**Содержание**

|  |  |
| --- | --- |
| Предисловие…….....…………………………………………………….. | 4 |
| Лабораторная работа №1. Изучение основ микроструктурного анализа металлов и сплавов с применением оптического микроскопа….. | 5 |
| Лабораторная работа №2. Исследование удельного электрического сопротивления и его температурного коэффициента проводниковых материалов……………………………….......................................................... | 15 |
| Лабораторная работа № 3. Исследование удельного электрического сопротивления и электрической прочности твердых диэлектриков……… | 22 |
| Лабораторная работа № 4. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков...................................................................................................... | 32 |
| Лабораторная работа № 5. Исследование влияния ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов на характеристики полупроводниковых диодов…..............................................................……... | 43 |
| Лабораторная работа № 6. Исследование свойств магнитных материалов.......................................................................................................... | 53 |
| Лабораторная работа №7. Исследование звукопоглощающей способности авиационных материалов............................................................ | 63 |
| Литература……………………………………………….....……………. | 67 |

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее руководство к лабораторным работам предназначено для студентов – будущих инженеров в области технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов, а также транспортного радиооборудования и УВД. Поэтому в рамках отведенного учебными программами времени основной целью лабораторного практикума является исследование свойств основных групп современных материалов, применяемых в приборном и радиотехническом оборудовании воздушных судов в условиях комплексного воздействия на них эксплуатационных факторов. Особое внимание при этом уделяется формированию у обучаемых понимания физической сущности процессов, которые приводят к изменению рабочих характеристик элементов и устройств в процессе длительной их эксплуатации, а также умению анализировать причины отказа и принимать решение о выборе и замене материалов и радиокомпонентов авиационного оборудования.

При подготовке настоящего руководства использован материал, изложенный в: – Методических указаниях к выполнению лабораторных работ по электроматериаловедению для студентов дневного и заочного обучения, авторы И.Н. Тихомиров, И.А. Тимошин, А.В. Мымриков, Е.В. Тутнова. - М.: МГТУ ГА, 1996г. – Руководство к лабораторным работам по курсу «Авиационное материаловедение», авторы Г.Н. Дубинин, Л.С. Воскобой-никова, Е.В. Тутнова. - М.: МГТУ ГА, 2008г.

В подготовке рукописи руководства к изданию большой вклад внес сотрудник лаборатории Н.Ю. Баланчук.

Авторы благодарят студента специальности 160903 А.И. Паршкова за разработку методики работы студентов на автоматизированной лабораторной установке для исследования магнитных материалов.

**Лабораторная работа №1**

**Изучение основ микроструктурного анализа металлов и сплавов с применением оптического микроскопа**

1. **Цель работы**

Изучить принципы проведения микроструктурного анализа элементов металлических конструкций и деталей при производстве экспертизных исследований авиационной техники.

1. **Задачи работы**

Познакомиться с устройством, возможностями и принципом работы металломикроскопов.

1. **Сущность исследуемых вопросов**

Под структурой металлов понимается их внутреннее строение, состоящее из кристаллов неправильной формы – зерен, образовавшихся при переходе металлов из жидкого состояния в твердое, т.е. при охлаждении.

В дальнейшем при изготовлении из металла изделий используются различные способы формообразования металла:

- изготовление изделий методом литья;

- пластическая деформация (прокатка, ковка, штамповка, волочение и др.)

- обработка металла на металлорежущих станках.

После изготовления детали часто подвергаются термообработке (закалке, отпуску, отжиг и т.п.)

Все эти перечисленные операции придают определенные свойства изделиям, прежде всего, за счет изменения структуры и фазового состава металлов и сплавов, из которых они изготовлены.

Изучая структуру изделий можно получить информацию о том, каким способом они изготовлены, каково качество проведения тех или иных операций, какие свойства при этом достигнуты и т.п. Поэтому изучение микроструктуры изделий является одним из основных способов оценки качества технологических процессов при производстве изделий и очень важным этапом при экспертизных исследованиях причин отказов в ходе эксплуатации.

Знакомство с содержанием и методикой проведения микроструктурных исследований в настоящей лабораторной работе проведем на примере анализа структуры железо-углеродистых сплавов ( сталей и чугунов).

Фазовый состав и структурные составляющие железо-углеродистых сталей в равновесном состоянии описываются диаграммой состояния железо-углерод (рис.1.1).

Диаграмма состояний *Fe-C* ограничивается сплавами, содержащими 6,67%С, поскольку при этой концентрации образуется химическое соединение – карбид железа *Fe­3-C* или цементит, каждый удобно рассматривать как второй компонент системы, поскольку сплавы с большим содержанием *С* не пригодны для практического применения.

Рассмотрим характерные области диаграммы *Fe-Fe3C* .

 ***ФЕРРИТ+ АУСТЕНИТ***

*~1300°С*

*B*

*t, °C*

*H*

*A*

***ФЕРРИТ+ ПЕРЛИТ***

***ЦЕМЕНТИТ+ ПЕРЛИТ***

**ПЕРЛИТ**

*N*

*O*

*G*

*I*

*K*

 *4,3*

*C% (мас)*

*6*

*5*

*4*

*3*

 *2*

 *2,14*

 *2*

*0,8*

 *1*

*Q*

*910*

*900*

*1539*

***ЦЕМЕНТИТ+ ЛЕДЕБУРИТ***

***ПЕРЛИТ+ ЦЕМЕНТИТ+ ЛЕДЕБУРИТ***

*768°С*

*M*

*P*

***АУСТЕНИТ+***

 ***ЦЕМЕНТИТ (ВТОРИЧНЫЙ)***

 ***S***

***АУСТЕНИТ***

***ЖИДКОСТЬ+ АУСТЕНИТ***

*727°С*

*F*

*E*

*С*

*1147°С*

***ЖИДКОСТЬ+ ЦЕМЕНТИТ (ПЕРВИЧНЫЙ)***

***ЖИДКОСТЬ***

***АУСТЕНИТ+ ЛЕДЕБУРИТ+ ЦЕМЕНТИТ***

*0*

*10*

*20*

*30*

*40*

*50*

*60*

*70*

*80*

*90*

*Fe3C% (мас)*

*600*

*1600*

***ЦЕМЕНТИТ+ ЛЕДЕБУРИТ***

***АУСТЕНИТ + ФЕРРИТ***

*700*

*800*

*1400*

*1500*

*1392*

*1100*

*1200*

*1300*

*D*

***ФЕРРИТ+ ЦЕМЕНТИТ (ТРЕТИЧНЫЙ****)*

***ФЕРРИТ***

***ЖИДКОСТЬ + ФЕРРИТ***

***ФЕРРИТ***

***АУСТЕНИТ***

Рис. 1.1. Диаграмма состояния сплавов *Fe-C*

1. Область *GPQOG* принадлежит твердому раствору углерода в *𝛼-Fe*, называемому ферритом (ОЦК). Предельная растворимость углерода в феррите при *t* = 727°C равна 0,02%, с уменьшением температуры до 600°С растворимость углерода в феррите падает до 0,01%.

2. Область *GNIESOG* принадлежит твердому раствору углерода в *γ — Fe*, называемая аустенитом (ГЦК); предельная растворимость углерода в аустените равна 2,14% при *t*=1147°С. С уменьшением температуры до 727°С растворимость углерода в аустените падает до 0,8%.

3. Область *AHNA* отвечает твердому раствору углерода в *δ –Fe* (ОЦК); предельная растворимость углерода равна 0,1 при *t*=1499°С. Так как у *Fe𝛼* и *Fеδ*– один и тот же тип кристаллической решетки (*К=*8), твердый раствор углерода в *δ –Fe* называется высокотемпературным ферритом. Вышеуказанные твердые растворы записывают так:

*Fe𝛼 (C); Fеγ (С); Fеδ (С).*

Все три твердых раствора принадлежат к растворам типа внедрения. Феррит весьма мягок, пластичен (*НВ=*65-130*; σВ*=30 кг/мм2; *δ* =30%), магнитен до 768°С. Сплавы железа с углеродом (до 0,5%*С*) теряют магнетизм выше температуры МО, отвечающей точке Кюри (768°С).

Аустенит более тверд и пластичен (*НВ=*200-250; *δ* =40-50%), немагнитен. Цементит очень тверд, но хрупок (*НВ* >800). Цементит имеет сложную орторомбическую кристаллическую решетку. Цементит магнитен до 210°С (А0). Будучи метастабильным соединением при весьма длительном нагреве выше 540°С цементит обнаруживает тенденцию к разложению. При *t*=1147°С и концентрации углерода 4,3% образуется эвтектика (точка С на диаграмме), которая состоит из двух фаз: аустенита и цементита. Такая смесь двух фаз называется ледебуритом. С уменьшением температуры с 1147°С до 727°С предельная растворимость углерода в аустените с 2,14% уменьшается до 0,8% (линия *ЕS*, по которой из аустенита выделяется вторичный цементит). Точка *S*, в которой сходятся две ветви кривых растворимости (*GS* и *ES*), напоминает точку эвтектики (*С*), однако в отличие от эвтектики в процессе охлаждения превращение в точке *S* происходит в твердом состоянии:

*Fеγ (С)0,8→ Fe𝛼 (C)0,02+ Fе3 С.*

Такое превращение аустенита в смесь предельно насыщенного углеродом феррита и цементита называется эвтектоидным, а точка *S* называется эвтектоидной точкой. Образующаяся в процессе превращения эвтектоидная смесь, состоящая из феррита и цементита, называется перлитом. Перлит имеет пластинчатое строение: кристаллы цементита перемежаются с кристаллами феррита. Таким образом, в диапазоне концентраций углерода от точки *Р* до точки *К* в системе сплавов *Fe — С* при 727°С происходит эвтектоидное превращение, при котором из аустенита образуется перлит. Температура эвтектоидного превращения 727°С обозначается буквой А1. Таким образом, и структура ледебурита ниже 727°С уже будет состоять не из смеси аустенита и цементита, а из смеси перлита и цементита. В системе *Fe — С* имеются две принципиальные группы сплавов: стали и чугуны. Сталями называются сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14%С, сплавы с большим содержанием углерода называются чугунами. Сталь, содержащая 0,8%С, называется эвтектоидной. Если сталь содержит менее 0,8%С, она называется доэвтектоидной, а при большем содержании (0 8-2,14%С) — заэвтектоидной. Рассмотрим структурное превращение в системе *Fe — С* при медленном охлаждении аустенита доэвтектоидной стали 0,4% (рис. 1.2).

В интервале температур 0 - 1 происходит охлаждение аустенита. Таким образом, процесс должен происходить при переменой температуре. Эта стадия процесса показана участком 0 - 1 на кривых охлаждения (рис. 1.2). В точке 1 начало кристаллизации 𝛼 фазы (феррита). По мере охлаждения относительное количество феррита увеличивается, а аустенита уменьшается. Концентрация углерода в аустените увеличивается по линии 1-S и в точке S при температуре 727°С достигает 0,8%. Концентрация углерода в феррите при этом увеличивается по линии GP, достигая при 727°С в точке Р значения 0,2%.

На кривой охлаждения (рис. 1.2) этот процесс отражен наклонной линией 1-2. При температуре 727°С происходит эвтектоидное превращение (γ→𝛼+ Fe3 С), при этом образуется перлит. Таким образом перлитное превращение протекает изотермически (площадка 2’-2 на кривой охлаждения). При дальнейшем понижении температуры до комнатной в интервале 2’-3 происходит охлаждение двухфазной структуры, которая состоит из зерен феррита и зерен перлита. Зерна феррита в микроструктуре наблюдаются в виде светлых зерен, перлит - в виде темных участков структуры. При большом увеличении можно наблюдать, что структура перлита состоит из пластинок феррита и цементита. Чем больше углерода в стали, тем больше в микроструктуре перлитной составляющей, тем выше твердость и прочность стали, но ниже пластичность (рис. 1.3).

*Ψ*

*an*

*Ψ,δ%,an*  $\frac{КГМ}{СМ^{2}}$

Рис.1.3. Зависимость основных механических характеристик железо-углеродистых сплавов от содержания в них углерода

*%С*

*0,2*

*0,4*

*0,6*

*0,8*

*1,2*

*1,0*

*1,4*

*0*

*20*

*40*

*60*

*80*

*100*

*120*

*140*

*10*

*20*

*30*

*40*

*50*

*60*

*24*

*20*

*16*

*12*

*8*

*4*

*300*

*200*

*100*

*0*

*0*

*HB*

*HB,* 𝜎*B* $ \frac{КГ}{ММ^{2}}$

𝜎*B*

*δ*

*𝛼 + Fe3C*

*0*

*𝛼*

*𝛼+γ*

*γ+ Fe3C*

*1*

*2*

*0,8*

*3*

*0,4*

*0,2*

*Q*

*0*

*3*

*2’*

*2*

*1*

Рис.1.2. Пример построения кривой охлаждения

*ФЕРРИТ*

*ВРЕМЯ τ*

*0*

*727°С*

*910°С*

*%С*

*S*

*P*

*γ*

*G*

Так как содержание углерода в феррите незначительно по сравнению с перлитом, то можно считать, что весь углерод доэвтектоидной стали содержится в перлите. Более строго, общее количество углерода в стали следовало бы определить из уравнения:

*CS = C1S1 + C2S2*, (1.1)

т.е. $ С=\frac{C\_{1}S\_{1}+C\_{2}S\_{2}}{S} ,$ (1.2)

где С – концентрация углерода в стали;

C1, C2 – концентрация углерода в феррите и перлите соответственно;

S – полная площадь исследуемого участка;

S1, S2 – площади, занимаемые ферритом и перлитом соответственно.

Но, как уже говорилось выше, можно C1=0 и тогда (1.2) перепишется в виде:

$С=\frac{C\_{2}S\_{2}}{S}$.

Таким образом, определяя относительную площадь, занятую перлитом S2/S, можно определить концентрацию углерода в доэвтектоидной стали.

Микроструктура заэвтектоидной стали состоит из перлита и вторичного цементита, расположенного в виде светлой сетки по границам зерен перлита.

Cтали доэвтектоидного состава относятся (за некоторым исключением) к конструкционным сталям, стали эвтектоидного состава и заэвтектоидного – к инструментальным.

Стали, применяемые в авиации, относятся к группе высококачественных, у которых содержание вредных примесей (S, Р) недолжно превышать 0,03%. В марках сталей с низким и средним содержанием углерода цифры указывают среднее содержание углерода в сотых долях процента, а с высоким содержанием углерода (инструментальных) в десятых долях процента. Кроме того, в последнем случае перед цифрами ставится буква «У». Например, сталь 45. Это среднеуглеродистая конструкционная сталь, содержащая 0,42 — 0,5% *С*, У12А — инструментальная сталь с 1,2%*С* (1,15-1,24%*С*). Буква «А» характеризует принадлежность стали к высококачественной группе.

Чугуны делятся на белые, серые и ковкие.

Белый чугун имеет в изломе матово-белый оттенок вследствие наличия цементита. Основной структурной составляющей белого чугуна является ледебурит.

В белом чугуне весь углерод связан в цементите. Белые чугуны подразделяются на доэвтектические (*С* < 4,З%), эвтектические (*С* = 4,3%) и заэвтектические (*С* > 4,3%). Доэвтектический белый чугун состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита. Перлит в белом чугуне окрашен в более темный цвет, а ледебурит имеет вид участков с точечными темными вкраплениями. Вторичный цементит, выделившийся из аустенита, находится в виде светлых включений и игл.

Эвтектический белый чугун содержит 100% ледебурита, представляющего смесь перлита и цементита. Перлит в ледебурите темный, цементит светлый.

Заэвтектический белый чугун состоит из первичного цементита и ледебурита. Первичный цементит имеет вид крупных светлых игл, а ледебурит имеет такой же характер структуры, как и в доэвтектическом чугуне.

Серый чугун. В изломе, благодаря наличию в структуре графита, чугун приобретает серый цвет. Микроструктура серого чугуна не соответствует диаграмме *Fe-C* (рис. 1.1), поскольку углерод в сером чугуне находится частично или полностью в свободном состоянии (графит).

Серый чугун получают путем введения в чугун повышенного количества кремния, который ускоряет распад цементита по реакции: *Fе3 С* →3 *Fеγ (С)* + *С* (графит). Эта же реакция протекает при медленном охлаждении чугуна, при литье. По степени графитизации различают несколько видов серых чугунов: перлитный, перлитно-ферритный и ферритный.

В микроструктуре серого чугуна графит наблюдается в виде пластин, которые, будучи хрупкими, образуют в металлической матрице микролокальную концентрацию напряжений, вследствие чего механические свойства такого чугуна невысокие.

Путем введения в чугун перед разливкой модификаторов (магний, силикокальций) графит принимает шаровидную форму. Концентрация напряжений в этом случае меньше, что повышает механические свойства чугуна. Путем длительного двойного отжига белого чугуна при 950-970°С и после при 760-720°С получают ковкий чугун. В результате отжига графит в структуре приобретает форму хлопьев. Такой графит по сравнению пластинчатым меньше снижает прочность и пластичность чугуна.

Металлическая основа может состоять из феррита (ферритный ковкий чугун) и перлита (перлитный ковкий чугун). Наибольшей пластичностью обладает ферритный ковкий чугун.

Железо (типа армко) Э, ЭА (С ≤ 0,4%). Микроструктура состоит из светлых полиэдрических зерен феррита. Различный оттенок полиэдров связан с анизотропией зерен. На светлом фоне зерен феррита наблюдаются неметаллические включения (в виде темных точек).

Сталь 45А (0,42-0,5%С). Микроструктура состоит из светлых зерен феррита и темных зерен перлита. При большом увеличении (больше 500 крат) отчетливо наблюдается пластинчатое строение перлита, темные участки (пластины) принадлежат части поля структуры, занятой ферритом, светлые участки (пластины) структуры принадлежат цементиту и частично ферриту.

Сталь У8А (0,75-0,84%С). Микроструктура состоит из перлита. В различных зернах ориентация пластин цементита и феррита различна.

Сталь У12А (1,15-1,24%С). Микроструктура состоит из пластинчатого перлита и вторичного цементита. Вторичный цементит расположен в виде светлой оторочки (сетки) по границам зерен перлита.

Белый чугун. Химический состав: 2,4-2,8%С; 0,8-1,4%Si; ≤1%Mn; ≤0,1%S; ≤ 0,2%Р. Микроструктура доэвтектического белого чугуна состоит из перлита, вторичного цементита и ледебурита. Темные большие участки шлифа — перлит. Светлые участки с точечными темными вкраплениями — ледебурит. Вторичный цементит, выделившийся из аустенита, находится в виде светлых включений и игл, а местами сливается с цементитом ледебурита.

Серый перлитный чугун (СЧ18-36). Химический состав: 3,2-3,6%С; 0,4-1,8%Si; ≤1% Mn; ≤0,2%S; ≤0,2%Р. Микроструктура состоит из перлита (основное поле шлифа) и графита (темные крупные пластинки).

Высокопрочный магниевый чугун (ВЧ60-8). Химический состав: 3,4-3,6%С; 1,8-2,2%Si; 0,96-1,2% Mn; 0,01-0,63%Mg; ≤0,01%S; ≤0,06%Р. Микроструктура состоит из сфероидных частиц графита, окруженных ферритом, который наблюдается в виде светлых участков. Основной (темный) фон микроструктуры составляет перлит.

1. **Аппаратура и методика исследования**

Микроструктурный анализ, получивший широкое распространение в инженерной практике, заключается в изучении структуры материала с помощью оптического металломикроскопа при увеличении от 100 до 500 (максимальна до 2000 раз).

Схема металломикроскопа показана ни рис. 1.4.

4

3

2

4

6

5

1

Рис.1.4. Оптическая схема металломикроскопа: 1 - лампа накаливания; 2 - диафрагма;

3 – фильтр; 4 - оптическая призма; 5 – объектив; 6 - исследуемый объект; 7 – окуляр; 8- глаз наблюдателя

71

8

От источника света (лампы накаливания) световой поток через систему конденсорных линз диафрагм и светофильтров, поворотных приам попадает на поверхность исследуемого объекта. Отразившись от нее, он попадает через объектив и окуляр в глаз наблюдателя.

Микроструктуру металлов и сплавов изучают на специально подготовленных образцах – микроструктурах (шлифах), вырезанных из наиболее характерных и важных мест исследуемого объекта. Наиболее удобными для исследования является шлифы, имеющие форму цилиндра диаметром 10-20 мм и высотой 10-15 мм или форму параллелепипеда размерами основания от 10×10 до 20×20 и высотой 10-16 мм. Если шлифы изготавливаются из проволоки, тонких листов и других малых по размерам и тонкостенных деталей, то их либо заливают в специальных обоймах легкоплавкими материалами или пластмассами, либо зажимают в струбцинах.

Предварительная подготовка шлифов включает вырезку, шлифования наждачной бумагой с последующим полированием на специальных станках с использованием окиси никеля или хрома.

После полирования шлифы промываются последовательно водой и спиртом. Приготовленные таким образом шлифы хранят в эксикаторах в атмосфере, предохраняющей от увлажнения и окисления.

Микроструктурный анализ проводится как на нейтральных, так и на травленых шлифах. Исследование нейтральных шлифов позволяет выявить степень загрязнения металлов, обнаружить микротрещины, поры и другие подобные дефекты.

С целью исследования собственной структуры материала шлифы подвергают легкому травлению. Травление шлифов проводится в малоконцентрированных реактивах при нормальной температуре и незначительной продолжительности травления, например, легкое травление исследуемых образцов проводится в растворе 4% азотной кислоты при комнатной температуре в течение 40 секунд.

В результате такой обработки шлифа за счет того, что более интенсивно растворяются места шлифа, имеющее более низкий электродный потенциал, выделяются границы зерен, различные фазовые и структурные составляющие.

В разной степени растворившиеся участки по-разному рассеивают световые лучи и поэтому при наблюдении с помощью микроскопа одни участки, например, границы зерен и фазы, более подвергшиеся травлению, кажутся более темными, чем остальные.

После ознакомления с принципом действия металломикроскопа (ход луча) и методикой изготовления шлифов. Студенту предоставляется комплект шлифов различных сплавов системы *Fe – C* согласно нижеприведенной таблицы (табл.1.1).

Таблица 1.1

 Основные характеристики исследуемых образцов

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка сплава | Химический состав, %С | Термическая обработка, °С, ч | Механичес-кие свойства | Применение |
| 1.Э, ЭА, железо типа армко | С≤0,04% | отжиг | *НВ=*80-90 кг/мм2*; σВ*=25 кг/мм2;*δ* =50% | Сердечники эл. магнитов; прутки; листы; детали, изготовляемые глубокой штамповкой |
| 2.Сталь 45 | 0,42-0,5% С | отжиг | *НВ=*152 кг/мм2*; σВ*=51 кг/мм2;*δ* =28% | Болты; гайки; шпильки; противовесы коленчатых валов |
| 3.Сталь У8А | 0,75-0,84%С | отжиг | *НВ=*80-90 кг/мм2*; σВ*=25 кг/мм2;*δ* =50% | Матрицы; пуансоны; пневматический инструмент |
| 4.Сталь У12А | 1,15-1,24%С |  | *НВ=*180 кг/мм2*; σВ*=70 кг/мм2;*δ* =10-15% | Режущий и мерительный инструмент |
| 5.Белый чугун | 2,4-2,8%С; 0,8-1,4%Si; ≤1%Mn; ≤0,1%S;≤ 0,2%Р | Охлаждение на воздухе после литья | *НВ=*300-400 кг/мм2*; σВ*=210 кг/мм2; *δ* =0% | Идет на передел |
| 6.Серый перлитный чугун(СЧ18-36) | 3,2-3,6%С; 0,4-1,8%Si; ≤1% Mn; ≤0,2%S; ≤0,2%Р | Охлаждение после литья медленное | *НВ=*150-200 кг/мм2*; σВ*=18 кг/мм2;*δ* =0,2% | Фрикционные колодки; торцевые барабаны; шестеренки; поршневые кольца тепловых двигателей; втулки и стаканы насосов |
|  |
| Продолжение табл.1.1 |
| 7.Высоко-прочный чугун (ВЧ60-8) | 3,4-3,6%С; 1,8-2,2%Si; 0,96-1,2% Mn; 0,01-0,63%Mg; ≤0,01%S; ≤0,06%Р | Двойное модифицирова-ние перед разливкой (FeSi и Mg) медленное охлаждение | *НВ=*190-260 кг/мм2*; σВ*=60-68 кг/мм2;*δ* =8-12% | Фрикционные диски; антифрикцион-ные втулки и матрицы для холодного прессования алюминия |

С помощью металломикроскопа изучается микроструктура сплавов, которая затем зарисовывается на специальном бланке. Структурные составляющие стрелками обязательно указываются в зарисовках. Отчет должен содержать чертеж диаграммы состояния *Fe – C* и ее анализ. Структурные составляющие должны быть объяснены.

1. **Порядок выполнения лабораторной работы**
	1. Изложить цель работы.
	2. Изучить порядок выполнения лабораторной работы и описать диаграмму железо-углерод.
	3. Изучить принцип построения кривых охлаждения с различной концентрацией углерода.
	4. Изучить принцип действия металломикроскопа.
	5. Зарисовать (карандашом) микроструктуру шлифов различных групп сталей и чугунов, сопровождая зарисовки данными о фазовом составе исследуемых сплавов и чугунов и указанием области применения.
	6. Краткие выводы по работе.
2. **Контрольные вопросы**
	1. Дать определения следующих структурных составляющих в сплавах системы железо-углерод:

а) феррит; б) аустенит; в) перлит.

* 1. Пользуясь правилом фаз построить кривые охлаждения для чистого железа и сплавов с 0,6%; 0,8%; 1,2%; 3,4%С.
	2. Каков принцип маркировки конструкционных и инструментальных углеродистых сталей?
	3. Для каких деталей летательных аппаратов применяется углеродистая сталь?
	4. В чем состоит задача микроструктурного анализа?
	5. Какую величину увеличения можно реализовать на современных металломикроскопах?
	6. Из каких подготовительных операций состоит процесс подготовки микрошлифа?
	7. Что можно увидеть в микроскоп на нетравленом микрошлифе?
	8. С какой целью микрошлифы подвергаются слабому травлению?
	9. Что можно изучать с помощью металломикроскопа на микрошлифе, подвергнутом легкому травлению?

**Лабораторная работа №2**

**Исследование удельного электрического сопротивления и его температурного коэффициента проводниковых материалов**

1. **Цель работы**

Изучить влияние состава, структуры и температуры окружающей среды на электропроводность проводниковых материалов.

1. **Задачи работы**
	1. Установить связь между структурой и электропроводностью металлических проводников.
	2. Освоить методику определения удельного электрического сопротивления (*ρ*) с помощью измерительной мостовой схемы и определить диапазон значений ρ для основных групп проводниковых материалов.
	3. Исследовать влияние температуры на удельное электрическое сопротивление основных проводников, применяемых в авионике.
	4. Сделать выводы о влиянии фазового состава и структуры на электропроводность проводниковых материалов, а также о причинах и характере воздействия температуры на электрическое сопротивление исследуемых образцов материалов.
2. **Сущность исследуемых вопросов**

3.1. Удельное электрическое сопротивление (удельная электропроводность). Сопротивление проводника с постоянным поперечным сечением *S* и длиной *l* определяется по формуле:

$R=ρ\frac{l}{S} , Ом $, (2.1)

где *ρ* – удельное электрическое сопротивление материала, из которого изготовлен данный проводник.

Отсюда

$ ρ=R\frac{S}{l} , Ом∙м $ . (2.2)

В международной системе единиц СИ удельное электрическое сопротивление измеряется также в $мкОм∙м$ $(1мкОм∙м=1\frac{Ом∙мм^{2}}{м} )$.

Величина удельной электропроводности определяется как

$ γ=\frac{1}{ρ} , \frac{1}{мкОм∙м} .$ (2.3)

Для металлических проводников величина удельного электрического сопротивления $ρ$ находится в пределах от 0,016 $мкОм∙м$ ($16∙10^{-5} Ом∙м$) для серебра до, примерно, $10∙мкОм∙м$ у железо-хромоалюминиевых сплавов.

Согласно классической теории электропроводности металлы рассматриваются как кристаллические тела, в узлах кристаллической решетки которых располагаются ион-атомы, совершающие хаотические тепловые колебания относительно статистического центра. Пространство между ион-атомами заполнено коллективизированными свободными электронами, способными перемещаться внутри кристаллической решетки.

Под влиянием электрического поля эти электроны способны направленно перемещаться, создавая электрический ток.

В силу того, что кристаллическая решетка реальных металлов содержит множество точечных, линейных и объемных дефектов, а также вследствие тепловых колебаний ион-атомов, свободные электроны при своем направленном движении под воздействием электрического поля будут периодически сталкиваться с дефектами кристаллического строения и ион-атомами металла. При соударениях рассеивается энергия, приобретенная электроном при движении в электрическом поле.

Наличие рассеяния энергии при соударении направленно движущихся свободных электронов на ион-атомах и дефектах кристаллического строения составляет физическую сущность электрического сопротивления.

Таким образом, удельное электрическое сопротивление определятся как

$ρ= ρ\_{u}+ρ\_{d} - правило Матиссена ,$ (2.4)

где $ρ\_{u}$ - удельное электрическое сопротивление, обусловленное рассеянием энергии за счет тепловых колебаний ион-атомов;

$ρ\_{d}$ – удельное электрическое сопротивление, вызванное рассеянием энергии электронов на дефектах кристаллического строения.

Путь, который проходят электроны между такими соударениями, называется средней длиной свободного пробега электрона.

Удельное электрическое сопротивление металла, согласно классической теории проводимости представляется следующим образом:

$ρ=\frac{2mv}{e^{2}nλ\_{ср}} , $ (2.5)

где *m* - масса электрона ($9.109534∙10^{-31} кг$);

 $λ\_{ср}$ - средняя длина свободного пробега электрона, обладающего энергией Ферми;

*v* - средняя скорость движения электрона;

*e* - заряд электрона, равный $ 1.6∙10^{-19} Кл$;

*n* - концентрация электронов в единице объема $\~10^{-23} м^{-3}$.

Аналогичное выражение для удельного электрического сопротивления на основе выводов квантовой волновой теории имеет вид

$ρ=\frac{h}{K e^{2}λ\_{ср}n^{2/3}} , $ (2.6)

где *h* – постоянная Планка;

*К* – числовой коэффициент.

Поскольку скорость теплового хаотического движения электронов различных металлов примерно одинакова, незначительно также отличаются и концентрации электронов, величина удельного электрического сопротивления металлических проводников зависит в основном от средней длины свободного пробега электронов, так как $λ\_{ср}$ в первую очередь зависит от структуры металлов и числа дефектов кристаллического строения.

Чистые металлы, характеризующиеся сравнительно незначительным искажением кристаллической решетки, имеют гораздо меньшие значения удельного электрического сопротивления, чем металлические сплавы, кристаллическая решетка которых, как правило, сильно искажена и величина $λ\_{ср}$ мала.

Присутствие в металле примесей способствует искажению кристаллической решетки, что вызывает рост удельного электрического сопротивления.

Особенно сильно искажается кристаллическая решетка и, как следствие этого, возрастает удельное электрическое сопротивление в сплавах, компоненты которых образуют твердые растворы (рис.2.1).

*T*

*a)*

*B*

*𝛼*

*ж*

*ж +𝛼*

*А*

*B , %*

*ρ*

*TKρ*

*TKρ*

*ρ*

*B , %*

*б)*

0

 Рис. 2.1. Диаграмма состояния (а) и диаграмма состав-свойства (б) сплавов, компоненты которых образуют неограниченные твердые растворы

Пластическая деформация металлов, сопровождающаяся наклепом, для которого характерно искажение кристаллической решетки и появления дефектов кристаллического строения, также приводит к возрастанию удельного электрического сопротивления.

При этом у чистых металлов наклеп увеличивает *ρ* слабо (всегда на несколько процентов), тогда как у сплавов величина *ρ* при наклепе может возрастать на несколько десятков процентов.

Рекристаллизационный отжиг приводит к исчезновению наклепа и следовательно, удельное электрическое сопротивление снижается, возвращаясь к исходному значению перед пластической деформацией.

Величина зерна в проводниковых материалах влияет на значение удельного электрического сопротивления.

Укрупнение зерна приводит к увеличению электропроводности, т.е. к снижению *ρ*, т.к. с уменьшением суммарной протяженности границ между зернами в единице объема и объемных дефектов кристаллического строения меньше.

3.2 Температурный коэффициент удельного электрического сопротивления *ТКρ(𝛼ρ)* численно выражает степень изменения удельного электрического сопротивления материала при изменении температуры на 1 градус.

В общем случае при повышении температуры проводника концентрация электронов (число свободных носителей заряда) в металле остается неизменной.

Вследствие усиления тепловых колебаний ион-атомов металла в узлах кристаллической решетки вероятность соударения электронов с этими элементарными частицами возрастает, длина свободного пробега электрона сокращается, а удельное электрическое сопротивление растет.

Типичный график изменения удельного электрического сопротивления от температуры металлического проводника представлен на рис. 2.2.

Δt

*ρ*

*Т, К*

Рис. 2.2. Зависимость удельного электросопротивления металлического проводникового материала от температуры

*ρt*

*ρ0*

t

t­0

ТПЛ

На этом графике скачок *ρ* соответствует температуре плавления металла. Линейно-кусочная аппроксимация $ρ=f(t)$ позволяет вычислить значение удельного электрического сопротивления при температуре *t* по формуле:

$ρ\_{t}=ρ\_{0}\left(1+TKρ∙∆t\right),$ (2.7)

где *ρ0* – удельное сопротивление при температуре *t0* ;$ ∆t=t-t\_{0} $ ;

*ТКρ* - средний температурный коэффициент удельного сопротивления. Из выражения (2.7) следует что:

$TKρ=\frac{ρ\_{t}-ρ\_{0}}{ρ\_{0}∙∆t} , K^{-1}$ . (2.8)

Значение *ТКρ* для чистых металлов близки друг к другу и их приближенно можно считать $ TKρ=\frac{1}{273}=0.004 , K^{-1} .$

У сплавов значение *ТКρ* может быть равно и даже меньше нуля при соответствующем подборе компонентов (рис. 2.1). Этот факт объясняется тем, что при более сложном составе и структурах по сравнению с чистыми металлами изменение электропроводности их обусловлено не только длиной свободного пробега электрона, но и частичным возрастанием концентрации носителей при повышении температуры. Таким образом, например, сплав, у которого уменьшение длины (*𝜆ср*) с повышением температуры будет компенсировано возрастанием концентрации носителей (см. выражение (2.5) и (2.6)), будет иметь $TKρ=0$.

1. **Аппаратура и методика исследования**

4.1. Определение удельного электрического сопротивления *ρ* и его температурного коэффициента *ТКρ*

Схема установки для измерения *ρ* и *ТКρ* приведена на рис. 2.3.

Рис. 2.3. Схема установки для измерения  *ρ* и *ТКρ*

t

*Нагревательный элемент*

Измерительный мост

Гальванометр

Образцы материалов

Термометр

2

3

4

1

Измерения проводятся на образцах, предоставляющих основные группы проводниковых материалов, широко применяемых в авиационной технике. Сопротивление стандартных образцов R определяются с использованием измерительного моста.

Значение удельного электрического сопротивления материала *ρ* подсчитывается по формуле (2.2)

$ρ=R\frac{S}{l}, Ом∙м$*.*

Температурная зависимость удельного электрического сопротивления для исследуемых образцов проводниковых материалов строится по результатам измерений и расчетов при нагревании образцов в нагревательном элементе (печке).

Величина *ТК ρ* образцов рассчитывается по формуле (2.8).

$TKρ=\frac{ρ\_{t}-ρ\_{0}}{ρ\_{0}∙∆t} , K^{-1} $.

Значения S и *l* образцов и температур, для которых необходимо провести расчеты, сообщаются руководителем лабораторной работы и записываются в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Сводная таблица экспериментальных данных

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | *l, м* | *S* | *T , C* | *𝛼* | *ρt* | *ρотн* | *R* | *Rотн* | *ТКρ* | *ТКR* |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

1. **Порядок выполнения лабораторной работы**
	1. Ознакомиться с перечнем исследуемых образцов проводников материалов и испытательным оборудованием.
	2. Пройти инструктаж по технике безопасности при работе на установке для определения *R* проводников.
	3. Измерить значения сопротивлений образцов проводниковых материалов в диапазоне от 20 до 80 градусов по Цельсию.
	4. Рассчитать значения *ρ* и *ТКρ* для указанных температур записать их в табл. 2.1.
	5. По данным табл. 2.1 построить графики *ρ* = *f (t)* для всех исследуемых образцов.
	6. По результатам исследований сделать выводы:

- о значении *ρ* и *ТКρ* для исследуемых образцов материалов, дать их сравнительную оценку и выдать рекомендации по применению;

- о влиянии структуры и фазового состава на электропроводность проводниковых материалов;

- о физической сущности и характере влияния температуры на *ρ* исследуемых образцов, подтвердив свои рассуждения вычисленными значениями *ТКρ.*

**6. Контрольные вопросы**

6.1. Какие характеристики определяют свойства проводниковых материалов?

6.2. Напишите формулу, по которой определяется величина удельного электрического сопротивления проводников, укажите размерность этой характеристике в системе СИ

6.3. В каких пределах находится величина *ρ* для металлических проводниковых материалов?

6.4. В чем состоит сущность электрического тока в металлических проводниках?

6.5. Какое влияние на электропроводность металлов оказывают дефекты их кристаллического строения?

6.6. В чем состоит физическая сущность электрического сопротивления?

6.7. Напишите выражение для правила Матиссена. Укажите смысл составляющих удельного электрического сопротивления.

6.8. В чем состоит физический смысл средней длины свободного пробега электрона?

6.9. Какие две теории электропроводности существуют в настоящее время?

6.10. Приведите математическое выражение удельного электрического сопротивления в классической теории электропроводности.

6.11. В какой степени отличаются друг от друга концентрации электронов и скорость их теплового хаотического движения для различных металлических проводников?

6.12. Каким параметром в основном определяется удельное электрическое сопротивление проводниковых материалов?

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

6.14. Какое влияние на электропроводность чистых металлов оказывает наличие в них примесей и почему?

6.15. Покажите на диаграмме состав-свойства для сплавов, компоненты которых образуют неограниченные твердые растворы, характер изменения удельного электрического сопротивления.

6.16. Какое влияние и почему оказывает пластическая деформация, сопровождающаяся наклепом, на электропроводность металлических проводников?

6.17. Какое влияние и почему оказывает величина зерна на электропроводность металлических проводников.

6.18. Какой физический смысл имеет характеристика проводникового *ТКρ* материала?

6.19. Зависит ли в общем случае концентрация электронов *n* в проводниковых материалах от температуры?

6.20. Увеличивается или уменьшается вероятность соударения электронов с ион-атомами проводника при повышении температуры?

6.21. Изобразите типичный график *ρ* зависимости от температуры для металлических проводников.

6.22. Чему равно удельное электрическое сопротивление проводника при температуре *t*?

6.23. Напишите формулу для определения *ТКρ* проводника.

6.24. Какой числовой порядок имеет значение *ТКρ* для металлов?

6.25. В чем причина того, что некоторые сплавы имеют *ТКρ=0*?

6.26. Какая разница в физическом смысле понятий *ТКρ* и *ТКR*?

**Лабораторная работа № 3**

**Исследование удельного электрического сопротивления и электрической прочности твердых диэлектриков**

**1. Цель работы**

Изучить влияние температуры и влажности на удельное электрическое сопротивление и электрическую прочность важнейших диэлектриков, применяемых в авионике.

**2. Задачи работы**

2.1. Освоить методику определения удельных электрических сопротивлений (объемного – *ρV* и поверхностного – *ρS*) диэлектриков и их электрической прочности *ЕПР*.

2.2. Установить порядок значений *ρV*, *ρS* и *ЕПР* для основных групп диэлектриков.

2.3. Исследовать влияние температуры и влажности на *ρV*, *ρS* и *ЕПР* различных твердых диэлектриков.

2.4. Сделать выводы о характере и причинах изменений *ρV*, *ρS* и *ЕПР* исследованных диэлектриков под влиянием температуры и влажности окружающей среды.

**3. Сущность исследуемых вопросов**

Самым широко распространенным применением диэлектриков является использование их в качестве электроизоляционных материалов, из которых изготавливаются: изоляция электрических проводов и кабелей; основания печатных плат и подложек интегральных микросхем; изоляция элементов штепсельных разъемов и электроизоляционных колодок; контакторов и выключателей и многое другое. Основное их назначение - препятствовать прохождению электрического тока на определенных участках электрической цели. Чем выше электрическое сопротивление и электрическая прочность этих элементов, тем выше их качество.

Однако во всех применяемых на практике диэлектриках при помещении их в электрическое поле протекает хотя и незначительный, по сравнению с проводниками, но все же электрический ток. Величина этого тока, естественно, определяется значением приложенного напряжения, но прежде всего он зависит от строения и свойств самого электроизоляционного материала и от его способности сохранять свои свойства при воздействии эксплуатационных факторов, к коим следует прежде всего отнести температуру и влажность окружающей среды.

Электрический ток, протекающий через диэлектрик, складывается в основном из двух составляющих: тока поляризации или тока смещения – *IСМ* , и тока сквозной проводимости – *IСКВ* или тока утечки, т.е. *I=IСМ+IСКВ* (рис. 3.1).

Рис.3.1. Изменение тока, протекающего через диэлектрик в постоянном электрическом поле

*IСМ*

*IСКВ*

*τ*

*I*

Ток смещения обусловлен замедленными видами поляризации (ориентационными), которые протекают в течение времени *τ* = 0,001 …0,1с. необходимого для смещения связанных электрических зарядов. Поэтому ток смещения имеет место при нахождении диэлектрика в переменных электрических полях или при включении или выключении постоянного электрического тока.

Ток сквозной проводимости является результатом перемещения под воздействием электрического поля свободных электрических зарядов (электронов и ионов). Наличие в диэлектрике свободных электрических зарядов является следствием диссоциации молекул основного вещества и главным образом примесей, которые всегда имеются в наличии в диэлектрике.

Способность того или иного диэлектрика противостоять протеканию через него электрического тока характеризуется величиной его удельного электрического сопротивления - *ρ* (или удельной электропроводностью *j=1/ρ*). Удельное электрическое сопротивление является одной из главных характеристик диэлектрических материалов, выполняющих электроизоляционные функции.

Поскольку ток через твердый диэлектрик, помещенный в электрическое поле, протекает двумя путями: через его толщу - *IV* и по поверхности - *IS* (рис.3.2), полное электрическое сопротивление диэлектрика можно посчитать как параллельное соединение *RS* и *RV* .

$$R=\frac{R\_{V}R\_{S}}{R\_{V}+R\_{S}},$$

Поэтому соответственно различают удельное объемное *ρV* и удельное поверхностное *ρS*  электрические сопротивления.

Рис. 3.2. Пути протекания электрического тока через диэлектрик

*E*

*IS*

*I*

*IS*

*IV*

Удельное объемное сопротивление диэлектрика численно равно сопротивлению куба с ребром в 1м, вырезанного из данного материала при условии, что ток в нем проходит через противоположные грани (рис. 3.3а)

Тогда $R\_{V}=ρ\_{V}\frac{h}{S}, Ом$.

Откуда $ρ\_{V}=R\_{V}\frac{S}{h}, Ом∙м$.

Удельное поверхностное сопротивление диэлектрика численно равно сопротивлению прямоугольника любых размеров на поверхности данного материала при условии протекания тока между электродами, помещенными на противоположные стороны этого прямоугольника (рис. 3.3б)

*h*

Рис. 3.3. Физическая сущность *ρV*и *ρS*

*Iv*

*S*

*a*

*b*

*a)*

*б)*

$R\_{S}=ρ\_{S}\frac{a}{b} и ρ\_{S}=R\_{S}\frac{b}{a}$.

Поскольку удельное поверхностное электрическое сопротивление диэлектриков помимо свойств материала зависит от состояния поверхности (качество ее обработки, степени загрязнения, наличия на ней водяной пленки и т.п.), то в качестве характеристик для оценки электроизоляционных свойств диэлектрика в большинстве случаев используют удельное объемное электрическое сопротивление *ρV* .

Величина *ρV* применяемых на практике диэлектриков находится в пределах от 106 до 1016 *Ом∙м.*

Диэлектрики, состоящие из нейтральных (неполярных) молекул, такие как полиэтилен, полистирол, фторопласт-4 и некоторые другие имеют более высокое *ρV* = 1012 … 1016 *Ом∙м.* В отличие от них, материалы, имеющие полярные (дипольные) молекулы – полярные диэлектрики, такие как фенопласты, поливинилхлориды, гетинакс, текстолит и другие характеризуются более низким значением *ρV* = 106 … 1011 *Ом∙м.*

Рис.3.4. Характер зависимости *ρV* от ε у диэлектриков

*ε*

*ρV*

Этот факт обусловлен тем, что полярные молекулы диэлектрика под действием электрического поля легче диссоциируют на ионы, чем нейтральные молекулы. Отсюда следует характер связи между относительной диэлектрической проницаемостью диэлектрика (ε) и величиной его объемного электрического сопротивления. Чем больше ε, тем меньше *ρV* (рис. 3.4).

Содержание примесей оказывает существенное влияние на электропроводность твердых диэлектриков. Молекулы примесей под действием электрического поля, как правило, легко распадаются на ионы, что в любых диэлектриках приводит к росту свободных электрических зарядов и уменьшению удельного электрического сопротивления диэлектриков.

Эксплуатационные факторы, и прежде всего повышение температуры и влажности, отрицательно сказываются на свойствах электрической изоляции.

Повышение температуры способствует диссоциации молекул примесей, а также основного вещества. Кроме того с ростом температуры растет подвижность носителей зарядов в диэлектрике. Под влиянием этих процессов электрическое сопротивление диэлектриков уменьшается.

Увеличение влажности диэлектриков также приводят к уменьшению величины их удельного сопротивления. Вода, проникая внутрь диэлектрика, способствует ионизации молекул примесей, а иногда и основного вещества. При увлажнении диэлектрика также растет его диэлектрическая проницаемость. Все это снижает *ρV* *.*

Влага, адсорбируемая (поглощаемая) поверхностью диэлектрика, увеличивает толщину проводящей пленки на поверхности диэлектрика и *ρS* резко уменьшается.

Степень влияния влажности на электропроводность диэлектриков зависит от гигроскопичности материала, а также его способности адсорбировать влагу на поверхности.

В зависимости от механизма взаимодействия молекул диэлектрика с полярными молекулами воды все твердые диэлектрики делятся на две группы: гидрофобные и гидрофильные.

Гидрофобные диэлектрики имеют нейтральные молекулы, не вступающие в электростатическое взаимодействие с молекулами воды. Поэтому их поверхность не адсорбирует влагу, т.е. не смачивается (полистирол, фторопласт, воск и др.) и, как следствие, их *ρS* велико и практически не зависит от относительной влажности окружающей среды.

Ко второй группе относятся диэлектрики, состоящие из полярных молекул, т.е. гидрофильные диэлектрики - это полярные диэлектрики. В этом случае между молекулами материала и воды возникают электростатические силы притяжения, влага адсорбируется поверхностью, на ней образуется водяная пленка, из которой влага проникает вглубь диэлектрика. К гидрофильным материалам относятся фенопласты, слоистые пластмассы на основе фенолформальдегидных смол ( гетинакс, текстолит ), стекла, мрамора и др.

Влияние относительной влажности воздуха на величину *ρS* гидрофобных и гидрофильных диэлектриков показано на рис. 3.5.

Рис.3.5. Влияние относительной влажности на величину *ρS* у гидрофобных и гидрофильных диэлектриков

Фенопласт (гидрофильные)

Фторопласт-4 (гидрофобные)

10­17

10­13

10­15

10­11

10­9

100

80

60

40

20

Относительная влажность

*ρS , Ом*

Величина приложенного напряжения также влияет на электропроводность диэлектриков. С повышением приложенного напряжения под действием электрического поля заметно увеличивается число свободных электронов, появляется электронная проводимость и *ρV* и *ρS* диэлектрика существенно падают.

В диэлектриках, находящихся в электрическом поле при одновременном воздействии эксплуатационных факторов, протекают физические процессы, приводящие к потери их электроизоляционных свойств. Это явление получило название электрического пробоя диэлектрика. Свойство диэлектрика противостоять электрическому пробою называется электрической прочностью.

Количественно электрическая прочность электроизоляционных материалов оценивается величиной пробивной напряженности *ЕПР*, которая определяется отношением:

$$E\_{ПР}=\frac{U\_{ПР}}{h}, \frac{МВ}{м} или \frac{кВ}{мм},$$

где *UПР* – пробивное напряжение - минимальное напряжение, при котором происходит пробой диэлектрика;

*h* – толщина диэлектрика, в направлении тока, протекающего через него.

В зависимости от физико-химических процессов, являющихся первопричиной потерей диэлектриками электрической прочности, различают три вида электрического пробоя:

Электронный пробой. В основе лежит процесс ударной ионизации молекул газа (диэлектрика).

Тепловой пробой обусловлен повышением температуры материала при нахождении его в электрическом поле. Если возникающее тепло не успевает отводиться в окружающую среду, то температура диэлектрика лавинообразно возрастает, что в итоге приводит к его термическому разрушению и электрическому пробою.

Электрохимический пробой вызывается снижением электрической прочности диэлектриков за счет необратимых изменений их свойств под влиянием физико-химических процессов, протекающих в материале, находящимся длительное время при одновременном воздействии электрического поля и эксплуатационных факторов (электрохимическое старение).

**4. Аппаратура и методика исследования**

4.1. Определение удельных объемного и поверхностного сопротивлений

В данной работе применяется один из наиболее распространенных методов определения электрического сопротивления диэлектриков – закон Ома для цепи постоянного тока.

Схема установки для измерения поверхностного и объемного сопротивлений диэлектриков приведена на рис. 3.6.

Основными элементами установки являются:

1. Измерительный прибор – микроамперметр, фиксирующий ток, протекающий через образец отдельно через объем либо по поверхности.

2. Повышающий автотрансформатор.

3. Выпрямитель.

4. Вольтметр, измеряющий поданное на образец напряжение (1 кВ).

5. Переключатель, обеспечивающий необходимые измерения *ρV* или *ρS.*

6. Высоковольтная камера, в которой устанавливается образец материала для измерения *ρV* и *ρS* и оснащенная тремя электродами: ВЭ – высоковольтным электродом; ОК – охранным кольцом; ИЭ – измерительным электродом, необходимым для включения образца в измерительную схему.

Для определения *ρV* и *ρS* материала используются плоские квадратные образцы толщиной от 1 до 4 мм либо в виде круга диаметром около 100 мм. Поверхность образцов должна быть гладкой. На поверхность образцов с помощью трансформаторного масла притираются электроды из алюминиевой фольги толщиной не более 0,01 мм, обеспечивающие подключение образца к указанным выше электродам высоковольтной камеры.

Удельное поверхностное сопротивление *ρS* определяется при постановке переключателя в положение *ρS*. При этом напряжение подводится к измерительному электроду и охранному кольцу, а высоковольтный электрод заземляется. В этом случае микроамперметр будет показывать ток, протекающий через кольцевой зазор между электродами, т.е. измерять только поверхностную составляющую тока сквозной проводимости *Is*.

Поверхностное сопротивление образца *RS* и удельное поверхностное сопротивление материала – *ρS* рассчитываются по следующим формулам:

$$R\_{S}=\frac{U}{I\_{S}}; ρ\_{S}=R\_{S}\frac{2π}{ln\frac{d\_{1}}{d\_{2}}},$$

где *U*- приложенное к образцу напряжение;

*Is*- поверхностная составляющая тока сквозной проводимости;

*d1*- диаметр измерительного электрода;

*d2* - внутренний диаметр охранного кольца (кольцевого электрода).

Для измерения удельного объемного сопротивления *ρV* переключатель ставится в положение *ρV*. При этом напряжение подается на измерительный электрод и на высоковольтный (нижний) электрод. Охранное кольцо заземляется.

Через микроамперметр протекает только объемная составляющая тока сквозной проводимости *Iv*.

Расчет *RV* и *ρV* ведется по формулам

$$R\_{V}=\frac{U}{I\_{V}}; ρ\_{S}=R\_{V}\frac{S}{h},$$

где *U* - приложенное напряжение;

*IV* - показание микроамперметра;

*S* - площадь измерительного электрода;

*h* - толщина образца диэлектрика.

4.2. Исследование влияния температуры и влажности на удельные объемное и поверхностное сопротивления

Влияние температуры на *ρV* и *ρS*. Исследуемый образец вместе с высоковольтной камерой устанавливается в термостат, имеющий нагревательный элемент. Установка позволит определять величины *ρV* и *ρS* при температурах от комнатной до 100°С.

Удельные сопротивления определяются при температурах от 20°С до 80°С. По полученным результатам строятся графики зависимости *ρV* и *ρS* от температуры.

Влияние влажности на *ρV* и *ρS* исследуется путем сравнения исследуемых величин для образцов материалов, выдержанных в среде с разной относительной влажностью.

Испытание образцов проводится по приведенной выше методике.

**5. Порядок выполнения лабораторной работы**

5.1. Ознакомиться с перечнем исследуемых образцов материалов и испытательным оборудованием.

5.2. Пройти инструктаж по технике безопасности при работе на лабораторной установке для определения *ρV* и *ρS* диэлектриков.

5.3. Провести замер толщины образцов и диаметра электродов.

5.4. Провести испытания образцов материалов. Полученные значения *ρV* и *ρS* свести в итоговую таблицу и по этим данным построить графики зависимости *ρV* и *ρS* от температуры относительной влажности среды для исследуемых материалов *ρV* и *ρS* = *f(T)* и *ρV* и *ρS*= *f(B).*

5.5*.* Измерение электрической прочности диэлектриков производиться на специальной лабораторной установке и рассчитывается по формуле 3.6.

5.6. По данным табл. 3.1 и графиков сформулировать выводы о влиянии эксплуатационных факторов на удельные электросопротивления и электрическую прочность исследуемых диэлектриков и объяснить полученные результаты.

Таблица 3.1

Сводная таблица экспериментальных данных

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | *Т*,°С | Относительная влажность, % | Толщина образца *h*, м | Диаметр *d1*,м | Диаметр *d2*,м | *U*, В | *Iv,* А | *Is,* А | *ρv,* Ом۰м | *ρs,* Ом۰м | *Uпр*, В | *Eпр*, кВ/мм |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

1. **Контрольные вопросы**

6.1. Для какого применения диэлектриков удельное объемное и поверхностное сопротивления являются наиболее важными характеристиками?

6.2. Назовите факторы, которые оказывают наиболее существенное влияние на *ρV* и *ρS*.

6.3. Из каких составляющих складывается ток, протекающий через диэлектрик, находящийся в электрическом поле?

6.4. Какова физическая сущность тока смещения в диэлектрике?

6.5. Какова физическая сущность тока сквозной проводимости в диэлектрике?

6.6. Изобразите график временной зависимости тока, протекающего через диэлектрик, находящийся в постоянном электрическом поле с момента его включения.

6.7. Какое свойство диэлектрика характеризуют *ρV* и *ρS*

6.8. Покажите, какими путями протекает ток через диэлектрик?

6.9. Напишите формулу суммарного электрического сопротивления диэлектрика.

6.10. Чему равно удельное объемное сопротивление диэлектрика? Укажите размерность этой характеристики.

6.11. Чему равно удельное поверхностное сопротивление диэлектрика *ρS*? Укажите размерность этой характеристики.

6.12. Почему для характеристики электроизоляционных свойств диэлектриков чаще используют удельное объемное сопротивление *ρV*, а не поверхностное *ρS*?

6.13. Укажите диапазон значений *ρV* который имеют диэлектрики, применяемые на практике.

6.14. Укажите диапазон значений *ρV* для нейтральных и полярных диэлектриков.

6.15. Приведите примеры полярных и нейтральных диэлектриков.

6.16. Почему удельное электрическое сопротивление полярных диэлектриков меньше, чем нейтральных?

6.17. Покажите на графике зависимость *ρV* диэлектриков от их относительной диэлектрической проницаемости *ε*.

6.18. Какое влияние на электропроводность твердых диэлектриков оказывает примеси, находящиеся в материале?

6.19. Покажите на графике характер изменения *ρV* диэлектрика при повышении его температуры.

6.20. Покажите на графике характер изменения *ρV* при увлажнении диэлектрика.

6.21. Какие диэлектрики по степени взаимодействия с молекулами воды относятся к гидрофильным, а какие к гидрофобным?

6.22. Покажите на графике характер относительной влажности воздуха на *ρS* гидрофильных и гидрофобных диэлектриков.

6.23. Какое влияние оказывает на величину *ρV* и *ρS* величина приложенного к диэлектрику напряжения?

6.24. Какой метод определения электрического сопротивления диэлектриков применяется в данной лабораторной работе?

6.25. Почему высоковольтная камера, в которой осуществляется измерение *ρV* и *ρS*, имеет три электрода?

6.26. На каких образцах материалов осуществляется определение *ρV* и *ρS* диэлектриков?

6.27. Каким образом осуществляется исследование зависимости *ρV* и *ρS* от температуры и влажности окружающей среды?

6.28. Как вы представляете явление электрического пробоя диэлектрика?

6.29. Дайте определение характеристики диэлектрика электрическая прочность.

6.30. Напишите математическое выражение пробивной напряженности диэлектриков и укажите ее размерность.

6.31. В чем состоит разница в физическом смысле понятий пробивное напряжение *UПР* и пробивная напряженность *ЕПР*.

6.32. Какие виды электрического пробоя вам известны?

6.33. В чем заключается физический смысл электронного пробоя?

6.34. В чем заключается физический смысл теплового пробоя?

6.35. В чем заключается физический смысл электрохимического строения?

**Лабораторная работа № 4**

**Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь твердых диэлектриков**

1. **Цель работы**

Изучить влияние состава и эксплуатационных факторов на диэлектрическую проницаемость и диэлектрические потери диэлектриков, широко используемых в авиационном оборудовании и радиотехнической аппаратуре.

1. **Задачи работы**
	1. Освоить методику определения основных характеристик диэлектриков: диэлектрической проницаемости *ε*, оценивающей способность диэлектрика к поляризации, и тангенса угла диэлектрических потерь *tgδ*, показывающего величину потерь в диэлектрике, которые находятся в переменных электрических полях.
	2. Исследовать влияние эксплуатационных факторов (влажности, температуры и частоты электрического поля) на основные материалы из числа полярных и нейтральных диэлектриков.
2. **Сущность исследуемых материалов**
	1. Поляризация и относительная диэлектрическая проницаемость

Важнейшим свойством диэлектриков является их способность под воздействием электрического поля поляризоваться. Поляризация представляет собой процесс ограниченного смещения связанных электрических зарядов и определенной ориентации дипольных молекул диэлектрика, находящегося в электрическом поле. В результате поляризации в диэлектрике образуется электрический заряд *Q*, величина которого зависит от строения диэлектрика и пропорциональна напряженности внешнего электрического поля *Е*. По прекращении действия электрического поля поляризация в диэлектрике постепенно исчезает.

В зависимости от природы и молекулярного строения диэлектрика возможны различные виды поляризации, среди которых важнейшими являются электронная, ионная и дипольная.

Электронная поляризация (рис. 4.1а) представляет собой упругую деформацию электронных оболочек атомов относительно положительно заряженного ядра.

Этот вид поляризации устанавливается практически мгновенно (за время порядка 10-15с), степень поляризации не зависит от температуры диэлектрика и протекает без рассеяния энергии. Электронная поляризация наблюдается у всех диэлектриков.

Рис. 4.1. Принцип электронной (а) и ионной (б) поляризации

*+*

*–*

*+E*

 *E*

 *а)*

 *б)*

Ионная поляризация (рис. 4.1б) рассматривается как упругое смещение ионов, составляющих молекулу относительно друг друга. В чистом виде эта поляризация наблюдается у веществ с ионным строением (кварц, слюда, фарфор и др.). Ионная поляризация устанавливается за очень короткое время 10-13с, практически не зависит от температуры и осуществляется без рассеяния энергии.

Дипольная поляризация представляет собой преимущественную ориентацию (поворот) полярных молекул (диполей) материала под действием внешнего электрического поля.

Повороту отдельно взятой молекулы препятствуют соседние молекулы. Поэтому дипольная поляризация связана с преодолением сил трения между молекулами, что является следствием нагрева диэлектрика, т.е. потерям на поляризацию.

Степень дипольной поляризации зависит от температуры, и этот вид поляризации протекает за значительно более продолжительное время, чем электронная или ионная.

Диэлектрики, у которых наблюдается только электронная поляризация, называются нейтральными (неполярными) диэлектриками.

Диэлектрики, у которых наряду с электронной существует и ионная поляризация, составляют группу ионных диэлектриков.

Диэлектрики, в которых одновременно происходит и электронная и дипольная поляризация, получили название полярных (дипольных диэлектриков).

Любой диэлектрик с подключенными к нему электродами, находящийся в электрическом поле, можно рассматривать как конденсатор. Заряд этого конденсатора *Q* (рис. 4.2.) состоит как бы из двух составляющих: из заряда *Q0*, который бы имел конденсатор, если бы его электроды разделял вакуум, дополнительного заряда *QД* обусловленного поляризацией диэлектрика, фактически находящегося между электродами. То есть

*Q=Q0* +*QД* (4.1)

Величина *QД* зависит от степени поляризации диэлектрика, которую можно определить, поделив *Q* на *Q0*.

Рис. 4.2. Эквивалентная схема диэлектрика

*E*

*Q=Q0 +QД*

Характеристика, определяющая степень поляризации диэлектрика, называется диэлектрической проницаемостью материала *ε*, т.е. она показывает во сколько раз данный диэлектрик сильнее поляризуется, чем вакуум.

$ε=\frac{Q}{Q\_{0}}$ . (4.2)

Принимая во внимание выражение (1) можно записать

$ε=\frac{Q\_{0}+Q\_{Д}}{Q\_{0}}=1+\frac{Q\_{Д}}{Q\_{0}}$. (4.3)

Откуда следует, что *ε* любого вещества больше единицы.

Величина диэлектрической проницаемости определяется, прежде всего, строением диэлектриков.

Нейтральные диэлектрики имеют *ε* =3…4 единиц.

У полярных диэлектриков *ε* =4…10 единиц, а у сильно полярных – несколько десятков единиц, например, у воды *ε* =81.

У ионных диэлектриков значение диэлектрической проницаемости зависит от воздействия эксплуатационных факторов. Причем степень и характер этой зависимости для отдельных групп диэлектриков весьма различны.

Зависимость диэлектрической проницаемости диэлектриков от температуры.

У нейтральных диэлектриков *ε* от температуры зависит слабо.

С повышением температуры она слегка уменьшается вследствие того, что при тепловом расширении материала уменьшается его плотность и, следовательно, снижается количество поляризующихся частиц в единице объема вещества.

У полярных диэлектриков с увеличением температуры одновременно протекают два процесса: ослабевают силы трения между молекулами, препятствующие ориентации диполей, что способствует росту *ε*; возрастает энергия теплового хаотического движения молекул, которая препятствует упорядоченной ориентации диполей под действием электрического поля, что приводит к снижению *ε*.

При сравнительно невысоких температурах первый процесс преобладает над вторым и *ε* увеличивается.

По мере увеличения температуры возрастание энергии теплового хаотического движения молекул начинает преобладать перед процессом упорядоченной ориентации диполей и *ε* падает.

Типовая зависимость *ε =f(T)* для полярных диэлектриков приведена на рис. 4.3.

Влияние влажности окружающей среды на диэлектрическую проницаемость зависит от способности диэлектриков поглощать влагу (их гигроскопичности). Поглощенные диэлектриком молекулы воды принимают участие в поляризации и в результате этого диэлектрическая проницаемость увеличивается. При этом у гигроскопичных элементов это влияние проявляется более резко, чем у не гигроскопичных.

*T*

Рис.4.3. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для полярных диэлектриков

*ε*

Влияние частоты электрического поля на диэлектрическую проницаемость также зависит от типа диэлектрика. У нейтральных и ионных диэлектриков при увеличении частоты *ε* остается неизменной.

Это объясняется тем, что электронная и ионная поляризация, которой они обладают, протекает практически мгновенно, в диапазоне используемых на *практике* частот поляризация успевает установиться.

У полярных диэлектриков зависимость *ε* от частоты имеет сложный характер. При не высоких частотах до *f '* (рис.4.4) дипольная поляризация успевает установиться, т.е. за время полупериода колебания дипольные молекулы диэлектрика успевают повернуться в соответствии с направлением электрического поля, и в этом случае рост частоты не влечет за собой изменение значения диэлектрической проницаемости.

При частотах электрического поля, превышающих *f ' - f’’,* время полупериода колебаний поля становится меньше времени, необходимого на установление поляризации, и поэтому диполи лишь успевают повернуться на меньший угол. Это приводит к уменьшению *ε*. Наконец, при высоких частотах (больших с *f”,* рис 4.4) время полупериода становится настолько малым, что диполи вовсе не успевают ориентироваться вслед за изменением поля. В этом случае в диэлектрике будет иметь место только электронная поляризация, при которой, как уже отмечалось, *ε* не зависит от частоты, т.е. остается постоянной.

*f*

Рис. 4.4. Зависимость диэлектрической проницаемости полярных диэлектриков от частоты электрического поля

*ε*

*f'*

*f”*

* 1. Диэлектрические потери

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Причиной диэлектрических потерь является наличие в диэлектрике в основном токов поляризации и сквозной проводимости.

Величина диэлектрических потерь характеризуется углом диэлектрических потерь *δ* или тангенсом этого угла (рис. 4.5).

Углом диэлектрических потерь называется угол *δ*, дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением цепи, имеющей емкостной характер нагрузки. В случае идеального диэлектрика (диэлектрика без потерь) вектор тока в такой цепи опережает вектор напряжения на 90°. При этом угол *δ* равен нулю. При наличии потерь в диэлектрике возникает активная составляющая тока, являющаяся суммой тока поляризации и тока сквозной проводимости $I\_{а}=I\_{пол}+I\_{скв}.$

Рис. 4.5. Векторная диаграмма диэлектрических потерь

*I*

*I*а

*Ip*

*φ*

*U0*

*δ*

Чем больше будут потери в диэлектрике, тем больше будет *Iа* и тем больше будет угол *δ* и функция этого угла *tgδ=Iа/Iр.*

Тангенс угла диэлектрических потерь входит в формулу для определения величины, рассеиваемой в диэлектрической мощности.

*Р=U2·C·ω·tgδ,* (4.4)

где *U* - напряжение, приложенное к диэлектрику;

*С* - емкость диэлектрика;

*ω*- круговая частота: *ω=2πf;*

*f* - частота электрического поля, Гц.

Значение *tgδ* зависит от строения диэлектрика. У нейтральных диэлектриков диэлектрические потери определяются только наличием сквозной электропроводности и поэтому они у них, как правило, малы. Нейтральные диэлектрики чаще всего с успехом могут работать в высокочастотных электрических полях и поэтому называются высокочастотными.

У полярных диэлектриков энергия затрачивается не только на сквозную электропроводность, величина которой больше, чем у нейтральных диэлектриков, но и на поляризацию. Поэтому диэлектрические потери в целом у полярных диэлектриков больше, чем у нейтральных.

Полярные диэлектрики на высоких частотах применяются редко, только в тех случаях, когда диэлектрические потери не влияют на работу аппаратуры. Поэтому полярные диэлектрики в основном составляют группу низкочастотных диэлектриков.

Величина *tgδ* у низкочастотных (полярных) диэлектриков составляет 10-1…10-2, а у высокочастотных (нейтральных) 10-3…10-4.

Для некоторых газов *tgδ* может быть 10-6…10-8.

Ионные диэлектрики в зависимости от их строения и качества могут быть как высоко-, так и низкочастотные.

Диэлектрические потери также зависят и от влияния эксплуатационных факторов.

Влияние температуры по-разному сказывается на потерях нейтрально ионных и полярных диэлектриков.

У нейтральных и ионных диэлектриков *tgδ* с ростом температуры увеличивается. Это объясняется тем, что увеличение температуры приводит к росту тока сквозной проводимости. Так как под действием температуры проходит диссоциация молекул и, главным образом, различных примесей.

Зависимость полярных диэлектриков от температуры показана на рис. 4.6.

*tgδ*

Рис. 4.6. Зависимость *tgδ* полярных диэлектриков от температуры

*T*

*T’*

Выше отмечалось, что полярные диэлектрики имеют две составляющие электропотерь: потери на поляризацию и потери на сквозную электропроводность. Так вот, при увеличении температуры сначала за счет уменьшения сил трения между молекулами и, как следствие, усиления дипольной поляризации потери растут, достигая своего максимального значения. Затем, при дальнейшем повышении температуры, вследствие влияния теплового хаотического движения молекул дипольная поляризация уменьшается, а следовательно, падают и диэлектрические потери. Так продолжается до температуры Т' (рис.4.6). Затем рост диэлектрических потерь объясняется усилением тока сквозной проводимости за счет температурной диссоциации молекул примесей и основного вещества.

Влияние влаги приводит к увеличению *tgδ*, т.к. при этом растут потери на дипольную поляризацию молекул воды и потери на сквозную проводимость, которая увеличивается за счет диссоциации молекул примесей и основного вещества.

При переменной частоте диэлектрические потери определяются согласно формуле (4.4).

Поэтому *tgδ* зависит от величины диэлектрических потерь и частоты, т.е.

$tgδ=\frac{P}{U^{2}Cω}$. (4.5)

У нейтральных диэлектриков величина диэлектрических потерь, поскольку они определяются потерями на сквозную проводимость, с увеличением частоты растет незначительно, и *tgδ* с ростом частоты существенно меняться не будет.

У полярных диэлектриков диэлектрические потери с ростом частоты сначала резко возрастают в связи с затратой большей энергии на ориентацию диполей. Когда же дипольная поляризация исчезает, остаются диэлектрические потери на сквозную проводимость, которые от частоты зависят слабо (рис. 4.7)

Рис. 4.7. Частотная зависимость диэлектрических потерь и тангенса угла диэлектрических потерь для полярного диэлектрика

*f*

*P1tgδ*

*P*

*tgδ*

Таким образом, когда имеет место дипольная поляризация, *tgδ* при увеличении частоты растет, а когда на первый план среди потерь выходят потери от сквозной проводимости, *tgδ* снижается.

1. **Аппаратура и методика исследования**

В данной работе применяется один из наиболее распространенных способов измерения емкости, индуктивности, *tgδ* на повышенных частотах с использованием универсального измерительного моста переменного тока. При измерении емкости мост одновременно позволяет определять и *tgδ.*

Схема установки для измерения емкости плоского конденсатора с исследуемым образцом диэлектрика между его обкладками и *tgδ* материала приведены на рис. 4.8.

Рис. 4.8. Схема лабораторной установки

*mV*

*ГЗЧ*

*ИМ*

*ИО*

*НЭ*

Основными элементами установки являются:

*ИМ* - измерительный мост переменного тока;

*ИО* - образец исследуемого материала, включенный в измерительное плечо моста;

*mV* – цифровой милливольтметр, включенный в измерительную диагональ моста;

*НЭ* – нагревательный элемент, обеспечивающий снятие температурных зависимостей *ε* и *tgδ*.

*ГЗЧ* – генератор звуковых частот, подключенный к измерительному мосту, с помощью которого исследуется частотная зависимость и *tgδ* твердых диэлектриков.

Для определения *ε* и *tgδ* исследуемых материалов используются плоские образцы с притертыми к их поверхности электродам из алюминиевой фольги, обеспечивающие подключение образца к измерительной схеме. В схеме установки они представляют собой плоские конденсаторы.

Измерение *ε* и *tgδ* исследуемых материалов осуществляется с помощью измерительного моста согласно имеющейся на рабочем месте инструкции.

С лимбов измерительного моста снимаются показания емкости конденсатора с исследуемым диэлектриком между его обкладками и величина его *tgδ*.

Относительная диэлектрическая проницаемость материала рассчитывается по формуле емкости плоского конденсатора.

$$C=\frac{εε\_{0}s}{h} ,$$

откуда

$$ε=\frac{Ch}{ε\_{0}s } ,$$

где *ε* относительная диэлектрическая проницаемость;

*ε 0* – абсолютная диэлектрическая проницаемость (*ε 0*=8,85·10 -12 , Ф/м);

*h* - толщина измеряемого образца, м;

*S*- площадь измерительного электрода, наклеенного на образце, м2.

Удельные потери рассчитываются по формуле:

*P=U2·ω·C·tgδ= U2·2πf·C·tgδ,*

где *U*- приложенное напряжение;

*f* - частота электрического поля.

Влияние влажности исследуется путем сравнительной оценки значений *ε* и *tgδ* сухих и увлажненных образцов.

Частотная зависимость определяется замером *ε* и *tgδ* на различных частотах, значения которых устанавливаются руководителем занятий.

Температурная зависимость *ε* и *tgδ* исследуется на образцах, помещенных в нагревательный элемент. Отсчеты значений осуществляются при дискретных температурах, определяемых руководителем занятий.

**5. Порядок выполнения лабораторной работы**

5.1. Ознакомиться с перечнем исследуемых образцов материалов и испытательным оборудованием.

5.2. Пройти инструктаж по технике безопасности при работе на лабораторной установке.

5.3. Провести замер необходимых параметров образцов.

5.4. Провести испытания образцов материалов. Полученные значения свести в итоговую таблицу (табл. 4.1) и по этим данным построить графики частотной и температурной зависимости *ε* и *tgδ* и *Р* исследуемых образцов. Установить влияние влажности образца на эти характеристики.

5.5. По данным таблицы и полученных графиков сформулировать выводы о влиянии эксплуатационных факторов на *ε* и *tgδ* и *Р* исследуемых диэлектриков. Дать объяснение полученным результатам.

Таблица 4.1

Сводная таблица экспериментальных данных

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Материал | *S, м2* | *h, м* | *Т, °С* | *f, Гц* | *С, Ф* | *ε* | *tgδ* | *PВТ* |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**6. Контрольные вопросы**

6.1. Назовите основные, эксплуатационные факторы, которые оказывают влияние на *ε* и *tgδ* диэлектриков.

6.2. Дайте определение поляризации диэлектриков.

6.3. Чему пропорциональна величина электрического заряда конденсатора с данным диэлектриком между его обкладками

6.4. Перечислите основные виды поляризации, которые наблюдаются в диэлектриках.

6.5. Изложите сущность электронной поляризации. Связана ли эта

поляризация с рассеянием энергии внешнего электрического поля?

6.6. Укажите время, за которое протекает электронная поляризация.

Зависит ли величина электронной поляризации диэлектриков от температуры?

6.7. Изложите сущность ионной поляризации. Происходит ли рассеяние

энергии вешнего поля при этом виде поляризации?

6.8. За какое время протекает ионная поляризация? Зависит ли степень ионной поляризации от температуры?

6.9. Изложите сущность дипольной поляризации. Происходит ли рассеяние энергии внешнего поля на этот вид поляризации?

6.10. 3а какое время протекает дипольная поляризация? Зависит ли степень поляризации от температуры?

6.11. Какие виды поляризации характерны для нейтральных диэлектриков?

6.12. Какие виды поляризации характерны для полярных диэлектриков?

6.13. Дайте определение относительной диэлектрической проницаемости *ε*.

6.14. Укажите диапазон возможных значений *ε* для полярных и

нейтральных диэлектриков. Чему равна *ε* для воды?

6.15. Покажите на графике зависимость *ε* от температуры для нейтральных диэлектриков.

6.16. Покажите на графике зависимость *ε* от температуры для полярных диэлектриков.

6.17. Какие факторы оказывают влияние на дипольные молекулы полярного диэлектрика при одновременном воздействии на него электрического поля и повышенной температуры?

6.18. Почему при увлажнении диэлектрика его диэлектрическая проницаемость увеличивается?

6.19. Покажите на графике характер зависимости *ε* от частоты электрического поля для нейтральных диэлектриков.

6.20. Покажите на графике характер зависимости *ε* от электрического поля для полярных диэлектриков.

6.21. Какие виды поляризации диэлектриков не зависят от частоты

электрического поля и почему?

6.22. Что собой представляют диэлектрические потери в диэлектрике?

6.23. Что является причиной возникновения в диэлектрике диэлектрических потерь?

6.24. Изобразите векторную диаграмму диэлектрика с потерями. Чему равен *tgδ*?

6.25. Напишите формулу, по которой подсчитывается величина рассеиваемой в диэлектрике мощности.

6.26. Почему нейтральные диэлектрики называют высокочастотными?

6.27. Почему полярные диэлектрики считают низкочастотными?

6.28. Приведите диапазон значений *tgδ* для высокочастотных и низкочастотных диэлектриков.

6.29. Покажите на графике характер зависимости *tgδ* от температуры для нейтральных диэлектриков.

6.30. Покажите на графике характер зависимости *tgδ* от температуры для полярных диэлектриков.

6.31. Какое влияние оказывает влага на *tgδ* диэлектриков и почему?

6.32. Покажите на графике зависимости *tgδ* от частоты для полярных диэлектриков.

6.33. Какой метод положен в основу измерения *ε* и *tgδ* в настоящей лабораторной работе?

6.34. Приведите формулу определения диэлектрической проницаемости диэлектрика через выражение для емкости плоского конденсатора.

6.35. С помощью какой аппаратуры исследуют зависимость *tgδ* от частоты?

**Лабораторная работа № 5**

**Исследование влияния ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов на характеристики полупроводниковых диодов**

**1. Цель работы**

Изучить влияние температуры на эксплуатационные характеристики полупроводниковых материалов, применяемых в авиационном радиоэлектронном оборудовании.

**2. Задачи работы**

2.1. Освоить методику определения величины обратного тока через *p-n* переходы в полупроводниковых приборах.

2.2. Исследовать влияние температуры на значение обратного тока диодов, изготовленных из различных полупроводниковых материалов.

2.3. Установить влияние ширины запрещенной зоны полупроводниковых материалов на температурную стабильность характеристик полупроводниковых приборов, изготовленных из этих материалов.

**3. Сущность исследуемых вопросов**

По своим свойствам полупроводниковые материалы занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками. Отличие в свойствах, согласно квантовой теории твердого тела, является следствием отличия во взаимном расположении основных энергетических зон этих материалов (рис. 5.1.).

Из диаграмм, приведенных на рис. 5.1, следует, что в проводниках валентная зона и зона проводимости перекрываются. Поэтому любой коллективизированный электрон в проводнике может стать свободным и принять участие в электропроводности. В диэлектрике валентная зона и зона проводимости разделены широкой запрещенной зоной *∆Е*, преодолеть эту зону свободные электроны могут только получив квант энергии *Е > ∆Е.*



Полупроводники отличаются от диэлектриков меньшей шириной запрещенной зоны (*∆Е* до 4,8∙10-19 Дж). Поэтому часть валентных электронов под влиянием температуры, светового излучения, напряженности электрического поля могут получить соответствующий квант энергии, достаточный для преодоления запрещенной зоны, и перейти в зону проводимости, став свободными электронами (электронами проводимости).

Уход валентного электрона со своего энергетического уровня (орбиты) приводит к появлению в валентной оболочке атома полупроводника незанятой орбиты свободного места, дырки (рис.5.2).

На это освободившееся место на орбите при условии получения определенного кванта энергии может перейти электрон с более низкой орбиты (с нижнего энергетического уровня) и так далее. То есть за счет последовательного перехода электронов с нижних на более высокие энергетические уровни дырка будет спускаться вниз по энергетическим уровням в валентной зоне.

Перемещение дырки по энергетическим уровням эквивалентно движению положительного электрического заряда, численно равного заряду электрона (1.6 ∙ 10-19 Кл).

Таким образом, в полупроводнике существует как бы два вида проводимости: электронная и дырочная.

В идеально чистом полупроводнике, не имеющем дефектов кристаллического строения, эти два вида проводимости равны и составляют так называемую собственную проводимость (проводимость I типа)

Рис.5.2. Образование свободного электрона и дырки в полупроводнике под действием теплового кванта; 1 – валентный электрон; 2 – электрон проводимости; 3 – дырка

*ЗП*

*ВЗ*

*ЗЗ*

*1*

*2*

*ΔE*

*E*

*2*

*1*

*3*

*3*

В таком полупроводнике концентрация электронов проводимости, следовательно, и дырок определяется только температурой по формуле:

$n=A∙T^{\frac{3}{2}}∙e^{-\frac{∆E}{2kT}}$, (5.1)

где *А* – коэффициент, зависящий от свойств материала;

*Т* – абсолютная температура;

*∆Е* – ширина запрещенной зоны;

*k* – постоянная Больцмана.

Однако ряд важных для практики электрических свойств проводниковых материалов связан с наличием в полупроводниковом монокристалле областей с разным типом проводимости (электронной или дырочной), полученной за счет местного легирования полупроводника химическими элементами, имеющими большую или меньшую валентность, чем сам полупроводник. Окрестность границы между областями полупроводника, имеющего электронный характер проводимости (проводимость *n*-типа) и дырочную проводимость (проводимость p-типа) называется *p-n* переходом. Принцип действия подавляющего большинства полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, фото- и термоэлементов, светодиодов, полупроводниковых лазеров и др.) основан на использовании свойств *p-n* переходов.

Однако вначале о достижении преимущественно электронной и дырочной проводимостях.



Если в предварительно очищенный от вредных примесей полупроводник, представляющий собой монокристалл, т.е. имеющий сравнительно малое количество дефектов кристаллического строения, ввести определенное количество легирующих элементов, валентность которых будет выше валентности самого проводника, то это приведет к появлению в непосредственной близости от зоны проводимости полупроводника дополнительных энергетических уровней. Они заполнены электронами, способными при незначительных энергетических воздействиях не преодолевая запрещенную зону, перейти в зону проводимости, т.е. стать свободными (электронами проводимости) рис.5.3а.

Как уже отмечалось, оставшаяся после ухода с энергетического уровня электрона дырка способна перемещаться вниз по энергетическим уровням. Однако, в рассматриваемом случае пределы перемещения дырки ограничивается только дополнительными энергетическими уровнями и в валентную зону дырка не попадает, благодаря тому, что ее дальнейшему перемещению препятствует энергетический барьер величиной *∆Е* запрещенной зоны. Таким образом, полупроводниковый материал, легированный элементом, валентность которого выше, чем его самого, имеет при энергетических воздействиях преимущественно электронную проводимость (проводимость типа «*n*»)

Аналогично рассуждая, можно прийти к выводу о том, что тот же полупроводник, в который введен легирующий элемент, валентность которого ниже валентности самого полупроводника, будет обладать преимущественно дырочной проводимостью (проводимость типа «*p*»). Это возможно потому, что наличие таких легирующих элементов эквивалентно появлению вблизи валентной зоны дополнительных свободных энергетических уровней, на которые при малых энергетических воздействиях способны переходить электроны с энергетических уровней валентной зоны. Однако, благодаря тому, что дальнейшему движению электронов препятствует энергетический барьер *∆Е* запрещенной зоны, а дырки способны беспрепятственно двигаться вниз по энергетическим уровням, данный полупроводник и будет иметь преимущественную дырочную проводимость (рис5.3б). Легирующий элемент, введение которого обеспечивает в полупроводнике электронную проводимость, называется донором, а элемент, создающий в полупроводнике дырочную проводимость, – акцептором.

Таким образом, *p-n* переход является граничной областью между полупроводниками *p*-типа и *n*-типа.

Вследствие того, что проводимость *p* и *n* областей определяется носителями зарядов, привнесенными легирующим элементом, эти примесные носители называются основными, а электроны и дырки, возникающие при переходе через запрещенную зону электронов самого полупроводника, считаются неосновными зарядами.

Принцип работы *p-n* переходов, являющихся основным функциональным элементом полупроводниковых приборов, на примере диода показан на рис. 5.4.

p-n переход

Основные носители

*d*

*p*

*n*

*+*

–

–

*+*

Неосновные носители

а)

б)

При прямой полярности включения диода (а) основные носители граничных областей движутся к *p-n* переходу и легко проходят через него, создавая прямой ток через *p-n* переход.

Рис. 5.4. Схема, поясняющая принцип работы диода: а) прямая полярность включения; б) обратная полярность включения. ● - электрон; О - дырка; *d* - ширина области пространственного заряда

При обратной полярности (б) основные носители движутся от *p-n* перехода (расходятся), а через *p-n* переход проходят только неосновные носители (дырки в области «*n*» и электроны в «*p*» области), концентрация которых в легированном полупроводнике гораздо меньше концентрации основных носителей. Движение неосновных носителей создает так называемый обратный ток. Обратный ток диода будет значительно меньше прямого, что подтверждается типовой вольтамперной характеристикой диодов (рис. 5.5).

Среди эксплуатационных факторов для полупроводниковых приборов на первое место выходит температура окружающей среды или температура, до которой нагревается прибор в процесс его работы.

При нагревании диода его обратный ток через *p-n* переход будет расти только за счет увеличения неосновных носителей, т.е. носителей собственно полупроводникового материала, которые под действием квантов тепловой энергии способны преодолеть энергетический барьер запрещенной зоны и перейти в зону проводимости согласно выражению (5.1).

Изменение вольтамперной характеристики полупроводникового диода при повышении температуры показано пунктиром на рис. 5.5 (кривая 2).

Чувствительность диода к изменению температуры можно оценить величиной относительно изменения значений обратного тока при фиксированном значении обратного напряжения – на *p-n* переходе по формуле:

Рис.5.5. Типовая вольтамперная характеристика полупроводникового диода:

1 – при температуре То = 293 К (нормальная температура);

2 – при температуре Т > То

*2*

*Uобр*

*Iобр*

*Uпр*

*Iпр*

*1*

Обратный ток

Прямой ток

*IОБР.ОТН = IОБР.Т* ***/*** *IОБР.То* , (5.2)

где *IОБР.То* - величина обратного тока при То = 293 К;

*IОБР.Т* - величина обратного тока при температуре T>T0.

Обратный ток через *p-n* переход можно рассматривать состоящим из двух составляющих: диффузной и генерационно-рекомбинационной.

Диффузная составляющая обратного тока обусловлена движением неосновных носителей через *p-n* переход.

При достаточно большом значении обратного напряжения величина диффузной составляющей обратного тока приближенно определяется формулой:

*IДИФ=B∙n,* (5.3)

где *B* - коэффициент, зависящий от площади *p-n* перехода и свойств полупроводникового материала;

*n* - концентрация носителей.

Генерационно-рекомбинированная составляющая обратного тока возникает за счет наличия электронов и дырок, возникающих в области *p-n* перехода под действием тепловых квантов и успевающих покинуть эту область, не успев рекомбинировать (уничтожить друг друга).Величина этой составляющей определяется формулой того же вида, что и (5.3), т.е.

*IГ-Р=C∙d∙n,* (5.4)

где *С* – коэффициент, определяемый свойствами полупроводникового материала;

*d* – ширина области пространственного заряда (рис.5.2 б), зависящая от приложенного напряжения: чем выше напряжение, тем больше *d.*

Полный обратный ток:

*IОБР= IДИФ+ IГЕН=(B+Cd)n.* (5.5)

С учетом выражений (5.1) и (5.5) формулу (5.2) можно представить следующим образом:

$I\_{ОБР}=K∙e^{-\frac{∆E}{2kT}} , $ (5.6)

*K=A(B+Cd)T3/2/IОБР.То*

где *K* – масштабный коэффициент, величина которого определяется свойствами полупроводниковых материалов и мало изменяется по сравнению с изменением экспоненты в сравнительно узком диапазоне частот.

Поскольку *B* и *d* зависят от приложенного к диоду напряжения, исследование зависимости величины обратного тока от температуры необходимо вести при фиксированном значении обратного напряжения. Это напряжение обычно соответствует наибольшему допустимому обратному напряжению, указанному в паспорте на диод.

Из полученной математической зависимости (5.6) следует, что относительное изменение величины обратного тока зависит от ширины запрещенной зоны полупроводникового материала, из которого изготовлен диод. То есть при повышении температуры относительное значение величины обратного тока тем выше, чем меньше *∆E*



Иными словами, чем шире запрещенная зона у полупроводникового материала, тем в меньшей степени величина обратного тока диода зависит от его температуры.

Графическая интерпретация формулы (5.6) приведена на рис.5.6.

В современных полупроводниковых приборах широкое применение находят полупроводниковые материалы, название и ширина запрещенной зоны которых приведены в табл.5.1.

Таблица 5.1

|  |
| --- |
| Ширина запрещенной зоны некоторых широко применяемых полупроводниковых материалов |
| **Материал** | ***ΔЕ*∙1019, Дж** |
| Германий | 1,2 |
| Кремний | 1,9 |
| Арсенид галлия | 2,2 |
| Карбид кремния | 5,0 |

Относительную величину обратного тока диода, характеризующую зависимость его характеристик от температуры, не следует отождествлять с абсолютной величиной тока, т.к. некоторые диоды, изготовленные из материалов, обладающих широкой запрещенной зоной, имеют значительно больший обратный ток, чем у диодов, изготовленных из материалов с более узкой *∆E.*

**4. Аппаратура и методика исследования**

В данной работе применяется метод непосредственного измерения величины обратного тока полупроводникового диода в диапазоне температур от 20 до 80 °С.

Схема лабораторной установки приведена на рис. 5.7.

*5*

Рис. 5.7. Электрическая схема установки для исследования температурной зависимости величины обратного тока диодов:

1– сеть 220; 2 – трансформатор; 3 – выпрямитель;

 4 – ампервольтметр; 5 – переключатель;

6 – полупроводниковый диод; 7 – нагревательный элемент

*3*

*1*

*2*

*6*

*7*

*НАПРЯЖЕНИЕ*

*4*

*ТОК*

*+*

*–*

Для измерения величины обратного напряжения, подаваемого на диод, переключатель 5 устанавливается в положение «напряжение». На выпрямителе устанавливается величина обратного напряжения, соответствующая *UОБР.MAX*, указанная в паспорте на прибор.

При установке переключателя в положение «ток» ампервольтметр показывает величину обратного тока диода *IОБР.* При включении нагревательного элемента диод начинает нагреваться. Значение *IОБР* через диод последовательно измеряется при нескольких дискретных температурах, выбираемых по указанию руководителя.

**5. Порядок выполнения лабораторной работы**

5.1. Ознакомиться с перечнем исследуемых материалов полупроводниковых диодов.

5.2. Пройти инструктаж по технике безопасности при работе на установке для определения величины обратного тока диодов.

5.3. Произвести исследование зависимости величины обратного тока от температуры на полупроводниковых диодах, изготовленных из разных полупроводниковых материалов.

Результаты измерений свести в итоговую табл. 5.2.

Таблица 5.2

Сводная таблица экспериментальных данных

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Исследуемый материал | Ширина запрещенной зоны, *ΔЕ*∙1019, Дж | *UОБР.MAX ,* В | *Т*, °С | *IОБР ,* А | *IОБР.ОТН.* |
|  |  |  |  |  |  |

5.4. По данным табл. 5.2 построить зависимости *IОБР.ОТН.= f(T)* для всех исследуемых образцов.

5.5. Сформулировать выводы о влиянии ширины запрещенной зоны полупроводникового материала на стабильность работы полупроводниковых приборов при их нагреве. Дать сравнительную оценку исследуемых материалов.

**6. Контрольные вопросы**

6.1. Изобразите энергетические диаграммы проводника, полупроводника и диэлектрика. Покажите, чем они отличаются друг от друга?

6.2. Укажите, ширина запрещенной зоны больше у полупроводника или диэлектрика?

6.3. Какие виды проводимости характерны для полупроводникового материала?

6.4. Что такое проводимость *p* - типа?

6.5. От каких факторов зависит концентрация носителей в полупроводниковом материале?

6.6. Что собой представляет *p-n* переход в полупроводниковом мате-риале?

6.7. За счет чего достигается преимущественно электронная проводимость в полупроводниковом материале?

6.8. За счет чего достигается преимущественно дырочная проводимость в полупроводниковом материале?

6.9. Какую валентность по сравнению с основным проводником должна иметь донорная примесь?

6.10. Какую валентность по отношению к основному полупроводнику должна иметь акцепторная примесь?

6.11. Какой проводимостью обладает полупроводник «*n*»-типа?

6.12. Какой проводимостью обладает полупроводник «*p*»-типа?

6.13. Какой физический смысл имеет ширина запрещенной зоны полупроводникового материала?

6.14. Какие носители считаются основными в легированном полупроводнике: собственные или примесные?

6.15. В чем состоит принцип работы *p-n* перехода?

6.16. Какие носители проходят через *p-n* переход при прямой полярности его включения?

6.17. Какие носители проходят через *p-n* переход при обратной полярности его включения?

6.18. Покажите на графике типовую вольтамперную характеристику полупроводникового диода?

6.19. Почему прямой ток диода гораздо больше его обратного тока?

6.20. Как изменится вид вольтамперной характеристики диода при его нагревании?

6.21. Какой величиной можно оценивать чувствительность полупроводникового прибора к изменению температуры?

6.22. Из каких составляющих складывается обратный ток, протекающий через *p-n* переход?

6.23. Какой физический смысл имеет диффузионная составляющая обратного тока?

6.24. Какой физический смысл имеет генерационно-рекомбинированная составляющая обратного тока?

6.25. Напишите формулу для обратного тока полупроводникового диода.

6.26. Как влияет ширина запрещенной зоны полупроводника на величину обратного тока *p-n* перехода при повышении температуры?

6.27. Изобразите на графике температурную зависимость относительного значения обратного тока при различных значениях E ширины запрещенной зоны.

6.28. Какой порядок значений ширины запрещенной зоны имеют современные полупроводники?

6.29. В чем состоит методика исследования температурной стабильности свойств полупроводниковых диодов?

6.30. Почему исследование температурной зависимости полупровод-никовых приборов проводится при измерении обратного тока, а не прямого тока через *p-n* переход?

**Лабораторная работа № 6**

**Исследование свойств магнитных материалов**

**1. Цель работы**

Изучить влияние состава, структуры и эксплуатационных факторов на основные характеристики ферромагнетиков.

**2. Задачи работы**

2.1. Освоить методику определения основных характеристик магнитных материалов по их предельной петле гистерезиса.

2.2. Установить влияние состава и структуры материала на его магнитные характеристики.

2.3. Исследовать влияние эксплуатационных факторов на величину электрических потерь в магнитных материалах.

**3. Сущность исследуемых вопросов**

3.1. Природа ферромагнетиков

Группу ферромагнитных материалов составляют:

- железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co) и сплавы на их основе – классические ферромагнетики;

- ряд редкоземельных элементов (металлов): гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), которые проявляют ферромагнитные свойства при определенных условиях;

- некоторые сплавы на основе магния (Mg), серебра (Ag), алюминия (Al), самария (Sm).

Ферромагнетики в отличие от пара- и диамагнитных материалов, согласно таблице Д.И. Менделеева, относятся к переходным элементам, у которых нарушен нормальный порядок заполнения электронных оболочек атомов. Наличие у этих материалов недостроенных внутренних оболочек их атомов является причиной появления нескомпенсированного суммарного спинового момента атома. Особенностью ферромагнетиков является и то, что лишь ниже некоторой, вполне определенной для каждого вещества температуры – точки Кюри, проявляется характерное обменное взаимодействие между электронными оболочками соседних атомов. Это взаимодействие, преодолевая разориентирующее влияние тепловых колебаний, ориентирует суммарные спиновые магнитные моменты соседних атомов параллельно друг другу. Так, в ферромагнитном материале возникают области с одинаковой ориентацией спиновых моментов атомов – магнитные домены. Таким образом, магнитный домен представляет собой область в ферромагнитном материале, которая самопроизвольно (спонтанно) намагничена до насыщения. Обычно домены имеют линейные размеры от десятичных долей до нескольких миллиметров.

При отсутствии внешнего магнитного поля полностью размагниченное ферромагнитное тело самопроизвольно разбивается на большое число доменов. Каждый домен всегда намагничен до насыщения. Направления магнитных моментов у всех доменов равновероятны и поэтому суммарный (результирующий) момент тела будет равным нулю.

Соседние домены отделены друг от друга граничными слоями, имеющими толщину от 10-6 до 10-3 мм. В граничных слоях направление вектора намагниченности отдельных атомов плавно изменяется от направления, соответствующего направлению вектора намагниченности одного домена, до направления вектора намагниченности соседнего домена. Такое строение граничных слоев делает границы доменов относительно подвижными.

Известно, что кристаллические тела анизотропные, т.е. их свойства зависят от направления, по которому эти свойства изменяются. Поэтому кристаллы ферромагнитных веществ также обладают магнитной анизотропией, т.е. в них имеются направления легкого и трудного намагничивания. При отсутствии внешнего магнитного поля каждый из доменов намагничен всегда в одном из направлений легкого намагничивания (в железе, например, в направлении, параллельном ребрам его элементарной кристаллической ячейке).

В поликристаллических телах в пределах каждого зерна образуется множество доменов.

3.2. Процессы намагничивания и перемагничивания. Основные характеристики магнитных материалов.

Процесс намагничивания ферромагнетика описывается основной кривой намагничивания, представляющей собой зависимость индукции B в материале от напряженности намагничивающего поля *H*.

Характер функции *B= f(H)* показан на рис. 6.1.

Исходное состояние магнитного материала соответствует его полному размагничиванию, т.е. равновероятному расположению доменов, намагниченных в направлении легкого намагничивания (точка 0 на рис. 6.1).



Слабым полям соответствует участок обратимого смещения границ доменов (точка 2). На этом участке происходит увеличение объема доменов, векторы суммарных магнитных моментов которых образуют наименьший угол с направлением внешнего поля. Рост доменов происходит за счет соседних, путем перемещения границ доменов между ними. Процесс практически является обратимым, т.е. после снятия внешнего поля границы доменов возвращаются в исходное состояние.

На участке необратимого смещения границ между доменами продолжается рост объема одних доменов за счет других, что соответствует крутовосходящему участку основной кривой намагничивания (точка 3).

В области сильных полей, когда процесс смещения границ доменов завершен, дальнейшее намагничивание осуществляется за счет одновременного вращения векторов магнитных моментов доменов от направления легкого намагничивания в более трудное, параллельное полю *H* (точка 4).

Когда все векторы магнитных моментов доменов расположатся параллельно внешнему полю, наступает техническое насыщение. Магнитная индукция, соответствующая техническому насыщению, называется индукцией насыщения *Bs*. Индукция насыщения является одной из важнейших характеристик магнитных материалов. Напряженность поля, соответствующая *Bs,* называется напряженностью поля насыщения *Hs*.

По основной кривой намагничивания можно построить кривую зависимости относительно магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.

Поскольку магнитное состояние вещества описывается уравнением

*B=µО⋅µ⋅H,* (6.1)

где *B*- магнитная индукция (плотность магнитного потока в веществе), Тл (тесла);

H- напряженность намагничивающего поля, А/м;

*µО* – магнитная проницаемость свободного пространства (вакуума), в системе СИ равна 12,56∙10-7 Гн/м;

*µ* - относительная магнитная проницаемость вещества – безразмерная величина (на практике, ради сокращения, слово «относительная» опускается).

То магнитная проницаемость вычисляется по формуле:

*µ* = *B /µО⋅H.* (6.2)

График *M=f(H)* показан на рис.6.1. По этому графику определяют также важные для магнитного материала характеристики – начальную магнитную проницаемость *µН* и максимальную магнитную проницаемость *µMAX.*

При симметричном перемагничивании материала в результате магнитного гистерезиса (отставания изменения индукции от изменения напряженности магнитного поля) кривая *B=f(H)* имеет вид замкнутой петли – петли гистерезиса (рис. 6.2).

Каждому значению амплитуды напряженности поля соответствует определенная (для данного материала) петля гистерезиса. Наибольшая из этих петель, соответствующая насыщению материала в каждом цикле перемагничивания, называется предельной петлей гистерезиса.

По предельной петле гистерезиса измеряются следующие характеристики ферромагнетиков:

- остаточная магнитная индукция *Br* – индукция, которая остается в предварительно намагниченном до насыщения материале после снятия внешнего поля *(H=0)*;

- коэрцитивная сила *Hc* – размагничивающая напряженность магнитного поля, которая должна быть приложена к намагниченному до насыщения материалу для того, чтобы магнитная индукция в нем стала равна нулю *(B=0)*.

Очень важной характеристикой магнитного материала, работающего в переменных магнитных полях, является величина его удельных потерь – представляющая собой мощность, которая затрачивается на перемагничивание 1кг материала.

0

Hc

Br

BS

Рис. 6.2. Семейство петель гистерезиса магнитного материала

-H

H

-B

Предельная петля гистерезиса

B

Удельные потери слагаются в основном из потерь на гистерезис *Pr* (перемагничивание) и потерь на вихревые токи *Pв*, т.е.

*P=Pr+Pв.* (6.3)

Потери на гистерезис прямо пропорциональны площади статической петли гистерезиса и первой степени частоты. При перемагничивании материала с частотой *f*(Гц) потери на гистерезис подсчитываются как

*PГ=f ∫ HdB/γ* , Вт/кг, (6.4)

где *γ* - плотность материала.

Потери на вихревые токи при заданной индукции прямо пропорциональны квадрату частоты и квадрату толщины листа магнитного сердечника и обратно пропорциональны удельному электросопротивлению материала, т.е.

*PB=164d2⋅ f 2⋅ B2MAX/γρ ,* (6.5)

где *BMAX* - амплитуда магнитной индукции, Тл;

*f -* частота переменного тока, Гц;

*d* - толщина листа, м;

γ - плотность, кг/м2;

ρ - удельное электросопротивление; Ом*⋅*м.

3.3 Влияние состава и структуры на магнитные свойства материалов

Магнитные свойства ферромагнетиков в значительной степени зависят от состава и структуры материалов, а также от воздействия эксплуатационных факторов: температуры, частоты, перемагничивания, механических напряжений и др.

Структурно-чувствительными характеристиками магнитных материалов являются:

- начальная и максимальная магнитные проницаемости µMAX  и µН;

- коэрцитивная сила *Hc*;

- остаточная магнитная индукция *Br*;

- ряд других производных от этих характеристик.

К структурно-нечувствительным характеристикам относятся:

- магнитная индукция насыщения *Bs (BMAX)*;

- некоторые другие производные от нее характеристики.

Влияние типа структуры. При образовании твердых растворов замещения возникают искажения кристаллической решетки, которые значительно повышают удельное электросопротивление, что снижает потери магнитных материалов на вихревые токи.

Твердые растворы внедрения характеризуются большими по масштабам искажениями кристаллической решетки, чем в твердых растворах замещения. Эти искажения соизмеримы по своей протяженности с толщиной границ между доменами, и поэтому являются заметным препятствием процессу смещения границ доменов. Как результат снижается магнитная проницаемость, растет коэрцитивная сила, увеличиваются магнитные потери.

Механическая смесь двух или более фаз, из которых одна фаза немагнитна. В этом случае наиболее типичным является резкое снижение магнитной проницаемости, повышение коэрцитивной силы и потери на гистерезис по сравнению с однофазными сплавами близкого состава. Это объясняется тем, что включения (зерна) немагнитной фазы затрудняют смещение границ доменов, делают их более устойчивыми и тем препятствует перемагничиванию материала.

При высокой концентрации очень мелких немагнитных включений в структуре материала коэрцитивная сила и удельные потери могут возрасти в сотни раз по сравнению со значением этих характеристик в однофазных сплавах. Немагнитные включения часто образуются в металлических сплавах при попадании в них углерода, кислорода, серы, азота, образующих с металлами карбиды, оксиды, сульфиды, нитриды. Поэтому в материалах, от которых важно получить высокую магнитную проницаемость, эти элементы недопустимы.

Влияние величины зерна. Границы зерен представляют для смещающихся границ доменов труднопреодолимое препятствие и тем самым затрудняют намагничивание и перемагничивание материалов. Поэтому чем крупнее зерно, тем меньше препятствий перемагничиванию и, как следствие, выше магнитная проницаемость, ниже потери на гистерезис и меньше коэрцитивная сила.

Особый интерес представляет влияние зерна в двухфазных сплавах, если очень мелкие зерна ферромагнитной фазы изолированы немагнитными прослойками. Если размер зерен приближается к предельно малому размеру доменов 0,01-0,1 мкм, то каждое зерно будет представлять собой изолированный от других домен. В этом случае процесс смещения доменов вовсе будет отсутствовать, а намагничивание (перемагничивание) материала будет происходить только путем вращения векторов намагниченности доменов. Материал с такой однодоменной структурой по величине коэрцитивной силы превосходит тот же материал, но с крупным зерном в сотни и тысячи раз.

Влияние наклепа. При наклепе (дробление зерен) резко возрастает количество дефектов кристаллического строения – дислокаций, что затрудняет процесс смещения границ доменов, поэтому магнитная проницаемость снижается, а коэрцитивная сила и удельные потери возрастают.

Влияние кристаллографической текстуры. Преимущественная ориентация кристаллической решетки (текстура) зерна кристаллического тела сообщает ему свойство кристалла – анизотропность. Если текстура такова, что направление внешнего намагничивающего поля совпадает с одним из направлений легкого намагничивания каждого зерна, то намагничивание и перемагничивание осуществляется в основном без участия процесса вращения вектора намагниченности доменов. Кривая намагничивания и петля гистерезиса становится прямоугольными, т.е. *Br* приближается к *Bs*, а величина магнитной проницаемости возрастает (рис. 6.3).

Br

BS

Рис. 6.3. Изменение формы предельной петли гистерезиса в результате создания кристаллографической текстуры;

1 – нетекстурованный материал;

2 – текстурованный материал

*B*

2

*H*

1

**4. Аппаратура и методика исследования**

Лабораторная установка для исследования свойств магнитных материалов (рис. 6.4) состоит из осциллографа, автотрансформатора и исследуемого образца в виде тороида.

На образец магнитного материала намотаны две обмотки *W1* и *W2*. Через обмотку *W1* пропускает переменный ток *I1*. Напряженность поля в магнитном сердечнике (образец материала) равна:

Рис. 6.4. Схема установки для исследования магнитных материалов:

1 – ЛАТР; 2 – образец магнитного материала в виде тороида;

3 – осциллограф

*~*

1

2

3

UY

С

r2

W2

W1

 r1

UX

UН

*H=W1I1/πdСР* , (6.6)

где *W1* – число витков первой обмотки;

*I*1 – ток, протекающий через первую обмотку;

*dСР* – средний диаметр первой тороидальной катушки.

В цепь первичной обмотки включен резистор *r*1. Падение напряжения *Uн* на этом резисторе пропорционально напряженности магнитного поля в сердечнике. Это напряжение попадает на горизонтальные отклоняющие пластины осциллографа.

**5. Порядок выполнения работы**

5.1. В качестве варианта выполнение лабораторной работы может быть проведено с использованием «Автоматизированной лабораторной установки для исследования магнитомягких материалов», которая выполнена на базе персонального компьютера, к которому подключается измерительный блок со сменными образцами магнитомягких материалов (рис. 6.5.). Измерительный блок включает в себя усилитель намагничивания (УН) и интегрирующий усилитель (ИУ), которые используются, соответственно, для формирования напряженности магнитного поля и преобразования сигнала магнитной индукции в образце.



Рис. 6.5.Общий вид стенда

Для ввода/вывода измерительной информации в ПК используется аудио адаптер. С помощью ПК осуществляется управление измерительным экспериментом и наблюдение результатов на экране монитора, как в графическом виде (петли гистерезиса, временные зависимости напряженности и индукции магнитного поля), так и в табличном. Образцы исследуемых материалов подключаются к ИБ через гнезда, установленные на передней панели блока.

Структурная схема измерений приведена на рис. 6.6.

ПК при помощи звуковой карты вырабатывает синусоидальное напряжение в диапазоне частот 40-1000 Гц. Переменное напряжение поступает на вход УН, к выходу которого подключена намагничивающая обмотка МП. МП представляет собой образец исследуемого магнитного материала в форме кольца с намотанными на него двумя обмотками: намагничивающей обмоткой 1 и измерительной обмоткой 2. Напряженность магнитного поля в материале определяется током *I* в намагничивающей обмотке по формуле: *H=I∙n*, где *n* – плотность витков обмотки 1(количество витков/м). Значение тока намагничивания и, следовательно, напряженности поля в образце определяется по значению падения напряжения на измерительном резисторе *R*, который включается последовательно с обмоткой 1.



Рис. 6.6.Структурная схема измерений

Напряжение с измерительного резистора подается на один из линейных входов звуковой карты в ПК. Амплитуда напряженности поля устанавливается программно с помощью элемента регулировки в окне характериографа программного приложения.

ЭДС, наводимая в измерительной обмотке 2 МП, пропорциональна производной от индукции магнитного поля *B* в исследуемом образце. Напряжение обмотки 2 интегрируется ИУ, на выходе которого напряжение измерительного сигнала пропорционально уже непосредственно *B*. Напряжение с выхода ИУ подается на второй линейный вход звуковой карты в ПК. Таким образом, в ПК поступает информация о напряженности *H*, индукции *B* магнитного поля в исследуемом образце и их частоте, на основании которой осуществляется построение кривых намагничивания и расчет всех магнитных параметров материалов.

5.2. При выполнении работы руководствоваться описанием программного интерфейса, который находится на рабочем месте в виде отдельной инструкции.

5.3. Ознакомиться с перечнем исследуемых образцов материалов и испытательным оборудованием.

5.4. Пройти инструктаж по технике безопасности при работе на лабораторной установке.

5.5. Произвести замер геометрических размеров образцов и записать исходные данные для расчетов.

5.6. Произвести испытание образцов магнитных материалов, получив для каждого материала основную кривую намагниченности и предельную петлю гистерезиса.

5.7. Определить магнитные характеристики исследуемых образцов магнитных материалов.

5.8. Построить графики зависимостей магнитных характеристик образцов магнитных материалов от частоты магнитного поля.

**6. Контрольные вопросы**

6.1. Перечислите магнитные материалы, входящие в группу классических ферромагнетиков.

6.2. Какие элементы согласно периодической системе Д.И. Менделеева считаются переходными?

6.3. Почему атомы переходных элементов имеют некомпенсированный суммарный спиновой момент?

6.4. Какой физический смысл имеет температура Кюри для ферромагнитных материалов?

6.5. Как располагаются в пространстве суммарные спиновые моменты соседних атомов ферромагнетика?

6.6. Что понимается под термином «домен» в ферромагнитном материале?

6.7. Какие линейные размеры имеют домены в ферромагнетике?

6.8. Как располагаются в пространстве векторы магнитных моментов в доменах полностью размагниченного ферромагнетика?

6.9. Что собой представляют границы между доменами в ферромагнетике и какую они имеют толщину?

6.10. Какой физический смысл имеет анизотропия свойств для магнитных материалов?

6.11. Покажите на графике основную кривую намагничивания и покажите на ней этапы намагничивания магнитного материала.

6.12. Нарисуйте график зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.

6.13. Какие магнитные характеристики материала определяются по основной кривой намагничивания и зависимости𝜇*=f(H)*?

6.14. Напишите математическое выражение зависимости магнитной индукции в материале от напряженности магнитного поля.

6.15. Какой механизм намагничивания магнитного материала характерен при воздействии слабых магнитных полей?

6.16. Какой механизм намагничивания магнитного материала характерен для сильных магнитных полей?

6.17. Какой физический смысл имеет относительная магнитная проницаемость?

6.18. Какой физический смысл имеет магнитный гистерезис?

6.19. Изобразите семейство петель гистерезиса ферромагнетика.

6.20. Изобразите предельную петлю гистерезиса и покажите основные магнитные характеристики, которые определяются по этой петле.

6.21. Дайте определение остаточной магнитной индукции.

6.22. Какой физический смысл несет характеристика коэрцитивная сила?

6.23. Какой физический смысл имеет характеристика «удельные потери» в ферромагнетике?

6.24. Из каких составляющих складываются магнитные потери?

6.25. Как зависят потери на вихревые токи в магнитных материалах от изменения частоты магнитного поля и удельного электрического сопротивления материала?

6.26. Какие магнитные характеристики материала являются структурно-чувствительными, а какие нет?

6.27. В каком направлении меняются свойства магнитных материалов при образовании на их основе твердых растворов замещения?

6.28. В каком направлении изменяется удельное электрическое сопротивление магнитных материалов при образовании на их основе сплавов – твердых растворов?

6.29. Какое влияние на магнитные свойства материалов оказывает размер зерна?

6.30. Какое влияние на магнитные свойства материалов оказывает наклеп?

**Лабораторная работа №7**

**Исследование звукопоглощающей способности авиационных материалов**

1. **Цель работы**

Изучить влияние состава и структуры материалов на их звукопоглощающие свойства.

1. **Задачи работы**

Освоить методику определения звукопоглощающих свойств материалов авиационной техники.

1. **Сущность исследуемых вопросов**

В связи с наличием мощных и сверхскоростных самолетов проблема уменьшения шума реактивных двигателей становится все более острой. Одним из решений этой проблемы является поиск эффективных звукопоглощающих авиационных материалов.

Основным источником шума на современном самолете является двигатель. Двигатели современных лайнеров развивают суммарную мощность до 360000 л.с., и реактивный самолет при взлете создает такой же шум, как, примерно, 10000 мотоциклов.

Высокочастотные составляющие шума генерируются за счет интенсивных срезающих усилий вблизи сопла, где формируются небольшие скоростные вихри. Низкочастотные шумы вызываются большими «медленными» вихрями, распространяющимися на незначительные расстояния за выхлопной струей.

Помимо шума от выхлопной струи у сверхзвуковых реактивных двигателей есть и другие источники шума, например, если, проходя через сопло, струя не расширяется и давление в ней не падает до давления окружающего воздуха, то генерируется широкополосный шум.

Большинство современных турбореактивных двигателей используют компрессорный вентилятор в воздухозаборнике со сверхзвуковой скоростью лопаток. Такой вентилятор создает отчетливо слышимый звук, характерный для работы пилы; этот звук, например, слышится перед приближением самолета.

Уровень шума определяется относительно минимального звукового давления *P0*, воспринимаемого ухом по формуле:

$n=20lg\frac{P}{P\_{0}} ,$ (7.1)

где *n* – уровень шума в децибелах;

*P* – звуковое давление, создаваемое источником шума;

*P0*=0,0002 дн/см2

Наряду с конструктивными решениями, уменьшающими шумы двигателей, используются звукопоглощающие авиационные материалы.

Для относительного сравнения двух звуковых волн, имеющих интенсивность *I1*и *I2,* используется величина, называемая децибелом и равная

$10lg\frac{I\_{1}}{I\_{2}}$.

Следовательно, если интенсивность звуковой волны *I1* в 10 раз больше *I2,* т.е. *I1=*10 *I2,* то относительная разница в децибелах будет равна *h=*10 дБ. Для *I1=*100 *I2*, *h=*20 дБ.

Ослабление звуковых волн при прохождении через материал характеризуется коэффициентом поглощения звука (дБ/см) и выражается следующей формулой:

$I\_{d}=(I\_{0}-I\_{1})e^{-\frac{kd}{a}}$ , (7.2)

где *Id*  - интенсивность звуковой волны после прохождения материала толщиной d (рис. 7.1);

*I0* – первоначальная интенсивность звука;

*I1* – интенсивность отраженного звука;

*d* – толщина звукопоглощающего материала, см;

*k* – коэффициент поглощения звука, дБ/см;

*a* = 4,34.

Интенсивность отраженного звука *I1* пропорциональна *I0*, т.е.

Рис. 7.1. Ослабление звука при прохождении материала

*k*

*d*

*I0*

*Id*

*I*

$I\_{1}=k\_{1}⋅I\_{0} ,$ (7.3)

где *k1* – коэффициент отражения звука от поверхности материала.

 Так как величина *k1* не зависит от толщины материала, а определяется только свойствами поверхности материала и условиями падения звуковой волны, то производя измерения интенсивности звуковой волны *Id* для материала различной толщины (*Id1* и *Id2*) можно определить и величину *k* (поглощение звука) и величину *k1* (отражение звука).

Из формулы (7.2) и (7.3) имеем:

$I\_{d1}=I\_{0}(1-k\_{1})e^{-\frac{kd1}{a}}$;

$I\_{d2}=I\_{0}(1-k\_{1})e^{-\frac{kd2}{a}}$. (7.4)

Отсюда величина *k* определяется из

$ln\frac{I\_{d1}}{I\_{d2}}=-\frac{k}{a}\left(d\_{1}-d\_{2}\right),$ (7.5)

т.е. $k=-\frac{a}{d\_{1}-d\_{2}}ln\frac{I\_{d1}}{I\_{d2}}$ . (7.6)

Значение коэффициента отражения звука определяется из уравнения

$k\_{1}=(1-\frac{I\_{d1}}{I\_{0}} )e^{\frac{k\_{d1}}{a}}$ . (7.7)

Следует учитывать, что значения коэффициентов *k* и *k1* зависят от частоты звука; в твердых телах *k* приблизительно пропорционально частоте, а в жидких – квадрату частоты. Усредненные по частотам *k*  для некоторых материалов приведены в табл.7.1.

Таблица 7.1

|  |
| --- |
| Постоянная затухания в некоторых твердых телах |
| **Материал** | **К, дБ/см** |
| Алюминий | 0,187 |
| Каучук натуральный | 0,13 |
| Дуралюмин | 0,1 |
| Нейлон | 1,0 |
| Поливинил | 1,0 |
| Полистирол | 1,77 |
| Полиэтилен | 4,7 |
| Сталь инструментальная | 0,43 |

**4. Аппаратура и методика исследования**

Исследование звукопоглощающих способностей материала производится на установке, блок-схема которой показана на рис.7.2.

Предварительно измеряются значения интенсивности звукового сигнала, не ослабленного материалом *I0*, и записывается ее значение. Далее измеряется интенсивность сигнала после помещения звукопоглощающей перегородки *Id1* и *Id2*. Зная толщину материала *d1­* и *d2* по формуле (7.6) вычисляется значение *k*, а по формуле (7.7) – значение *k1.*

Полученные в исследовании экспериментальные результаты обобщаются в табл. 7.2.

*Uвх*

Микрофон

Рис. 7.2. Лабораторная установка

*Id*

Генератор

Осциллограф

Динамик

*f*

*U­вых*

Таблица 7.2

Сводная таблица экспериментальных данных

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № п/п | Исследуемый материал | Толщина материала, см | Состав | Удельный вес, г/см3 | Рабочая температура, °С |
| 1. | Войлок «АТИМ» | 0,5; 1 | Изготовлен из овечьей шерсти | 0,13 | до 200 |
| 2. | Пенопласт (пенополистирол) ПС-1 | 3,6 | Продукт полимеризации стирола | 0,1 | до 60-70 |
| 3. | Органическое стекло | 1,2 | Продукт полимеризации метилметакрилата | 1,18 | до 60 |
| 4. | Винипласт | 0,5; 1 | Переплавленный поливинилхлорид | 1,4 | до 120 |
| 5. | Пенопласт ПВХ-1 | 3,6 | Поливинилхлорид | 0,2 | до 60 |
| 6. | Вакуумная резина 7889 | 2,4 | Продукт вулканизации каучука | 0,92 | до 90 |
| 7. | Дуралюмин Д16 | 0,1; 0,3 | *Cu -4.3%**Mg-1.5%**Mn-0.6%*остальные *-Al* | 2,7 | до 350 |

Зависимость *n* от частоты строится в координатах *n = P(f)*

**5. Порядок выполнения лабораторной работы**

5.1. Изложить цель работы

5.2. Произвести определение коэффициента поглощения звука *k* и коэффициента отражения звука *k1* материалов на частоте 1 кГц.

5.3. Исследовать частотную зависимость коэффициента *k* в диапазоне частот от 50 Гц до 10 кГц. Для этого необходимо при каждом значении частоты определить значение *k* и построить зависимость *n = P(f);* напряжение выхода звукового сигнала *Uвых* следует всегда поддерживать постоянным, равным 0,5V. Интенсивность прошедшей звуковой волны измеряется с помощью осциллографа следующим образом: устанавливается частота, соответствующая частоте звукового сигнала, и измеряется амплитуда звуковой волны на экране прибора А. Интенсивность определяется из соотношения *I≈A2*. При этом необходимо учитывать коэффициент деления входа осциллографа.

5.4. Установить связь между плотностью материалов и величин *k.*

**6. Контрольные вопросы**

6.1. В каких единицах измеряется относительный уровень шума?

6.2. Приведите характеристики источников шума на самолете.

6.3. Какие конструктивные методы борьбы с шумами применяются в авиации?

6.4. Как зависит интенсивность звуковой волны, прошедшей через материал, от :

а) толщины материала;

б) интенсивности падающей волны;

в) коэффициента удельного звукопоглощения?

6.5. Как зависит коэффициент удельного звукопоглощения от частоты падающего звука?

6.6. Какие звукопоглощающие материалы используются в гражданской авиации?

Литература

1. Материалы для авиационного приборостроения и конструкций / под ред. А.Ф. Белова. - М.: Металлургия, 1982г.
2. П.С. Давыдов, П.А. Иванов. Эксплуатация радиоэлектронного оборудования: справочник. - М.: Транспорт, 1990г.
3. Ремонт авиационной техники (теория и практика) / под ред. Г.А. Кручи-нского. - М.: Машиностроение, 1984г. – Кн.V.
4. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Кориц-кого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. - Л.: Энергия, 1976г. - Т.3.
5. Тихомиров И.Н. Учебное пособие. - М.: МГТУ ГА, 1996г.
6. Тихомиров И.Н., А.В. Мымриков. Материаловедение и технология конструкционных материалов. - М.: МГТУ ГА, 1996г. - Ч. I, 1997г. - Ч. II.