюминия

Параметры	Твердотянутый алюминий	Отожженный алюминий (300 °С 2 ч в масле )
Предел прочности при растяжении $\sigma_r$ , МПа	100–180	70–100
Относительное удлинение, %	0,5–2,0	10–25
Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , мкОм·м	0,0283	0,028

Проводниковый алюминий используется для изготовления токопроводящих жил обмоточных, монтажных и силовых проводов, а также неизолированных проводов для воздушных линий электропередачи, прессованных жил кабелей различного назначения. Из него делают тонкий прокат, фольгу, любой профиль прессованием и другими видами обработки давлением. Из него изготавливают разного типа провода, применяют в электроаппаратуре. Как конструкционный материал алюминий чаще всего применяется в сплавах со следующими легирующими элементами: Cu, Zn, Mg, Ni, Fe, Mn, Ti, Si, Cr, которые формируют упрочняющие зоны и фазы.

**3.4.5 Классификация сплавов на основе алюминия.** Сплавы алюминия отличаются лёгкостью и повышенной механической прочностью, твёрдостью, износостойкостью, нагревостойкостью и удельным электросопротивлением, по сравнению с чистым алюминием. В состав алюминиевых сплавов могут входить марганец, цинк, магний, медь, железо и кремний, причем содержание железа и кремния в составе сплава не должно превышать 0,7 и 0,3 % соответственно.

Сплавы алюминия нашли широкое применение прежде всего в авиации, автомобилестроении, судостроении и др. отраслях народного хозяйства. Все алюминиевые сплавы можно разделить на конструкционные и электротехнические. Конструкционные сплавы – на деформируемые и литейные.



Деформируемые сплавы подразделяют на сплавы, не упрочняемые термической обработкой, и сплавы, упрочняемые термообработкой.

Неупрочняемые сплавы Al–Mn (АМц) и Al–Mg (АМг) – это коррозионностойкие материалы, идущие на изготовление бензо-, маслобаков, корпусов судов; имеют высокую пластичность.

К алюминиевым деформируемым сплавам, упрочняемым термической обработкой, относятся такие сплавы, как дюралюмины и авиаль. Сплав алюминия с медью называется дуралюминием (дюраль). Упрочняемые сплавы Al–Mg–Si (АВ, АД31, АД33) идут для изготовления лопастей и деталей кабин вертолетов, барабанов колес гидросамолетов. Они хорошо деформируются в горячем и холодном состоянии.

Сплавы авиаль (АВ) менее прочны, чем дюралюмины, но более пластичны, хорошо свариваются и сопротивляются коррозии.

Высокопрочные сплавы Al–Zn Mg–Cu (В93, В95, В96Ц) более прочны, чем дюралюминий, обладают лучшей коррозионной стойкостью и применяются для изготовления шпангоутов, лонжеронов, стрингеров. Алюминиевые сплавы часто применяются для изготовления поковок штамповок лопастей винта самолета, рам, поясов лонжеронов, крепежных деталей. Это сплавы АК1, АК6, АК8, АК4.

Жаропрочные алюминиевые сплавы системы Al–Cu–Mn (Д20, Д21) и Al–Cu–Mg–Fe–Ni (АК-4-1) применяют для изготовления поршней, головок цилиндров, дисков, лопаток компрессоров и т. д., работающих при температурах до 300 °С. Жаропрочность достигается за счет легирования Ni, Fe, Ti, (Д20, Д21, АК-4-1).

Литейные сплавы алюминия маркируют двумя буквами АЛ и цифрой, обозначающей порядковый номер сплава. Литейные алюминиевые сплавы применяются для изготовления литых заготовок. Это сплавы Al–Si (силумины), Al–Cu (дюралюмины), Al–Mg (АМг). К силуминам относятся сплавы Al–Si (АЛ-2), Al–Si–Mg (АЛ-4, АЛ-9, АЛ-34), которые упрочняются термообработкой. Силумины хорошо лются, обрабатываются резанием, свариваются, анодируются, пропитываются лаками.

*Электротехнические сплавы алюминия.* В соответствии с ГОСТ 14838-78 для изготовления холоднотянутой электротехнической проволоки используют алюминий марки АД1 и алюминиевые деформируемые сплавы марок АМц, АМг2, АМг5П, Д1П, Д16П, Д18 и В65, где А обозначает алюминий, Д – деформируемый сплав, Мц – марганец, Мг – магний, П – сплав холодной высадки (разновидность пластической деформации), В – высокопрочный. Химические элементы, образующие с алюминием твердые растворы, увеличивают механическую прочность, но снижают удельную электропроводность. Наиболее сильно снижают удельную электропроводность Cr, Li, Mg, Nb, Ti, V, Mn, поэтому их количество в электротехнических алюминиевых сплавах должно быть ограниченным. Железо также повышает механическую прочность сплавов, но при этом





мало влияет на их удельную электропроводность, так как не входит в твердый раствор, а присутствует в алюминии в виде дисперсных частиц. Все электротехнические сплавы алюминия содержат железо Fe и отличаются друг от друга различным его содержанием. Остальные элементы в этих сплавах представлены на более низком уровне.

Из электротехнических сплавов системы Al–Mg–Si с добавкой Fe наиболее известен сплав альдрей, обладающий высокими механическими свойствами при небольшом удельном сопротивлении

Алюминиевые сплавы являются доминирующим конструкционным материалом в авиации. Их применяют для изготовления силовых элементов самолета: обшивки, шпангоутов, лонжеронов, нервюр, а также топливных и масляных баков. Алюминиевые сплавы широко используют в конструкциях ракет и искусственных спутников Земли. Алюминий и некоторые его сплавы обладают свойством не терять пластичности при криогенных температурах, поэтому из них изготавливают резервуары для хранения криогенных жидкостей, например, жидкого метана (температура минус 161 °С). Из чистого алюминия делают теплообменники для сжижения гелия, который, как известно, переходит в жидкое состояние при 4 К. Алюминий и его сплавы применяют в промышленных и бытовых холодильниках.

**3.4.6 Железо.** Наиболее дешёвым и доступным металлом, который может использоваться в качестве проводникового материала, является железо. Одним из недостатков технически чистого железа является его высокое удельное электрическое сопротивление (порядка 0,1 мкОм·м), а наличие примесей ведет к дальнейшему увеличению удельного электрического сопротивления. Химически чистое железо обладает высокой теплопроводностью, электропроводностью и магнитной проницаемостью. Получение химически чистого, не содержащего углерода, железа связано с значительными трудностями, а применение его невелико. Железо при нагревании в присутствии углерода образует с ним соединение, называемое карбидом железа или цементитом. Это соединение отвечает формуле Fe<sub>3</sub>C и содержит 6,69 % углерода. При изменении температуры растворимость углерода в железе изменяется, при этом образуется ряд твердых растворов углерода в железе, обладающих различными свойствами. Степень насыщения железа углеродом определяет свойства стали. С увеличением содержания углерода повышается твердость и прочность стали при одновременном понижении пластичности. Примеси серы и фосфора резко ухудшают свойства стали, так как фосфор снижает ее ковкость в холодном, а сера – в горячем состоянии.

Важнейшей примесью, резко снижающей электропроводность железа, является углерод. Сплавы железа, содержащие от 2,14 до 4,3 % углерода и выше, называются чугуном. Сплавы железа, содержащие от 0 до



2,14 % углерода, называются сталью. Кроме углерода, в сталь специально вводятся легирующие добавки, с целью повышения технических характеристик.

Стали, содержащие 1,3–2,0 % кремния, используются как рессорно-пружинные, а содержащие до 4,5 % кремния – в качестве трансформаторных сталей. При добавке различных количеств хрома, марганца, никеля и других элементов можно получить различные сорта конструкционных, инструментальных, жароупорных и других высококачественных сталей.

Проводниковые материалы из стали по сравнению с алюминием и медью имеют ряд преимуществ и недостатков. Достоинство стальных материалов – высокая механическая прочность при разрыве. Недостатком железа (стали) является также малая коррозионная стойкость, т. е. они резко окисляются даже при нормальной температуре, а при повышении температуры и влажности скорость коррозии резко возрастает. Поэтому стальные провода для защиты от атмосферной коррозии покрываются слоем более стойкого материала, например цинком. Добавка к стали ниобия сообщает ей устойчивость против коррозии и действия кислот. Основные свойства железа и других проводниковых материалов сведены в таблицу 6.

Таблица 6 – Физико-механические, тепловые и электрические свойства проводниковых материалов

Свойство металла	Медь	Железо	Алюминий	Хром	Никель
1 Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	8940	7870	2700	7100	8900
2 Удельное электрическое сопротивление $\rho$ , мкОм·м	0,0168	0,098	0,028	0,210	0,073
3 Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления ТК <sub>с</sub> , °С <sup>-1</sup>	0,0043	0,0060	0,0042	24	65
4 Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	385–406	73	209	88,6	95
5 Температурный коэффициент линейного расширения ТК <sub>л</sub> ·10 <sup>-6</sup> , К <sup>-1</sup>	16,4	11	24	65	13
6 Удельная теплоемкость, с, при $t = 20$ °С Дж/(кг·К)	386	452	922	113	444
7 Температура плавления $T_{\text{плав}}$ , °С	1083	1535	657	1850	1455

### 3.5 Общие требования и свойства резистивных материалов

В качестве материалов с высоким сопротивлением используют металлические сплавы типа твердых растворов замещения, металлические и угольные пленки, проводниковые композиции. Материалы высокого сопротивления по назначению разделяются на:

- проводниковые резистивные материалы;



- пленочные резистивные материалы;
- материалы для термопар.

*3.5.1 Проводниковые резистивные материалы.* Проводниковые резистивные материалы разделяют на сплавы для проволочных резисторов (манганин, константан) и для электронагревательных элементов (нихром, фехраль, хромаль).

К проволочным резистивным материалам предъявляются следующие требования:

- удельное электрическое сопротивление при нормальной температуре не менее 0,3 мкОм·м и высокая стабильность его значения во времени;
- малый температурный коэффициент термоЭДС в паре сплава с медью;
- малый температурный коэффициент удельного электрического сопротивления;
- технологичность.

В отличие от материалов с высокой проводимостью (чистых металлов) резистивные материалы представляют собой в основном сплавы с заметно деформированной кристаллической решеткой, что характерно для твердых растворов металлов. Для получения проволоки разного диаметра, применяемой для изготовления проволочных резисторов различного назначения, наибольшее распространение получили сплавы на основе меди и никеля. Важнейшие электрические характеристики этих сплавов зависят от процентного соотношения меди и никеля.

К материалам, предназначенным для изготовления образцовых сопротивлений, шунтов и добавочных сопротивлений к электроизмерительным приборам, предъявляется ряд требований. Они должны иметь: высокое удельное электрическое сопротивление для уменьшения размеров и массы, малый температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, обеспечивающий стабильность электрического сопротивления прибора при изменении их температуры, малую термоЭДС относительно меди и стойкость к окислению при повышенных температурах, стабильность удельного электрического сопротивления во времени.

Перечисленными свойствами обладают сплавы на основе меди, никеля, железа, хрома и других металлов. Такими сплавами являются твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой. Основные представители этой группы: сплавы меди с никелем, известные под названием манганин, константан и нейзильбер.

В микроэлектронике находят применение тонкие (толщина 10–1000 Å) плёнки из тугоплавких металлов. Плёнки напыляются в вакууме на изолирующие подложки и являются основным элементом схем микроэлектроники. Основное направление их использования – резисторы в интегральных схемах. Из металлов наиболее часто применяются хром Cr, тантал Ta и рений Re. В тонких напылённых плёнках наблюдается несовпадение структуры со структурой монокристаллического металла. Плёнки имеют островковую или



сетчатую структуру, что приводит к затруднению движения электронов. В этом случае электропроводность тонких плёнок отступает от основных теоретических положений. Удельное электрическое сопротивление тонких проводящих и резистивных плёнок  $\rho_{\delta}$  при соизмеримости толщины плёнки с длиной свободного пробега электрона больше удельного электрического сопротивления соответствующего материала в толстых слоях и зависит от толщины плёнки и способа ее получения. Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления тонких металлических плёнок может быть положительным и отрицательным. С уменьшением толщины плёнки ухудшается воспроизводимость и стабильность ее параметров, снижается ее надёжность.

В качестве резистивных материалов применяют металлы и сплавы с высоким удельным электрическим сопротивлением, окислы металлов, углерод, композиционные материалы. Выбор материала зависит от номинального сопротивления резистора, его назначения и условий эксплуатации. Применяться резистивный материал может в виде объёмного элемента, проволоки различного диаметра или плёнки, осаждённой на поверхности диэлектрика.

К сплавам для электронагревательных элементов предъявляются следующие требования: высокий коэффициент удельного электрического сопротивления, малый температурный коэффициент удельного электрического сопротивления  $\text{TK}_{\rho}$ , длительная работа на воздухе при высоких температурах (иногда до 1000 °С и даже выше), технологичность, невысокая стоимость и доступность компонентов. К нагревостойким сплавам относят сплавы на основе железа, никеля, хрома и алюминия. Высокая нагревостойкость этих сплавов достигается благодаря введению в их состав достаточно большого количества металлов, которые образуют при нагреве на воздухе сплошную оксидную пленку. Нихромы представляют собой твёрдые растворы никель-хром (Ni–Cr) или тройные сплавы никель-хром-железо (Ni–Cr–Fe). Железо вводится в сплав для обеспечения лучшей обрабатываемости и снижения стоимости, но в отличие от никеля и хрома железо легко окисляется, что приводит к снижению нагревостойкости сплава; содержание хрома придает высокую тугоплавкость оксидам. Близость значений температурных коэффициентов линейного расширения  $\text{TK}_{\lambda}$  этих сплавов и их оксидных плёнок повышает стойкость хромоникелевых сплавов при высокой температуре воздуха. Растрескивание оксидных плёнок происходит при резких сменах температуры. В результате кислород воздуха проникает в образовавшиеся трещины и продолжает процесс окисления. Поэтому при многократном кратковременном включении электронагревательного элемента из нихрома он перегорает значительно быстрее, чем в случае непрерывной работы при той же температуре. Для увеличения срока службы трубчатых нагревательных элементов нихромовую проволоку помещают в трубки из стойкого к окислению металла и запол-



няют их диэлектрическим порошком с высокой теплопроводностью. Такие нагревательные элементы применяют, например, в электрических кипятильниках, которые могут работать длительное время. Нихромовая проволока применяется для изготовления проволочных резисторов, потенциометров, паяльников, электропечей и плёночных резисторов интегральных схем. Как и константаны, нихромы содержат большое количество дорогого дефицитного никеля. В марках сплавов буквы обозначают главные компоненты сплава: хром Х, никель Н, алюминий Ю. Цифра, стоящая за соответствующей буквой, указывает (в среднем) количество этого металла в сплаве. Например, в сплаве Х15Н60 содержится 15–18 % хрома, 55–61 % никеля, 1,5 % марганца, остальное – железо.

Таблица 7 – Физико-механические, тепловые и электрические свойства сплавов высокого сопротивления

Свойство сплава	Манганин	Константан	Нихром		Хромоалюминиевые сплавы	
			Х15Н60	Х20Н80	Х13Ю4	Х23Ю5
1 Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	8400	8900	8300	8400	7300	7250
2 Удельное электрическое сопротивление $\epsilon$ , мкОм·м	0,42–0,48	0,48–0,52	1,1–1,2	1,0–1,1	1,18–1,34	1,30–1,40
3 Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления $TK_{\epsilon} \cdot 10^{-6}$ , °C <sup>-1</sup>	-6...+50	-5...+25	100–200	100–200	100–120	65
4 Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	–	–	12,6	16,8	16,8	16,8
5 Температурный коэффициент линейного расширения, $TKl \cdot 10^{-6}$ , °C <sup>-1</sup>	13	14,4	17	18	15	15
6 Предел прочности при растяжении $\sigma_r$ , МПа	450–600	400–500	400–645	686–735	700	800
7 Относительное удлинение при разрыве, %	15–30	20–40	15–30	10–18	20	10–15
8 Температура плавления, °C	910–960	1260–1080	1390	1380–1420	1500	1500
9 Максимальная рабочая температура, °C	60–250	200–500	1000	1100	900	1200





Хромоалюминовые сплавы (Fe–Cr–Al) почти не содержат никеля. Они дешевле нихромов и отличаются от них своими электрическими и механическими свойствами. Увеличение содержания хрома и алюминия в сплаве приводит к росту жаростойкости и одновременно к повышению прочности и хрупкости сплава. Хромоалюминиевый сплав фехраль с повышенным содержанием железа менее жаростоек, но имеет более высокий температурный коэффициент удельного сопротивления, чем хромаль.

*3.5.2 Плёночные резистивные материалы.* Плёночные резистивные материалы получают из исходных материалов в процессе получения самих резистивных плёнок. Свойства таких резистивных плёнок значительно отличаются от свойств исходных материалов. Тонкие резистивные плёнки наносят на изоляционные основания (подложки) методом термического испарения в вакууме; катодным, реактивным и ионноплазменным распылением, электрохимическим и химическим осаждением и др. В качестве оснований используют стекло, керамику, ситалл, поликор, слоистые пластики и др. К материалам, применяемым для изготовления плёночных резисторов, предъявляются следующие требования: возможность изготовления стабильных во времени резисторов с низким температурным коэффициентом удельного электрического сопротивления ТК, хорошая адгезия к подложкам, высокая коррозионная стойкость и устойчивость к длительному воздействию высокой температуры. Адгезия – способность материалов сцепляться друг с другом. В зависимости от исходных материалов плёночные резисторы разделяют на металлоплёночные и металлооксидные, композиционные, углеродистые. Для изготовления металлоплёночных и металлооксидных резисторов применяют тугоплавкие металлы тантал, титан, никель, хром, палладий, рений, вольфрам и сплавы на их основе.

*3.5.3 Материалы для термопар.* Для термопар применяют чистые металлы и различные сплавы с высоким электрическим сопротивлением. Материалы для термопар выбирают по следующим характеристикам:

- допустимая рабочая температура спая  $T_{сп}$ ;
- удельный коэффициент электрического сопротивления;
- температурный коэффициент удельного электрического сопротивления  $TК_p$ ;
- коэффициент термо-ЭДС.

Термопары могут применяться для измерения следующих температур: до 350 °С – медь-константан, медь-копель; до 600 °С – железо-константан, железо-копель, хромель-копель; до 900–1000 °С – хромель-алюмель; до 1600 °С – платинородий-платина. Для измерения криогенных температур можно использовать термопару железо-золото.





### 3.6 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рисунок 7) состоит из нагревательного устройства А1 1, в котором размещены исследуемые изделия 2, 3 из различных проводниковых материалов. Они закреплены на панели из диэлектрика. На коммутационную панель 4 через соединение разъёмное (розетка XS1 – вилка XP1) подключены исследуемые образцы. Для измерения температуры внутри нагревательного устройства используется термомпара ЕК1.

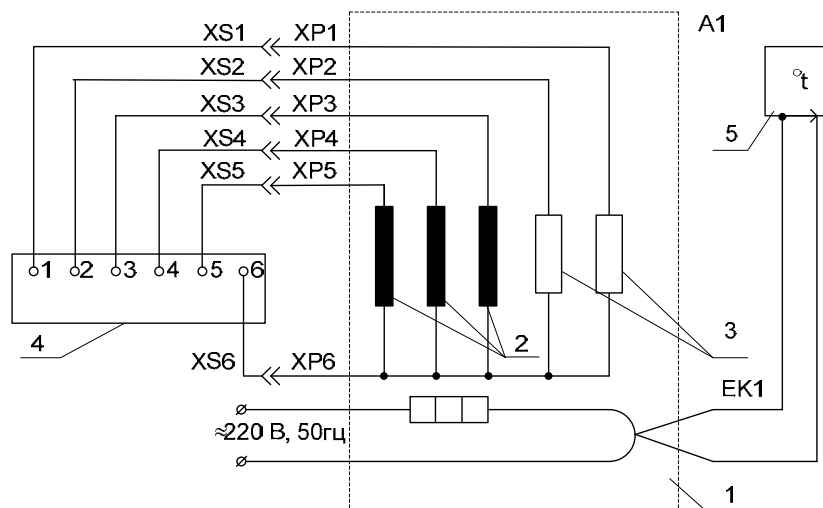


Рисунок 7 – Схема лабораторной установки

### 3.7 Содержание и объём выполнения работы

Объём проводимых испытаний определяет преподаватель, проводящий лабораторные занятия.

### 3.8 Порядок выполнения работы

3.8.1 Для измерения электрического сопротивления при выполнении лабораторной работы используется комбинированный измерительный прибор типа Щ4311 (или другой с аналогичными характеристиками).

**Внимание!** До проведения измерений изучить руководство по эксплуатации комбинированного измерительного прибора типа Щ4311.

3.8.2 Поочередно измерить сопротивление  $R_0$  исследуемых опытных образцов при комнатной температуре  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  планшет №1. Длина и диаметр исследуемых образцов приведены в таблице, расположенной на стенде. Результаты измерений занести в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты измерения сопротивления исследуемых образцов

Номер позиции	Наименование материала	$R_0$ , Ом	$\rho_0$ , мкОм·м	$l$ , м	$D$ , м	$S$ , м <sup>2</sup>
1						
2						
3						
4						
5						

3.8.3 По измеренному сопротивлению  $R_0$  рассчитать удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , пользуясь формулой

$$\rho_0 = \frac{R_0 \cdot S}{l}, \quad (8)$$

где  $\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление, мкОм·м;

$R_0$  – электрическое сопротивление, Ом;

$S$  – площадь поперечного сечения исследуемого образца, м<sup>2</sup>;

$l$  – длина исследуемого образца, м.

Данные расчета занести в таблицу 8.

3.8.4 По рассчитанному удельному сопротивлению, используя справочные данные таблиц 6 и 7, определить название материалов, из которых изготовлены исследуемые образцы. В данной работе используются металлы высокой проводимости и сплавы высокого сопротивления.

*Внимание! В работе производится исследование электротехнических изделий на высокой температуре до 200 °С.*

3.8.5 Включить нагревательное устройство А1 в сеть. При достижении температуры 110 °С отключить нагревательное устройство А1 от сети. Далее нагрев происходит «по инерции». Когда начинается процесс остывания и температура достигнет значения 120 °С выполнить поочерёдное измерение образцов; измерения произвести через каждые 20 °С. Результаты измерений занести в таблицу 9.

*Внимание! В работе производится исследование пяти электротехнических изделий, поэтому необходимо представить пять шаблонов таблицы 9.*

3.8.6 По результатам измерений и данным таблиц 8 и 9 рассчитать по формуле (8) для металлов и сплавов удельное электрическое сопротивление (экспериментальное значение) при различных температурах. Результаты расчётов занести в таблицу 9.

3.8.7 Для металлов рассчитать теоретическое удельное сопротивление для различных температур, используя формулу (7) (значение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  взять из таблицы 6 или [1]). Результаты расчётов занести в таблицу 9.



Таблица 9 – Результаты измерения сопротивления исследуемых материалов при изменении температуры

Исследуемый образец	Температура, °C					
	20	40	60	80	100	120
R, Ом						
$\rho$ , мкОм·м (экспериментальный)						
$\rho$ , мкОм·м (теоретический для металлов)						
$\alpha_R$ , C <sup>-1</sup> (для сплавов)						
$\alpha_\rho$ , C <sup>-1</sup> (теоретический для металлов)						
$\alpha_\rho$ , C <sup>-1</sup> (экспериментальный)						

3.8.8 Используя формулу (3), рассчитать температурный коэффициент удельного электрического сопротивления  $\alpha_\rho$  для металлов и сплавов. Результаты расчётов занести в таблицу 9.

3.8.9 Используя формулу (5), рассчитать температурный коэффициент электрического сопротивления  $\alpha_R$  для сплавов. Результаты расчётов занести в таблицу 9.

3.8.10 По данным таблицы 9 и расчётов в пп. 3.8.6–3.8.8 построить для металлов:

- график зависимости удельного сопротивления от температуры  $\rho = f(T)$  по экспериментальным и теоретическим данным;
- график зависимости температурного коэффициента удельного сопротивления от температуры  $T\alpha_\rho = f(T)$  по экспериментальным и теоретическим данным.

Для сплавов построить:

- график зависимости удельного сопротивления от температуры  $\rho = f(T)$  по экспериментальным данным;
- график зависимости температурного коэффициента удельного сопротивления от температуры  $T\alpha_\rho = f(T)$  по экспериментальным данным.

### 3.9 Содержание отчета

Отчет о работе должен содержать:

- цель работы;
- схему лабораторной установки;
- основные расчётные формулы и примеры вычислений с указанием размерности определяемых величин для каждой таблицы;
- график зависимости удельного сопротивления от температуры  $\rho = f(T)$  и график зависимости температурного коэффициента удельного

сопротивления от температуры  $\text{TK}_\rho = f(T)$  по экспериментальным и теоретическим данным для металлов высокой проводимости;

– график зависимости удельного сопротивления от температуры  $\rho = f(T)$  и график зависимости температурного коэффициента удельного сопротивления от температуры  $\text{TK}_\rho = f(T)$  по экспериментальным данным для сплавов высокого сопротивления;

– сравнительную оценку полученных данных в сопоставлении со справочными данными;

– выводы.

### ***Контрольные вопросы***

1 Что собой представляет температурный коэффициент удельного электрического сопротивления? Является ли он константой для данного металла? Чем он отличается от температурного коэффициента сопротивления?

2 Объясните зависимость удельного электрического сопротивления тонких металлических пленок от их толщины.

3 Как и почему изменяется удельное электрическое сопротивление металлов при механических воздействиях (сжатии, растяжении, изгибе, пластической деформации)?

4 Почему тонкие металлические пленки имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления?

5 Какой режим работы наиболее желателен для нихрома в электронагревательных приборах и почему?

6 Какие медные и алюминиевые сплавы применяются в электротехнике? Область их применения и основные свойства.

7 Сравните электрические и физические свойства меди и алюминия.

8 Какое влияние оказывает процентное содержание цинка на физико-механические свойства латуней?

9 Какие легирующие элементы повышают механическую прочность и коррозионную стойкость латуней?

10 Какие сплавы высокого сопротивления наиболее широко применяются в электротехнике и для каких целей?

11 Что представляют собой жаростойкие проводниковые материалы и где они применяются?

12 Какие проводниковые материалы применяются для подвижных контактов? Какие требования предъявляются к скользящим и разрывным контактам?

13 Какое влияние оказывают примеси на теплопроводность металлов?

14 Что собой представляют бронзы? Маркировка и применение бронз в электротехнике.



15 Из каких материалов изготавливаются образцовые резисторы, шунты и добавочные сопротивления? Какие требования предъявляются к этим материалам?

16 Какие металлы могут образовывать оксидную пленку? Дайте определение коэффициенту оксидирования?

17 Какие факторы оказывают влияние на срок службы нагревательных элементов, выполненных из жаростойких сплавов?

18 Назовите химический состав хромоникелевых и хромоалюминиевых сплавов? Какие компоненты ухудшают механические свойства сплавов?

19 Какими параметрами характеризуются основные свойства проводниковых материалов?

20 Укажите химический состав сталей, их применение и недостатки.

### Список литературы

1 **Богородицкий, Н. П.** Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

2 **Тареев, Б. М.** Электрорадиоматериалы / Б. М. Тареев, Н. В. Короткова, В. М. Петров ; под ред. Б. М. Тареева. – М. : Высш. шк., 1978. – 336 с.

3 **Тареев, Б. М.** Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М. : Энергия, 1982. – 320 с.

4 **Штофа, Я.** Электротехнические материалы в вопросах и ответах / Я. Штофа ; под ред. Б. М. Тареева. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 113 с.

5 **Антипов, Б. Л.** Материалы электронной техники. Задачи и вопросы / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. – М. : Высш. шк., 1990. – 208 с.: ил.

6 **Колесов, С. Н.** Материаловедение и технология конструкционных материалов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – М. : Высш. шк., 2005. – 520 с. : ил.

7 **Пасынков, В. В.** Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – М. : Высш. шк., 1986. – 230 с.

8 Справочник по электротехническим материалам : в 3 т. / Под ред. Ю. В. Корицкого [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1987.

9 Конструкционные и электротехнические материалы / В. Н. Бородулин [и др.] ; под ред. В. А. Филикова. – М. : Высш. шк., 1990. – 226 с. : ил.

10 Производство кабелей и проводов: справочник / Под ред. Н. И. Белорусова, И. Б. Пешкова. – М. : Энергоатомиздат, 1981. – 500 с.

11 **Преображенский, А. А.** Магнитные материалы и элементы / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – М. : Высш. шк., 1986. – 352 с.

