

Міністерство освіти і науки України  
Чернігівський промислово-економічний коледж  
Київського національного університету технологій та дизайну

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з НР

\_\_\_\_\_ С.В.Бондаренко

\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Методичні вказівки щодо організації  
самостійної роботи студентів  
з дисципліни Конструкційні та електротехнічні матеріали  
спеціальності 5.05070104 «Монтаж і експлуатація  
електроустаткування підприємств і цивільних споруд»**

Уклав

О.І. Богдан

Розглянуто на засіданні  
циклової комісії  
спеціальних електротехнічних дисциплін  
Протокол №\_\_ від \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

Голова циклової комісії

В.В. Олійник

## Самостійна робота №1

**Тема:** Загальні відомості про магнітні матеріали

**Мета:** ознайомлення з загальними відомостями про магнітні

### Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Фізична суть намагнічення. Формула і одиниці намагнічення.
- 2 Фізична суть магнітної сприйнятливості.
- 3 Класифікація речовин за магнітними властивостями.

### Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### Питання для самоконтролю:

- 1 Яка фізична суть намагнічення. Формула намагнічення.
- 2 Яка фізична суть магнітної сприйнятливості.
- 3 Охарактеризуйте класифікацію речовин за магнітними властивостями.
- 4 Наведіть приклади діамагнетиків, парамагнетиків, антиферомагнетиків, феромагнетиків.

Кожна речовина при приміщенні її в магнітне поле здобуває деякий магнітний момент  $M$ . Магнітний момент одиниці об'єму речовини називають *намагніченістю*:

$$J_M = M/V \quad (4.1)$$

При нерівномірному намагнічуванні речовини

$$\mathbf{J}_M = \mathbf{d} M / dV.$$

Намагніченість є векторною величиною. В ізотропних речовинах вона спрямована паралельно або антипаралельно напруженості магнітного поля. У системі СІ намагніченість виражається в одиницях напруженості магнітного поля (А/м).

З напруженістю магнітного поля намагніченість зв'язана співвідношенням:

$$\mathbf{J}_M = k \mathbf{H} \quad (4.2)$$

де  $k$  - безрозмірна величина, що характеризує здатність речовини намагнічуватися в магнітному полі й називається **магнітною сприйнятливістю**. Вона чисельно дорівнює намагніченості при одиничній напруженості поля. Намагнічене тіло, що перебуває в зовнішньому полі, створює власне поле, яке в ізотропних матеріалах спрямоване паралельно або антипаралельно зовнішньому полю. У зв'язку з цим *магнітна індукція* в речовині визначається алгебраїчною сумою індукції зовнішнього й власного полів:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_o + \mathbf{B}_i = \mu_o \mathbf{H} + \mu_o \mathbf{J}_M \quad (4.3)$$

де  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  - магнітна постійна в системі СІ.

Підставивши значення намагніченості в рівняння (4.3), одержимо

$$\mathbf{B} = \mu_o \mathbf{H} (1 + k_M) = \mu_o \mu_r \mathbf{H} \quad (4.4)$$

де  $\mu_r$  - відносна магнітна проникність, що показує, в скільки разів магнітна індукція поля в даному середовищі більша, ніж магнітна індукція у вакуумі.

Причиною магнітних властивостей речовини є внутрішні сховані форми руху електричних зарядів, що являють собою елементарні кругові струми, які володіють магнітними моментами. Такими струмами є електронні спіни й орбітальне обертання електронів в атомах. Магнітні моменти протонів і нейтронів у багато разів менше магнітного моменту електрона. Тому магнітні

властивості речовини повністю визначаються електронами.

Класифікація речовин за магнітними властивостями. Всі речовини за реакцією на вплив зовнішнього магнітного поля можна розділити на наступні групи:

- діамагнетики,
- парамагнетики,
- феромагнетики,
- антиферомагнетики
- феримагнетики.

До **діамагнетиків** відносяться речовини, в яких магнітна сприйнятливість негативна й не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Діамагнітний ефект обумовлений незначною зміною кутової швидкості орбітального обертання електронів. Якщо електронну орбіту розглядати як замкнений контур, який не володіє активним опором, то під дією зовнішнього поля в цьому контурі змінюється сила струму й виникає додатковий магнітний момент. Відповідно до закону Ленца цей момент спрямований назустріч зовнішньому полю. У тому випадку, коли площа електронної орбіти розташована не перпендикулярно до вектора  $H$ , то зовнішнє магнітне поле викликає прецесійний рух орбіти навколо напрямку  $H$ . При цьому вектор орбітального магнітного моменту описує конус. Кутова швидкість прецесії визначає значення негативного магнітного моменту ДМ. **Діамагнітний ефект** має місце у всіх речовинах, але виступає на перший план у тих випадках, коли власний момент атомів дорівнює нулю, тобто спінові магнітні моменти попарно скомпенсовані.

Чисельне значення магнітної сприйнятливості діамагнетиків становить -  $(10^6-10^{-7})$ . Відносна магнітна проникність цих речовин незначно відрізняється від одиниці .

Зовнішнім проявом діамагнітного ефекту є виштовхування цих речовин

з неоднорідного магнітного поля.

Рисунок 1.1 – Процесія електронних орбіт під дією магнітного поля



До діамагнетиків належать інертні гази, водень, азот, вода, мідь, срібло, золото, цинк, ртуть і т.д. Діамагнетиками є також речовини в надпровідному стані.

До парамагнетиків відносяться речовини з позитивною магнітною сприйнятливістю, що не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. У парамагнетиках атоми мають елементарні магнітні моменти навіть при відсутності зовнішнього магнітного поля, однак через тепловий рух ці магнітні моменти розподілені хаотично, в результаті чого намагніченість речовини в цілому дорівнює нулю. Зовнішнє магнітне поле викликає переважну орієнтацію магнітних моментів атомів в одному напрямку, але теплова енергія протидіє створенню магнітної впорядкованості. У зв'язку з цим парамагнітна сприйнятливість сильно залежить від температури. При нормальній температурі магнітна сприйнятливість парамагнетиків дорівнює  $10^{-3} - 10^{-6}$ . Тому їхня магнітна проникність незначно відрізняється від одиниці ( $\mu > 1$ ). Завдяки позитивній намагніченості парамагнетики, вміщені в неоднорідне магнітне поле, втягуються в нього.

Парамагнетиками є кисень, лужні й луго-земельні метали, солі заліза, кобальту нікелю і т.д.

До феромагнетиків відносяться речовини з великою позитивною магнітною сприйнятливістю (до  $10^6$ ), що сильно залежить від напруженості магнітного поля й температури. Для феромагнетиків характерна внутрішня магнітна впорядкованість, що полягає в існуванні макроскопічних областей з паралельно орієнтованими магнітними моментами атомів. Ці речовини здатні намагнічуватися до насичення у відносно слабких магнітних полях.

*Антиферомагнетиками* є речовини, в яких нижче деякої температури виникає антипаралельна орієнтація елементарних магнітних моментів однакових атомів або іонів кристалічних решіток. Вони характеризуються незначною позитивною магнітною сприйнятливістю ( $10^{-5} - 10^{-6}$ ), що дуже залежить від температури. При нагріванні антиферомагнетик випробовує фазовий перехід у парамагнітний стан. Температура такого переходу, при якій зникає магнітна впорядкованість, називається точкою Нееля або *антиферомагнітною точкою Кюрі*.

Усього відомо близько тисячі з'єднань з властивостями антиферромагнетиків. Представниками *антиферомагнетиків* є *хром, марганець, германій і т.д.* До *феримагнетиків* відносяться речовини, магнітні властивості яких обумовлені некомпенсованим антиферомагнетизмом. Як і феромагнетики, вони мають високу магнітну сприйнятливість, що істотно залежить від напруженості магнітного поля й температури.

До феримагнетиків відносяться різні оксидні з'єднання, серед яких найбільший практичний інтерес мають *ферити*.

Діа-, пара- і антиферомагнетики можна об'єднати в групу *слабкомагнітних* речовин. Феро- і феримагнетики є *сильномагнітними* речовинами.

## Самостійна робота №2

**Тема:** Процеси технічного намагнічення і перемагнічення магнітних матеріалів

**Мета:** ознайомлення з загальними відомостями намагнічення і перемагнічення магнітних матеріалів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Процес виникнення намагнічення феромагнетика.
- 2 Крива намагнічення феромагнетика.

3 Суть петлі гістерезису.

**Практичне завдання:** нарисувати петлю гістерезиса.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

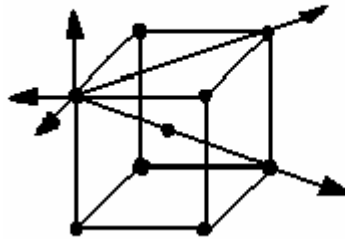
2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Яка виникає процес намагнічення феромагнетика.
- 2 Охарактеризуйте основні ділянки кривої намагнічення.
- 3 Охарактеризуйте суть петлі гістерезису.

У монокристалах феромагнітних речовин існують напрямки легкого й важкого намагнічування. Число таких напрямків визначається симетрією кристалічних решіток. У відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів мимовільно орієнтуються уздовж однієї з осей легкого намагнічування.

Легке  $\{100\}$                       Середнє  $\{110\}$



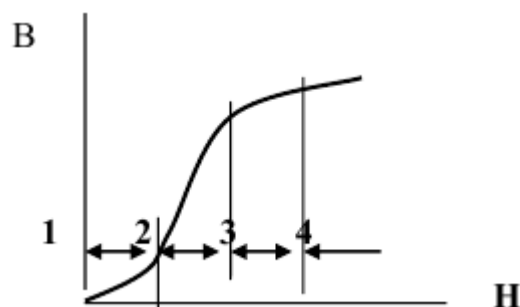
Важке  $\{111\}$

Рисунок 2.1 – Напрямки легкого, середнього та важкого намагнічення в монокристалі заліза

Елементарна комірка заліза являє собою об'ємноцентрований куб. Напрямок легкого намагнічування збігається з ребром куба. Отже у монокристалі заліза можна виділити шість еквівалентних напрямків легкого намагнічування. Для намагнічування монокристалічного зразка до насичення уздовж однієї з осей легкого намагнічування треба затратити значно меншу енергію, ніж для такого ж намагнічування уздовж осі важкого намагнічування.

Залежність магнітної індукції макрооб'єму феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля називають *кривою намагнічування* (рис. 2.2). Зростання індукції під дією зовнішнього поля обумовлено двома основними процесами: зсувом доменних границь і поворотом магнітних моментів доменів.

Початковій ділянці кривої (область 1) відповідає оборотне (пружне) зміщення границь доменів. При цьому відбувається збільшення об'єму тих доменів, магнітні моменти яких утворюють найменший кут з напрямком зовнішнього поля і зменшення розмірів доменів з несприятливою орієнтацією вектора спонтанної намагніченості. Після зняття слабкого поля границі доменні повертаються в колишнє положення.





## Рисунок 2.2 – Крива намагнічення феромагнетика

В області більш сильних полів (область 2) зсув доменних границь має необоротний, стрибкоподібний характер. На ділянці необоротного зсуву доменних границь крива намагнічування має найбільшу крутизну.

При подальшому збільшенні напруженості магнітного поля зростає роль другого механізму намагнічування - механізму обертання, при якому магнітні моменти доменів з напрямку легкого намагнічування поступово повертаються в напрямку поля (область 3).

Коли всі магнітні моменти доменів орієнтуються уздовж поля, наступає технічне насичення намагніченості (область 4). Незначне зростання індукції на ділянці насичення обумовлено складовою частиною  $\mu_0 H$  (2.1) і збільшенням намагніченості самого домену. Це явище одержало назву *парапроцесу* або *істинного намагнічування*. Строго паралельне розташування спінових моментів у домені можливе тільки при температурах, близьких до абсолютного нуля. При підвищенні температури за рахунок теплової енергії впорядкованість у розташуванні спінів порушується. Зовнішнє поле повертає спіни до паралельної орієнтації. Цим досягається ефект збільшення намагніченості.

На відміну від істинного намагнічування, зростання індукції за рахунок зсуву доменних границь і обертання магнітних моментів називають *технічним намагнічуванням*.

Із кривої намагнічування можна визначити статичну (відносну) магнітну проникність. Вона пропорційна тангенсу кута нахилу січної, проведеної з початку координат через відповідну точку на основній кривій намагнічування.

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (2.1)$$

Граничне значення магнітної проникності при напруженості магнітного поля, що прагне до нуля, називають *початковою магнітною проникністю*  $\mu_n$

Експериментально її визначають у слабких магнітних полях з напруженістю порядку 0,1 А/м.

Крутизна окремих ділянок кривої намагнічування і гілок петлі гістерезису характеризують диференціальною магнітною проникністю

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (2.2)$$

У тому самому зразку максимальне значення диференціальної проникності завжди перевищує максимальне значення статичної магнітної проникності. Якщо феромагнетик намагнітити до насичення  $B_s$ , а потім відключити зовнішнє поле, то індукція в нуль не обернеться, а прийме деяке значення  $B_r$ , яке називається залишковою індукцією. Щоб усунути залишкову індукцію, необхідно прикласти магнітне поле протилежного напрямку. Напруженість розмагнічуваного поля, при якій індукція в зразку, попередньо намагніченому до насичення, обертається в нуль, називається коерцитивною силою. Зміна магнітного стану феромагнетика при його циклічному перемагнічуванні характеризується явищем гістерезису, тобто відставанням індукції від напруженості поля. Для різних амплітудних значень напруженості зовнішнього поля можна одержати сімейство петель гістерезису. Петлю гістерезису, отриману при індукції насичення, називають граничною. При подальшому зростанні поля площа петлі гістерезису залишається незмінною.

Залишкова індукція і коерцитивна сила є параметрами граничної петлі гістерезису. Сукупність вершин петель гістерезису утворює основну криву намагнічування феромагнетика.

### Самостійна робота №3

**Тема:** Аморфні металеві сплави, процес утворення та їх структура

**Мета:**

- 1 Ознайомлення з аморфними металевими сплавами
- 2 Опанування процесу утворення та структури аморфних сплавів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Історія відкриття металевих стекол.
- 2 Структура аморфного стану.
- 3 Утворення аморфних матеріалів.
- 4 Протікання процесу аморфізації.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте історію відкриття металевих стекол.
- 2 Охарактеризуйте структуру аморфного стану.
- 3 Опишіть утворення аморфних матеріалів.
- 4 Поясніть процес протікання аморфізації.

### **Історія відкриття металевих стекол**

Перші роботи про отримання аморфних плівок при використанні вакуумного напилення з'явилися в 50-і роки. Пізніше аморфні сплави були отримані методом електроосадження сплавів системи Ni-P. У 1959 р. Була отримана дуже тонка фольга першого металевого скла сплаву Au+Si. Під керівництвом Дювеза, при використанні методу „пострілу”, учені отримали невелику кількість швидко загартованої фольги (луски), структура якої, як показав рентгено-структурний аналіз, була однофазним твердим розчином з

границированою кристалічною решіткою, утворення якого неможливе врівноважних умовах. Проте повторити експеримент було дуже складно, оскільки установка була поспішно зібрана з скляних трубок. А отримана аморфна фольга була дуже нестабільною.

У 1960 р. Ученими Салі і Мірошніченко був розроблений спосіб отримання аморфних сплавів шляхом двостороннього охолодження розплавів. Швидкості охолодження розплаву, що досягаються, складали  $\sim 10^6$  К/с.

Коен і Теренбелл показали, що аморфний склад Au-Si близький до складу сплаву з дуже низькою евтектичною крапкою на рівноважній діаграмі. Встановлена проста умова формування аморфних металевих сплавів - глибока евтектика на рівноважних діаграмах стану, що у свою чергу полегшило пошук систем і складів, які можуть аморфізуватися при загартуванні з розплаву.

### **Структура аморфного стану**

Відразу ж після отримання аморфних металевих сплавів (АМС) виникли питання, пов'язані з їх атомною структурою. Чи змінився структурний хаос атомів, властивий рідкому стану, при швидкому охолодженні? Якщо змінився, то яким став новий структурний безлад? Нажаль, відповіді на ці питання непрості. Трудності посилюються тим, що до теперішнього часу немає прямих експериментальних методів, які могли б дати однозначну відповідь про структуру аморфних сплавів. Проте за допомогою рентгенівської, нейтронної, електронної дифракції було показано, що в АМС є більш-менш чітко обумовлений на відстані двох-трьох сусідніх атомів так званий ближній порядок. Щоб розібратися в суті цього поняття, скористуємося модельними уявленнями, які служать для ілюстрації просторового розположення атомів в кристалічних ґратах. В таких моделях атоми вважаються кульками. Структура кристала утворюється в результаті багаторазового повторення в трьох напрямках одиничної елементарної комірки. Елементарна комірка представляє собою групу атомів, взаємне розташування яких однозначно

визначено. Подані моделі структури кристала, елементарної коміркою якої служить група з восьми атомів, розташованих у вершинах куба. Переміщуючи елементарну комірку вздовж трьох взаємно перпендикулярних напрямків, можна побудувати весь об'ємний кристал. Розміщення атомів у вигляді нескінченних рядів, що йдуть далі, називають дальнім порядком.

Повернемося до визначення ближнього порядку. Вважається, що в аморфному металевому сплаві елементарна комірка, характерна для кристалічного стану, також зберігається. Однак при стикуванні елементарних комірок в просторі порядок їх порушується, і стрункість лав атомів, характерна для далекого порядку, відсутня. У цьому легко переконатися, уважно подивившись на модель, представлену на рис. 3, б. Ця структура отримана за допомогою комп'ютерного моделювання. Видно елементарні комірочки, що складаються з восьми атомів, характерні для ближнього порядку. При цьому дальній порядок, очевидно, відсутній.

Близький порядок, який лежить в основі структури аморфних сплавів, є метастабільною системою. При нагріванні до температури кристалізації  $T_x$  він перебудовується в звичайну кристалічну структуру. У середньому для більшості аморфних сплавів  $T_x$  знаходиться в межах 650-1000 К. На щастя, при кімнатній температурі аморфні сплави можуть зберігати структуру і властивості протягом сотень років.

Особливості структури АМС позначилися і на багатьох фізичних властивостях. Так, незважаючи на те що щільність аморфних сплавів на 1-2% нижче щільності кристалічних аналогів, міцність їх вище в 5-10 разів. Більш висока міцність пов'язана з тим, що в АМС відсутні такі дефекти, як дислокації і межі зерен, властиві кристалічному стану. Навіть вакансії (порожні місця, що утворюються при видаленні атомів з вузлів кристалічної решітки) в аморфних сплавах мають іншу форму і розміри. Вони більше схожі на порожнечі чечевицеподібної форми. Їх називають вакансіонноподібними дефектами. Ці пустоти мають вигляд вузьких щілин, і в них не може розміститися атом.

Наявність таких дефектів сильно ускладнює дифузію (проникнення атомів) через аморфні металеві шари.

Безлад розташування атомів у вигляді ближнього порядку впливає на електропровідність металевих стекл. Їх питомий електричний опір у 3-5 разів вище, ніж у кристалічних аналогів. Це пов'язано з тим, що при русі електронів через нерегулярну структуру АМС вони відчувають набагато більше зіткнень з іонами, ніж у кристалічній решітці.

### **Утворення аморфних матеріалів**

Нанокристалічна тверда фаза відповідає граничному стану метастабільного твердого тіла і може бути отримана різними способами, включаючи тверднення з рідкої або газоподібної фази, хімічне осадження з розчину, опромінювання кристалічного матеріалу високоенергетичними іонами або нейтронами. Некристалічне тверде тіло, отримане безперервним охолодженням з рідини, називають склом або аморфним твердим тілом. Аморфізація розплаву вимагає, щоб розплав був охолоджений з достатньо великою швидкістю, з метою придушення процесів кристалізації і отримання розупорядочного розташування атомів.

Процеси кристалізації легко пригнічуються у ряді неметалічних матеріалів (силікати, органічні полімери). У цих матеріалів, за рахунок природи міжатомних зв'язків, розплав може перейти в скло при достатньо малих швидкостях охолодження ( $<10^2$  К/с).

У металевих розплавах немає направлених зв'язків і атомні перебудови протікають дуже швидко навіть при великих ступенях охолодження нижче рівноважної температури твердіння. Проте, дуже високі швидкості охолодження ( $>10^6$  К/с) дозволяють отримувати аморфний стан сплаву, а в багатокомпонентних системах аморфні металеві фази можуть бути отримані при нижчих швидкостях охолодження.

### **Протікання процесу аморфізації**

При плавленні металу або сплаву кристалічна решітка руйнується і в рідині атоми коливаються навколо позицій, які постійно і швидко взаємно

перерозподіляються. При плавленні рідка і тверда фази знаходяться в рівновазі, ентальпія і ентропія зазнають стрибкоподібну зміну. При температурах вище за точку кристалізації рідка фаза знаходиться в стані внутрішньої рівноваги і нездібна чинити опір зсувній напрузі. Металевим розплавам характерна в'язка текучість, тоді як розплави силікатів, боратів і ін. подібних речовин володіють дуже низькою текучістю, тобто мають високу в'язкість.

При охолодженні, перш ніж почнуться процеси кристалізації, рідка фаза повинна переохолоджуватися нижче за рівноважну температуру кристалізації, для подолання енергетичного бар'єру потрібного для створення кристалічного зародка. Ступінь переохолодження розплаву залежить від ряду чинників, включаючи первинну в'язкість розплаву, швидкість її зростання при зниженні температури; температурну залежність різниці вільних енергій рідкої і кристалічної фаз; щільність і ефективність центрів гетерогенного зародкоутворення; швидкість охолодження.

При видаленні з розплаву центрів гетерогенного зародження (домішок), швидкість росту кристалів залишається дуже високою, і у разі малої швидкості відведення тепла в навколишнє середовище відбувається швидке заповнення об'єму кристалічною фазою. Якщо ж розплав охолодити швидко (забезпечивши ефективний тепловідвід) впливу джерел гетерогенного зародження кристалів важко, а у разі ще більшого збільшення швидкості охолодження переохолодження ще більше зростає і швидкість до кристалізації знижується. Т.ч., істотно скорочується температурний інтервал в якому протікає процес кристалізації, що викликає зміну структури, що формується при охолодженні. Спочатку відбувається подрібнення мікрокристалічної структури, а потім, залежно від складу сплаву, відбувається розширення розчинності в твердому розчині і утворюються метастабільні кристалічні фази. І якщо швидкість охолодження дуже висока, кристалізація пригнічується і відбувається уповільнення не тільки процесів зростання

кристалів, але і їх зародження. В'язкість при охолодженні розплавів безперервно зростає.

Не дивлячись на те, що рушійні сили кристалізації постійно збільшуються, вони проте компенсуються рухливістю атомів, що швидко знижується, яка домінує при дуже великих значеннях переохолодження. В результаті атомна конфігурація набуває нерівноважного характеру і при так званій температурі оскляння  $T_g$  виявляється гомогенно замороженою. Замерзання аморфної структури, як правило, відбувається при в'язкості рівною 012.

На практиці одному сплаву може відповідати декілька аморфних структур, оскільки температура і структура, при яких відбувається відхилення від стану рівноваги, залежать від швидкості охолодження. Тобто значення  $T_g$  аморфна структура залежать від швидкості охолодження. Зміна швидкості охолодження приводить до того, що на стадії релаксації при подальшому нагріві сплав матиме різний характер поведінки. Аналіз дифракційних картин показує, що атомна структура аморфного сплаву вельми близько відтворює статичну структуру рівноважної рідини поблизу точки замерзання. Таким чином процес аморфізації рідкої фази полягає в придушенні зародження кристалів при охолодженні, або, як ще говорять, в запобіганні утворенню частини кристалічної фази, що експериментально виявляється. Схильність до утворення аморфної фази визначається кінетикою процесу зародження або кінетикою ранніх стадій зростання кристалів.

#### **Самостійна робота №4**

**Тема:** Класифікація чавунів і феритів

**Мета:** ознайомлення з загальними відомостями отримання феритів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

1 Класифікація чавунів.



## 2 Класифікація феритів.

### Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

### Питання для самоконтролю:

- 1 Охарактеризуйте різновиди чавунів.
- 2 Охарактеризуйте різновиди феритів.

Відносно магнітних властивостей чавуни і сталі можна поділити на матеріали магнітні і немагнітні. До перших відносяться сірий чавун, вуглецеві та леговані сталі, до других - немагнітні сталі та немагнітний чавун.

**Сірий чавун** застосовується для виливків корпусів електричних машин, закріплювальних деталей, плит тощо. Іноді їм потрібна термічна обробка, така як відпал. Вали, обертаючі деталі електричних машин, станини машин, які піддаються вібраціям, не бажано виготовляти з чавуну. Для цих деталей необхідна **сталь**, яка має підвищену міцність. Для виливків, звичайно, застосовується вуглецева сталь з вмістом від 0,08 до 0.2 % вуглецю, які піддають повільному відпалу при температурі 850-900 ° С. Для особливо відповідальних і спеціальних електричних машин, а також для машин з полегшеною конструкцією потрібна легована сталь з підвищеними механічними властивостями - легована нікелем, ванадієм, хромом,

молібденом Вироби із легованої сталі після гартування для зняття напружень повинні піддаватися високому відпуску 550-650°C.

**Немагнітний чавун** застосовується в тих випадках, коли наявність магнітних властивостей в конструкційному матеріалі може пошкодити роботі приладу чи апарату.

**Немагнітну сталь** виготовляють шляхом додавання до складу сталі нікелю і мангану, які зменшують температуру алотропічних перетворень на 20 °С. Немагнітна сталь застосовується для виготовлення тих деталей, які раніше виготовлялись з кольорових металів.

Особливу роль відіграють спеціальні марки феритів для СВЧ. В цій області частот, в першу чергу, використовуються можливості керування електричними і магнітними параметрами феритів. На СВЧ застосовуються нікелеві, магнієві ферити, магнієві фероамонікати тощо.

**Ферити** - це магнітна кераміка з незначною електропровідністю. Великий питомий опір, який перевищує питомий опір заліза в  $10^6$  -  $10^{11}$  разів, а відповідно, невеликі втрати енергії забезпечують дуже широке застосування при підвищених і високих частотах та достатньо високі магнітні властивості.

Ферити - це система з оксидів заліза і оксидів двовалентних, рідше одновалентних металів. Ферити мають кубічну кристалічну решітку, цікаві магнітні властивості, які є твердими розчинами декількох простих з'єднань, зокрема немагнітних. Ферити, які застосовуються в техніці, називають *оксіферами*, тобто, складними оксидними феромагнетиками. Технологія виготовлення феритів впливає дуже суттєво на властивості готових виробів. Ферити - тверді та крихкі матеріали, дозволяють проводити обробку різанням і допускають тільки шліфування та полірування. Ферити з невисокою точкою Кюрі останнім часом сталі застосовувати як термомагнітні матеріали. Для запам'ятовувальних пристроїв обчислювальної техніки особливий інтерес становлять ферити, які мають прямокутну форму петлі гістерезису.

Сплави, що пластично деформуються, випускають у вигляді стрічок, листів, дроту для виготовлення дрібних магнітів вимірювальних приладів,

стрілок компасів, стрічок магнітного запису.

Матеріалам для виготовлення магнітних стрічок служать суцільні металеві стрічки з корозійностійкої сталі, біметалічні стрічки і стрічки на пластмасовій основі з порошковим робочим шаром.

Еластичні магніти — магніти на гумовій основі — використовують як листи магнітної пам'яті для обчислювальних машин, магнітів для відхилюючих систем в телебаченні, коректуючи магнітів і ін. Вони можуть бути будь-якої форми, яку допускає технологія обробки гуми (у виді шнурів, довгих смуг, листів і т. п.).

### **Самостійна робота №5**

**Тема:** Сплави на основі рідкоземельних металів

**Мета:** ознайомлення з загальними відомостями про сплави на основі рідкоземельних металів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Процес отримання сплавів на основі рідкоземельних металів.
- 2 Процес отримання мартенсита і пластичних деформованих сплавів.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Яка виникає процес отримання сплавів рідкоземельних металів.
- 2 Охарактеризуйте процес отримання мартенсита.
- 3 Охарактеризуйте процес отримання пластичних деформованих сплавів.
- 4 Де використовують мартенсит та пластичні деформовані сплави.

Сплави на основі рідкоземельних металів. Інтерметалічні з'єднання кобальту з рідкоземельними металами (РЗМ): церієм Се, самарієм, празеодимом, лантаном і ітрієм Y- типу  $R_xCo_y$ , де R – РЗМ мають дуже високі значення коерцитивної сили та магнітної енергії. З цієї групи найбільший інтерес представляють з'єднання типу  $RCO_5$  і  $R_2Co_{17}$ , які володіють найбільшою магнітною анізотропією, вагомою величиною спонтанної намагніченості і високою температурою Кюрі. З'єднання типу  $RCO_5$  нестабільні і розпадаються на дві або більшу кількість фаз. Багатофазність є однією з причин появи високої коерцитивної сили.

**Технологія отримання магнітів з РЗМ полягає в спіканні їх з порошків у присутності рідкої фази або лиття.** Рідка фаза створюється за рахунок того, що РЗМ береться в надлишку. Магнітні властивості сплавів наведено в табл. 4.1

Таблиця 4.1

Соединение	$H_c$ кА/м	$B_r$ , Тл	$W_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	$T_k$ , °С
$Sm Co_5$	560	0,92	75	725
$Pt Co_5$	415	0,94	56	610
$Sm_{0,5}Pt_{0,5}Co_5$	450—700	0,89—1,0	80—92	—

Подальше збільшення максимальної магнітної енергії може бути отримано тільки при збільшенні  $B_r$  матеріалів. У наш час отримані лабораторні зразки на основі сплаву  $R_2Co_{17}$  у складі 52% Co, 25,5%  $S_m$ , 8% Cu, 14% Fe і 1,1% Zn, який мав наступні параметри:  $B_r = 1,1$  Тл,  $H_c = 550$  кА / м,  $W_{max} = 120$  кДж / м<sup>3</sup>.

Перспективи використання таких сплавів великі. Основні недоліки сплавів - неважливі механічні властивості (висока крихкість), використання дефіцитних матеріалів і висока вартість.

Крім розглянутих магнітотвердих матеріалів застосовуються найбільш старі матеріали для постійних магнітів - мартенситні сталі, а також пластичні деформовані сплави.

**Мартенситом** називають особливий вид мікроструктури сталі, який отримують при швидкому її охолодженні (загартуванню). Створення мартенситу ( $200^{\circ}\text{C}$ ), який має пластинчасту форму, супроводжується об'ємними змінами, створенням великих внутрішніх напруг, що призводить до появи великої коерцетивної сили. В даний час використовуються тільки леговані мартенситні сталі, які називаються по легуючій добавці: хромові (до 3% Cr), вольфрамові (до 8% W) і кобальтові (до 15% Co). Значення  $W_{max}$  Для мартенситних сталей низьке і лежить в межах 1-4 кДж / м<sup>3</sup>; крім того, вони мають схильність до старіння. В даний час ці матеріали мають обмежене застосування і використовуються для виготовлення магнітів тільки в найменш відповідальних випадках.

**Пластично деформовані сплави**, володіють високими механічними властивостями, добре штампуються, ріжуться ножницями, обробляються на верстатах.

Найбільш поширеними є сплави куніфе (60% Si, 20% Ni, 20% Fe), куніко (50% Si, 21% Ni, 29% Co, залишок Fe) і вікаллою (51,0--54,0 Co, 10-13,0 Y, решта Fe).

Сплави куніфе анізотропні, застосовуються у вигляді дроту і штамповок. Сплави куніко дорожче сплавів куніфе і застосовуються для виготовлення магнітів складної конфігурації. Вікаллою застосовують для виготовлення дрібних магнітів складної конфігурації.

Магнітні характеристики для всіх сплавів наступні: залишкова індукція - 0,6 - 0,9 Тл, коерцетивної сила 24 - 57 кА м, магнітна енергія для вікалої - 4-14 кДж м<sup>3</sup>, куніфе - 2,8 - 7,4 кДж м<sup>3</sup>, туніко - 3,2 - 4,0 кДж м<sup>3</sup>.

## Самостійна робота №6

**Тема:** Різновиди магнітом'яких матеріалів

**Мета:** ознайомлення з різновидами магнітом'яких матеріалів

### Питання, що виносяться на самостійне вивчення:

- 1 Залізо та кремніста електротехнічна сталь.
- 2 Пермалої.
- 3 Альсифери.

### Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### Питання для самоконтролю:

- 1 Як виготовляється електролітичне залізо?
- 2 Назвіть основний компонент який входить до кремністого електротехнічного заліза.
- 3 Де використовується кремніста електротехнічна сталь?
- 4 Охарактеризуйте пермалої та альсифери?
- 5 Де використовують пермалої?

## Залізо

а) **Технічно чисте залізо** зазвичай містить невелику кількість домішок (від 0,08% до 0,1%): вуглецю, сірки, марганцю, кремнію та інших елементів, що погіршують його магнітні властивості. Технічно чисте залізо має дуже низький електричний опір і тому застосовується в основному для магнітопроводів постійного магнітного потоку. За кордоном такий матеріал відомий під назвою «армко-залізо».

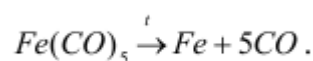
Низьковуглецева електротехнічна листовая сталь - один з різновидів технічно чистого заліза випускається товщиною від 0,2 до 4 мм, містить вуглецю  $C < 0,04\%$  і не понад 0,6% інших домішок. Нижче наводяться усереднені значення відносної магнітної проникності і коерцитивної сили:  $\mu_r$  не менше  $3500 \div 4500$ ;  $H_c$  не більше  $65 \div 100$ , А / м.

б) **Особливо чисте залізо** містить дуже малу кількість домішок (менше 0,05%) і може бути отримано двома шляхами.

Електролітичне залізо виготовляють електролізом розчину сірчаноокислого або хлористого заліза. Анодом служить чисте залізо, катодом - пластина м'якої сталі.

Обложене на катоді залізо (товщина шару 4-6 мм) після ретельної промивки знімають і подрібнюють в порошок у шарових млинах, після чого виробляють вакуумний відпал і переплавку у вакуумі.

в) карбонільне залізо отримують термічним розкладанням пентакарбоніла заліза відповідно до рівняння:



Карбонільне залізо має вигляд тонкого порошку, що робить його дуже зручним для виготовлення пресованих високочастотних магнітних сердечників.

## Кремниста електротехнічна сталь

Кремниста електротехнічна сталь є основним магнітом'яким матеріалом масового споживання. У змінних магнітних полях для поліпшення магнітних властивостей до складу стали вводять кремній Si до 4%.

Введення Si дозволяє збільшити електричний опір, що викликає зниження втрат на вихрові струми.

Крім того, наявність в сталі Si сприяє виділенню вуглецю у вигляді графіту, а також майже повного окислення сталі.

Разом з тим Si несприятливо впливає на механічні властивості заліза, збільшує його крихкість і ускладнює прокатку в листи і штампування. При вмісті Si до 4% сталь володіє ще хорошими механічними властивостями, але при вмісті  $Si > 5\%$  вона стає крихкою.

Шляхом комбінованої гарячої і холодної прокатки кремнистої сталі і особливої термічної обробки можна виготовити текстуровану сталь крупнокристалічної будови, причому кристали виявляються орієнтованими таким чином, що вісь їх легкого намагнічування збігається з напрямком прокатки. Магнітні властивості такої сталі в напрямку прокатки значно вище, ніж сталі, що не піддавалася подібній обробці. **Текстуровані сталі застосовуються для сердечників трансформаторів, що виготовляються способом намотування.** Вага і габарити при цьому зменшуються: у силових трансформаторів на 20-25%; у радіотрансформаторів на 40%.

Електротехнічну тонколистову сталь для роботи в змінних магнітних полях маркують чотирма цифрами (ГОСТ 21427.0 - 75).

Перша цифра в позначенні стали характеризує структурний стан і вид прокатки:

- 1 - гарячекатана ізотропна;
- 2 - холоднокатана ізотропна;
- 3 - холоднокатана анізотропна з ребровою структурою.

Друга цифра характеризує вміст кремнію Si:

- 0 - вміст до 0,4%;



1 - від 0,4 до 0,8%;

2 - від 0,8 до 1,8%;

3 - від 1,8 до 2,8%;

4 - від 2,8 до 3,8%;

5 - від 3,8 до 4,8.

Третя цифра характеризує групу з основної нормованої характеристики:

0 - нормуються питомі втрати при магнітної індукції  $B = 1,7$  Тл і частоті  $f = 50$  Гц;

1 - нормуються питомі втрати при магнітної індукції  $B = 1,5$  Тл і частоті  $f = 50$  Гц;

2 - нормуються питомі втрати при магнітної індукції  $B = 1,0$  Тл і частоті  $f = 400$  Гц;

6 - нормується магнітна індукція  $B$  в слабких магнітних полях при напруженості магнітного поля  $0,4$  А / м;

7 - нормується магнітна індукція  $B$  в середніх магнітних полях при напруженості магнітного поля  $10$  А / м.

Перші три цифри позначають тип сталі. Четверта цифра маркування позначає порядковий номер сталі. Сталь випускається у вигляді рулонів, листів і різаною стрічки. Вона може бути без ізоляційного покриття або мати його. Товщина листів сталі  $0,1-1$  мм. Сталь різних класів призначається для виготовлення магнітних кіл апаратів, трансформаторов, приладів, електричних машин.

### **Пермалої**

Пермалої - залізонікеліві сплави, що володіють дуже великою  $\mu_r$  в області слабких полів і малої коерцитивної силою.

Пермалої поділяються на:

- Високонікелеві з вмістом нікелю до 72-80%;

- Низьконікелеві з вмістом нікелю до 40-50%.

Дуже легка намагнічуваність пермалоїв в слабких полях пояснюється практично відсутністю у них анізотропії та явища магнітострикції.

## **Альсифери**

До складу альсиферів входять: Al (9,5%) - Si (5,6%) - Fe (84,9%).

За магнітними властивостями матеріал не поступається високонікелевим пермалоєм.

Склад відрізняється твердістю і крихкістю. Виготовляють методом лиття з товщиною стінок не менше 2-3 мм або пресуванням.

З альсифера виготовляють магнітні екрани, корпуси приладів.

Завдяки крихкості альсифера їх можна розмелювати в порошок і використовувати поряд з карбонільним залізом для виготовлення високочастотних пресованих сердечників.

## **Застосування пермалоїв**

Нізконікелеві пермалої рекомендується використовувати для сердечників малогабаритних силових трансформаторів, дроселів, реле і деталей магнітних кіл, що працюють при підвищених індукціях без підмагнічування або з невеликим підмагнічуванням.

Високонікелеві пермалої рекомендуються для сердечників імпульсних трансформаторів, реле і магнітних екранів, при товщині пластин 0,02 мм для сердечників імпульсних трансформаторів, магнітних підсилювачів і безконтактних реле.

Недоліком пермалоїв є їх відносно висока вартість, чутливість до механічного впливу.

## **Самостійна робота №7**

**Тема:** Основні вимоги до провідникових матеріалів

**Мета:** ознайомлення з вимогами до провідникових матеріалів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

1 Основні вимоги до провідникових матеріалів.

2 Основні провідникові матеріали: мідь і алюміній.

3 Сплави міді і алюмінію.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

1 Які основні вимоги до провідникових матеріалів?

2 Назвіть основні переваги міді і алюмінію.

3 Де використовується мідь і алюміній.

4 Охарактеризувати сплави міді.

5 Охарактеризувати сплави алюмінію.

### **Вимоги, пропоновані до провідникових матеріалів:**

- висока питома провідність;

- задовільні механічні властивості як при обробці, так і при експлуатації;

- легко й надійно паятися, зварюватися і т.д.;

- бути доступними на вітчизняному ринку;

- мати низьку вартість.

Практичне застосування як провідникові матеріали одержали мідь і алюміній.

За хімічним складом мідь підрозділяється на кілька марок: М1, М00к, М0к, М0ку, М00б, М0б, М1б, М1у, М1к, М1ф, М1р. Цифри 00, 0, і показують вміст міді, букви к, ку позначають катодну мідь, б - безкисневу, у – катодну переплавлену, р, ф - розкислену.

Значення міді в цих марках становить від 99,9 до 99,99%. Максимальне значення міді містять марки М00к і М00б. Як провідникові матеріали використовують мідь М1 і М0. Найбільш шкідливою домішкою в міді є кисень. При підвищенні його вмісту істотно погіршуються механічні й технологічні властивості міді. Проявляється так звана "воднева хвороба" міді. У процесі одержання міді її віджигують у захисній атмосфері. Якщо ця атмосфера містить водень або вуглеводи, то вони при високій температурі здатні проникати в мідь, де з'єднуються з киснем, у результаті чого утворюються молекули води. Тиск пару, що утвориться при нагріванні води, приводить до утворення мік-ротріщин. Мідь, що містить більше 0,1% кисню, стає ослабленою і легко ламається. Кращими механічними властивостями володіє мідь марки М0 (99,95%<sup>^</sup>), у тому числі не більше 0,02% кисню.

За механічними характеристиками розрізняють мідь марок МТ і ММ.

Мідь МТ (твердотягнута) одержують методом холодного протягання. Завдяки впливу наклепу вона має високу межу міцності при розтягуванні й мале відносне подовження, а також твердість і пружність.

Мідь ММ (м'яка відпалена) має малу твердість, невелику міцність і значне подовження при розриві.

Помітний вплив на механічні й електричні характеристики міді має температура. При нагріванні вище 200оС у результаті процесу рекристалізації механічні й електричні характеристики міді погіршуються. Крім того, питома провідність міді істотно залежить від наявності домішок. Так при вмісті в міді 0,5% домішок Zn, Cd, або Ag її питома провідність зменшується на 5%.

До недоліків міді варто також віднести її схильність до атмосферної корозії з утворенням окисних і сульфідних плівок. Швидкість окислювання зростає при нагріванні, але міцність зчеплення окисної плівки з металом не

велика. Внаслідок окислювання мідь не придатна для слабкострумівих контактів, тому що металеве відшаровування і термічне розкладання викликає підвищене зношування мідних контактів при великих струмах.

Механічні й електричні характеристики провідникової міді визначають області її застосування.

М'яка мідь, питомий опір якої при 20 оС не повинен перевищувати 0,017241 мкОм\*м. у вигляді дротів різного перерізу й форми, як правило, застосовуються для виготовлення струмопровідних жил кабелів, обмотувальних і монтажних проводів, екранів силових кабелів, обмоток трансформаторів і т.д. Тверда (холоднокатана) мідь, питомий опір якої має бути не більше 0,0180 мкОм\*м, застосовується в основному там, де необхідно забезпечити високу механічну міцність, твердість, пружність і опірність стиранням навантаженням. Такі вимоги пред'являються до міді при виготовленні контактних проводів, шин розподільних пристроїв, колекторних пластин електричних машин і т. д.

**Сплави міді.** У ряді випадків замість чистої міді як провідниковий матеріал застосовують її сплави з оловом, кремнієм, фосфором, берилієм, хромом, магнієм, кадмієм. Такі сплави, які називають бронзами, мають більше високі механічні характеристики, ніж чиста мідь. Відповідно до нормативних документів бронзи, які застосовують для виготовлення конструкційних і струмо- провідних частин приладів і апаратів, розділяються на наступні групи:

- бронзи олов'яні, які обробляються тиском;
- бронзи олов'яні ливарні;
- бронзи безолов'яні ливарні.

Провідникові бронзи (кадмієва, фосфориста, берилієва, хромиста) застосовують для виготовлення контактних проводів, колекторних пластин, струмопровідних пластин, контактів і т. д.

Сплави міді з цинком - латуні, як і бронзи, володіють у порівнянні з міддю більш високими механічними характеристиками зокрема більшим відносним подовженням перед розривом і більшою межею міцності при розтяганні. Ця

властивість забезпечує латуням технологічну перевагу в порівнянні з міддю при штампуванні, глибокій витяжці й т.п.

В основному латуні застосовують при виготовленні різних струмопровідних деталей.

Другим за значенням провідниковим матеріалом є алюміній - найпоширеніший матеріал у природі. Його зміст у земній корі становить близько 7,5%. Алюміній має знижені в порівнянні з міддю як електричні, так і механічні властивості. Питомий опір алюмінію в 1.6 рази більше питомого опору міді, але алюміній в 3,5 рази легше міді. Завдяки малій щільності забезпечується більша провідність на одиницю маси, тобто при однакових опорі й довжині алюмінієві дроти у два рази легше мідних, незважаючи на більший поперечний переріз. Тому для виготовлення проводів однієї й тої ж провідності при даній довжині алюміній вигідніше міді в тому випадку, якщо тонна алюмінію дорожче міді не більш ніж у два рази.

В електротехнічній промисловості використовується алюміній, що містить не більше 0,5% домішок, марки А1. Більш чистий алюміній марки АВ00 (не більше 0,03% домішок) застосовують для виготовлення алюмінієвої фольги, електродів, корпусів оксидних конденсаторів. Алюміній найвищої чистоти марки АВ0000 містить домішок не більше 0.004%.

Алюміній активно окисляється і покривається тонкою плівкою окису з більшим електричним опором. Ця плівка охороняє алюміній від корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів, що унеможлиблює пайку алюмінію звичайними методами. Для пайки алюмінію застосовують спеціальні пасти-припої або ультразвукові паяльники.

Важливе практичне значення має проблема захисту від гальванічної корозії місць контакту міді й алюмінію. Коли область контакту піддається впливу вологи, то виникає місцева гальванічна пара з досить високим значенням е.р.с., причому полярність цієї пари така, що струм на зовнішній поверхні контакту спрямований від алюмінію до міді, внаслідок чого алюмінієвий провідник може бути сильно зруйнований корозією. Для

усунення цього місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні бути ретельно захищені від зволоження.

До недоліків алюмінію слід віднести:

- низьку механічну міцність; відпалений алюміній у три рази менш міцний на розрив ніж відпалена мідь.
- питомий опір практично в 1,6 рази більше, ніж у міді;
- піддається електролітичній корозії.

**Сплави алюмінію** Прикладом такого сплаву є **альдрей** ( 0,3-0,5% Mg, 0,4 - 0,7% Si, 0,2 -0,3% Fe, інше Al ). Високі механічні властивості альдрей здобуває після спеціальної обробки. Альдрей має наступні характеристики:  $\rho = 0,0317 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ ;  $\alpha_\rho = 0,0036 \text{ K}^{-1}$ ;  $\alpha_1 = 23 \cdot 10^{-6}$ .

Таким чином, альдрей, практично зберігає легкість алюмінію, близький до нього за питомою провідністю і в теж час наближається за механічною міцністю до твердотягнутої міді.

У високовольтних лініях електропередачі широко застосовують сталевалюмінієві проводи, які являють собою осердя зі сталевих жил, обкручених алюмінієвим дротом. У таких проводах механічна міцність визначається головним чином сталевим осердям, а електрична провідність - алюмінієм.

## Самостійна робота №8

**Тема:** Фактори, які впливають на питомий опір провідників

**Мета:** ознайомлення з факторами, які впливають на питомий опір провідників

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Фактори, які впливають на питомий опір
- 2 Залежність питомого опору від температури.
- 3 Вплив магнітного поля на питомий опір.

## Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

## Питання для самоконтролю:

- 1 Які основні фактори впливають на питомий опір провідників?
- 2 Охарактеризуйте зміну питомого опору від температури.
- 3 Охарактеризуйте інші фактори, які впливають на питомий опір.

## Фактори, що впливають на значення питомого опору.

Як вже зазначалося вище, питомий опір металів пов'язано в основному з розсіюванням енергії вільних електронів на дефектах кристалічної решітки, до яких відносяться домішкові атоми, вакансії, дислокації, і теплові коливання власних атомів. Тому питомий опір  $\rho$  можна представити як

$$\rho = \rho_{\text{тепл}} + \rho_{\text{залиш}} \quad (7.1)$$

де  $\rho_{\text{тепл}}$ -питомий опір, обумовлене в основному тепловими коливаннями решітки;  $\rho_{\text{залиш}}$  - питомий опір, викликане наявністю дефектів в кристалічній решітці.

Характерна для металів залежність питомого опору від температури наведена на рис. 7.1.



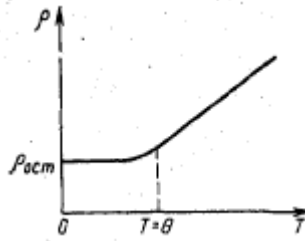


Рисунок 7.1 – Залежність питомого опору металу від температури

Наочно видно, що при температурах, що перевищують температуру Дебая  $\theta$ , яка для металів знаходиться в межах  $400-800^\circ\text{C}$ , питомий опір зростає практично лінійно і обумовлено в основному посиленням теплових коливань решітки. При цьому зменшується середня довжина вільного пробігу електронів, їх рухливість, а отже, зменшується і провідність металу.

В області низьких (криогенних) температур значення  $\rho$  майже не залежить від температури і визначається лише опором  $\rho_{\text{залиш}}$

Характер залежності  $\rho$  від температури для більшості металів різко змінюється при переході з твердого стану в рідкий. Зазначене явище досить наочно демонструє залежність питомого опору  $\rho$  міді від температури (рис. 7.2).

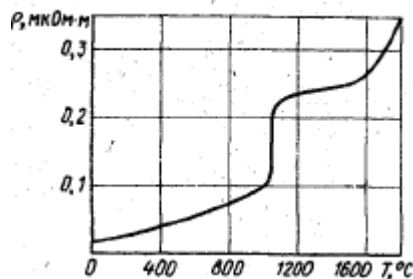


Рисунок 7.2 – Залежність питомого опору міді від температури

При досягненні температури плавлення (для міді вона складає  $1083^\circ\text{C}$ ) збільшується обсяг металу, зменшується його щільність, а разом з нею і концентрація носіїв. В результаті опір міді зростає приблизно в 2,4 рази. Для металів, що зменшують свій об'єм при плавленні (галій, вісмут, сурма), значення питомого опору має тенденцію до зменшення.

Зміна питомого опору металевого провідника з температурою прийнято характеризувати температурним **коефіцієнтом питомого опору**.

Якщо температура металу змінюється у вузьких межах, то для практичних цілей зручно використовувати кусочно-лінійну апроксимацію залежності, яка дозволяє визначити середній температурний коефіцієнт питомого опору

До числа факторів, що впливають на питомий опір металевих провідників, відноситься і магнітне поле, під дією якого відбувається викривлення траєкторії руху електронів, що призводить до зміни електропровідності.

Як відомо, металеві провідники та сплави застосовуються в електротехніці зазвичай у вигляді дроту різної форми і перетинів, яка виготовляється в процесі її протягання або волочіння.

При деформації металу в холодному стані спостерігається спотворення кристалічної решітки, що призводить також до збільшення питомого опору.

Усунути дане явище дозволяє **віджиг**, в ході якого метал і сплав спочатку нагріваються до високої температури, а потім повільно охолоджуються. В результаті процесу рекристалізації відбувається відновлення спотвореної структури і питомий опір зменшується.

## **Самостійна робота №9**

**Тема:** Властивості надпровідникових матеріалів

**Мета:** ознайомлення з застосуванням надпровідникових матеріалів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Визначення надпровідності.
- 2 Теорія надпровідності.
- 3 Фонони і квазічастинки.

**Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте явище надпровідності.
- 2 В чому суть теорії надпровідності?
- 3 Охарактеризуйте фонони і квазічастинки.

**Надпровідність** — квантове явище протікання електричного струму у твердому тілі без втрат. Явище надпровідності було відкрито в 1911 році голландським науковцем Камерлінг-Оннесом, лауреатом Нобелівської премії 1913 року. Усього за відкриття в області надпровідності було видано п'ять Нобелівських премій з фізики: в 1913, 1972, 1973, 1987 та 2003 роках.

Явище надпровідності існує для низки матеріалів, не обов'язково провідників високої якості при звичайних температурах. Перехід до надпровідного стану відбувається при певній температурі, яку називають критичною температурою надпровідного переходу. Надпровідність, проте, може бути зруйнована, якщо помістити зразок у зовнішнє магнітне поле, яке перевищує певне критичне значення. Це критичне магнітне поле зменшується при збільшенні температури.

Надпровідність характеризується абсолютним діаманетизмом. У магнітному полі в надпровідному матеріалі виникають такі струми, магнітне поле яких повністю компенсує зовнішнє магнітне поле, тобто магнітне поле виштовхується із надпровідника. Завдяки цій властивості виникає явище левітації надпровідника над магнітом (або магніту над поверхнею надпровідника), яке отримало назву труна Магомета. Сильне магнітне поле руйнує надпровідність. Проте надпровідники розрізняються за своєю поведінкою у відносно сильних магнітних полях, у залежності від поверхневої енергії границі розділу надпровідної й нормальної фаз.

У надпровідників I роду ця поверхнева енергія додатня, й надпровідність руйнується, якщо поле перевищує певний рівень, який називається критичним магнітним полем. У надпровідників II роду поверхнева енергія границі розділу нормальної та надпровідної фаз від'ємна, тож магнітне поле, коли його напруженість перевищує певне значення (воно називається першим критичним полем), починає проникати в надпровідник поступово в певних місцях, навколо яких утворюються вихрові струми (див. Абрикосівський вихор). Якщо збільшувати магнітне поле далі, то нормальних областей стає дедалі більше, й при критичному полі надпровідність руйнується повністю. Надпровідники другого роду використовуються для створення надпровідних електромагнітів.

## Теорії надпровідності

Явище надпровідності — макроскопічне (видиме) проявлення квантової природи речовини: атомів та електронів. Відомо, що електрони в атомі можуть перебувати тільки у визначених станах, яким відповідають дискретні значення енергії. Таким чином атом може поглинати і випромінювати енергію певними порціями — квантами. Однак, якщо ми перейдемо до макроскопічного тіла, де концентрація електронів перевищує  $10^{22} \text{ см}^{-3}$ , то квантовий характер зміни енергії кожного електрону «змазується» великою кількістю таких електронів, що поглинають або випромінюють енергію, і ми бачимо суцільний спектр поглинання або випромінювання енергії макроскопічними тілами.

## Квазічастинки в кристалах

### Фонони

Між атомами існують пружні сили, що не дозволяють атомам відділятися або наближатися ближче деякого  $r_{\text{крит}}$ . Однак, при кімнатних температурах атоми здійснюють коливання навколо положення рівноваги; таким чином, у ґратці постійно присутній коливальний рух, а кожний атом можна розглядати як маятник, що здійснює рівномірні коливання навколо точки рівноваги. Відміна від класичного маятника полягає в тому, що атом — це «квантовий маятник». Річ у тому, що дійсно енергія атому може змінюватися тільки порціями — квантами, з енергією, де — це частота поглинутого або випроміненого кванту. При кімнатній температурі величина близька до  $kT$  — повної енергії атома, що коливається. При зниженні температури, здавалося б, амплітуда коливань повинна прямувати до нуля. Однак, сучасні дослідження

показують, що атоми і при  $T = 0\text{K}$  будуть здійснювати коливання. Це «нульові коливання атомів». Вони не зникають ніколи.

Пружні сили, що примушують атоми коліватись, можна уявити собі як пружини, які з'єднують атоми. Якщо один з атомів одержить додаткову енергію, говорять, що проходить збудження атома. Додаткові коливання будуть передаватись через пружні зв'язки — пружинки до сусідніх атомів. Збудження буде поширюватись в кристалі у вигляді пружної хвилі.

Однак, за законами квантової механіки збудження атомів будуть передавати енергію порціями квантами. Така порція збудження, що поширюється кристалом, називається квазічастинкою, у випадку пружних коливань — фононом. Фонон — квант збудження кристалічної ґратки. Кількість фононів зростає з ростом температури. Фонони, рухаючись кристалом, стикаються один з одним, з електронами, з дефектами кристалічної ґратки.

## **Електрони**

Розглянемо рух електронів в металі при кімнатній температурі. Основний вид руху хаотично-тепловий. При цьому середня швидкість  $v = 10^7$  см/с. Цей рух нагадує броунівський рух молекул газу чи рідини. Багато разів за секунду електрон змінює напрямок руху, його енергія і імпульс змінюються при цьому через взаємодію з атомами, тобто з фононами і з іншими електронами. При наявності різниці потенціалів характер руху дещо зміниться: електрони, що хаотично рухалися, набувають направленої руху в напрямку позитивного (вищого) потенціалу. Картину можна уявити як хаотичний рух людей в натовпі, який повільно пересувається в який-небудь бік.

## **Теорія Гінзбурга-Ландау**

Докладніше у статті Рівняння Гінзбурга-Ландау

Побудована в 1950 теорія Гінзбурга-Ландау описує надпровідність феноменологічно, за допомогою параметру порядку, який пізніше зв'язали з хвильовою функцією куперівських пар. Теорія дозволила успішно аналізувати поведінку надпровідника в магнітному полі.

Теорія БКШ

Докладніше: Теорія БКШ

Фізики напружено працювали над створенням теорії надпровідності і приблизно за 50 років з 1911 до 1957 року загальні риси теорії були

сформовані. Спочатку, в 50-х роках виникла феноменологічна теорія надпровідності (див. рівняння Гінзбурга-Ландау), яка успішно пояснювала поведінку надпровідників у магнітних полях, а в 1957 році Джон Бардін, Леон Ніл Купер й Джон Роберт Шріффер запропонували мікроскопічну теорію надпровідності, за яку в 1972 році одержали Нобелівську премію.

Основною ідеєю теорії БКШ є те, що електрони провідності (вільні носії заряду) при певних температурах з'єднуються в пари, що називаються «куперівськими». Зв'язок в таких парах достатньо сильний, і пари, рухаючись по ґратці, допомагають один одному уникнути розсіювання. Притягування між від'ємно зарядженими електронами важко уявити, оскільки загальновідоме Кулонівське відштовхування між однойменно зарядженими частинками. Однак такі відштовхування безумовно виникають між ізольованими електронами. У ґратці при низьких температурах, коли коливання атомів у вузлах практично зупинилось, може спостерігатись інше явище.

Під час руху електрона вздовж кристалічної ґратки виникає електростатичне відштовхування між ним та від'ємними електронними оболонками атомів. Ці оболонки деформуються, віддаляючись від електрона, який вільно рухається. Можна сказати, що атоми поляризуються. Тобто біля розглядуваного електрону формується позитивний заряд. Цей позитивний заряд буде рухатись — супроводжувати збуджуючий електрон. До сформованого таким чином позитивного просторового заряду притягуватиметься якийсь інший електрон, що теж буде рухатись синхронно з позитивним зарядом, а, отже, синхронно з першим електроном. Утворилася так звана «куперівська пара» електронів. Другий електрон в розглянутій парі сам є збудником іншого позитивного заряду в тій області, де він рухається. Електронний газ (так іноді називають вільні електрони в металі) при досягненні надпровідності перетворюється в «куперівську рідину».

Розглянуте явище на квантовому рівні можна описати так: електрони взаємодіють з ґраткою і приводять її в збуджений стан. Зворотний перехід ґратки в нормальний стан супроводжується випромінюванням енергії, що поглинається іншими електронами. Або: перший електрон випромінює фонон, рухаючись в ґратці. Другий електрон цей фонон поглинає. Обмін фононами і створює притягування між електронами. Які ж електрони мають здібності об'єднуватись в куперівські пари? Тільки ті, у яких рівні за модулем ( $|P_1| = |P_2|$ ) та протилежні імпульси ( $P_1 = -P_2$ ), і у яких протилежні спіни.

З рівності й протилежності імпульсів одержали, що нова квазічастинка «куперівська пара» має  $P_{\text{куп.}} = 0$ , і спін, рівний нулю. Не слід думати, що в куперівській парі електрони близько розташовані один від

одного. Розмір пари досить великий  $10^{-6} \text{ м} = 1 \text{ мкм}$ . Якщо врахувати, що між атомами відстань близько  $10 \text{ \AA}$ , тобто  $1 \text{ нм}$ , то одержимо, що між куперівськими електронами близько  $1000$  атомних відстаней. Таким чином, куперівська пара знаходиться в мікрооб'ємі, що є кубом зі стороною в  $1000$  атомів. У цьому об'ємі вміщується  $10^3 \times 10^3 \times 10^3 = 10^9$  атомів і стільки ж, а то й більше, електронів. Куперівські пари перекриваються один з одним в межах мікрооб'єму — в межах всього кристалу, так, що поведінка всієї куперівської рідини стає скорельованою. При цьому розсіювання електронів стає неможливим. Припиняється втрата енергії електронами при розсіюванні, а також деформація траєкторій руху.

**Розсіювання** — це не обов'язково пряме зіткнення, це, як правило, відхилення траєкторії під дією яких-небудь об'єктів кристалічної ґратки. Так наприклад, якщо електрони рухаються мимо центру розсіювання в складі пари, або краще сказати в складі «куперівської рідини», то взаємодія електронів з іншими електронами сильніша, ніж взаємодія з центром розсіювання, і електрони обходять центр розсіювання, після чого відновлюють попередню траєкторію руху завдяки взаємодії з іншими електронами. Тобто відбувається рух електронів без розсіювання.

Якщо до такого кристалу прикласти електричне поле, то всі пари електронів отримають один і той же імпульс і почнуть рухатись в одному і тому ж напрямку, з деякою дрейфовою швидкістю. При цьому рух всіх куперівських пар буде строго скорельований. Розсіювання електронів буде відсутнє, тобто опір провідника дорівнюватиме нулю.

Надпровідність — надзвичайно цікаве й деякою мірою загадкове фізичне явище, практичне застосування якого має принести людству незліченні здобутки. Надпровідний струм є бездисипативним, тобто при протіканні постійного струму в надпровіднику не виникають звичайні резистивні втрати. Це причина, завдяки якій використання надпровідних пристроїв виявляється одним з найбільш важливих і перспективних шляхів енергозбереження. Оцінки показують, що застосування надпровідності дозволить зменшити втрати під час генерації, передачі, трансформації та використанні електроенергії з приблизно  $30-35 \%$  до  $1-2 \%$ , що є рівнозначним побудові кількох нових потужних електростанцій в Україні.

## Самостійна робота №10

**Тема:** Властивості кріопровідникових матеріалів

**Мета:** ознайомлення з властивостями кріопровідникових матеріалів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Визначення кріопровідникового матеріалу.
- 2 Застосування кріопровідникового матеріалу

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте визначення кріопровідникового матеріалу.
- 2 Де застосовують кріопровідникові матеріали?
- 3 Назвіть матеріали, які застосовуються в якості кріопровідників.

Це матеріали, які при глибокому охолодженні (нижче  $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) здобувають високу електричну провідність, але не переходять у надпровідний стан. Пояснюється це тим, що при низькій температурі питомий опір провідника визначається, як правило, наявністю домішок і дефектами кристалічних ґрат.

**Застосування кріопровідників замість надпровідників в електротехнічних пристроях має такі переваги:**

- використання як холодоагента рідкого водню або рідкого азоту замість рідкого гелію спрощує конструкцію теплової ізоляції;
- зменшує витрату потужності на охолодження і відповідно знижує



вартість установки;

- усувається небезпека раптового звільнення великої кількості енергії, що має місце в надпровідниках, тому що при підвищенні температури відбувається плавне збільшення опору. При випадковому порушенні надпровідності звільняється енергія магнітного поля, величина якої дорівнює  $L I^2/2$  Дж.

Як кріопровідники практичний інтерес представляють при температурі рідкого водню алюміній, а при температурі рідкого азоту - берилій. Проблема полягає в тому, що алюміній досить дешевий матеріал, але рідкий водень вибухонебезпечний. Берилій дорогий і дефіцитний матеріал, але як холодоагент можна використовувати дешевий рідкий азот.

Для одержання кріопровідників потрібна винятково висока чистота металу й відсутність наклепу (відпалений стан).

## Самостійна робота №11

**Тема:** Сплави з великим питомим опором

**Мета:** ознайомлення з сплавами великого питомого опору

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Визначення сплавів високого опору.
- 2 Характеристика константана та манганіна.
- 3 Виникнення терморушійної сили.

### Література:

- 1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990
- 2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте визначення сплавів високого опору.
- 2 Де застосовують сплави константан та манганін.
- 3 Як виникає терморухливість?

**Сплави високого опору** - це провідникові матеріали з питомим опором в нормальних умовах не меншим 0,3 мкОм/м. Вони застосовуються для електровимірювальних приладів (шунти, компенсаційні, додаткові та зразкові опори), для реостатів і електронагрівальних елементів. В електровимірювальних приладах ці сплави повинні мати якнайменше значення температурного коефіцієнта електроопору та малу термоелектрорухливість відносно міді. Найбільш поширені сплави на мідній основі - манганін і константан а сплави на хромонікелевій основі і залізохромоалюмінієвій, які використовуються в електронагрівальних приладах та повинні довготривало працювати на повітрі за температур до 800 -1100 °С.

**Манганін** - сплав на мідній основі (86 % Cu, 12 % Mn, 2 %Ni), жовтуватого відтінку, питомий опір 0,42 - 0,48 мкОмм, максимальна робоча температура 100 - 200 °С, добре витягується в тонкий дріт до діаметра 0,02 мм. З манганіну виготовляють також стрічку товщиною 0,01 - 1 мм і шириною 10 - 300 мм. Високий питомий опір манганіну слабо залежить від температури (в межах 15-35 °С). Використовується для виготовлення еталонних опорів і елементів електровимірювальних приладів. До манганінів відносять також деякі сплави на основі срібла з добавками Mn (до 17 %), Sn (до 7 %) та інших елементів.

Для отримання високої стабільності опору і малого  $\alpha_s$  манганін відпалюють за 350 - 550 °С у вакуумі з наступним повільним охолодженням і витримкою при кімнатній температурі.

**Константан** (від латинського constans - постійний, незмінний) - сплав міді і нікелю (60 % Cu, 40 % Ni), має високий питомий електричний опір, який мало залежить від температури. Значення  $\alpha_{\rho}$  константану близьке до нуля і, звичайно, має від'ємний знак. Вміст нікелю в сплаві відповідає максимуму  $\rho$  і мінімуму  $\alpha_{\rho}$ сер (рис. 10.1). Константан добре протягується в дріт і прокатується в стрічку.

Константан застосовується для виготовлення реостатів і електро-нагрівальних елементів з робочими температурами не вище 400 - 450 °С. Для отримання на поверхні константану достатньо гнучкої і міцної електроізоляційної плівки константан швидко і короткочасово (не більше 3с) нагрівають до температури 900 °С і охолоджують на повітрі. Покритий такою плівкою константановий дріт можна щільно намотувати, без додаткової ізоляції між витками, якщо напруга між сусідніми витками не перевищує 1 В.

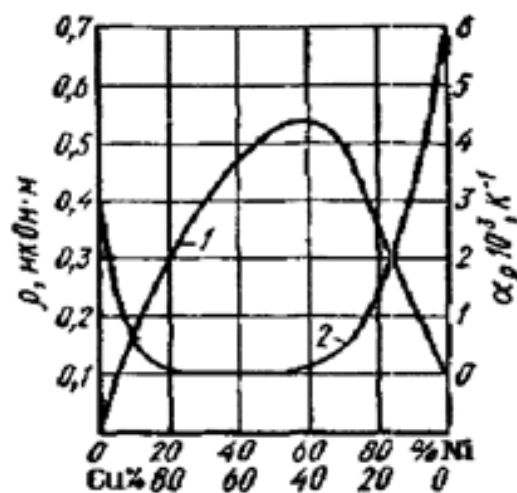


Рисунок 10.1 – Вміст нікелю в сплаві

У місцях контакту константанових провідників з мідними виникає термо-е.р.с, яка може викликати похибки при нульових вимірюваннях в мостових і потенціометричних схемах. Це є недоліком за використання константанових резисторів у вимірювальних схемах. У той же час велике значення термо-е.р.с. дозволяє успішно використовувати константан для виготовлення мідь-константанових термопар.

**Хромонікелеві сплави (ніхроми) та хромоалюмінієві сплави (фехрالی)** використовують для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей, плиток і тощо. Їх склад та електротехнічні властивості наведено в табл. 10.1

Таблиця 10.1 - Склад і властивості сплавів високого електроопору

Марка сплаву	Назва	Склад*	Питомий електроопір при 20 °С, Ом*мм <sup>2</sup> /м	Темпер, коеф. електроопору (10 <sup>5</sup> ), °К	Гранична температура, °С
		Сг	№	А1	
X13Ю4	Фехраль	12-15	0,6	3,5-5,5	1,26
1X17ЮА	Сплав № 1	16-19	0,6	4,6 - 6,0	1,30
1X25Ю5	Сплав № 2	23-27	0,6	4, 5- 6, 5	1,40
X20Н80	Ніхром	20-23	78-80	0,2	1,11
X15Н60	Ніхром	15-18	55-61	0,2	1,13

\* решта залізо

З них виготовляють дріт діаметром до 0,02 мм, стрічку перерізом 0,1 - 1 мм і більше. Згадані сплави стійкі проти хімічного руйнування поверхні в газових середовищах за температур 550 °С і вище в ненавантаженому і слабо навантаженому станах. У результаті легування сталі хромом, алюмінієм чи кремнієм в процесі окиснення на поверхні сталі утворюються щільні оксиди Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, або <sub>2</sub>, дифузія крізь які утруднена. Тому тонка оксидна плівка гальмує процес подальшого окиснення. Чим вищий вміст легуючих елементів, тим вища окалиностійкість сплаву і тим вищою може бути робоча температура.

**Виникнення терморушійної сили.** Вобласті контакту двох різних металів між ними виникає контактна різниця потенціалів, зумовлена різними рівнями в них енергії Фермі E<sub>F</sub>. За контакту має місце більш інтенсивний перехід електронів з металу з більшим значенням рівня енергії Фермі у метал з нижчим рівнем. У результаті такого переходу перший метал заряджається

позитивно, а другий - негативно. Між ними виникає різниця потенціалів, яка унеможлиблює подальший перехід електронів. Енергія Фермі в металах може сягати декількох електронвольт, тому й контактна різниця потенціалів між двома металами перебуває в межах від десятих часток до кількох вольт.

## **Самостійна робота №12**

**Тема:** Загальні відомості про діелектричні матеріали

**Мета:** опанувати загальні відомості про діелектричні матеріали

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Характеристика діелектричного матеріалу.
- 2 Характеристика електроізоляційного матеріалу.
- 3 Активні та пасивні діелектрики.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте визначення діелектричного матеріалу.
- 2 Охарактеризуйте визначення електроізоляційного матеріалу.
- 3 Чим відрізняються активні діелектрики від пасивних?

### **Загальні відомості**

**Діелектриками** називають речовини, основним електричним властивістю яких є здатність поляризуватися в електричному полі.

В газоподібних, рідких і твердих діелектриках електричні заряди міцно пов'язані з атомами, молекулами або іонами і в електричному полі можуть лише зміщуватися. Відбувається поділ центрів позитивного і негативного зарядів, тобто поляризація. Використовувані на практиці діелектрики містять і вільні заряди, які, переміщаючись в електричному полі, обумовлюють електропровідність, здатність діелектрика пропускати постійний електричний струм. Однак кількість таких вільних зарядів в діелектрику невелика, а тому вельми малий і струм. Отже, для діелектрика характерним є досить великий опір проходженню постійного струму.

**Діелектричними матеріалами** називають клас електротехнічних матеріалів, призначених для використання їх діелектричних властивостей (надавати великий опір проходженню електричного струму і здатність поляризуватися).

**Електроізоляційними матеріалами** називають діелектричні матеріали, призначені для створення електричної ізоляції струмоведучих частин в електротехнічних і радіоелектронних пристроях. Електрична ізоляція є невід'ємною частиною електричного кола і передусім потрібна для того, щоб не пропускати струм з непередбачених електричною схемою шляхах.

Використовувані як електроізоляційних матеріалів діелектрики називаються **пасивними** діелектриками. В даний час широко застосовуються так звані **активні** діелектрики, параметри яких можна регулювати змінюючи напруженість електричного поля, температуру, механічні напруги та інші параметри впливають на них факторів. Наприклад, конденсатор, діелектричним матеріалом в якому служить п'єзоелектрик, під дією прикладеного змінної напруги змінює свої лінійні розміри і стає генератором ультразвукових коливань. Ємність електричного конденсатора, виконаного з нелінійного діелектрика-сегнетоелектрика, змінюється в залежності від напруженості електричного поля; якщо така ємність включена в коливальний LG-контур, то змінюється і його частота настройки.

Техніка, технологія і експлуатація електротехнічного і радіоелектронного устаткування пред'являють найрізноманітніші вимоги до властивостей діелектричних матеріалів. Крім потрібних електричних властивостей діелектричні матеріали повинні володіти ще механічними, термічними і багатьма іншими фізико-механічними властивостями, які розглянуті в цьому розділі.

## Самостійна робота №13

**Тема:** Електропровідність газоподібних діелектриків

**Мета:** опанувати загальні відомості про електропровідність газоподібних діелектриків

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Електропровідність газоподібних діелектриків.
- 2 Вольтамперна характеристики газового проміжку.

### Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте принцип виникнення електропровідності в газоподібних діелектриках.
- 2 Охарактеризуйте вольтамперну характеристику газового проміжку.
- 3 Поясніть кожний проміжок в вольтамперній характеристиці.

### Електропровідність газоподібних діелектриків

Електропровідність у газах виникає тільки при наявності в них іонів чи вільних електронів. Іонізація нейтральних молекул газу відбувається під дією зовнішніх факторів, або внаслідок зіткнення іонізованих часток самого газу, прискорених електричним полем, з молекулами газу. Зовнішніми факторами є ультрафіолетові промені, рентгенівське випромінювання, космічні промені,

радіоактивне випромінювання, а також термічне нагрівання газу. Іонізація відбувається внаслідок поглинання нейтральними молекулами фотонів. Енергія фотона визначається за формулою  $W = h \cdot \nu$ , де  $h$  - постійна Планка,  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  - частота випромінювання, 1/с;  $c$  - швидкість світла;  $\lambda$  - довжина хвилі.

Іонізація молекул відбувається при перевищенні енергією кванта випромінювання величини потенціалу іонізації,  $U_i$ :

$$h \nu > eU_v = U_i \quad (13.1)$$

де  $U_v$  - потенціал виходу (робота, яку необхідно затратити для видалення за межі атома частки, носія заряду),  $e$  - заряд електрона ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).

З підвищенням частоти здатність молекул газу до іонізації збільшується. Енергія, яку необхідно затратити на іонізацію молекул газу, вимірюється в електронвольтах (еВ). Енергія в 1 еВ дорівнює кінетичній енергії, що здобуває електрон при вільному русі між двома точками з різницею потенціалів у 1В. Отже, 1еВ дорівнює енергії  $e U = 1,6 \cdot 10^{-19}$ , Вт с (Дж).

Потенціал іонізації більшості газів знаходиться в межах 10-20 еВ. Вільні електрони, знаходячись у русі, зіштовхуються з молекулами газу, при цьому частина з них рекомбінує, тобто захоплюється позитивними іонами, а частина, що захоплюється нейтральними молекулами, утворює негативні іони. Час життя вільного електрона складає близько  $10^{-6}$ с. Оскільки процеси іонізації і рекомбінації проходять одночасно, то при визначеній температурі і тиску настає рівновага, при якій забезпечується постійна концентрація іонів. На підставі результатів досліджень встановлено, що в звичайних умовах середня концентрація позитивних іонів у повітрі складає 750 1/см<sup>3</sup>, а негативних - 650 1/см<sup>3</sup>.

Під впливом зовнішніх факторів газ здобуває хоч і дуже малу, але певної величини електропровідність, що називається несамостійною. При збільшенні напруги, що прикладається до газового проміжку, виникає ударна іонізація електронами, які під дією поля здобувають кінетичну енергію, достатню для іонізації нейтральних молекул при їхньому зіткненні. Одночасно з іонізацією



газу відбувається і рекомбінація позитивних і негативних іонів з утворенням нейтральних молекул. Електропровідність газу, обумовлена ударною іонізацією, називається самостійною.

На рис.13.2. приведена вольтамперна характеристика газового проміжку. У випадку утворення електропровідності під дією зовнішніх факторів при незначній напрузі струм дуже малий і баланс процесів утворення іонів і їхньої рекомбінації зберігається. У розглянутому режимі виконується закон Ома:

$$J = \gamma E = \gamma U / h \quad (13.2)$$

де  $J$  - щільність струму;

$\gamma$  - питома провідність;

$U$  - напруга, що прикладається;

$h$  - відстань між електродами.

На рис 13.2. цей режим відповідає ділянці ОА.

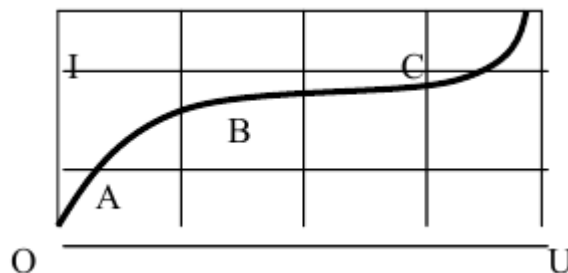


Рисунок 13.2 - Вольтамперна характеристика газового проміжку

При подальшому збільшенні напруги баланс процесів утворення іонів і їхньої рекомбінації порушується, тому що іони несуться до електродів, не встигаючи рекомбінувати. Струм росте повільніше напруги (ділянка АВ). Зменшення концентрації іонів продовжується з ростом напруги і при певному його значенні настає насичення (ділянка ВС). Іони, що утворюються під впливом зовнішніх іонізаторів, несуться до електродів. Щільність струму в цьому випадку дорівнює:

$$J = N q h, \quad (13.3)$$

де  $N$  - кількість позитивних і негативних іонів;

$q$  - заряд іона;

$h$  - відстань між електродами.

Подальше збільшення напруги супроводжується посиленням ударної іонізації і збільшенням кількості вільних електронів практично в геометричній прогресії, що приводить до різкого зростання струму.

### **Самостійна робота №14**

**Тема:** Поляризація діелектриків

**Мета:** опанувати загальні відомості про поляризацію діелектриків

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Поняття поляризації діелектрика.
- 2 Основні види поляризації діелектрика.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте принцип виникнення поляризації в діелектрику.
- 2 Запишіть формулу для визначення поляризованості діелектрика.
- 3 Обґрунтуйте основні види поляризації діелектрика.

### **ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ**

Основною властивістю діелектриків є здатність до поляризації під дією прикладеної напруги. Процес поляризації являє собою зміну розташування в

просторі часток діелектрика, що мають електричні заряди. Елементарні диполі, що представляють зв'язані й невіддільні один від одного молекули діелектрика, позитивні й негативні заряди яких зміщені один відносно другого, характеризуються електричним моментом  $\mathbf{p}$ :

$$\mathbf{p} = q \mathbf{l}, \quad (14.1)$$

де  $q$  - заряд диполя;  $l$  - відстань між зарядами.

Під дію електричного поля диполі починають орієнтуватися в просторі і створюють сумарний момент. Такий момент, віднесений до одиниці об'єму діелектрика, називається поляризованістю діелектрика  $\mathbf{P}$

$$\mathbf{P} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum_i^n \mathbf{p}_i}{V}, \quad (14.2)$$

де  $V$  - об'єм діелектрика

Залежність поляризованості  $\mathbf{P}$  від напруженості електричного поля  $\mathbf{E}$  в діелектрику для більшості діелектриків має лінійний характер. При малих значеннях напруженості поля для ізотропних діелектриків можна записати

$$\mathbf{P} = \chi \epsilon_0 \mathbf{E} = \alpha \mathbf{E} \quad (14.3)$$

де  $\chi$  - діелектрична сприйнятливість діелектрика. Вона зв'язана з відносною діелектричною проникністю діелектрика співвідношенням  $\epsilon_r = 1 + \chi$ ;  $\alpha$  - абсолютна діелектрична сприйнятливість чи питома поляризованість.

При заданому значенні прикладеної напруги величина заряду  $Q$  складається із заряду  $Q_0$ , який був би присутній на електродах, якщо їх розділяв вакуум, і заряду  $Q_d$ , що обумовлений поляризацією діелектрика, який фактично поділяє електроди:

$$Q = Q_0 + Q_d \quad (14.4)$$

Здатність діелектрика утворювати ємність можна оцінити за допомогою параметра відносної діелектричної проникності  $\epsilon_r$ , що представляє відношення заряду  $Q$ , отриманого при деякій напрузі на конденсаторі, що містить даний діелектрик, до заряду  $Q_0$ , який можна було б одержати на конденсаторі тих же геометричних розмірів і при тій же напрузі, якби між

електродами знаходився вакуум.

З наведеної формули видно, що значення  $\epsilon_r$  будь-якого діелектрика більше одиниці і тільки якщо вакуум  $\epsilon_r = 1$ .

### **Основні види поляризації діелектриків**

Велика кількість різних механізмів поляризації діелектриків, що мають місце в діелектриках, можна розділити на два основних види:

- поляризації, що протікають під впливом електричного поля практично миттєво і не супроводжуються розсіюванням енергії, тобто без виділення тепла;
- поляризації, що протікають уповільнено і які супроводжуються розсіюванням енергії в діелектрику, тобто нагріванням. Такий вид поляризації називається релаксаційною.

До першого виду відносяться електронна й іонна поляризації. Інші механізми поляризації слід віднести до релаксаційних.

**Електронна поляризація** - це зсув орбіт електронів щодо атомних ядер. Даний механізм поляризації спостерігається у всіх діелектриків незалежно від наявності в них інших видів поляризації. При переміщенні діелектрика в зовнішнє електричне поле електронна поляризація встановлюється за час порядку  $10^{-15}$ с. При підвищенні температури діелектрика у зв'язку з тепловим розширенням речовини і зменшенням числа часток в одиниці об'єму електронна поляризація зменшується. Однак слід зазначити, що температура не впливає на зсув і деформацію електронних орбіт атомів і іонів.

**Іонна поляризація** - це зсув один щодо одного іонів, що утворюють молекулу. Ця поляризація протікає за час порядку 10 с. При підвищенні температури іонна поляризація посилюється. Причиною цього є ослаблення пружних сил, що діють між іонами внаслідок збільшення відстані між ними при тепловому розширенні.

**Дипольна поляризація** - це орієнтація дипольних молекул у полярних діелектриках під дією електричного поля. Вона належить до числа релаксаційних поляризацій. Діелектрики, що містять електричні диполі,

здатні орієнтуватися в зовнішньому електричному полі, називаються полярними. Очевидно, що дана поляризація буде виявлятися тим інтенсивніше, чим більше дипольний момент даного матеріалу. Залежно від величини електричних моментів диполів, в'язкості середовища, а також інтенсивності теплового руху молекул час установлення даної поляризації складає  $10^{-2}$ - $10^{-10}$ с.

**Дипольна поляризація** властива полярним газам і рідинам. У цих діелектриках у зв'язку з незначною щільністю і невеликими розмірами молекул при впливі електричного поля відбувається поворот самих молекул. У твердих діелектриках також може спостерігатися дипольна поляризація. Але, на відміну від газоподібних і рідких діелектриків, поворот молекул тут неможливий, а відбувається орієнтація окремих груп атомів без порушення їхнього зв'язку з молекулами.

Зі збільшенням температури молекулярні сили слабшають, в'язкість речовини зменшується, тому спочатку дипольна поляризація посилюється. Однак у той же час зростає енергія теплового руху молекул, що зменшує вплив електричного поля, і коли тепловий рух стає інтенсивним, дипольна поляризація зменшується. Проміжок часу, протягом якого впорядкованість орієнтованих полем диполів після його зняття зменшується внаслідок теплового руху в  $e$  раз у порівнянні з початковим значенням, називається часом релаксації. Іонно-релаксаційна поляризація спостерігається в іонних діелектриках з нещільним упакуванням іонів. Даний вид поляризації характерний для неорганічного скла, а також для деяких неорганічних кристалічних речовин. Слабко зв'язані іони під дією зовнішнього електричного поля крім хаотичних теплових переміщень одержують додаткові переміщення в напрямку поля. Після зняття електричного поля орієнтація іонів поступово слабшає за експонентним законом. При підвищенні температури іонно-релаксаційна поляризація посилюється.

**Електронно-релаксаційна** поляризація виникає в діелектриках за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових "дефектних" електронів

чи дірок. Даний вид поляризації характерний для діелектриків з електронною електропровідністю і значним внутрішнім електричним полем. Діелектрики з електронно-релаксаційною поляризацією мають високе значення відносної діелектричної проникності. У кривій залежності  $\epsilon_r = f(T)$  спостерігається максимум навіть при негативних температурах. При збільшенні частоти дана поляризація, як правило, зменшується.

**Міграційна поляризація** характерна для неоднорідних діелектриків і обумовлена перерозподілом вільних зарядів у його об'ємі. Даний вид поляризації зв'язаний з наявністю в діелектрику шарів з різною діелектричною проникністю і провідністю, а також різних провідних і напівпровідних включень. На межі розподілу між шарами в шаруватих матеріалах і в приелектродних шарах може відбуватися нагромадження зарядів повільно рухаючих іонів, що створює ефект міжшарової поляризації. У результаті цього в такому діелектрику при внесенні його в електричне поле утворюються поляризовані області. При міграційній поляризації спостерігається значне розсіювання електричної енергії.

**Мимовільна чи спонтанна** поляризація спостерігається в сегнетоелектриках. У цих речовинах існують окремі області, що мають електричний момент навіть при відсутності зовнішнього електричного поля. Орієнтація електричних моментів у доменах різна. При внесенні даного діелектрика в електричне поле відбувається орієнтація електричних моментів у напрямку поля, в результаті чого спостерігається сильна поляризація. На відміну від інших видів поляризації, при деякому значенні напруженості зовнішнього поля настає насичення і подальше збільшення напруженості не приводить до посилення поляризації. Діелектрична поляризація в сегнетоелектриках нелінійно залежить від величини напруженості електричного поля.

**Тема:** Механічні, термічні властивості діелектриків

**Мета:** ознайомитись з механічними та термічними властивостями діелектриків

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Основні механічні властивості діелектриків.
- 2 Основні термічні властивості діелектриків.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте властивість діелектриків міцність на розрив.
- 2 Опишіть характеристику пластмас опір розкалювання
- 3 Обґрунтуйте ударну в'язкість і стійкість до вібрацій.
- 4 Охарактеризуйте теплопровідність, теплоємність і нагрівостійкість.

**Механічні властивості діелектриків.**

Вони характеризують здатність діелектрика витримувати зовнішні статичні і динамічні навантаження без недопустимих змін первинних розмірів і форми. Статичне навантаження на матеріал при експлуатації або випробуваннях плавно зростає з обумовленою швидкістю, динамічна впливає миттєво, ривком, ударом, швидко змінюючись за величиною і (або) напрямом.

Здатність діелектрика витримувати статичні навантаження характеризується руйнуючим напругою при розтягу, стиску або згині, межею плинності, відносним подовженням при розриві, відносною деформацією при

стисканні та іншими характеристиками. Перераховані параметри визначаються стандартизованими методами.

Для випробувань використовують зразки певної форми і розмірів. Наприклад, визначення **міцності на розрив** тонких аркушів паперу і картону виробляють на зразках у вигляді смужок шириною 15 мм (для паперу) або 50 мм (для картону), довжиною 180 або 100 мм. При статичних випробуваннях анізотропних листових матеріалів зразки вирізають вздовж і поперек рулону; зразки, вирізані вздовж рулону, мають більшу руйнівну напругу і меншу відносне подовження при розтягуванні в порівнянні з зразком, вирізаним поперек рулону.

Для пластмас важливим параметром є **опір розколювання**. Для його визначення використовують зразки розмірами 15x15x10 мм. В ході випробувань в торець зразка, розміщеного на нижній опорній плиті розривної машини, вдавлюється клин, укріплений на верхній плиті. Опір розколювання розраховується по формулі  $S_p = F/b$ , де  $F$  - найбільше навантаження в момент розколювання зразка, Н;  $b$  - ширина середньої частини зразка, м.

Механічні властивості гнучких матеріалів (папір, лакоткани, плівки) характеризуються таким умовним параметром, **як стійкістю до надриву**. Для його визначення використовують смужки матеріалу шириною від 8 до 20 мм. Смужка пропускається в закріплену у верхньому затиску розривної машини скобу, перегинається на 180 °, після чого обидва її кінця закріплюють в нижньому затиску. Скоба має форму півкільця. Залежно від ширини смужки радіус півкільця може мати розміри від 5 до 13 мм. Таким чином, при натягу смужки найбільші зусилля передаються на її краю. Стійкість до надриву чисельно дорівнює навантаженню в ньютонках, при якій відбувається надрив країв смужки.

Твердістю називають здатність матеріалу чинити опір впровадженню в нього іншого, більш твердого матеріалу. У більшості випадків при визначенні твердості електроізоляційних матеріалів, використовується статичний метод вдавлювання індентером в поверхню зразка при заданому навантаженні.



Зазвичай індентером являє собою полірований кулька із загартованої сталі з діаметром 5 мм. Твердість  $H$  ( $\text{H}/\text{мм}^2$ ) визначається глибиною вдавнення індентером після закінчення 30 с після навантаження і розраховується по формулі  $H = F/(\pi dh)$ , де  $F$  - навантаження, Н;  $d$  - діаметр кульки, мм;  $H$  - глибина вдавнення.

**Здатність діелектрика витримувати динамічні механічні навантаження характеризують ударною в'язкістю і стійкістю до вібрації.**

**Питома ударна в'язкість** - відношення енергії удару при зламі зразка до площі його поперечного перерізу. Вона характеризує міцність матеріалу при динамічному згині. У такому режимі працюють багато вузлів електротехнічного обладнання, виконані з пластмас, шаруватих пластиків та інших матеріалів. Ударну в'язкість вимірюють за допомогою маятникових копрів. Важкий маятник  $l$  піднімають на висоту  $h_2$  і фіксують. Зразок 2 випробуваного матеріалу, який має форму бруска без розрізу і з розрізом посередині для в'язких матеріалів, розміщують на двох опорах копра. При звільненні фіксатора маятник падає, ламає зразок і піднімається по інерції на висоту  $h_1$ , яка залежить від властивостей випробуваного матеріалу. Різниця потенційних енергій маятника в положеннях  $h_2$  і  $h_1$  визначає роботу удару  $A_{\text{уд}} = G(h_2 - h_0)$ . де  $G$  - вага маятника. Н. Питома ударна в'язкість  $W_{\text{уд}}$  ( $\text{Дж}/\text{м}^2$  або  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ) розраховується за формулою  $W_{\text{уд}} = A_{\text{уд}} / S$ , де  $S$  - площа поперечного перерізу зразка,  $\text{м}^2$ .

**Стійкість матеріалів і виробів до вібрацій** визначається відсутністю механічних пошкоджень, порушенням герметичності у випадку герметизованих конструкцій, збереженням в заданих межах електричних параметрів ізоляції після дії протягом певного часу вібрації з заданими параметрами (амплітудою прискорення, діапазоном частот і ін.). Для вібраційних випробувань матеріалів і виробів використовуються спеціальні вібраційні стенди.

Для багатьох електроізоляційних матеріалів важливим параметром є гнучкість, яка забезпечує збереження високих механічних і електричних

параметрів ізоляції при найрізноманітніших механічних деформаціях. Методи визначення гнучкості засновані на визначенні числа перегинів тонкого матеріалу, що викликають його руйнування. Гнучкість визначають за допомогою приладів, які називаються еластометрами. Для випробування використовують зразок у вигляді смужки 25x200 мм, яка розташовується вертикально і затискається між двома парами губок. Верхня пара губок може повертатися навколо горизонтальної осі на заздалегідь встановлений кут. До нижньої парі губок підвішується чашка з вантажами. Гнучкість визначається числом подвійних перегинів, які доводять зразок до розриву. При визначенні гнучкості лакових плівок тонку мідну фольгу з нанесеною лаковою плівкою згинають навколо стрижнів різних діаметрів. Показником гнучкості служить найменший діаметр стержня, при вигині навколо якого плівка ще не розтріскується.

**Термічні властивості діелектриків.** Поведінка діелектрика при нагріванні характеризується рядом властивостей, які в сукупності визначають його допустиму робочу температуру. До найважливіших термічних властивостей матеріалу відносяться теплопровідність, теплоємність, плавлення і розм'якшення матеріалу, теплове розширення, нагрівостійкість, стійкість до термоударів.

**Теплопровідність** визначає процес відводу теплоти від нагрітих провідників і магнітопроводів через шар електричної ізоляції, а також і відвід теплоти з товщі електричної ізоляції, нагрітої за рахунок діелектричних втрат. Кількісно теплопровідність характеризується коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  [Вт/(м · К) або Вт/(м·С)], який дорівнює кількості теплоти, що пройшла за одиницю часу через одиницю площі при градієнті температури 1 К / м. Як правило, діелектрики є поганими провідниками теплоти  $X$  їх малий. Коефіцієнт теплопровідності має значення для газів  $(2\div 5) \cdot 10^{-2}$ , а для твердих діелектриків 0,02-3,0 Вт/(м·К).

**Теплоємність**  $C$  [Дж/(кг·К)] речовини визначає ту кількість теплоти  $Q$  (Дж), яке необхідно для нагрівання тіла масою  $m$ (кг), від температури  $T_0$  до  $T$

(К) і входить в рівняння  $Q = Cm (T - T_0)$ . Час нагріву або охолодження електроізоляційних конструкцій залежить від теплоємності використовуваних в них матеріалів, теплоємність визначає кількість теплоти, необхідної для їх нагрівання в ході технології виготовлення і цілий ряд інших процесів. Питома теплоємність деяких діелектриків при нормальних температурах має значення: лужні алюмосилікатні скла-300-1000 Дж/(кг·К), електротехнічний фарфор, стеатити - 800-900, органічні полімери - 1200-2200, нафтові електроізоляційні масла - 1800-2500, вода - 4200 Дж/(кг·К).

Тверді кристалічні діелектрики при нагріванні плавляться і для них характерним параметром є температура плавлення  $T_{пл}$  (К). Аморфні матеріали переходять з твердого стану в рідкий в інтервалі температур. Такий перехід характеризують температурою розм'якшення  $T_{разм}$ . Температуру розм'якшення таких діелектриків, як бітум, віск, і деяких видів компаундів визначають методом «кільця і кулі». Для цього випробовуваний діелектрик заливається в циліндричне кільце до самого верху. (рис. 5.42, а). Після затвердіння діелектрика кільце поміщають на стійку і в центрі поверхні кладуть сталеву кулю. Стійку поміщають в посудину з рідиною. При нагріванні відбувається розм'якшення діелектрика і під навантаженням, створеної кулькою, він видавлюється з кільця. За  $T_{разм}$  приймають температуру, при якій видавлені маса торкнеться пластини, розташованої на глибині  $h$ .

Температура розм'якшення пластмас визначається за Віка (рис. 5.42, б). Зразок нагрівають в термостаті і одночасно піддають дії стискає зусилля. Зусилля створюється навантаженням 10 або 50 Н і передається на зразок через стрижень і індентером у вигляді трубочки з діаметром 1,13 мм і довжиною 3 мм. За  $T_{разм}$  жорстких пластмас приймають температуру, при якій індентером упровадиться в зразок на глибину 1 мм. Температура розм'якшення пластмас та інших матеріалів визначається також при одночасному впливі температури і згинального навантаження на зразок. Так визначають  $T_{разм}$  по Мартенсу (рис. 5.42, в). Зразок розташовують вертикально, закріплюючи консольно в нижньому затиску. Верхній затиск жорстко скріплений з рейкою-важелем, на

якій переміщується вантаж. Таким чином можна змінювати згинатися навантаження. Деформацію зразка при нагріванні контролюють за допомогою показника деформації, За  $T_{разм}$  приймають температуру, де фиксируемая показником деформація дорівнює 6 мм. Стандартом передбачено визначення  $T_{разм}$  по прогину розташованого горизонтально на двох опорах стержня з діелектрика під дією навантаження, яка прикладається до середини стержня. Стержень має розміри 110x 10x4 мм. За  $T_{разм}$  приймають температуру, при якій прогин складе 0,33 мм.

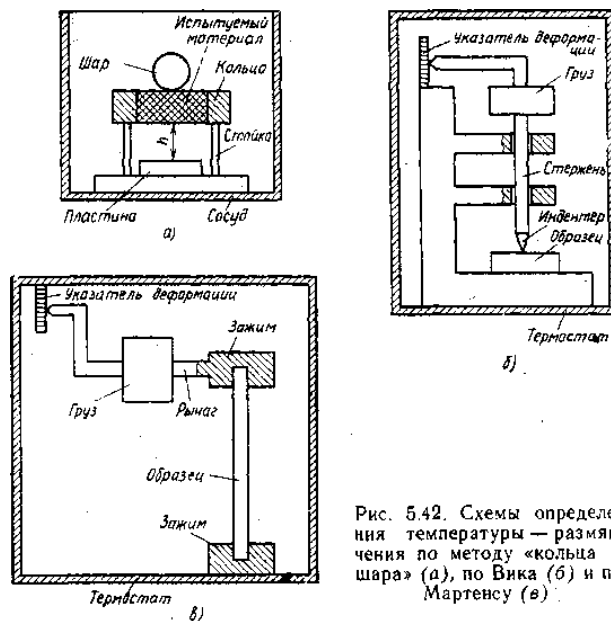


Рис. 5.42. Схемы определения температуры — размягчения по методу «кольца и шара» (а), по Вика (б) и по Мартенсу (в).

Діелектрик, як і інші матеріали, при нагріванні розширюється. Термічне розширення оцінюють температурним коефіцієнтом довжини  $TKl$  ( $K^{-1}$ ) і температурним коефіцієнтом обсягу  $TKV$  ( $K^{-1}$ ). Температурний коефіцієнт обсягу дорівнює потроєному коефіцієнту довжини:  $TKV = 3TKl$ . Значення  $TKl$  більшості діелектриків змінюється в межах  $(0,3 \div 20) \cdot 10^{-5}K^{-1}$ . Досить малий  $TKl$  кварцового скла:  $0,055 \cdot 10^{-5}K^{-1}$  тому вироби з нього не руйнуються при різких перепадах температур. В композиційному електроізоляційні матеріали, що складається з діелектриків з різними  $TKl$ , при нагріванні або охолодженні виникають внутрішні механічні напруги. При багаторазовому повторенні циклу нагрівання - охолодження в таких матеріалах утворюються тріщини, розшарування і інші механічні пошкодження, супроводжувані різким зниженням їх електричних параметрів.

Для рідких і аморфних в'язких матеріалів (смола, компаундів) важливим параметром є в'язкість. В'язкість властива текучим тілам, де має місце опір переміщенню однієї частини (одного шару) тіла відносно іншої. Це опір характеризується динамічною в'язкістю ( $\text{Па}\cdot\text{с}$ ) і кінематичною в'язкістю ( $\text{м}^2/\text{с}$ ), рівної відношенню динамічної в'язкості до щільності матеріалу. На практиці користуються умовною в'язкістю (ВУ), яка пов'язана з динамічною і кінематичною емпіричними співвідношеннями. Умовна в'язкість вимірюється за допомогою віскозиметрів різних типів. За допомогою капілярних або універсальних віскозиметрів ВУ вимірюється за часом закінчення заданого об'єму рідини через капіляр або сопло заданого діаметра.

В ротаційних віскозиметрах випробувана рідина завантажується в простір між коаксіальними циліндрами, один з яких нерухомий, а інший обертається. ВУ визначається по витраті потужності на обертання циліндра. В'язкість визначає електричні властивості електроізоляційних матеріалів і такі технологічні процеси виробництва електричної ізоляції, як просочування твердих матеріалів лаками, компаундами, пресування матеріалів і виробів з них. В'язкість мінерального масла визначає конвекційний тепловідведення від нагрітих частин у доквілля в масляних трансформаторах, вимикачах та інших пристроях.

В процесі експлуатації матеріали та вироби піддаються впливу різних старять їх факторів. В першу чергу до них відносяться нагрів і електрична напруга. Одночасно можуть впливати вологість, хімічно активні речовини, радіація, механічні навантаження, у тому числі вібраційні, глибоке охолодження і цілий ряд інших. Здатність електричної ізоляції без пошкодження і без неприпустимого погіршення практично важливих для неї властивостей витримувати дію одного або декількох факторів протягом часу, порівнянного з терміном експлуатації, визначає її стійкість до впливу таких факторів.

**Нагрівостійкість** електричної ізоляції визначають по змінам її електричної міцності, тангенсу кута діелектричних втрат, втрати маси,

механічної міцності, а також інших параметрів при витримці при підвищених порівняно з робочою температурах. Наприклад, при температурі розм'якшення сильно знижується механічна міцність діелектрика і деформація виробів збільшується до небезпечних меж і вони виходять з ладу.

Тому оцінкою нагрівостійкості матеріалу може служити  $T_{разм}$  по Мартенсу. Критерієм виходу з ладу ізоляції може служити також зменшення її електричної міцності вдвічі порівняно зі значенням до випробувань. Показником Нагрівостійкості може бути також і час виходу з ладу всіх зразків при кожній температурі випробувань.

Матеріали, використовувані в ізоляції електричних машин, трансформаторів і апаратів, по Нагрівостійкості поділяють на сім класів. Для кожного класу встановлюється певна максимальна температура, при якій матеріал може тривало працювати без погіршення властивостей (табл. 5.4).

<i>Позначення класу</i>	<i>Температура,</i>	<i>Основні групи електроізоляційних</i>
<i>У</i>	<i>363 (90)</i>	<i>Волокнисті матеріали з целюлози, бавовни, натурального шовку та поліамидов; пластмаси з органічним</i>
<i>А</i>	<i>378 (105)</i>	<i>Волокнисті матеріали, просочені масляними, масляносмоляними та іншими</i>
<i>Е</i>	<i>393 (1'20)</i>	<i>Синтетичні волокна, плівки, смоли, шаруваті пластики, пластмаси на термореактивних</i>
<i>В</i>	<i>403 (130)</i>	<i>Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолонна в поєднанні з обмежених</i>
<i>Р</i>	<i>428 (155)</i>	<i>Ті ж матеріали в поєднанні з синтетичними еднальними;</i>
<i>Н</i>	<i>453 (180)</i>	<i>Ті ж матеріали з кремнийорганіческим</i>

Для матеріалів, що працюють при великих температурах, класи нагрівостійкості характеризуються температурами 200, 220 і 250 ° С, а при ще вищих - 275, 300 ° С і так далі через кожні 25 ° С.

Ізоляція цілого ряду електротехнічного і радіоелектронного обладнання повинна зберігати свої властивості при охолодженні до - (60÷70) ° С, а в ряді випадків і при температурі рідкого азоту (-196 ° С), водню (-252 ° С) і гелію (-268,7 ° С). При низьких температурах електричні властивості діелектриків, як правило, поліпшуються. Але механічні властивості еластичних і гнучких в нормальних умовах матеріалів при низьких температурах змінюються, вони стають жорсткими, крихкими і легко руйнуються, особливо при вібраціях.

Холодостійкість електричної ізоляції визначається шляхом порівняння механічних характеристик при негативній і нормальної температурах. Наприклад, вимірюють деформації при розтягуванні при низькій і при нормальній температурах, що виникають під дією однакового зусиллями розраховують коефіцієнт холодостійкості :  $K_{\text{хол}}=l_2/l_1$ . Холодостійкість визначається гранично низькою температурою  $T_{\text{хол}}$ , при якій  $K_{\text{хоа}}$  залишається ще постійним.

Стійкість до термоударам визначається для крихких матеріалів і виробів з них. Наприклад, ізолятори з електротехнічного фарфору повинні витримувати триразове нагрівання без помітного погіршення основних властивостей. При визначенні стійкості до термоударам нагріті ізолятори занурюють у крижану воду, де витримуються певний час. Після витримки кондиціонують на повітрі при кімнатній температурі. Далі цикл нагрівання - охолодження повторюють. Після трьох циклів термоударів ізолятори кондиціонують і піддаються електричним випробуванням.

## Самостійна робота №16

**Тема:** Газові діелектриків

**Мета:** ознайомитись з різновидами газових діелектриків

### **Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Основні властивості газоподібних діелектриків.
- 2 Водень.
- 3 Гелій.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте властивість газоподібних діелектриків.
- 2 Опишіть характеристики водню.
- 3 Обґрунтуйте характеристики гелію.
- 4 Охарактеризуйте де використовується водень і гелій.

У числі газоподібних діелектриків перш за все повинне бути згадане повітря, яке через свою загальну поширеність, майже завжди входить до складу електричних пристроїв і грає в них роль електричної ізоляції, додаткової до твердих або рідких електроізоляційних матеріалів. У окремих частинах електричних установках, наприклад на ділянках повітряних ліній електропередачі між опорами, повітря утворює єдину ізоляцію між голими проводами лінії. При недостатньо ретельно проведеному просоченню ізоляції електричних машин, кабелів, конденсаторів в ній можуть залишатися



повітряні включення, часто небажані, оскільки вони при високій робочій напрузі ізоляції можуть стати вогнищами утворення іонізації.

У таблиці 7.1. приведені властивості повітря і ряду широко вживаних в техніці газів, а також властивості тих же газів в зрідженому стані, що мають велике значення для електротехнічних пристроїв, що працюють при низькому тиску (так звані пристрої кріоелектротехніки).

Таблиця 7.1. –

Властивості газів

Параметр	Повітря	Азот N <sub>2</sub>	Кисень O <sub>2</sub>	Водень H <sub>2</sub>	Метан CH <sub>4</sub>	Елегаз SF <sub>6</sub>	Інертні гази				
							He	Ne	Ar	Kr	Xe
Молекулярна маса	29	28	32	2	16	146	4	20,2	40	83,8	131,3
Температура кипіння, t <sub>к</sub> (К)	79	77,4	90,2	20,4	111,7	318,7	4,2	27,2	87,52	120,2	166
Температура плавлення, t <sub>п</sub> , (К)	60	63,2	54,4	14	89,2	209,3	-	24,5	84	115,6	161
Густина, ρ(кг/м <sup>3</sup> )	1,29	1,25	1,43	0,09	0,717	6,39	0,18	0,9	1,78	3,47	5,58
Теплота випаровування, кДж/кг	212	197	213	458	510	-	21	88	162	110	-
Теплопровідність	24	24	24	166	26	-	142	45,5	16,3	8,73	5
Теплоємність	1,05	1,06	0,915	14,2	2,18	0,62	5,2	1,03	0,52	0,25	0,16
Динамічна в'язкість	19	18	21	9,5	12	15	19	30	21	25	22

За інших рівних умов (при однаковому тиску і температурі, формі електродів, відстані між ними і так далі) різні гази можуть мати значення електричної міцності, що помітно розрізняються. Азот має практично однакову з повітрям електричну міцність. Він нерідко застосовується замість повітря для заповнення газових конденсаторів і для інших цілей, оскільки, будучи близький по електричних властивостях до повітря, він не містить кисню, який надає окислюючу дію на дотичні з ним матеріали. Деякі гази, що мають високу молекулярну масу і з'єднання, що містять галогени (фтор, хлор), для іонізації яких потрібна велика енергія, мають помітно підвищену в порівнянні з повітрям електричну міцність. Так, гексафторид сірки SF<sub>6</sub> (шестифториста сірка) має електричну міцність приблизно в 2,5 разу вище, ніж у повітря. Гексафторид сірки називають елегазом (скорочення від слів "електрика" і

"газ"). Елегаз не токсичний, хімічно стійкий, не розкладається при нагріві до 800°C, його з успіхом можна використовувати в конденсаторах, кабелях.

Особливо великі переваги елегазу при підвищеному тиску. Дихлордифторметан  $CCl_2F_2$  – фреон, має електричну міцність, близьку до електричної міцності елегаза, але його температура кипіння всього лише 242,7K (-30,5°C), і він при нормальній температурі може бути стислий без зріджування лише до 0,6 МПа. Фреон викликає корозію деяких твердих органічних електроізоляційних матеріалів, що треба мати на увазі при конструюванні електричних холодильників. Перфторировані вуглеводні. Багато перфторированих вуглеводнів, тобто вуглеводні, в молекулах яких всі атоми водню замінені атомами фтору, що мають загальний склад  $C_xF_y$  за нормальних умов, є газами (наприклад,  $CF_4$ ,  $C_2F_6$ ,  $C_3F_8$ ,  $C_4F_8$ ,  $C_4F_{10}$ ) або ріди- нами (наприклад,  $C_7F_{11}$ ,  $C_7F_8$ ,  $C_8F_{16}$ ,  $C_{14}F_{24}$ ).

Електрична міцність деяких з цих газів, а також пари рідин істотно (6 – 10 разів) перевершує електричну міцність повітря. Електрична міцність фторо містких газів і пари за нормальних умов може бути того ж порядку, що і електрична міцність електроізоляційних рідин, в той же час дані гази в порівнянні з рідкими діелектриками мають переваги значно меншої щільності (що приводить до зменшення маси заповнюваних газом апаратів), вищій нагрівостійкості і стійкості до старіння. Навіть невелика домішка, до повітря елегазу, фреону, перфторорганічних газів або пару помітно підвищує його електричну міцність, що використову- ється в деяких електричних пристроях високої напруги.

**Водень.** Значний інтерес представляє водень. Це дуже легкий газ, що володіє вельми сприятливими властивостями для використання як середовище, що охолоджує, замість повітря. Водень характеризується високими значеннями питомої теплопровідності і теплоємності. При використанні водню охолодження електричних машин, що обертаються, істотно поліпшується. Крім того, при заміні повітря воднем помітно знижуються втрати потужності на тертя ротора машини об газ і на вентиляцію,

оскільки ці втрати приблизно пропорційні щільності газу. Унаслідок відсутності окислюваної дії кисню повітря сповільнюється старіння органічної ізоляції обмоток машини і усувається небезпека пожежі у разі короткого замикання усередині машини. У атмосфері водню поліпшуються умови роботи щіток. Тому водневе охолодження дозволяє підвищити потужність машини та її к.к.д. Крупні турбогенератори, синхронні компенсатори і тому подібне виконуються з водневим охолодженням (ще ефективніше охолодження досягається циркуляцією рідини усередині порожнистих провідників обмоток статора і, іноді, ротора). Застосування циркуляційного водневого охолодження вимагає герметизації машини (підшипники ущільнюються за допомогою масляних затворів). Щоб уникнути попадання всередину машини повітря (водень при змісті його в повітрі від 4 до 74% за об'ємом утворює вибухову суміш — гримучий газ), усередині машини підтримується деякий надмірний тиск понад атмосферний, поступовий витік водню заповнюється подачею газу з балонів. За інших рівних умов електрична міцність водню приблизно на 40%, а вугільного ангідриду  $\text{CO}_2$  — на 10% нижче, ніж електрична міцність повітря. Для заповнення електровакуумних приладів і ламп уживаються інертні гази аргон, неон та інші, а також пари ртуті і натрію. Інертні гази володіють низькою електричною міцністю. Слід зазначити малу теплопровідність криптону і ксенону, ця обставина використовується у виробництві деяких типів електричних ламп.

**Гелій.** Особливо велике значення в якості, низькотемпературного хладагенту, зокрема для пристроїв, що використовують явище надпровідності, має зріджений гелій.

Гелій взагалі є виключно цікавим матеріалом, що володіє унікальними властивостями. Так, у нього найнижча в порівнянні з іншими газами температура зріджування (4,216К при атмосферному тиску). Рідкий гелій має дуже малу щільність. Квантовомеханічні явища в рідкому гелії роблять його поведінку багато в чому схожим з поведінкою газів, а не рідин. Діелектрична проникність рідкого гелію вельми мала. Вельми мала відмінність питомих

теплопровідностей рідкого і газоподібного гелію. Мало і поверхневе, натягнення рідкого гелію. Теплота випаровування його надзвичайно низка, що велими істотно для криогенної техніки. При подальшому охолодженні нормальний рідкий гелій (гелій I) переходить в нову модифікацію — гелій II. В'язкість гелію II практично рівна нулю (цей стан називають надтекучістю, так гелій II легко протікає крізь щілину між пришліфованими скляними пластинками). Питома теплопровідність гелію II практично нескінченно велика, питома теплоємність рідкого гелію зростає у багато разів. Неон. Іноді як криогенного хладагенту застосовується рідкий неон, температура кипіння якого лише ненабагато перевершує температуру кипіння водню. Для неону, як і для інших інертних газів, характерна вельми мала відмінність між температурою кипіння і температурою плавлення. Хімічна інертність неону складає його перевагу перед вибухонебезпечним воднем. Проте неон дуже дорогий. Рідкий азот легко виходить при розділенні повітря на азот і кисень; рідкий водень проводиться промисловістю у великих кількостях.

### **Самостійна робота №17**

**Тема:** Рідкі діелектрики

**Мета:** ознайомитись з різновидами рідких діелектриків

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Основні властивості рідких діелектриків.
- 2 Трансформаторне масло.
- 3 Синтетичні рідкі діелектрики.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте властивість рідких діелектриків.
- 2 Опишіть характеристики трансформаторного масла.
- 3 Обґрунтуйте особливості синтетичних діелектриків.
- 4 Охарактеризуйте застосування синтетичних діелектриків.

**Рідкі діелектрики** представляють собою електроізоляційні рідини, які використовуються в електричних апаратах високої напруги, а також в блоках електронної апаратури. Застосування електроізоляційних рідин дозволяє забезпечити надійну і тривалу роботу електричної ізоляції, під напругою елементів конструкції, і відводити від них теплоту, що виділяється при роботі.

Нафтові масла отримують фракційної перегонкою нафти. Виділені фракції являють собою складну суміш вуглеводнів парафінового, нафтового і ароматичного рядів з невеликою домішкою інших компонентів, що містять атоми сірки, кисню та азоту. Нафтові масла, в яких переважають нефтфнові вуглеводні, називають нафтовими. В трансформаторних маслах їх вміст досягає 75-80%. Необхідною складовою частиною іншого електричного нафтових, масел є також ароматичні вуглеводні, зміст яких обмежується певним оптимумом (зазвичай 10-12%), що забезпечує найбільшу збільшення терміну служби. Зайва кількість ароматичних вуглеводнів збільшує тангенс кута діелектричних втрат.

Щоб отримати трансформаторне масло, придатне для застосування, необхідно очистити масляний дистилят, який залишається після відгону від нафти легких нафтопродуктів: бензину, гасу, лигроїна.

Дистилят очищають сірчаною кислотою, потім нейтралізують лугом, промивають водою і сушать при 75-85 ° С, продуваючи через нього повітря. Для очищення від домішок і механічних забруднень масла фільтрують через адсорбенти - речовини, що мають сильно розвинену поверхню.

**Свіже трансформаторне (конденсаторне) масло** має звичайно солом'яно-жовтий колір, причому чим глибше очистка, тим світліше масло. Масла, що були в експлуатації, через накопичення продуктів окислення мають темний колір.

Конденсаторне масло отримують з низкозастигаючих високоякісних нафт або шляхом додаткової очистки адсорбентами трансформаторного масла. Операції очищення конденсаторного масла кислотою і лугом проводяться також, як і для трансформаторного, але триваліше і ретельно.

Так як нафтові електроізоляційні олії є горючими рідинами, то вони представляють собою велику пожежну небезпеку в масляних господарствах енергосистем, де часто використовуються тисячі тонн масла. Тому правила пожежної безпеки при роботі з маслonaповненим обладнанням повинні ретельно дотримуватися. Пожежна небезпека оцінюється по температурі спалаху парів трансформаторного масла в суміші з повітрям, яка не повинна бути нижче 135-140 ° С. У тих випадках, коли трансформаторне масло застосовується в масляних вимикачах високої напруги, важливим параметром масла є температура застигання. Масло в цих електричних апаратах служить для охолодження каналу дуги і швидкого її гасіння в момент розриву контактів. Тоді як звичайне трансформаторне масло має температуру застигання близько-45 ° С, спеціальне «арктичне» масло, призначене для роботи на відкритих підстанціях в районах Крайньої Півночі, має температуру застигання - 70 ° С (марка АТМ-65).

Найбільш важливі для практичного застосування трансформаторного масла властивості нормовані ГОСТ 982-80. З цих характеристик необхідно знати кінематичну в'язкість при температурі 20 і 50 ° С, так як при збільшенні в'язкості понад допустимих меж гірше відводиться теплота від обмоток і магнітопровода трансформатора, що може привести до скорочення терміну служби електричної ізоляції. Стандартом нормовано також так зване кислотне число - кількість грамів КОН, яким можна повністю нейтралізувати всі кислі продукти, які містяться в 1 кг масла. Цей показник важливий для обліку старіння масла в процесі його експлуатації і для різних марок масла не повинен перевищувати значень 0,03-0,1г КОН на 1 кг. Для розрахунку розширювачів трансформаторів, в які переходить частина масла з бака трансформатора при підвищенні температури, важливо також враховувати і щільність масла, яка становить 0,85-0,9 мг/м<sup>3</sup>, і температурний коефіцієнт об'ємного розширення, що має значення близько 0,00065 К<sup>-1</sup>. Здатність масла відводити теплоту від муздраттеатру і обмоток зануреного в нього трансформатора залежить від питомої теплоємності, рівної при нормальній температурі приблизно 1,5 Дж/(кг·К), і коефіцієнта теплопровідності близько 1Вт/(м·К). Обидві ці характеристики при зростанні температури збільшуються.

За своїми діелектричним характеристикам добре очищене від домішок і вологи трансформаторне масло має властивості неполярного діелектрика. Значення діелектричної проникності при 20 ° С дорівнює 2,2-2,3 tg δ при

частоті 50 Гц для трансформаторного масла не повинен перевищувати 0,003. Величина  $\delta$  визначається провідністю і залежить від ступеня очищення трансформаторного масла. Отримання масел із зниженими діелектричними втратами (значення  $\text{tg } \delta$  близько 0,002-0,0005) для кабелів і конденсаторів вимагає дуже хорошої очищення із застосуванням адсорбентів. Залежність  $\text{tg } \delta$  трансформаторного масла від температури на частоті 50 Гц показана на рис. 6.1. Питомий електричний опір свіжого трансформаторного масла при нормальній температурі не перевищує  $10^{13}$  Ом·м.

Важливою характеристикою масла є його електрична міцність, яка надзвичайно чутлива до зволоженню. Правила технічної експлуатації електростанцій (ПТЕ) передбачають певні норми електричної міцності для чистого і сухого трансформаторного масла, приготованого для заливки в апарат, і для мрела, що знаходився в експлуатації.

Пробій масла виробляють в стандартному, розряднику між зануреними в масло металевими дисковими електродами діаметром 25 мм із закругленими кінцями при відстані між ними 2,5 мм. Пробивна напруга технічно чистих масел в стандартному розряднику становить 50-60 кВ при 50 Гц і приблизно 120 кВ при впливі імпульсного напруги. Домішка води в маслі знижує значення пробивної напруги. Якщо вода знаходиться в маслі у вигляді емульсії, тобто у вигляді найдрібніших крапельок, які втягуються в місця, де напруженість поля велика, то в цьому місці і починається розвиток пробою. Характер зміни пробивної напруги трансформаторного масла, що містить вологу, в залежності від температури показаний на рис. 6.2. Збільшення пробивної напруги з ростом температури пояснюється переходом води з суспензії в молекулярно-розчинений стан. Зростання пробивної напруги при зменшенні температури нижче  $0^{\circ}\text{C}$  пояснюється утворенням льоду і зростанням в'язкості олії.

При роботі маслонаповнених трансформаторів або інших електричних апаратів, що містять масло, спостерігається поступове погіршення робочих параметрів масла:  $\text{tg } \delta$ , кольору, кислотності, в'язкості, температури замерзання і ін. Ці процеси характеризуються поняттям «старіння», яке супроводжується зміною хімічних та електрофізичних показників. Найбільш інтенсивно процеси старіння масла протікають при підвищенні температури масла до максимально допустимої (зазвичай робоча температура масла не перевищує  $95^{\circ}\text{C}$ ) при одночасному впливі електричного поля. Старіння прискорюється також за рахунок одночасного впливу світла, випромінювань високих енергій і присутності деяких матеріалів і сполук, що є каталізаторами старіння. Активними каталізаторами є мідь

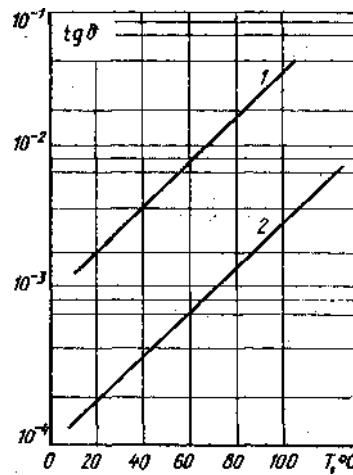


Рисунок 17.1 – Залежність  $\text{tg } \delta$  трансформаторного масла від температури

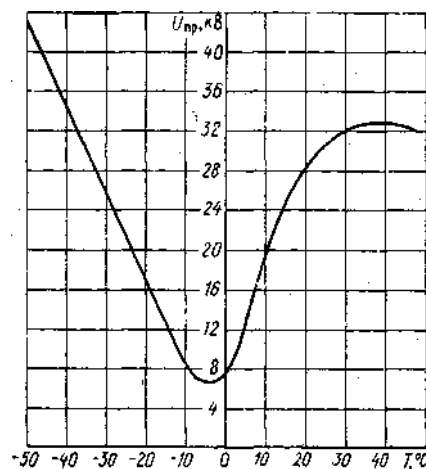


Рисунок 17.2 – Залежність пробивної напруги трансформаторного масла від температури

та її сплави, а також солі міді, заліза, кобальту, органічних кислот, розчинні в олії. На початку процесу старіння масла утворюються частково розчинні забруднюючі продукти - смоли і кислоти, а з плином часу з'являються важкі нерозчинні опади, які у вигляді «мулу» або «шламу» осідають на дні бака, на менш нагрітих частинах трансформатора і в місцях з підвищеною напруженістю поля. Шар мулу значно погіршує тепловідвід від нагрітих деталей, а низькомолекулярні кислоти, що містяться в застарілому маслі, руйнують ізоляцію обмоток і викликають корозію металів. Електричне поле прискорює процес старіння масла і змінює характер продуктів окислення масел. При старінні деяких сортів масла в електричному полі може спостерігатися також і газовиділення, від якого позбуваються підбираючи склад масла.

З метою підвищення стійкості масел до процесів старіння їх склад підбирають таким чином, щоб у ньому не містилося природних каталізаторів окислення і зберігалися сполуки, що уповільнюють окислення. Такі речовини



називаються інгібіторами. В масла вводять також синтетичні інгібітори - іонол, ДВРС в концентрації від 0,1 до 0,5%. Введення іонола уповільнює процес старіння масла в 2-3 рази. Щоб продовжити термін служби масла в обладнанні, використовують різні методи. Найбільш поширений спосіб - герметизація устаткування, в результаті якої усувається безпосередній контакт масла з киснем повітря. Цей прийом використовується в кабельній, конденсаторній техніці і в трансформаторобудуванні. В трансформаторах, крім того, для уповільнення накопичення продуктів окислення масла використовується метод природної циркуляції масла через так званий термосифонний фільтр, який можна періодично замінювати на свіжий, заповнений адсорбентом. Такі фільтри постійно з'єднані з трансформатором. Для трансформаторів різних габаритів розроблено близько 20 типів термосифонів. Особливістю термосифонних фільтрів є можливість відновлення масла в трансформаторі без його відключення. Для запобігання окисдування і зволоження масла в трансформаторах вільний простір між поверхнею масла і кришкою бака або розширювача зазвичай заповнюється азотом.

Масла, побувавши в експлуатації, піддаються регенерації. Волога і великі тверді домішки видаляються на різних центрифугах (для електричних апаратів напругою нижче 35 кВ). Для електричних апаратів напругою вище 35 кВ масла очищаються від містяться в них вологи, газів і легких домішок шляхом термовакuumної обробки в спеціальних апаратах. Осушка масел проводиться штучними цеолітами, які відомі також під назвою «молекулярні сита». Масла з кислотним числом нижче 0,4 мг КОН на 1 г піддаються очищенню природними і синтетичними адсорбентами при температурі 50-60°C.

Основні характеристики регенованого масла повинні відповідати нормам на свіжі масла.

Крім трансформаторного масла в електротехнічній промисловості знаходять застосування інші види нафтових масел. До них відносяться конденсаторні, кабельні та масла для масляних вимикачів і контакторних пристроїв регулювання напруги під навантаженням.

**Синтетичні рідкі діелектрики.** Вони застосовуються в тих випадках, коли необхідно забезпечити тривалу і надійну роботу високовольтних електричних апаратів при підвищених теплових навантаженнях та напруженості електричного поля, в пожежо- або вибухонебезпечною середовищі. Рідкі діелектрики знаходять застосування і для заливки герметичних кожухів, в яких розташовуються блоки електронної апаратури.

Найбільше застосування отримали синтетичні рідини на основі хлорованих вуглеводнів, що пов'язано з їх високою термічною стійкістю, електричною стабільністю, негорючістю, підвищеним значенням діелектричної проникності і відносно невисокою вартістю. За зарубіжними даними, якщо ціну нафтового масла прийняти рівною одиниці, то вартість хлорованих вуглеводнів по відношенню до масла дорівнює 4-10, кремнійорганічних рідин - від 80 до 370, фторорганічних рідин - до 1150. Однак у зв'язку з токсичністю хлорованих вуглеводнів їх застосування спочатку обмежувалося, а в даний час майже повсюдно заборонено, хоча в експлуатації ще мається їх значна кількість.

Хлоровані вуглеводні можна отримати шляхом хлорування дифенілу -  $C_6H_5$ . При цьому можна отримувати продукти з різним ступенем хлорування: три-, тетра-, пента- і гексахлордифеніли. У міру збільшення ступеня хлорування ростуть молекулярна маса, щільність, в'язкість, температура застигання і кипіння. Разом з тим зростає і екологічна небезпека, тому в конденсаторостроєнні пентахлордифеніл (совтола) був замінений на тріхлордифеніл, хоча він і має підвищену в'язкість при низьких температурах. Для застосування в силових трансформаторах в СРСР використовують в основному совтола-10, що представляє собою суміш 90% пента- хлордифеніла і 10% трихлорбензол, який має в робочому інтервалі температур в'язкість, близьку до в'язкості трансформаторного масла. Однак за своїми в'язкісно-температурним властивостям совтола-10 значно поступається гексола, який представляє собою суміш 20% пентахлордифеніла і 80% гексахлорбутадієна. Гексола не застигає при температурі до  $-60^{\circ}C$  і менше схильний до впливу забруднень. Значення тангенса кута діелектричних втрат для тріхлордифеніла, совтола-10 і гексола при  $90^{\circ}C$  лежать в межах 0,015-0,03. Питомий об'ємний опір поліхлордифенілів при робочих температурах - в межах 3- 10 Ом-м. Найменш полярні властивості проявляються у гексола, у якого  $\epsilon$  при  $70^{\circ}C$  не перевищує 2,7-2,9. Електрична міцність більшості рідин на основі хлористих вуглеводнів при  $20^{\circ}C$  не перевищує 18-22 МВ / м.

## Самостійна робота №18

**Тема:** Лаки, емалі, компаунди.

**Мета:** ознайомитись з різновидами лаками, емалями, компаундами.

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Лаки.
- 2 Емалі.
- 3 Компаунди.

### Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### Питання для самоконтролю:

- 1 Охарактеризуйте призначення і властивості лаків.
- 2 Опишіть призначення і властивості емалів.
- 3 Обґрунтуйте призначення і властивості компаундів.

**Електроізоляційні лаки** являють собою колоїдні розчини на лакової основі, що утворює після видалення розчинника плівку, яка має електроізоляційні властивості.

Лакова основа являє собою ту частину лаку, яка утворює плівку і складається з бітумів, що висихають рослинних масел, природних або синтетичних смол, а також з їхніх композицій.

Рослинні масла, одержувані з насіння різних рослин, здатні під дією нагрівання, освітлення, зіткнення з киснем повітря та інших факторів переходити в твердий стан. Висихання масел є складним хімічним процесом, пов'язаним з полімеризаційними процесами і поглинанням маслом деякої кількості кисню з повітря, тому маса льняного і подібного масел при сушінні може дещо збільшуватися. Найбільш широко застосовуються лляне і тунговое масла. Ці масла, якщо їх нанести на поверхню, швидко висихають з утворенням твердої неплавкої плівки. Плівки з тунгового масла не розчиняються в органічних розчинниках, стійкі до дії води, а плівки льняного

масла майже не розчиняються в розчинниках. Найбільш високими електроізоляційними властивостями володіє тунгове масло, яке є токсичним продуктом. Каталізаторами реакцій висихання масел є сполуки свинцю, кобальту, кальцію, запроваджені в олії у вигляді солей, різних кислот. Такі речовини називаються сиккативами.

**Бітуми** - чорні, тверді або пластичні речовини з аморфною структурою, що складаються в основному зі складної суміші вуглеводнів і продуктів їх подальшої полімеризації і окислення. Природні бітуми, звані також асфальтами, містять різні мінеральні домішки. Бітуми при нагріванні переходять в рідкий стан, при охолодженні тверднуть. При низьких температурах вони крихкі і дають характерний злам у вигляді раковини.

Кращі електроізоляційні властивості, як правило, мають більш тугоплавкі бітуми, вони важче розчиняються і більш тендітні. Температура розм'якшення бітумів може бути підвищена шляхом пропускання повітря через розплавлений бітум. За своїми діелектричними характеристиками бітуми можуть бути віднесені до слабополярних сполук. Для електроізоляційної техніки найбільш широко застосовують нафтові бітуми- марок БН-III, БН-IV, БН-V і більш тугоплавкі спецбітуми марок В і Г.

**Розчинники** - летючі рідини, застосовувані для розчинення лакових основ і летких в процесі утворення плівки. Розчинниками можуть служити ароматичні вуглеводні, спирти, складні і прості ефіри, скипидар та ін. До складу лаку, крім того, можуть входити такі додаткові речовини.

**Сиккативи** - речовини, що прискорюють процес висихання рослинних масел і лаків. Пластифікатори - речовини, що додають еластичність і ударну міцність лакової плівці. Отвердители - сполуки, що сприяють отвердінню плівки лаку. Ініціатори і прискорювачі - речовини, що прискорюють процес утворення полімерів. Інгібітори - сполуки, що перешкоджають передчасному загущенню.

**Електроізоляційні емалі** є лаки, до складу яких входять пігменти - високодисперсні неорганічні речовини, підвищувальні твердість і механічну міцність лакової плівки, теплопровідність, дугостійкість. В якості пігментів часто застосовують діоксид титану, залізний сурик і ін.

Електроізоляційні компаунди в основному складаються з тих же речовин, які входять до складу лакової основи електроізоляційних лаків, але на відміну від лаків не містять розчинників. В момент застосування при нормальній і підвищеній температурі компаунди перебувають в рідкому стані і твердіють після охолодження або в результаті відбуваються в них хімічних процесів.

Крім того, до складу компаундів можуть входити активні розріджувачі, понижуючі в'язкість компаунда, пластифікатори, отверджувачі, ініціатори та

інгібітори, призначення яких ті ж, що і в лаках. До складу компаунда можуть також входити наповнювачі - неорганічні і органічні порошкоподібні або волокнисті матеріали, що застосовуються для зменшення усадки, поліпшення теплопровідності, зменшення температурного коефіцієнта розширення і зниження вартості. Як наповнювачі застосовують пилоподібне кварц, тальк, слюдяну пил, азбестове і скляне волокно і ряд інших.

**Електроізоляційні лаки та компаунди** широко застосовуються в електроізоляційної та кабельної техніці, у виробництві електричних машин, турбо- і гідрогенераторів, апаратів, трансформаторів, розподільних пристроїв, в високочастотної техніці.

Вибір електроізоляційних лаків або компаундов для тієї або іншої конструкції ґрунтується на знанні технічних вимог для даної конструкції і умов її роботи, на фізичних і електричних характеристиках лаків і компаундів, що визначаються відповідними ГОСТами і технічними умовами (ТУ).

За призначенням і виконуваним функціям електроізоляційні лаки прийнято поділяти на три основні групи: просочувальні, покривні і склеювальні.

Просочувальні лаки призначені для просочення ізоляції обмоток електричних машин і апаратів, для просочення різних електроізоляційних матеріалів волокнистої будови - паперу, тканини, склотканини, електрокартону і ін.

Покривні лаки використовують для створення зовнішньої захисної обробки різних електроізоляційних деталей, металевих вузлів і деталей, покриття попередньо просочених обмоток електричних машин і апаратів. До цієї групи належать також емаль-лаки, застосовувані в кабельній промисловості, і напівпровідні лаки, що володіють підвищеною питомою провідністю.

**Клеючі лаки** призначаються для склеювання різних електроізоляційних матеріалів і деталей, слюди, паперу, картону.

Наведена класифікація лаків значною мірою є умовною, оскільки один і той же лак іноді може служити і просочувальним і клеїть, наприклад бакелітовий лак при виробництві шаруватих пластиків.

За способом сушіння електроізоляційні лаки діляться на лаки повітряної, чи холодною, сушки та пічного, або гарячої.

Лаки повітряної сушки висихають і утворюють плівки необхідної якості при кімнатній температурі. Освіта плівки лаку повітряної сушки може відбуватися в результаті видалення летючих розчинників, окислювальних або полімеризацій процесів (в масляних або бітумних лаках), а також при введенні

відповідних отверджувачів холодного затвердіння в лаках на основі деяких синтетичних смол.

Лаки пічної, або гарячої, сушки містять в основі висококиплячі розчинники, повільно летких при нормальній температурі, або композиції різних термореактивних синтетичних смол, в яких під час сушки при високій температурі 100 ° С і вище відбуваються реакції окислення, полімеризації або поліконденсації.

За хімічним складом лакової основи електроізоляційні лаки діляться на три основні групи: масляні, смоляні, ефіро-целюлозні.

Масляні (масловмісні) лаки складаються з висихаючих рослинних масел і натуральних або синтетичних смол або бітумів з добавкою сикативів. З висихаючих масел найбільш часто застосовують лляне, тунговое, ойтісікове або їх суміші. Розчинниками є аліфатичні вуглеводні (гас, уайт-спірит), ароматичні (толуол, ксилол) або їх суміші, а також скипидар. До групи масляних лаків відносяться масляно-бітумні, масляно-каніфольні, масляно-алкідні лаки. До складу масляно-бітумних лаків входять рослинні масла в композиції з асфальтами і асфальтитами або штучними нафтовими бітумами з добавкою сикативу. До складу масляно-каніфольних лаків входять крім висихаючих рослинних масел препарати, що містять каніфоль. Масляно-алкідні лаки являють собою продукт реакції поліконденсації багатоатомних спиртів з багатоосновними кислотами.

Смоляні лаки виходять на основі синтетичних смол. Прикладом є фенолоформальдегідні смоли, розчинені в етиловому спирті, водні феноло- або крезолоформальдегідні лаки, що не містять спирту. До цієї ж групи належать лаки на основі поліефірних, епоксидних, кремнійорганічних смол, лаки на основі поліефірних, епоксидних, кремнійорганічних смол, лаки на основі натуральних смол або бітумів.

Ефіроцелюлозних лаки, що представляють собою розчини різних ефірів целюлози (нітроцелюлоза, етилцелюлоза) з добавкою пластифікаторів суміші зі складними ефірами, спиртами, кетонами і ароматичними вуглеводнями мають обмежене застосування в електротехнічній промисловості.

**Електроізоляційні компаунди** за своїм призначенням і виконуваним функціям діляться на дві основні групи: просочувальні і заливальні. Просочувальні компаунди служать для заповнення пір, капілярів і повітряних включень в електроізоляційних матеріалах, використовуваних головним чином для обмоток електричних машин, котушок апаратів, трансформаторів та інших електротехнічних конструкцій. Після просочення підвищується електрична міцність матеріалу і всієї конструкції в цілому, поліпшуються

теплопровідність, тепловіддача обмоток, що дозволяє збільшити потужність електричних машин і апаратів при тих же габаритах, збільшуються механічна міцність, вологостійкість, термін служби всієї конструкції.

По відношенню до нагрівання електроізоляційні компаунди діляться на термопластичні і термореактивні.

**Термопластичні компаунди** тверді при нормальній температурі, при нагріванні розм'якшуються, стають пластичними і переходять в рідкий стан, при охолодженні знову затвердівають. Розплавлення і отвердіння компаундов цієї групи можна проводити багаторазово. Для виготовлення цих компаундов часто застосовують нафтові бітуми в поєднанні з рослинними і мінеральними маслами, каніфоллю і деякими термопластичними полімерами.

**Термореактивні компаунди** в момент їх застосування знаходяться в рідкому стані, а потім тверднуть в результаті відбуваються в них хімічних реакцій. Отвердіння компаундов цієї групи відбувається під дією затверджувача або каталізатора. Після затвердіння компаунд стає твердим, неплавким і не розчинним в звичайних розчинниках. Як і лаки, ці компаунди діляться на компаунди гарячого і холодного затвердіння. Компаунди гарячого затвердіння переходять в твердий стан при спеціальній термічній обробці, а компаунди холодного затвердіння переходять в твердий стан під дією затверджувачів.

За хімічним складом електроізоляційні компаунди діляться на компаунди, що виготовляються на основі нафтових бітумів, рослинних або мінеральних масел і каніфолі, і компаунди на основі синтетичних смол. В компаунди, що виготовляються на основі різних нафтових бітумів, іноді додають лляне або мінеральне масло і каніфоль. Компаунди на основі синтетичних смол виготовляються на основі поліефірних, епоксидних, епоксидно-поліефірних кремнійорганічних та інших смол та їх композицій.

## Самостійна робота №19

**Тема:** Слюда і слюдяні матеріали

**Мета:** ознайомитись з різновидами слюди і слюдяних матеріалів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

1 Слюда.

2 Слюдяні матеріали.

## Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

## Питання для самоконтролю:

- 1 Охарактеризуйте призначення слюди.
- 2 Опишіть призначення і властивості слюдяних матеріалів.

**Слюди** — група поширених породотвірних мінералів підкласу шаруватих силікатів, водні алюмосилікати лужних і лужноземельних металів. Мають важливе промислове значення. Становлять собою гідроксил- і флуорвмісні алюмосилікати.

За хімічним складом усі слюди поділяються на три групи (ряди):

- 1 калієсто-натрієсті (мусковіт, парагоніт),
- 2 літійєсті (лепідоліт, цинвальдит),
- 3 магнієсто-залієсті (флогопіт, біотит, лепідомелан).
- Окремо виділяють гідрослюди (глауконіт, вермікуліт, гідробіотит, гідромусковіт).

Кожний із зазначених рядів є ізоморфним. За структурними формулами калієсто-натрієсті слюди виділяють під назвою гептафілітів, а літійєсті і магнієсто-залієсті – октафілітів. За фізич. властивостями і морфологією всі слюди дуже близькі між собою.

Крім того, виділяють слюди діоктаедричні – слюди, в структурі яких заповнено лише 2/3 можливих октаедричних положень. Це гептофіліти (мусковіт, парагоніт) та ін. мінерали-аналоги шаруватої будови. Слюди тріоктаедричні – слюди, в структурі яких заповнені всі можливі октаедричні положення. До них належать октафіліти (магнієсто-залієсті і літійєсті слюди) та ін. шаруваті мінерали-аналоги.

Слюди крихкі – алюмосилікати шаруватої будови, які за своєю будовою і фізичними властивостями дуже близькі до слюд. На відміну від звичайних



слюд пакети в крихкій слюді зв'язуються катіонами не лугів, а кальцію. Ці слюди дуже рідкісні, утворюють суцільні лускувато-зернисті маси. Твердість їх вища, а спайність гірша, ніж у звичайних слюд.

Слюди – головні породотвірні мінерали більшості вивержених

Мають шарувату структуру. Будова кристалів листувата з досконалою спайністю в одному напрямку. Тв. 2 (гідрослюди) – 4,5 (маргарит).

Густина від 2,3 у гідрослюд до 2,8-2,9 у мусковіту і лепідоліту і до 3,0-3,3 у флогопіту і біотиту. Пром. значення мають мусковіт, флогопіт, вермікуліт, глауконіт, а також літєві слюди (як літєва руда). Застосовуються в електро- і радіотехніці.

З мінералів групи слюди найважливіше промислове значення мають мусковіт і флогопіт. Найтонші, рівні і гнучкі листочки їх характеризуються діелектричними властивостями і механічною міцністю; термічністю і хімічною стійкістю; дуже малою гігроскопічністю і високою жаростійкістю (до 500-800°C). Завдяки вдалому поєднанню цих властивостей мусковіт і флогопіт є найціннішим природним високоякісним електроізоляційним матеріалом. Окремі кристали слюд досягають іноді 1 м.

### **Листова слюда**

До неї відносять світлі, прозорі різновиди, які розщеплюються на «книжки» різної товщини, придатні для штамповки виробів потрібних форм. Завдяки високим електроізоляційним формам використовується у радіоелектроніці, електромашинобудуванні, електротермії.

### **Дрібнолускова слюда**

Використовується для виготовлення теплоізоляційних матеріалів в галузях теплоенергетики, будівельництва й використовується як сорбент у сільському господарстві.

### **Фарби та покриття**

Дрібно мелена слюда з нанесеним покриттям діоксиду титану (TiO<sub>2</sub>) широко застосовується для досягнення "перламутрового" ефекту в автомобільних покриттях.

## **Самостійна робота №20**

**Тема:** Активні діелектрики

**Мета:** ознайомитись з різновидами активних діелектриків

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Призначення активних діелектриків.
- 2 Сегнетоелектрики.
- 3 П'єзоелектрики.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте призначення активних діелектриків.
- 2 Опишіть призначення сегнетоелектриків.
- 3 Обґрунтуйте призначення п'єзоелектриків.

**Активними називаються** діелектрики, властивостями яких можна керувати за допомогою зовнішніх енергетичних впливів і використовувати для створення функціональних елементів електроніки. Активні діелектрики дозволяють здійснити генерацію, посилення, фільтрацію, модуляцію електричних та оптичних сигналів, запам'ятовування і перетворення інформації.

До числа активних діелектриків відносять сегнето-, п'єзо-і піроелектрик, Електрети, матеріали квантової електроніки, рідкі кристали, електро-, магніто- і акустооптичні матеріали, діелектричні кристали з нелінійними оптичними властивостями та ін

Властивостями активних діелектриків мають тверді, рідкі газоподібні речовини. За хімічним складом це можуть бути органічні і неорганічні

матеріали. За властивостями і будовою їх можна підрозділити на полярні й неполярні, кристалічні і аморфні діелектрики. Різкого розмежування між активними і пасивними діелектриками не існує. Один і той же матеріал в різних умовах експлуатації може виконувати або пасивні функції ізолятора або конденсатора як активні функції керуючого або перетворюючого елемента.

### **Сегнетоелектрики**

Сегнетоелектриками називають речовини, що володіють спонтанною (мимовільною) поляризацією, напрямок якої може бути змінено за допомогою зовнішнього електричного поля.

У відсутності зовнішнього електричного поля сегнетоелектрики, як правило, мають доменну структуру. Домени - це макроскопічні області, що володіють спонтанною поляризацією, яка виникає під впливом внутрішніх процесів в діелектрику. Лінійні розміри доменів складають 0.001 - 1 мм. Напрямок електричних моментів у різних доменів різному. У результаті сумарна поляризованість зразка в цілому дорівнює нулю.

Зовнішнє електричне поле змінює напрям електричних моментів доменів, відбувається процес зародження й росту нових доменів за рахунок зміщення доменних меж. У результаті відбувається переорієнтація вектора спонтанної поляризації у напрямку зовнішнього поля. Це створює ефект дуже сильної поляризації і обумовлює надвисокі значення діелектричної проникності сегнетоелектриків (до сотень тисяч). Залежність поляризованості  $P$  від напруженості поля  $E$  нелінійна і при циклічному зміні  $E$  має вид петлі гістерезису (рис. 34). Напруженість поля  $E_c$ , при якій відбувається зміна напрямку поляризованості називають коерцитивною силою. Діелектричний гістерезис зумовлений необоротним зміщенням доменних меж під дією поля і свідчить про додаткові витрати енергії, пов'язаних з орієнтацією доменів. Площа петлі гістерезиса пропорційна енергії, що розсіюється в діелектрику за один період. Тому сегнетоелектрики характеризуються великим значенням тангенса кута втрат ( $\text{tg } d = 0.1$ ).

Наявність петлі гістерезиса є основною властивістю сегнетоелектриків, яка відрізняє їх від інших класів діелектриків. Іншим характерним параметром сегнетоелектриків є сегнетоелектрична точка Кюрі - температура при якій виникає (при охолодженні) або зникає (при нагріванні) спонтанна поляризація, а діелектрична поляризація досягає свого максимального значення (рис.35). Після досягнення точки Кюрі доменна структура розпадається і сегнетоелектрик переходить в пароелектричного стан. Це супроводжується різким зменшенням  $\text{tg } d$ , оскільки зникають втрати на гістерезис. При

температурах вище точки Кюрі залежність діелектричної проникності від температури підкоряється закону Кюрі-Вейсса.

За типом хімічного зв'язку та фізичним властивостям сегнетоелектрики підрозділяють на іонні і дипольні кристали.

До іонних сегнетоелектриків відноситься титанат барію ( $\text{BaTiO}_3$ ), титанат свинцю ( $\text{PbTiO}_3$ ), ніобат літію ( $\text{LiNbO}_3$ ), танталат літію ( $\text{LiTaO}_3$ ) та ін Ці з'єднання не розчиняються у воді, мають значну механічну міцність, легко виходять у вигляді полікристалів за керамічною технологією, мають більш високу температуру Кюрі і більше значення спонтанної полярності, ніж дипольні сегнетоелектрики.

До дипольних сегнетоелектриків відносяться сегнетова сіль, дігідросульфат калію ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), нітрит натрію ( $\text{NaNO}_2$ ) та ін Дипольні сегнетоелектрики дуже добре розчиняються у воді і мають малу механічну міцність, точка Кюрі у багатьох з них набагато нижче кімнатної температури. Сегнетоелектрики застосовуються для виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів, термоелектричних і піроелектричних перетворювачів, діелектричних підсилювачів і модуляторів, елементів пам'яті і перетворювачів лазерного випромінювання.

Конденсаторна сегнетокераміка повинна мати найбільшу величину діелектричної проникності з малою залежністю її від температури, невеликі втрати, найменшу залежність  $\epsilon$  і  $\text{tg } d$  від напруженості електричного поля (малу нелінійність), високі значення питомої об'ємної і поверхневої опору та електричної міцності. Оптимізація електричних характеристик досягається підбором концентрації компонентів сегнетоелектриків.

У промисловості використовують кілька сегнетоелектричних матеріалів, кожен з яких застосовують для певних типів конденсаторів.

Сегнетоелектрики, що володіють різко вираженими нелінійними властивостями, застосовуються для нелінійних конденсаторів - варікондів. Одна з основних характеристик варіконда - це коефіцієнт нелінійності  $K = C_{\text{max}} / C_{\text{нач.}}$ , Величина якого може прийняти від 4 до 50. Нелінійні діелектричні елементи, зазвичай в тонкоплівкових виконанні, є основою різних радіотехнічних пристроїв - параметричних підсилювачів, низькочастотних підсилювачів потужності, фазовращателів, умножителів частоти, модуляторів, стабілізаторів напруги та ін

## **П'єзоелектрики**

До п'єзоелектрики відносяться діелектрики, які мають сильно вираженим п'єзоелектричним ефектом.

Прямим п'єзоефект називають явище поляризації діелектрика під дією механічної напруги. Електричний заряд  $Q$ , що виникає на поверхні, змінюється за лінійним законом у залежності від механічних зусиль  $F$ .

П'єзоефект спостерігається лише в іонних і сільнополярних діелектриках, в структурі яких відсутня центр симетрії і які володіють високим питомим опором.

Для характеристики конкретних п'єзоелектриків використовують також величину звану коефіцієнтом електромеханічного зв'язку  $k$ . Це пов'язано з тим, що реальна робота зовнішньої сили затрачається не тільки на деформацію, але і на поляризацію.

$$k^2 = W_e / W,$$

де  $W_e$  - електрична енергія, генерована п'єзоелектриків;  $W$  - вся енергія витрачається на деформацію.

При зворотному п'єзоефекті енергія зовнішнього джерела витрачається не тільки на зарядку ємності п'єзоелектрики, але і на його деформацію.

$$k^2 = W_M / W,$$

Чисельне значення  $k$  для прямого і зворотного п'єзоефект збігаються.

Як пьезоматеріали широко застосовують сегнетоелектрики. Звичайна сегнетокераміки як ізотропна середовище не має п'єзоефект. Для додання п'єзоелектричних властивостей її піддають поляризації: витримують в сильному електричному полі при температурі 100-150 °C протягом тривалого часу. Поляризованість доменів отримує переважну орієнтацію в напрямку поля. Після зняття зовнішнього поля в кераміці зберігається стійка залишкова поляризація; з ізотропного тіла кераміка перетворюється на анізотропне - текстуру. За своїми властивостями поляризований сегнетокерамічеській зразок близький до однодомених кристалу. Поляризовану сегнетокераміки, призначену для використання її п'єзоефекту, називають п'єзокерамікою. З п'єзокераміки можна виготовити активний елемент практично будь-якого розміру і будь-якої форми. Пьезокераміка використовується для створення ультразвукових випромінювачів, елементів перетворення електричних сигналів у звукові і назад, датчиків тиску, деформацій, прискорень і вібрацій, пьезорезонансних фільтрів електричних сигналів, ліній затримки, п'єзотрансформатора і пьезодвигунів. Основним матеріалом для виготовлення п'єзокерамічних елементів є тверді розчини  $PbZrO_3$  -  $PbTiO_3$  (цирконат - титанат свинцю або скорочено ЦТС).

Плоскопаралельна полірована кварцова пластинка з електродом і власником є п'єзоелектричний резонатор, тобто є коливальним контуром з певною частотою коливань. Частота визначається товщиною пластини і напрямом кристалографічного зрізу. Перевагою кварцових резонаторів є

малий  $\text{tg } d$ , висока механічна добротність ( $Q_m = 5 \times 10^4 - 10^7$ ) і температурна стабільність параметрів. Завдяки високій добротності кварцові резонатори використовуються в якості фільтрів з високою виборчою здатністю, а також для стабілізації та еталонірованія частоти генераторів. Одна з головних вимог до таких п'єзоелектрики є нульовий або мінімальний догляд частоти механічних коливань у можливо більш широкому інтервалі температур. Цій вимозі в значній мірі задовольняють АТ-і ВТ-зрізи в діапазоні частот 0.6 - 100 і 5 - 20МГц відповідно, а також СТ-, ДТ-і ГТ-зрізи - в діапазоні 100 - 550 кГц.

### **Самостійна робота №21**

**Тема:** Класифікація кольорового маркування проводів та кабелів

**Мета:** ознайомитись з кольорового маркування проводів та кабелів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Призначення проводів.
- 2 Маркування проводів та кабелів.
- 3 Маркування проводів (кабелів) фаза-ноль-земля.
- 4 Маркування фазних проводів (кабелів).

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте призначення проводів та кабелів.
- 2 Обґрунтуйте для чого виконується маркування проводів та кабелів.
- 3 Як виконується маркування проводів (кабелів) фаза-ноль-земля.
- 4 Як виконується маркування фазних проводів (кабелів).

### **Для чого виконується колірне маркування проводів**

Сьогодні монтаж електропроводки немислимий без застосування провідників у кольоровій ізоляції. Колірне маркування - не данина моді і не маркетинговий хід виробника, який, як комусь може здатися, бажає барвисто піднести свою продукцію.

Насправді це гостра необхідність. По-перше, колірне маркування дозволяє вказати призначення кожного провідника в тій чи іншій групі для полегшення їх комутації. По-друге, значно знижується ймовірність появи помилки в ході монтажу проводів і, як наслідок, виникнення короткого замикання під час пробного включення або ураження електричним струмом в процесі обслуговування та ремонту мереж.

Певні кольори обрані не випадково. Все розмаїття кольорів зведено до єдиного стандарту - ПУЕ. У них зазначено, що жили проводів слід ідентифікувати за колірним або буквено-цифровим позначенням.

В рамках цієї публікації буде розглянута колірне маркування проводів. З прийняттям єдиного стандарту колірної ідентифікації електричних провідників значно полегшить роботу по їх комутації. Кожна жила, що має певне призначення, позначається унікальним кольором: коричневим, сірим, жовтим, зеленим, синім і т. д.

Кольорова маркування зазвичай виконується по всій довжині провідника. Допускається також ідентифікація на кінцях жил і в точках сполук, для чого застосовуються кольорові термоусадочні трубки (кембрики) або кольорова ізоляція.

Розглянемо, як виконана колірне маркування проводів в мережі трифазного, однофазного і постійного струму.

У трифазних мережах шини і високовольтні введення трансформаторів на електричних станціях і підстанціях забарвлення виконується таким чином: жовтим кольором фарбуються проводи та шини з фазою "А", зеленим з фазою "В", а червоним з фазою "С".

Крім мереж змінного струму в народному господарстві використовуються ланцюга постійного струму, які знаходять застосування в наступних областях:

- в промисловості, будівництві, складуванні матеріалів (вантажна техніка, електровізки, електричні крани);
- в електрифікованому транспорті (трамваях, тролейбусах, електровозах, теплоходах, кар'єрних самоскидах);
- на електричних підстанціях (для живлення автоматики та оперативних ланцюгів захистів).

У мережі постійного струму використовується тільки два дроти. У таких мережах немає фазного або нульового провідника, а є тільки позитивна шина (+) і негативна шина (-).

За нормативними документами проводи та шини позитивного заряду (+) забарвлюється в червоний колір, а проводи та шини негативного заряду (-) повинні бути синього кольору. Середній провідник (М) позначається блакитним кольором.

### **Кольори проводів фаза нуль земля в електропроводці**

Для прокладки електричних мереж змінного струму застосовуються багатожильні проводи в різнобарвної ізоляції, що значно спрощує монтажні роботи і виключає плутанину.

Позначення проводів за кольором особливо актуально, коли розводку робить одна людина, а подальшим обслуговуванням або ремонтом буде займатися іншою. Інакше останньому доведеться постійно шукати щось «фазу», то «нуль» за допомогою пробника.

У наш час Нормативним документом, що регулює кольорове маркування ізольованих або неізольованих провідників - є ПУЕ 7, де відповідно до ГОСТ



Р 50462 "Ідентифікація провідників по кольорам або цифровим позначенням" повинні бути використані тільки певні кольори і позначення.

Основним завданням маркування електропроводки є швидкість і легкість визначення призначення провідників по всій довжині, що і є однією з основних вимог ПУЕ.

Розглянемо, яку забарвлення сьогодні повинні мати провідники в електроустановках змінного струму напругою до 1000В і з глухозаземленою нейтраллю (до цієї категорії належить більшість адміністративних будівель і житлових будинків).

### **Колір нульового захисного і нульового робочого провідників**

Блакитним кольором позначаються **нульові робочі провідники (N)**. **Нульовий захисний (PE)** провідник повинен бути пофарбований у жовто-зелені поздовжні або поперечні смуги. Така комбінація кольорів повинна застосовуватися тільки для маркування заземлюючих провідників (нульових захисних).

Поєднаний нульовий робочий і нульовий захисний (PEN) - **синій колір по всій довжині провідника з жовто-зеленими смугами на кінцях (в місцях з'єднання)**. Характерно, що ГОСТ сьогодні допускає і протилежний варіант забарвлення - **жовто-зелені смуги по всій довжині з синім кольором на кінцях (в місцях з'єднання)**.

Цвет нулевых рабочих и защитных проводников  
напряжением до 1000 В в сетях с  
глухозаземленной нейтралью



Нулевой рабочий - N



Нулевой защитный - PE  
(заземляющий)



Совмещенный нулевой  
рабочий и защитный  
PEN

[electricvdome.ru](http://electricvdome.ru)

**Простіше кажучи, позначення нульових проводів за кольором повинно бути:**

1. нульовий робочий (N) - блакитний колір;
2. нульовий захисний (PE) - жовто-зелений колір;
3. суміщений (PEN) - жовто-зелений на кінцях блакитні мітки.

### Кольори фазних проводів

У відповідності з ПУЕ при позначенні фазних провідників перевага віддається одному з наступних кольорів: чорному, коричневому, червоному, сірому, фіолетовому, рожевому, білому, помаранчевому, бірюзовому.

#### Цвет фазных проводников электропроводки



Однофазна електрична мережа може бути створена шляхом відгалуження від трифазної мережі. У цьому випадку фазний провід однофазної мережі за кольором повинен збігатися з фазним провідником трифазної мережі, з яким він з'єднаний.

### Самостійна робота №22

**Тема:** Призначення та характеристика кабелів

**Мета:** ознайомитись з призначенням та характеристикою кабелів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Призначення кабелю.
- 2 основні характеристики кабелів..

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.  
– 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте призначення кабелю.
- 2 Обґрунтуйте основні характеристики кабелів.

**Кабель** — це досить складний виріб, який складаються з провідників, шарів екрана й ізоляції. У деяких випадках до складу кабелю входять з'єднувачі, за допомогою яких кабелі приєднуються до устаткування. Крім цього, для забезпечення швидкої перекомутації кабелів і устаткування використовуються різні електромеханічні пристрої, які називаються кросовими секціями, кросовими коробками чи шафами. У комп'ютерних мережах застосовуються кабелі, що задовольняють визначеним стандартам, які дозволяють будувати кабельну систему мережі з кабелів і сполучаючих пристроїв різних виробників. Сьогодні найбільш вживаними стандартами у світовій практиці є наступні.

Американський стандарт EIA/TIA-568A, який був розроблений спільними зусиллями декількох організацій: ANSI, EIA/TIA і лабораторією Underwriters Labs (UL). Стандарт EIA/TIA-568 розроблений на основі попередньої версії стандарту EIA/TIA-568 і доповнень до цього стандарту TSB-36 і TSB-40A).

Міжнародний стандарт ISO/IEC 11801.

Європейський стандарт EN50173.

Ці стандарти близькі між собою і по багатьом позиціям, які пред'являються до кабелів. Однак є і розходження між цими стандартами, наприклад, у міжнародний стандарт 11801 і європейський EN50173 увійшли деякі типи кабелів, що відсутні в стандарті EIA/TIA-568A.

До появи стандарту EIA/TIA велику роль грав американський стандарт системи категорій кабелів Underwriters Labs, розроблений разом з компанією Anixter. Пізніше цей стандарт увійшов у стандарт EIA/TIA-568.

Крім цих відкритих стандартів, багато компаній у свій час розробили свої фірмові стандарти, з яких і досі має практичне значення тільки один — стандарт компанії IBM.

При стандартизації кабелів прийнято протокольо-незалежний підхід. Це означає, що в стандарті обмовляються електричні, оптичні і механічні характеристики, яким повинен задовольняти той чи інший тип кабелю чи виробу для сполучення — роз'єм, кросова панель і т.п. Однак для якого протоколу призначений даний кабель, стандарт не визначає. Тому не можна придбати кабель для протоколу Ethernet чи FDDI, потрібно просто знати, які типи стандартних кабелів підтримують протоколи Ethernet і FDDI.

У ранніх версіях стандартів визначалися тільки характеристики кабелів, без з'єднувачів. В останніх версіях стандартів з'явилися вимоги до елементів сполучення (документи TSB-36 і TSB-40A, що увійшли потім у стандарт 568A), а також до ліній (каналів), що представляють типову збірку елементів кабельної системи, що складає зі шнура від робочої станції до розетки, самої розетки, основного кабелю (довжиною до 90 м для кручений пари), точки

переходу (наприклад, ще однієї чи розетки твердого кросового з'єднання) і шнура до активного устаткування, наприклад концентратора чи комутатора. Ми зупинимося тільки на основних вимогах до самих кабелів, не розглядаючи характеристик елементів сполучення і зібраних ліній.

У стандартах кабелів обмовляється досить багато характеристик, з яких найбільш важливі перераховані нижче.

**Загасання (Attenuation).** Загасання виміряється в децибелах на метр для визначеного частоти чи діапазону частот сигналу. Перехресні наведення на ближньому кінці (Near End Cross Talk, NEXT). Виміряються в децибелах для визначеної частоти сигналу.

**Імпеданс (хвильовий опір)** — це повний (активний і реактивний) опір в електричній мережі. Імпеданс виміряється в Омах і є сталою величиною для кабельних систем (наприклад, для коаксіальних кабелів, які використовуються у стандартах Ethernet, імпеданс кабелю повинний складати 50 Ом). Для неекранованої кручений пари, яка найбільш часто використовується значення імпедансу — 100 і 120 Ом. В області високих частот (100-200 МГц) імпеданс залежить від частоти.

**Активний опір** — це опір постійного струму в електричному ланцюзі. На відміну від імпедансу активний опір не залежить від частоти і зростає зі збільшенням довжини кабелю.

**Ємність** — це властивість металевих провідників накопичувати енергію. Два електричних провідники в кабелі, розділені діелектриком, являють собою конденсатор, здатний накопичувати заряд. Ємність є небажаною величиною, тому варто прагнути до того, щоб вона була якнайменше (іноді застосовують термін “паразитна ємність”). Високе значення ємності в кабелі приводить до перекручування сигналу й обмежує смугу пропускання лінії.

Рівень зовнішнього електромагнітного випромінювання чи електричний шум. **Електричний шум** — це небажана перемінна напруга в провіднику. Електричний шум буває двох типів: фоновий і імпульсний. Електричний шум можна також розділити на низько-, середньо- і високочастотний. Джерелами

фонового електричного шуму в діапазоні до 150кГц є лінії електропередачі, телефони і лампи денного світла; у діапазоні від 150 кГц до 20 МГц — комп'ютери, принтери, ксерокси; у діапазоні від 20МГц до 1ГГц — телевізійні і радіопередавачі, мікрохвильові печі. Основними джерелами імпульсного електричного шуму є мотори, перемикачі і зварювальні агрегати. Електричний шум вимірюється в мілівольтах.

**Діаметр чи площа перетину провідника.** Для мідних провідників досить вживаною є американська система AWG (American Wire Gauge), що вводить деякі умовні типи провідників, наприклад 22AWG, 24AWG, 26AWG. Чим більше номер типу провідника, тим менше його діаметр. В обчислювальних мережах найбільш поширеними є типи провідників, приведені вище як приклади. У європейських і міжнародних стандартах діаметр провідника вказується в міліметрах.

Приведений перелік характеристик далеко не повний, причому в ньому представлені тільки електромагнітні характеристики і його потрібно доповнити механічними і конструктивними характеристиками, що визначають тип ізоляції, конструкцію з'єднання і т.п. Крім універсальних характеристик, таких, наприклад, як загасання, що застосовуються для всіх типів кабелів, існують характеристики, що застосовуються тільки до визначеного типу кабелю. Наприклад, параметр крок скрутки проводів використовується тільки для характеристики крученої пари, а параметр NEXT застосуємо тільки до багатопарних кабелів на основі кручених пар.

Основна увага в сучасних стандартах приділяється кабелям на основі крученої пари і волоконно-оптичним кабелям.

### **Самостійна робота №23**

**Тема:** Волокно-оптичні лінії зв'язку

**Мета:** ознайомитись з волоконно-оптичними лініями зв'язку

### **Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Призначення волокно –оптичних кабелів.
- 2 Будова та різновиди волокно-оптичних кабелів.

### **Література:**

- 1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.
- 2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте призначення волокно-оптичних кабелів.
- 2 Обґрунтуйте будову волокно-оптичних кабелів.

**Волокно-оптичні кабелі** складаються з центрального провідника світла (серцевини) — скляного волокна, оточеного іншим шаром скла — оболонкою, що володіє меншим показником переломлення, чим серцевина. Поширюючи по серцевині, промені світла не виходять за її межі, відбиваючись від покриваючого шару оболонки. У залежності від розподілу показника переломлення і від величини діаметра сердечника розрізняють:

- багатомодові волокно зі східчастою зміною показника переломлення;
- багатомодові волокно з плавною зміною показника переломлення;
- одномодове волокно .

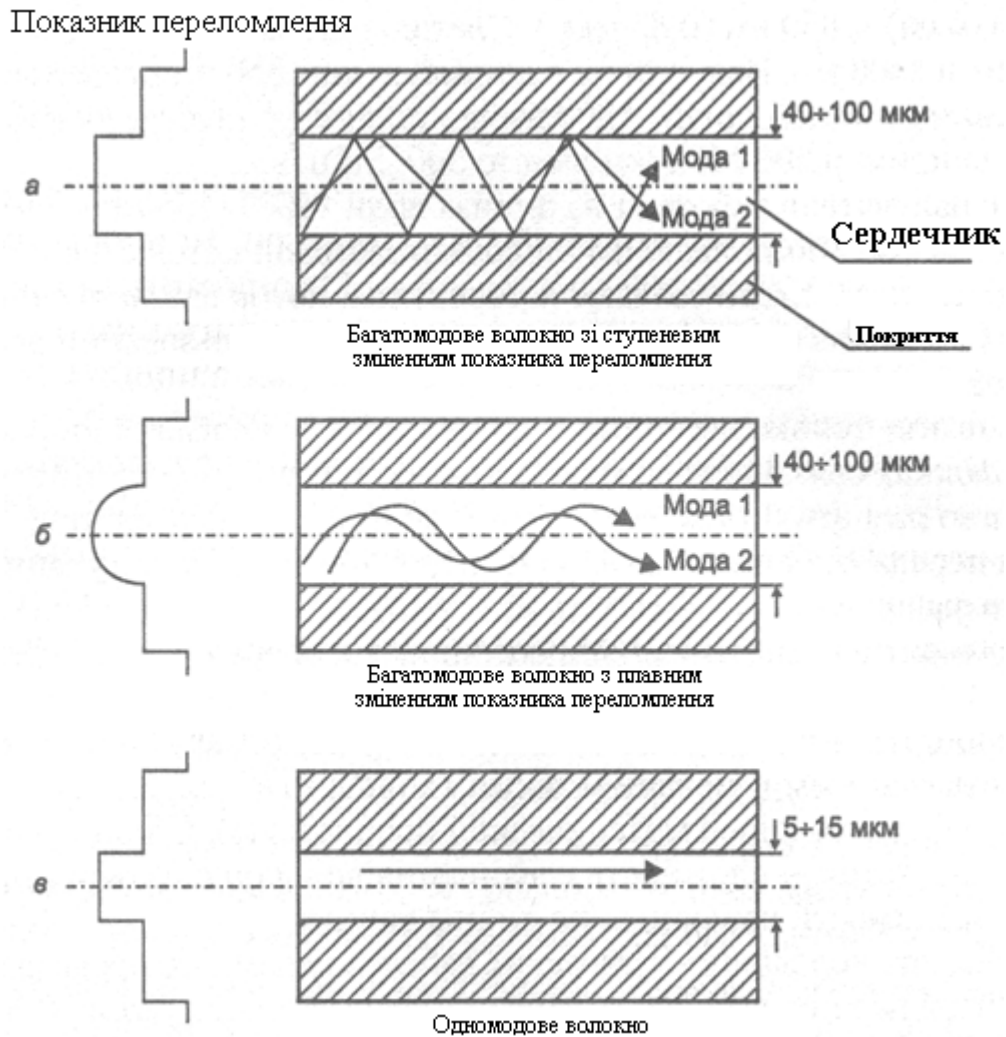


Рисунок 23.1 – Різновиди волоконно-оптичних ліній зв'язку

Поняття "мода" описує режим поширення світлових променів у внутрішньому сердечнику кабелю. В одномодовому кабелі (Single Mode Fiber, SMF) використовується центральний провідник дуже малого діаметра, порівняно з довжиною хвилі світла — від 5 до 10 мкм. При цьому практично всі промені світла поширюються уздовж оптичної осі світловода, не відбиваючи від зовнішнього провідника. Смуга пропускання одномодового кабелю дуже широка — до сотень гигагерц на кілометр. Виготовлення тонких якісних волокон для одномодового кабелю представляє складний технологічний процес, що робить одномодовий кабель досить дорогим. Крім того, у волокно такого маленького діаметра досить складно направити пучок світла, не втративши при цьому значну частину його енергії.

У багатомодових кабелях (Multi Mode Fiber, MMF) використовуються більш широкі внутрішні сердечники, що легше виготовити технологічно. У стандартах визначені два найбільш вживаних багатомодових кабелі: 62,5/125 мкм і 50/125 мкм, де 62,5 мкм чи 50 мкм — це діаметр центрального провідника, а 125 мкм — діаметр зовнішнього провідника.

У багатомодових кабелях у внутрішньому провіднику одночасно існує кілька світлових променів, що відбиваються від зовнішнього провідника під



різними кутами. Кут відображення променя називається модою променя. У багатомодових кабелях із плавною зміною коефіцієнта переломлення режим поширення кожної моди має більш складний характер.

Багатомодові кабелі мають більш вузьку смугу пропускання — від 500 до 800 МГц/км. Звуження смуги відбувається через втрати світлової енергії при відображеннях, а також через інтерференцію променів різних мод.

Як джерела випромінювання світла у волоконно-оптичних кабелях застосовуються:

- світлодіоди;
- напівпровідникові лазери.

Для одномодових кабелів застосовуються тільки напівпровідникові лазери, тому що при такому малому діаметрі оптичного волокна світловий потік, який створюється світлодіодом, неможливо без великих втрат направити у волокно. Для багатомодових кабелів використовуються більш дешеві світлодіодові випромінювачі.

Для передачі інформації застосовується світло з довжиною хвилі 1550 нм (1,55 мкм), 1300 нм (1,3 мкм) і 850 нм (0,85 мкм). Світлодіоди можуть випромінювати світло з довжиною хвилі 850 нм і 1300 нм. Випромінювачі з довжиною хвилі 850 нм істотно дешевше, ніж випромінювачі з довжиною хвилі 1300 нм, але смуга пропускання кабелю для хвиль 850 нм уже, наприклад 200 МГц/км замість 500 МГц/км. Лазерні випромінювачі працюють на довжинах хвиль 1300 і 1550 нм. Швидкодія сучасних лазерів дозволяє модулювати світловий потік з частотами 10 ГГц і вище. Лазерні випромінювачі створюють когерентний потік світла, за рахунок чого втрати в оптичних волокнах стають менше, ніж при використанні некогерентного потоку світлодіодів.

Використання тільки декількох довжин хвиль для передачі інформації в оптичних волокнах пов'язано з особливістю їхньої амплітудно-частотної характеристики. Саме для цих дискретних довжин хвиль спостерігаються яскраво виражені максимуми передачі потужності сигналу, а для інших хвиль загасання у волокнах істотно вище.

Волокно-оптичні кабелі приєднують до устаткування роз'ємами MIC, ST і SC.

Волокно-оптичні кабелі мають відмінні характеристики всіх типів: електромагнітними, механічними (добре гнуться, а у відповідній ізоляції володіють гарною механічною міцністю). Однак у них є один серйозний **недолік** — **складність з'єднання волокон з роз'ємами і між собою при необхідності нарощування довжини кабелю**. Сама вартість волоконно-оптичних кабелів ненабагато перевищує вартість кабелів на кручений парі, однак проведення монтажних робіт з оптичним волокном обходиться набагато дорожче через трудомісткість операцій і високої вартості застосовуваного монтажного устаткування. Так, приєднання оптичного волокна до роз'єму вимагає проведення високоточної обрізки волокна в площині строго перпендикулярній осі волокна, а також виконання з'єднання шляхом складної операції склеювання, а не обтиснення, як це робиться для кручений пари.

Виконання ж неякісних з'єднань відразу різко звужує смугу пропускання волоконно-оптичних кабелів і ліній.

## Самостійна робота №24

**Тема:** Електропровідність напівпровідників і її залежність від різних факторів

**Мета:**

- 1.1 Ознайомитись з електропровідністю напівпровідників
- 1.2 Залежність напівпровідності від різних факторів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Визначення і характеристики напівпровідника.
- 2 Фізична суть електропровідності напівпровідника.
- 3 Провідники n-типу і p-типу.

### Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризуйте призначення напівпровідника.
- 2 Обґрунтуйте основні характеристики напівпровідника.
- 3 Опишіть напівпровідники n-типу і p-типу.
- 4 Охарактеризуйте основні фактори електропровідності.

**Напівпровідник** - матеріал, електропровідність якого має проміжне значення між провідностями провідника та діелектрика. Відрізняються від

провідників сильною залежністю питомої провідності від концентрації домішок, температури і різних видів випромінювання. Основною властивістю цих матеріалів є збільшення електричної провідності з ростом температури.

Напівпровідниками є речовини, ширина забороненої зони яких становить близько кількох електронвольт (eV). Наприклад, алмаз можна віднести до широкозонних напівпровідників, а арсенід індію — до вузькозонних. До числа напівпровідників належать багато простих речовин хімічних елементів (германій, кремній, селен, телур, арсен та інші), величезна кількість сплавів і хімічних сполук (арсенід галію та ін.).

Залежно від того, чи віддає домішковий атом електрон або захоплює його, його називають донорними або акцепторними. Характер домішки може змінюватися в залежності від того, який атом решітки вона заміщує, в яку кристалографічну площину вбудовується.

Провідність напівпровідників сильно залежить від температури. Поблизу абсолютного нуля температури напівпровідники мають властивості діелектриків.

Характерна риса напівпровідників — зростання електропровідності зі зростанням температури; при низьких температурах електропровідність мала. При температурі близькій до абсолютного нуля напівпровідники мають властивості ізоляторів. Кремній, наприклад, при низькій температурі погано проводить електричний струм, але під впливом світла, тепла чи напруги електропровідність зростає. Напівпровідники мають повністю заповнену валентну зону, відділену від зони провідності неширокою забороненою зоною. Ширина забороненої зони напівпровідників зазвичай менша за 3 eV. Неширока заборонена зона призводить до того, що при підвищенні температури ймовірність збудження електрона у зону провідності зростає за експоненціальним законом. Саме цим фактом зумовлене збільшення електропровідності власних напівпровідників.

Ще більше на електропровідність напівпровідників впливають домішки — **донори й акцептори**. Завдяки доволі великій діелектричній проникності домішкові рівні в забороненій зоні розташовані дуже близько до зони провідності чи до валентної зони ( $< 0.5$  eV), й легко іонізуються, віддаючи електрони в зону провідності чи забираючи їх із валентної зони. Леговані напівпровідники мають значну електропровідність.

В залежності від концентрації домішок напівпровідники діляться на власні (без домішок), **n-типу (донори)**, **p-типу (акцептори)** і компенсовані (концентрація донорів урівноважує концентрацію акцепторів, й

напівпровідник веде себе, як власний). При дуже високій концентрації домішок напівпровідник стає виродженим і поводить себе як метал.

У напівпровідникових приладах використовуються унікальні властивості контакту областей напівпровідника, одна з яких належить до n-типу, інша до p-типу — так званих p-n переходів. p-n переходи проводять струм лише в одному напрямку. Схожі властивості мають також контакти між напівпровідниками й металами — контакти Шоткі.

### **Електропровідність напівпровідника**

Зумовлена переважним рухом заряджених часток, носіїв заряду в напрямку електричного поля. Носіями заряду можуть бути електрони, дірки або йони. Для забезпечення провідності носії заряду повинні бути вільними.

В електричному полі на носій заряду діє сила  $q\mathbf{E}$ , де  $q$  - заряд, а  $\mathbf{E}$  - напруженість електричного поля. Під дією цієї сили носій заряду прискорюється й набирає енергію. Проте це прискорення не безмежне. На заваді йому стають зіткнення із іншими носіями заряду, йонами чи нейтральними атомами. Під час таких зіткнень енергія електрона розсіюється й перетворюється в тепло. Проходження струму через речовину завжди супроводжується виділенням тепла. Величина електропровідності залежить, таким чином, не лише від концентрації вільних носіїв заряду та напруженості поля, а й від частоти зіткнень носіїв заряду, яка описується так званою довжиною вільного пробігу.

Із квантовомеханічної точки зору визначальними факторами для провідності також є акти розсіяння — зіткнення носіїв заряду із різноманітними дефектами структури. Одним із висновків зонної теорії стверджує те, що вільні квазічастинки - електрони й дірки, рухаються через ідеальний кристал, як крізь вакуум, не відчуваючи присутності йонів у вузлах кристалічної ґратки. Розсіяння носіїв заряду відбувається лише на дефектах кристалічної ґратки: атомах домішки, атомах кристалу, зміщених із свого положення завдяки тепловим коливанням тощо. Важливу роль у визначенні провідності відіграє принцип виключення Паулі, який забороняє носіям заряду переходити у стани, зайняті іншими носіями заряду того ж гатунку.

Провідність різних середовищ лежить в дуже широких межах — від нескінченно малої до нескінченно великої. Нескінченно малу провідність має вакуум, у якому відсутні заряджені частки, нескінченно велику - надпровідники. В залежності від величини провідності матеріали ділять на провідники й ізолятори. Проміжну позицію між цими двома групами займають напівпровідники.

**n-типу** — напівпровідник, в якому основні носії заряду — електрони провідності.

Для того, щоб отримати напівпровідник n-типу, власний напівпровідник легують донорами. Здебільшого це атоми, які мають на валентній оболонці на один електрон більше, ніж атоми напівпровідника, який легується. При не надто низьких температурах електрони зі значною ймовірністю переходять із донорних рівнів у зону провідності, де їхні стани делокалізовані й вони можуть вносити вклад у електричний струм.

Кількість електронів у зоні провідності залежить від концентрації донорів, енергії донорних рівнів, ширини забороненої зони напівпровідника, температури, ефективної густини рівнів у зоні провідності.

Здебільшого легування проводиться до рівня  $10^{13}$  —  $10^{19}$  донорів на см<sup>3</sup>. При високій концентрації донорів напівпровідник стає виродженим.

**p-типу** — напівпровідник, в якому основними носіями заряду є дірки.

Напівпровідники p-типу отримують методом легування власних напівпровідників акцепторами. Для напівпровідників четвертої групи періодичної таблиці, таких як кремній та германій, акцепторами можуть бути домішки хімічних елементів третьої групи — бор, алюміній.

Наприклад, якщо кремній легувати 3-валентним індієм, то для утворення зв'язків з кремнієм у індію не вистачає одного електрона, тобто утворюється дірка. Змінюючи концентрацію індію, можна в широких межах змінювати провідність кремнію, створюючи напівпровідник із заданими електричними властивостями. Такий напівпровідник називається напівпровідником p-типу, основними носіями заряду є дірки, а домішка індію, що утворює дірку, називається акцепторною.

Концентрація дірок у валентній зоні визначається температурою, концентрацією акцепторів, положенням акцепторного рівня над верхом валентної зони, ефективною густиною рівнів у валентній зоні.

## Самостійна робота №25

**Тема:** Термоелектричні явища у напівпровідників

**Мета:**

- 1.1 Ознайомитись з термоелектричними явищами у напівпровідниках
- 1.2 Опанувати ефект Зеєбека, Пельтьє, Томпсона

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Термоелектричні явища в напівпровіднику.
- 2 Ефект Зеебека, Пельтьє, Томпсона

### Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### Питання для самоконтролю:

- 1 Охарактеризуйте призначення термоелектричного явища.
- 2 Обґрунтуйте ефект Зеебека, Пельтьє, Томпсона.
- 3 В чому суттєва різниця цих ефектів.

До найважливіших термоелектричних явищам в напівпровідниках відносяться ефекти Зеебека, Пельтьє і Томпсона. Сутність явища Зеебека полягає в тому, що в електричній мережі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних напівпровідників або напівпровідника і металу, виникає ЕРС, якщо між кінцями цих матеріалів існує різниця температур.

На рис. 25.1 представлена мережа з двох спаїв. Один кінець спаю нагрітий до температури  $T_1$ , а інший - до  $T_2$ , нехай  $T_2 > T_1$ . При цьому в мережі виявляється електрорушійна сила - термоЕРС, яка в цьому випадку дорівнює:

$$E = \alpha \cdot (T_2 - T_1)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт термоЕРС, який визначається матеріалами двох гілок.

Розглянемо механізм утворення термоЕРС на прикладі однорідного напівпровідника, у якого один з кінців нагрітий більше, ніж нагрітий другий.

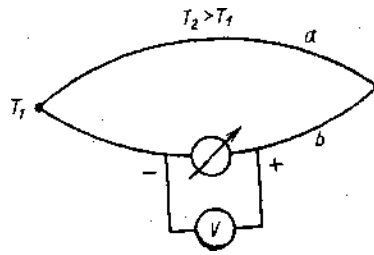


Рисунок 25.1 – Виникнення термоЕРС в мережі із двох спаїв

Вільні носії заряду з гарячого кінця будуть мати більш високу енергію і швидкість, ніж з холодного кінця.

Крім того, з гарячого кінця напівпровідника вільних носіїв виявиться більше, ніж холодного. У силу цих причин потік вільних носіїв від гарячого кінця до холодного буде більше, ніж від холодного до гарячого. Якщо концентрація вільних електронів і дірок в напівпровіднику або їх рухливості не однакові, то кінці напівпровідників виявляться протилежно зарядженими.

В електронному напівпровіднику основними носіями заряду, як відомо, є електрони, потік їх від гарячого кінця до холодного буде більше, ніж від холодного до гарячого. У результаті цього на холодному кінці буде накопичуватися негативний заряд, на гарячому залишатися некомпенсований позитивний. Електричне поле, яке при цьому виникло буде викликати потік електронів від холодного кінця до гарячого. Стаціонарний стан встановиться при рівності цих електронів. У діркового напівпровідника на холодному кінці виникне позитивний заряд. Таким чином, за знаком термоЕРС можна судити про тип електропровідності напівпровідника.

Ефект, зворотний явищу Зеєбека, називають ефектом Пельтьє. Він полягає в тому, що при проходженні струму через контакт двох різнорідних напівпровідників або напівпровідника і металу відбувається поглинання або виділення теплоти в залежності від напрямку струму.

Кількість теплоти, що виділяється або поглинається в контакті пропорційно значенню проходженню струму  $I$ :

$$Q_n = \Pi \cdot I \cdot t,$$

где  $Q_n$ — теплота Пельтьє;  $t$  — час проходження струму;  $\Pi$  — коефіцієнт Пельтьє, який залежить від природи контактуючих матеріалів, температури та напрямку струму.

Ефект Томпсона полягає у виділенні або поглинанні теплоти при проходженні струму в однорідному матеріалі, в якому існує градієнт температур. Наявність градієнта температур в напівпровіднику, як ми з'ясували раніше, призводить до утворення термоЕРС. Якщо напрямок зовнішнього електричного поля буде збігатися з електричним полем, обумовленим термоЕРС, то не вся енергія, що підтримує струм,

забезпечується зовнішнім джерелом, частина роботи відбувається за рахунок теплової енергії самого напівпровідника, в результаті чого він охолоджується.

При зміні напрямку зовнішнього електричного поля воно буде здійснювати додаткову роботу, що призведе до виділення теплоти додатково до теплоти Джоуля.

Теплота Томпсона  $Q_m$  дорівнює

$$Q_m = \tau \cdot (T_2 - T_1) \cdot t \cdot I$$

де  $\tau$  - коефіцієнт Томпсона.

## Самостійна робота №26

**Тема:** Фотопровідність напівпровідників

**Мета:**

- 1.1 Ознайомитись з поняттям фотопровідність
- 1.2 Опанувати основні властивості фотопровідності

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Поняття фотопровідність.
- 2 Властивості фотопровідності.

### Література:

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризувати поняття фотопровідності.
- 2 Обґрунтувати основні властивості фотопровідності.



**Фотопровідність**, фоторезистивний ефект, збільшення електропровідності **напівпровідника** під дією електромагнітного випромінювання. Вперше Ф. спостерігалася в Se У. Смітом (США) в 1873.

Зазвичай фотопровідності обумовлена збільшенням концентрації носіїв струму під дією світла (концентраційна фотопровідності). Вона виникає в результаті декількох процесів: фотони «виривають» електрони з валентної зони і «закидають» їх в зону провідності (рисунок 26.1), при цьому одночасно зростає число електронів провідності і дірок (власна фотопровідності); електрони із заповненої зони закидаються на вільні домішкові рівні – зростає число дірок (діркова домішкова фотопровідності); електрони закидаються з домішкових рівнів в зону провідності (електронна домішкова фотопровідності). Можливо комбіноване збудження фотопровідності «власним» і «домішковим» світлом: «власне» збудження в результаті подальших процесів захвату носіїв приводить до заповнення домішкових центрів і, отже, до появи домішкової фотопровідності (індукована домішкова фотопровідності). Концентраційна фотопровідності може виникати лише при збудженні досить короткохвильовим випромінюванням, коли енергія фотонів перевищує або ширину забороненої зони (в разі власної і індукованою фотопровідності), або відстань між однією із зон і домішковим рівнем (в разі електронної або діркової домішковою фотопровідності).

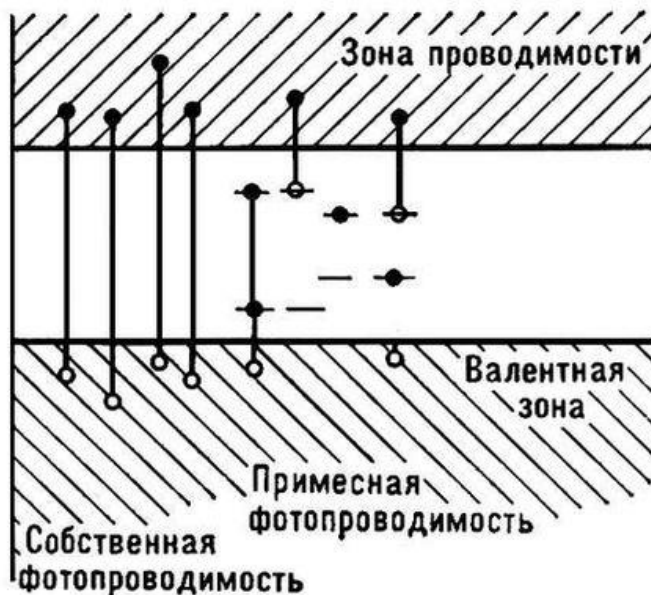


Рисунок 26.1 – Явище фотопровідності

В тій або іншій мірі фотопровідності володіють всі неметалічні тверді тіла. Найбільш вивчена і широко застосовується в техніку фотопровідності напівпровідників Ge, Si, Se, CDS, Cdse, Insb, Gaas, PBS і ін. Величина концентраційної фотопровідності пропорційна квантовому виходу  $\eta$  (відношенню числа носіїв, що утворюються, до загального числа поглинутих фотонів) і часу життя нерівноважних (надлишкових) носіїв, що збуджуються світлом (фотоносіїв). При освітленні видимим світлом  $\eta$  зазвичай менше 1 із-за «конкуруючих» процесів, що приводять до поглинання світла, але не

пов'язаних з освітою фотоносіїв (збудження екситонів, домішкових атомів, коливань кристалічної решітки і ін.). При опроміненні речовини ультрафіолетовим або жорсткішим випромінюванням  $h > 1$ , т.к. енергія фотона досить велика, щоб не лише вирвати електрон із заповненої зони, але і повідомити йому кінетичну енергію, достатню для ударної **іонізації**. Час життя носія (тобто час, який він в середньому проводить у вільному стані) визначається процесами рекомбінації. При прямій (міжзонною) рекомбінації фотоелектрон відразу переходить із зони провідності у валентну зону. В разі рекомбінації через домішкові центри електрон спочатку захоплюється домішковим центром, а потім потрапляє у валентну зону. Залежно від структури матеріалу, мірі його чистоти і температури час життя може мінятися в межах від доль *сік* до  $10^{-8}$  сек.

Залежність фотопровідності від частоти випромінювання визначається спектром поглинання напівпровідника. У міру збільшення коефіцієнта поглинання фотопровідності спочатку досягає максимуму, а потім падає. Спад фотопровідності пояснюється тим, що при великому коефіцієнті поглинання все світло поглинається в поверхневому шарі провідника, де дуже велика швидкість рекомбінації носіїв (поверхнева рекомбінація, рисунок 26.2).

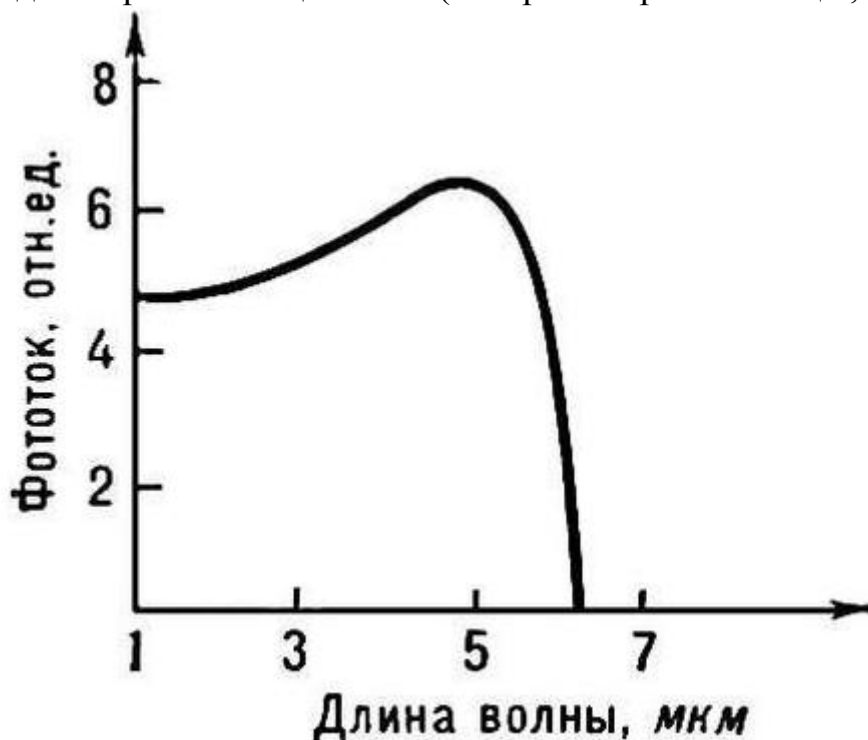


Рисунок 26.2 – Характерний вигляд спектру власної фотопровідності

Можливі і ін. види фотопровідності, не пов'язані із зміною концентрації вільних носіїв. Так, при поглинанні вільними носіями довгохвильового електромагнітного випромінювання, що не викликає міжзонних переходів і іонізації домішкових центрів, відбувається збільшення енергії («розігрівши») носіїв, що приводить до зміни їх рухливості і, отже, до збільшення електропровідності. Така подвійностная фотопровідності убуває при високих частотах і перестає залежати від частоти при низьких частотах. Зміна рухливості під дією випромінювання може бути обумовлене не лише

збільшенням енергії носіїв, але і впливом випромінювання на процеси розсіяння електронів кристалічною решіткою.

Вивчення фотопровідності – один з найбільш ефективних способів дослідження властивостей **твердих тіл**. Явище фотопровідності використовується для створення **фоторезисторів**, чутливих і малоінерційних **приймачів випромінювання** в дуже широкому діапазоні довжин хвиль – від g-променів до діапазону **надвисоких частот**.

## **Самостійна робота №27**

**Тема:** Основи термічної обробки сталі

**Мета:**

- 1.1 Ознайомитись з поняттям термічної обробки сталі
- 1.2 Опанувати основні різновиди термічної обробки сталі

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Поняття термічна обробка сталі.
- 2 Різновиди термічної обробки сталі: відпал, гартування, відпуск.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

**Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризувати поняття термічна обробка сталі.
- 2 Обґрунтувати основні різновиди термічної обробки сталі: відпал, гартування, відпуск.

## **Теорія термічної обробки сталі**

**Термічною обробкою сталі** називають процес її нагрівання до визначеної температури, витримання при цій температурі і подальше охолодження із заданою швидкістю з метою зміни структури та властивостей у бажаному напрямі.

Термічно обробляють заготовки, отримані відливанням, куванням, прокатуванням, волочінням або пресуванням, зварні вироби, деталі машин та інструменти різного призначення. Термічну обробку застосовують або як проміжну операцію для поліпшення технологічних властивостей (оброблюваності тиском чи різанням), або як прикінцеву технологічну операцію для досягнення певних експлуатаційних властивостей матеріалу.

На результат термообробки впливають швидкість (час) нагрівання, температура нагрівання, тривалість (час) витримання при цій температурі та швидкість (час) охолодження, тобто основними факторами є час і температура.

### **Перетворення, що відбуваються у сталях під час нагрівання**

Якщо нагрівати дуже повільно, то всі фазові перетворення у вуглецевих сталях описує ліва частина діаграми залізо-вуглець. Критичні температури цих перетворень позначають буквою **A** з певними індексами. Зокрема, температуру лінії **PSK** позначають через **A<sub>1</sub>**, температури лінії **GS** — через **A<sub>3</sub>**, а температури лінії **SE** — через **A<sub>cm</sub>**. До цих позначень додають індекс **c** в разі охолодження або індекс **r** — при нагріванні, наприклад: **A<sub>c1</sub>**, **A<sub>cm</sub>**, **A<sub>r3</sub>**. Відхилення від рівноважних умов спричинює тепловий гістерезис, тобто розбіжність критичних температур нагрівання та охолодження.

Структура доевтектоїдної сталі при невисокій температурі — ферит і перліт. При температурі **A<sub>c1</sub>** (лінія **PSK**) перліт перетворюється в аустеніт. Вище від цієї лінії буде двофазова структура: ферит + аустеніт. В інтервалі температур **A<sub>c1</sub>...A<sub>c3</sub>** ферит поступово розчиняється у аустеніті і при **A<sub>c3</sub>** зовсім зникає.

В евтектоїдній сталі структура перліту зберігається до температури **A<sub>c1</sub>**, при якій перліт повністю перетворюється в аустеніт.

У заевтектоїдній сталі з перлітно-цементитною структурою при температурі **A<sub>c1</sub>** перліт перетворюється в аустеніт, а в проміжку температур **A<sub>c1</sub>...A<sub>cm</sub>** вторинний цементит поступово розчиняється в аустеніті.

Отже, в результаті описаних перетворень у сталях формується однофазова аустенітна структура, яка займає частину діаграми вище лінії **GSE** аж до лінії солідус.

У виробничих нерівноважних умовах нагрівання температура перетворення перліту в аустеніт дещо перевищує  $A_{c1}$  залежно від швидкості охолодження.

### Продукти розпаду аустеніту

Під час повільного охолодження сталі по лінії PSK відбувається розпад аустеніту з утворенням фериту та цементиту в результаті дифузії вуглецю та заліза.

Утворення перліту завершується при температурі  $650^{\circ}$ . Пластинки перліту мають розмір  $0,6 \dots 1,0$  мкм. Твердість перліту  $180 \dots 250$  HB.

При розпаді аустеніту в інтервалі температур  $650 \dots 600^{\circ}$  утворюється більш дрібнозерниста феритно-цементитна суміш з розміром зерен  $0,25 \dots 0,3$  мкм. Такий дисперсний перліт називають **сорбітом**. Сорбіт має твердість  $250 \dots 350$  HB.

При подальшому збільшенні швидкості охолодження в інтервалі температур  $600 \dots 550^{\circ}$  утворюється феритно-цементитна суміш з розміром зерен  $0,1 \dots 0,15$  мкм. Таку структуру називають **троостит**. Твердість  $350 \dots 450$  HB.

Перліт, сорбіт та троостит є двофазовими пластинчастими (іноді зернистими) структурами з різним ступенем дисперсності. Зі збільшенням дисперсності збільшується твердість сталі.

Зі зниженням температури розпад аустеніту сповільнюється, а при температурах нижче  $500^{\circ}$  припиняється зовсім.

При різкому переохолодженні сталі відбувається тільки поліморфне перетворення  $\gamma$  – заліза в  $\alpha$  – залізо без виділення вуглецю з твердого розчину. Такий пересичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$  – залізі називають **мартенситом**. Це основна структура загартованої сталі голчастої форми розміром  $0,1 \dots 0,001$  мкм з твердістю до  $60 \dots 65$  HRC.

Температура початку та кінця мартенситного перетворення залежить від концентрації вуглецю і легувальних елементів у сталі. Що більша концентрація вуглецю, то нижчий інтервал мартенситного перетворення. В сталях з вмістом вуглецю понад  $0,5$  % мартенситне перетворення зсувається в зону мінусових температур. Всі легувальні елементи, крім кобальту і алюмінію знижують інтервал температур мартенситного перетворення.

Атоми вуглецю сильно деформують решітку  $\alpha$  – заліза, збільшуючи міжатомні відстані. Це веде до збільшення об'єму та виникнення внутрішніх напружень.

Так як зі зниженням температури розпад аустеніту сповільнюється, то при швидкому охолодженні сталі в структурі залишається певна кількість не

перетвореного аустеніту, який називають **залишковим аустенітом**. Залишковий аустеніт, кількість якого зростає зі збільшенням вмісту вуглецю у сталі, спричиняє неоднорідність властивостей загартованої сталі.

## **Різновиди термічної обробки сталей**

### ***Відпал сталей***

**Відпалом** називається процес термічної обробки – нагрівання сплаву до певної температури, витримка і наступне, як правило, повільне охолодження (в печі) з метою одержання більш рівноважної структури.

**Відпал першого роду.** Це відпал, при якому, як правило, не відбувається фазових перетворень (перекристалізації), а якщо вони мають місце, то не впливають на кінцеві результати, передбачені його цільовим призначенням.

Розрізняють такі різновиди відпалу першого роду: дифузійний і рекристалізаційний.

**Дифузійний відпал.** Це відпал зливків з вуглецевих та легованих сталей при температурі 1100-1300 °С з витримкою 20...50 годин, а зливків алюмінієвих сплавів – при 420...520 °С з витримкою 20...30 годин з метою вирівнювання хімічного складу.

**Рекристалізаційний відпал.** Це відпал заготовок з наклепаної сталі при температурі, що перевищує температуру початку рекристалізації, з метою усунення наклепу і одержання певної величини зерна. Його проводять після холодного деформування (прокатування, волочіння та ін.). В процесі цього відпалу зменшується міцність і твердість та відновлюється пластичність деформованого металу. Для сталей з вмістом вуглецю 0,08...0,20% температура відпалу становить 680...700 °С, для високовуглецевих легованих сталей - 700 °С з тривалістю витримки 0,5...1,5 години.

**Відпал другого роду.** Це відпал, при якому фазові перетворення (перекристалізація) визначають його цільове призначення. Розрізняють такі різновиди відпалу другого роду: повний, неповний, ізотермічний, нормалізаційний (нормалізація).

**Повний відпал.** Цьому виду відпалу піддають доевтектоїдну сталь з метою досягнення дрібнозернистості, зниження твердості і підвищення пластичності, зняття внутрішніх напружень. Сталь нагрівають до температури на 20-30° вище точки  $A_{c3}$ . При нагріванні крупна початкова

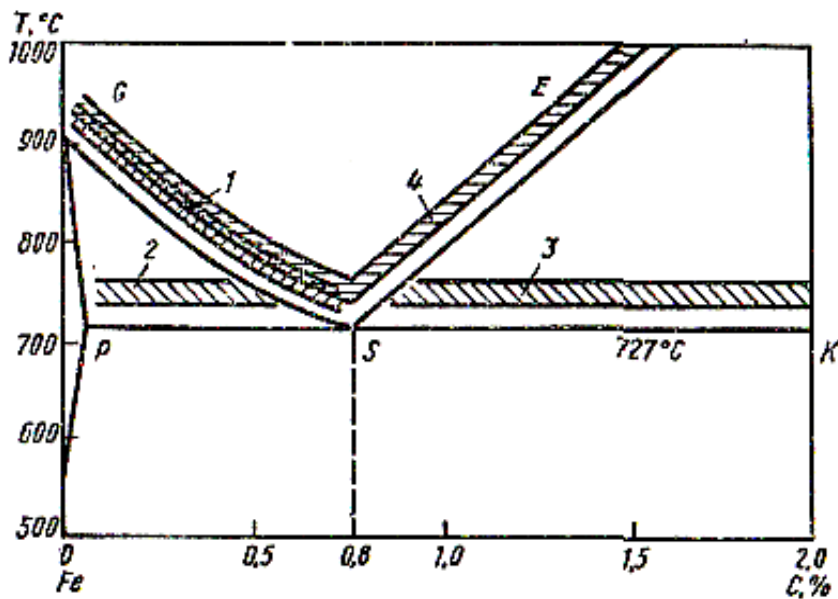


Рисунок 27.1- Температурні режими відпалів другого роду:

- 1 – повний відпал;
- 2, 3 – неповний відпал;
- 4 – нормалізація.

ферритно-перлітна структура перетворюється в дрібну структуру аустеніту. При цьому відпалі відбувається повна фазова перекристалізація сталі. Забезпечується висока в'язкість і пластичність, а також можливість досягнення високих властивостей після остаточної термічної обробки. Повному відпалу зазвичай піддають сортовий прокат, поковки та фасонні відливки.

### *Гартування сталі*

**Гартуванням** називають процес термічної обробки, що складається з нагріву сталі до певної температури, витримки і подальшого швидкого охолодження з метою отримання нерівноважної структури. Внаслідок гартування підвищується міцність і твердість та знижується пластичність сталі. Основні параметри при гартуванні – температура нагріву і швидкість охолодження.

**Температура гартування.** Для вуглецевих сталей температуру гартування можна визначити по лівій нижній частині діаграми стану залізо-цементит.

При гартуванні доєвтектоїдні сталі нагрівають до температури на 30-50° вище точки  $A_{c3}$ . При гартуванні заєвтектоїдні сталі нагрівають до температури на 30-50° вище точки  $A_{c1}$ . Сталі, леговані кремнієм, вольфрамом, молібденом і титаном, гартують при більш високих температурах, щоб розчинились в

аустеніті важкорозчинні карбіди. Швидкорізальні сталі гартують при 1200...1300 °С, а штампові, наприклад 3Х2В8Ф, при 1050...1100 °С.

**Час нагрівання** вибирається в залежності від розмірів та конфігурації деталей. Час витримки при температурі гартування вибирають таким, щоб повністю завершилися фазові перетворення. Практично час нагріву в електричних печах прийнято 1,5-2 хвилини на 1 мм перерізу.

**Охолодження при гартуванні** має вирішальний вплив на результат гартування. Найбільш розповсюджені середовища для гартування – вода, водяні розчини солей ( $\text{KNO}_2 + \text{NaNO}_3$ ) і лугів ( $\text{NaOH} + \text{KOH}$ ), масло, повітря, розплавлені солі.

Вода охолоджує значно швидше, ніж масло: в 6 разів швидше при 550-650 °С і в 28 разів швидше при 200 °С. Тому воду використовують для охолодження сталей з великою критичною швидкістю гартування (вуглецеві сталі), а в маслі охолоджують сталі з малою критичною швидкістю гартування (леговані сталі). Основний недолік води, як охолоджувача – висока швидкість охолодження при занижених температурах в області утворення мартенситу, що призводить до виникнення великих структурних напружень і створює небезпеку виникнення тріщин. Додавання до води солей та лугів підвищує її гартувальну здатність.

Масло охолоджує значно повільніше, ніж вода. Але перевага масла як охолоджувача полягає в тому, що воно володіє невеликою швидкістю охолодження в області температур мартенситного перетворення, тому при охолодженні в маслі небезпека утворення тріщин значно зменшується. Недолік масла – його вогненебезпечність, пригорання до поверхні деталі.

**Прогартуваність сталі.** Під прогартуваністю розуміють здатність сталі гартуватися на певну глибину. Глибину загартованої зони можна визначити на зламі зразка. Загартована зона має блискучу дрібнозернисту поверхню. Легувальні елементи, крім кобальту, збільшують прогартуваність сталі. Прогартуваність не слід плутати з **загартовуваністю**, яка характеризується максимальним значенням твердості, яку набула сталь внаслідок гартування. Вона залежить від вмісту вуглецю. Якщо вміст вуглецю не перевищує 0,2%, то такі сталі практично не гартуються.

**Гартування в одному охолоднику.** Деталь нагрівають до температури гартування і охолоджують в одному охолоднику (вода, масло). Для зниження короблення довгих циліндричних та тонких плоских деталей використовують спеціальні гартувальні машини і преси. Недолік гартування у воді – виникнення значних внутрішніх напружень, які можуть викликати тріщини.



**Гартування в двох охолодниках** – спочатку швидко охолоджують у сильному охолоднику (вода, водяні розчини солей або лугів), а пройшовши температурний інтервал 650...400 °С, де стійкість аустеніту мінімальна, охолоджують у слабшому охолоднику, наприклад в маслі. При цьому складно визначити момент переносу заготовки з одного охолодника в інший.

### ***Поверхнєве гартування сталі***

**Поверхнєве гартування** відбувається внаслідок швидкого нагрівання поверхневого шару сталі до температури вище критичної і наступне охолодження з метою одержання в поверхневому шарі структури мартенситу.

Поверхнєве гартування використовують для підвищення зносостійкості деталей при збереженні високого опору динамічним навантаженням, зростанню міцності втомлювання. Поверхнєве гартування відбувається дуже швидко і тому на поверхні деталі не утворюється окалини.

Методи нагрівання можуть бути різними – струмами високої частоти (СВЧ), полум'ям газової горілки, в електролітах. Нагрів СВЧ є найбільш продуктивним. При нагріванні СВЧ (2...50 сек.) гартують деталі різноманітної конфігурації, повністю автоматизуючи процес гартування. Після гартування деталі піддають низькому відпуску.

Перспективним є нагрівання заготовки лазерним променем протягом  $10^{-3} \dots 10^{-7}$  сек. Товщина зміцненого шару не перевищує 0,1...0,15 мм.

### ***Відпуск сталі***

**Відпуском** називають процес нагрівання загартованої сталі до температури не вище точки  $A_{c1}$  (727 °С), витримання при цій температурі і подальшого охолодження. Відпуск виконують для зниження або повного усунення внутрішніх напружень, зменшення крихкості загартованої сталі та отримання необхідної структури і механічних властивостей.

**Низькотемпературний відпуск** проводять з нагріванням сталі до температури 150-250° С протягом 1...3 годин. Цей відпуск знижує внутрішні напруження в сталі при збереженні високої твердості (58-63 HRC). Він використовується переважно для інструментів з вуглецевих і низьколегованих сталей, а також для деталей, які підлягають поверхневому гартуванню, цементації і нітроцементації, до яких пред'являють високі вимоги по твердості і зносостійкості. При охолодженні одержують структуру мартенситу відпуску.

**Середньотемпературний відпуск** здійснюють при температурах 350-500 °С. Метою цього відпуску є покращення структури трооститу. Твердість загартованої сталі при цьому знижується до 40-50 HRC, межа пружності

досягає максимальної величини. Середньому відпуску підлягають ресори, пружини і ударні інструменти.

**Високотемпературний відпуск** здійснюють при температурах 500-650 °С. Сталь при цьому набуває структури сорбіту (сорбіт відпуску). Твердість загартованої сталі знижується до 250-350 *HV*, міцність зменшується в 1,5-2 рази, пластичність і в'язкість збільшуються в декілька разів, внутрішні напруження повністю знімаються. Гартування з високим відпуском називають **поліпшенням**. Поліпшена сталь в порівнянні з відпаленою або нормалізованою має більш високі показники міцності, пластичності і в'язкості. Поліпшенню піддають вироби з конструкційних сталей марок 40, 45, 40X, 40XHM, 40XMФ тощо (напівосі, колінчасті вали, шатуни, поворотні кулаки, важилі, балки передніх осей вантажних автомобілів, а також болти, гайки, гвинти тощо), які сприймають значні ударні та знакозмінні навантаження.

## Самостійна робота №28

**Тема:** Хіміко-термічна обробка сталі

**Мета:**

- 1.1 Ознайомитись з поняттям термічної обробки сталі
- 1.2 Опанувати основні різновиди термічної обробки сталі

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Поняття хіміко-термічної обробки сталі.
- 2 Різновиди хіміко-термічної обробки сталі: цементація, дифузійна металізація.

## Література:

- 1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.
- 2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризувати поняття хіміко-термічна обробка сталі.
- 2 Обґрунтувати основні різновиди хіміко-термічної обробки сталі: цементація, дифузійна металізація.

### **Хіміко-термічна обробка сталі**

*Хіміко-термічною обробкою* (ХТО) називають процес, який представляє собою поєднання термічного і хімічного впливу з метою зміни хімічного складу, мікроструктури і властивостей поверхневого шару заготовки.

Для зміни хімічного складу заготовку нагрівають у середовищі, збагаченому *дифузантом* (елементом, який насичує), витримують протягом певного часу при заданій температурі, а потім охолоджують. Під час цього відбувається дифузійне збагачення поверхневого шару заготовок неметалами або металами з метою поверхневого зміцнення. В результаті утворюється *дифузійний шар*, що відрізняється від основного металу хімічним складом, структурою та властивостями. Товщина дифузійного шару залежить від температури та тривалості процесу, виду утворюваного твердого розчину і концентрації дифузанта на поверхні заготовки. З підвищенням температури та часу витримки товщина дифузійного шару зростає.

ХТО змінює хімічний склад і структуру поверхневого шару, тоді як поверхневе гартування — лише структуру. Тому різниця у властивостях поверхні та осердя в деталях після хіміко-термічної обробки більша, ніж у поверхнево загартованих деталях. Результати ХТО не залежать від форми деталей. Проте поверхневе гартування продуктивніше.

До найпоширеніших способів ХТО належать цементація, азотування, ціанування, нітроцементація, алітування, силіціювання та інші.

### ***Цементація сталі***

*Цементацією* називають процес дифузійного насичення вуглецем поверхневого шару сталевих заготовок. Мета цементації в комплексі з подальшою термообробкою — надати поверхні деталі високої твердості та

зносостійкості, зберігши в'язке осердя. Як правило, цементують сталі з низькою масовою часткою вуглецю в межах від 0,1 до 0,25 % . Перед цементацією заготовки попередньо обробляють різанням, залишивши припуск (0,05...0,1 мм) на шліфування.

Після ХТО концентрація вуглецю найвища на поверхні заготовки (0,8...1,0 %) і поступово зменшується в глибину. Значення ефективної глибини лежить в інтервалі від 0,5 до 2 мм.

### *Дифузійна металізація*

*Дифузійна металізація* — дифузійне насичення поверхневих шарів переважно сталевих виробів різними металами (алюмінієм, хромом) і металоїдами (кремній, бор) при високій температурі. Дифузійна металізація зумовлює підвищення корозійної тривкості, жаро- і зносостійкості.

Дифузійне насичення виробів алюмінієм з метою підвищення жаростійкості називають *алітуванням*. Алітують сталі з 0,1...0,2 % С. За наявності кисню на поверхні алітованого виробу формується щільна плівка оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ , яка захищає виріб від взаємодії з середовищем до температури 900 °С.

*Хромовання* — дифузійне насичення хромом поверхонь переважно сталевих виробів з метою підвищення до 800 °С жаростійкості, корозійної тривкості (у воді, морській воді та азотній кислоті) та поверхневої твердості. Глибина дифузійного шару 0,2...0,25 мм. Підвищенню поверхневої твердості до 1200...1300 НV сприяє вуглець у сталі в кількості понад 0,3 %, який утворює карбіди заліза і хрому.

Хромують вироби, що працюють в агресивних середовищах в умовах спрацювання.

*Силіціювання* – насичення сталі кремнієм. При цьому підвищується корозійна стійкість виробів, однак цей вид хіміко-термічної обробки не отримав широкого використання в техніці.

## **Самостійна робота №29**

**Мета:** Загальні відомості про ливарне виробництво

1.1 Ознайомитись з основними відомостями про ливарне виробництво

1.2 Опанувати технологію ливарного виробництва

### **Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Основні відомості про ливарне виробництво.
- 2 Основні різновиди технології ливарного виробництва.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризувати поняття ливарне виробництво.
- 2 Обґрунтувати основні різновиди технології ливарного виробництва.

**Ливарне виробництво**, одна з галузей промисловості, продукцією якої є **відливання**, отримувані в ливарних формах при заповненні їх рідким сплавом. Методами лиття виготовляється в середньому близько 40% (по масі) заготовок деталей машин, а в деяких галузях машинобудування, наприклад у верстатобудуванні, доля литих виробів складає 80%. Зі всіх вироблюваних литих заготовок машинобудування споживає приблизно 70%, металургійна промисловість — 20%, виробництво санітарно-технічного устаткування — 10%.

Литі деталі використовують в металообробних верстатах, двигунах внутрішнього згорання, компресорах, насосах, електродвигунах, парових і гідравлічних турбінах, прокатних станах, сільськогосподарських машинах автомобілях, тракторах, локомотивах, вагонах. Значний об'єм литих виробів, особливо з кольорових сплавів, споживають авіація, оборонна промисловість, приладобудування. Ливарне виробництво поставляє також водопровідні і каналізаційні труби, ванни, радіатори, опалювальні казани, пічну арматуру і ін. Широке вживання відливань пояснюється тим, що їх форму легко наблизити до конфігурації готових виробів, чим форму заготовок,

вироблюваних ін. способами, наприклад ковкою. Литтям можна отримати заготовки різної складності з невеликими припуськами, що зменшує витрату металу, скорочує витрати на механічну обробку і, кінцем кінцем, знижує собівартість виробів.

Основні сплави, з яких виготовляють відливання: сірий, ковкий і легований чавун (до 75% всіх відливок по масі), вуглецеві і легovanі сталі (понад 20%) і кольорові сплави (мідні, алюмінієві, цинкові і магнієві). Сфера застосування литих деталей безперервно розширюється.

**Технологія ливарного виробництва.** Процес ливарного виробництва багатообразний і підрозділяється: за способом заповнення форм — на звичайне литво, литво відцентрове, литво під тиском ; за способом виготовлення ливарних форм — на литво в разові форми (службовці лише для здобуття одного відливання), литво в багато разів використовувані керамічні або глиняно-піщані форми, називається напівпостійними (такі форми з ремонтом витримують до 150 заливок), і литво в багато разів використовувані, так звані постійні металеві форми, наприклад кокілі, які витримують до декількох тисяч заливок.

При виробництві заготовок литвом використовують разові піщані, оболонкові самотвердеючі форми. Разові форми виготовляють за допомогою модельного комплекту і опоки (рисунок 29.1). Модельний комплект складається з власне ливарній моделі, призначеною для здобуття в ливарній формі порожнини майбутнього відливання, і стрижньового ящика для здобуття ливарних стрижнів, що оформляють внутрішні або складні зовнішні частини відливань. Моделі укріплюють на модельних плитах, на яких встановлюють опоки, що заповнюються формувальною сумішшю. Заформовану нижню опоку знімають з модельної плити, перевертають на  $180^\circ$  і в порожнину форми вставляють стрижень. Потім збирають (спарюють) верхню і нижню опоки, скріплюють їх і заливають рідкий сплав. Після твердіння і охолодження відливку разом з системою ливника витягують (вибивають) з опоки, відокремлюють систему ливника і очищають відливання — виходить лита заготівка.

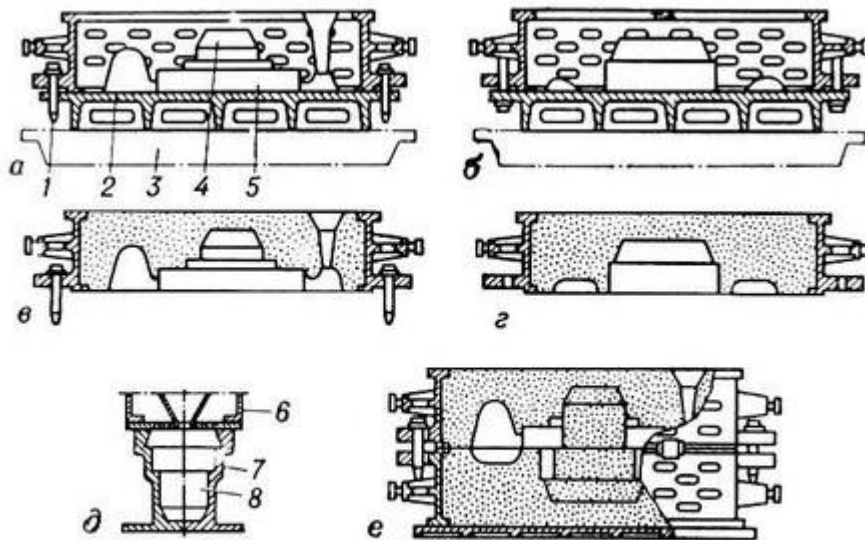


Рисунок 29.1 – Основні елементи ливарного оснащення при здобутті відливання в разовій формі: а і б – модельний комплект верхньої і нижньої пів форми з опокою в і г – верхня і нижня за формування опоки.

Найбільш поширене в промисловості виробництво відливань в разових піщаних формах. Цей спосіб застосовується для виготовлення з різних сплавів заготовок будь-яких розмірів і конфігурації. Технологічний процес литва в піщані форми (рисунок 29.2) складається з ряду послідовних операцій: підготовка матеріалів, приготування формувальних і стрижньових сумішей, виготовлення форм і стрижнів, простановка стрижнів і збірка форм, плавка металу і заливка його у форми, охолодження металу і вибівка готового відливання, очищення відливання, термообробка і обробка.



Рисунок 29.2 – Основні операції технологічного процесу здобуття відливання в піщаній формі

Матеріали, вживані для виготовлення разових ливарних форм і стрижнів, діляться на початкових формувальні матеріали і формувальні суміші; їх маса рівна в середньому 5—6 т на 1 т придатних відливань в рік. При виготовленні формувальної суміші використовують відпрацьовану формувальну суміш, вибиту з опок, свіжі піщано-глинисті або бентонітові матеріали, добавки, поліпшуючі властивості суміші, і воду. У стрижньову суміш зазвичай входять кварцевий пісок, єднальні матеріали (масло, смола і ін.) і добавки. Приготування суміші виробляють в певній послідовності на смесеприготовітельном устаткуванні ; ситах, сушилах, дробарках, млинах, магнітних сепараторах, змішувачах і тому подібне

Форми і стрижні виготовляють на спеціальному формувальному устаткуванні і верстатах. Насипана в опоки суміш ущільнюється струшуванням, пресуванням або спільно тим і ін. способом. Крупні форми заповнюють за допомогою песькометов, рідше для виготовлення форм використовують песькодувніє і песькострельніє машини. Форми в опоках, заформованніє в стрижньових ящиках стрижні піддаються тепловій сушці або хімічному твердненню, наприклад при литво в самотвердеющие форми . Теплову сушку здійснюють в ливарних сушилах, а сушку стрижнів виробляють також в нагрітому стрижньовому ящику. Збірка форм складається з наступних операцій: установка стрижнів, з'єднання половин форм, закріплення форм скобами або вантажами, що встановлюються на верхню форму і запобігають їх розкриттю при заливці сплавом. Інколи на форму



встановлюють чашу ливника, виготовлену із стрижнкової або формувальної суміші.

Плавлять метал залежно від вигляду сплаву в печах різного типу і продуктивності (див. Плаவில்не устаткування) . найчастіше ливарний чавун виплавляють в вагранках, застосовують також електричні плавильні печі (тиглі, електродуги, індукційні, канального типу і ін.). Здобуття деяких сплавів з чорних металів, наприклад білого чавуну, ведуть послідовно в двох печах, наприклад у вагранці і електропечі (т.з. дуплекс-процес). Заливку форм сплавом здійснюють із заливальних ковшів, в які періодично поступає сплав з плавильного агрегату. Затверділі відливання зазвичай вибивають на вібраційних ґратах або коромислах. При цьому суміш пробуджується через ґрати і поступає в смесепріготівельне відділення на переробку, а відливання — в очисне відділення. При очищенні відливань з них видаляють суміш, що пригоріла, відбивають (відрізують) елементи системи ливника і зачищають затоки сплаву і залишки ливників. Ці операції проводять в галтувальних барабанах, дробеструйних і дробеметних установках. Крупні відливання очищають гідравлічним способом в спеціальних камерах. Обрубкування і зачистку відливання здійснюють пневматичними зубилами і абразивним інструментом. Відливання з кольорових металів обробляють на металоріжучих верстатах.

Для набуття необхідних механічних властивостей більшість відливань із сталі, ковкого чавуну, кольорових сплавів піддають термічною обробці . Після контролю якості литва і виправлення дефектів відливання забарвлюють і передають на склад готової продукції.

### **Самостійна робота №30**

**Мета:** Зварювання металів

- 1.1 Ознайомитись з основними відомостями про зварювання металів
- 1.2 Опанувати технологію зварювання металів

**Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Основні відомості про зварювання металів.
- 2 Основні різновиди технології зварювального виробництва.
- 3 Автоматизація зварювального виробництва.

**Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризувати поняття зварювання металів.
- 2 Обґрунтувати основні різновиди технології зварювального виробництва.
- 3 Пояснити яким чином відбувається автоматизація виробництва.

### **Ручне електродугове зварювання**

*Зварюванням* називається процес отримання нероз'ємного з'єднання за допомогою встановлення міжатомних зв'язків між зварюваними частинами при їх місцевому або загальному нагріванні або пластичному деформуванні, або сумісній дії того і іншого.

Здатність металів і сплавів до зварювання оцінюють по їх зварюємості. Під *зварюємістю* розуміють можливість утворення при зварюванні щільних герметичних швів з необхідною міцністю і фізико-хімічними властивостями. Не всі метали і сплави володіють доброю зварюємістю.

Кращою зварюємістю володіють метали, здатні утворювати один з одним тверді розчини. Гірше зварюються метали з обмеженою розчинністю в твердому стані. Зовсім неможливо зварити методом плавлення ті метали, які взагалі взаємно не розчиняються в твердому стані або утворюють крихке з'єднання. Ці метали піддають зварюванню тиском або вводять при зварюванні проміжний метал, який здатен розчинятися в обох основних металах.

### **Суть електродугового зварювання**

Суть ручного дугового зварювання у тому, що за допомогою теплоти зварювальної дуги розплавляється електрод та краї заготовок, а рідкий метал заповнює простір між ними, утворюючи після кристалізації рідкого металу — зварний шов. Шов міцно і надійно з'єднує зварені заготовки в одне ціле,

зварювальник рукою переміщує електродотримач з електродом у напрямку до заготовок і вздовж майбутнього шва.

**Зварювальною дугою** називають потужний і стабільний електричний розряд у середовищі іонізованих газів та випарів металу, який супроводжується інтенсивним виділенням теплоти і світла. Повітря у звичайних умовах складається з нейтральних молекул, тому воно не є провідником електричного струму. Щоб молекули повітря дугового проміжку стали провідником струму, їх необхідно іонізувати. З цією метою електрод на короткий час дотикають до заготовки, після цього віддалять його на відстань довжини дуги. Під час дотику між торцем електрода і заготовкою відбувається коротке замикання, внаслідок чого метал контактних поверхонь швидко нагрівається до високої температури. Після відриву електрода з нагрітого катода під дією електричного поля починається електронна емісія.

Температура в центрі стовпа дуги становить 6000...7000 °С. Напруга, необхідна для запалювання дуги, у випадку постійного струму не повинна перевищувати 30...35 В, а у випадку змінного струму — 50...55 В. У режимі стійкого горіння напруга спадає до 18...30 В.

Напруга дуги залежить від складу газів, у яких горить дуга, довжини дуги, сили струму, матеріалу електрода та виробу.

### ***Електроди для ручного зварювання***

Для ручного електродугового зварювання застосовують два типи електродів: неплавкі, плавкі.

**Неплавкі електроди** виготовляють у вигляді стрижнів з вольфраму, електротехнічного вугілля або синтетичного графіту.

**Плавкий електрод** для ручного зварювання — це дротяний електропровідний стрижень з нанесеним на нього покриттям завтовшки 0,5...3 мм. Речовини покриття, а також стрижня, підсилюють іонізацію дугового проміжку, захищають рідкий метал від шкідливої дії середовища, дезоксидують і обмежено легують рідкий метал. Стрижні електродів діаметром 1,6...12 мм і довжиною 150...450 мм виготовляють зі спеціального зварювального дроту, який поділяють за хімічним складом на низьковуглецевий дріт (Св-08, Св-05ГА, Св-10Г2 та ін.); легований дріт (Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС та ін.) та високолегований дріт (Св-12Х13, Св-10Х20Н15 та ін.).

У позначенні марки дроту літери Св означають зварювальний, а цифри після них — вміст вуглецю у сотих частках відсотка. Наступні літери й цифри після цих літер показують легувальні елементи та їх відсотковий вміст.

Наприклад, зварювальний дріт марки Св-10Х20Н15 містить 0,10 % вуглецю, 20 % хрому, 15 % нікелю, решта — залізо. Літера А в кінці марки низьковуглецевого та легованого дроту свідчить про знижений вміст шкідливих домішок. Бажано, щоб хімічний склад електродного дроту був близький до хімічного складу зварюваного матеріалу. Якщо цього досягти важко, то речовини, яких в електроді не вистачає, необхідно внести в покриття.

Для зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей використовують електроди Е38, Е42, Е42А, Е46, Е46А, Е50, Е50А, Е55 і Е60; для зварювання легованих конструкційних сталей підвищеної міцності застосовують електроди Е70, Е85, Е100, Е125 і Е150. Цифра відповідає межі міцності в МПа  $\times 10^{-1}$ . Літера А означає, що наплавлений метал має підвищені пластичні властивості (відносне видовження і ударну в'язкість).

До складу покриття входять іонізувальні, шлакоутворювальні, газоутворювальні, дезоксидувальні, легувальні та зв'язувальні речовини. За видом основної речовини покриття поділяються на рутилові (Р), целюлозні (Ц), основні (О) та кислі (К).

Найпоширенішими є рутилові покриття завдяки низькій токсичності, здатності забезпечувати стабільне горіння дуги та міцні шви.

Окрім сталевих електродів, використовують також електроди зі сплавів алюмінію (для зварювання матеріалів на його основі), зі сплавів міді (для зварювання бронз і латуней), зі сплавів титану (для зварювання титанових сплавів).

### ***Типи зварних з'єднань***

***Типи зварних з'єднань*** залежать від конструкції виробу й товщини зварюваного металу. Головними типами зварних з'єднань є стикові, внакладку, таврові та кутові.

***Стикове з'єднання*** — зварне з'єднання двох заготовок торцевими поверхнями. Якщо товщина заготовок під 1 до 5 мм, то шов виконують переважно з одного боку і рідше з двох боків, попередньо не обробляючи скісні краї й залишаючи між заготовками невеликий зазор. При зварюванні заготовок з товщиною більше 3 мм краям заготовки можна надавати V-подібну, U-подібну або X-подібну форму. Якщо краї X-подібні, то шов накладають по чергову з обох боків з метою зменшити деформації зварюваних елементів.

***Накладні з'єднання*** можуть бути суцільними та переривчастими.

***Таврові та кутові з'єднання*** виготовляються також з попередньою обробкою кромки та без підготовки.

Залежно від положення швів у просторі під час зварювання їх поділяють на нижні, горизонтальні, вертикальні та стельові.

Нижній стиковий шов найзручніше виконувати, оскільки тут рідкий метал легко заповнює проміжок між зварюваними елементами, а з ванни він не витікає.

Складно накладати вертикальні шви, ще складніше — горизонтальні на вертикальній стінці і найскладніше — стельові, бо з ванни вертикальних, горизонтальних і стельових швів рідкий метал може витікати під дією сил гравітації. Витіканню можна запобігти, застосовуючи малопотужну коротку дугу.

### **Режим ручного дугового зварювання**

**Режимом ручного дугового зварювання** називають сукупність параметрів, які забезпечують необхідну якість зварного з'єднання, максимальну продуктивність і низьку собівартість. Найважливішими параметрами режиму є діаметр електрода  $d$  і сила зварювального струму  $I_z$ .

**Діаметр електрода  $d$**  вибирають залежно від товщини зварюваних елементів користуючись емпіричними формулами або орієнтовними співвідношеннями між товщиною зварюваних елементів і рекомендованим діаметром електрода:

Товщина металу $t$ , мм	1...3	3	4...5	6...12	13 і більше
Діаметр електрода $d$ , мм	1,6...2,5	3	3...4	4...5	5 і більше

**Силу зварювального струму  $I_z$**  (А) для електродів діаметром 3...6 мм можна визначити за емпіричною формулою

$$I_z = \kappa \cdot d,$$

де  $\kappa$  — коефіцієнт, який змінюється від 25 до 60 А/мм.

**Довжина дуги** істотно впливає на якість шва: чим коротша дуга, тим вище якість наплавленого металу. Довжину дуги визначають за формулою

$$L = 0,5 \cdot (d + 2)$$

де  $d$  — діаметр електроду, мм.

### **Автоматизація зварювального виробництва**

**Напівавтоматичне дугове зварювання в атмосфері захисних газів** відрізняється від ручного тим, що тут автоматично подається електродний дріт на виріб, автоматично запалюється та підтримується дуга і лише вручну зварювальник переміщає електродний дріт уздовж шва. Як захисні використовують інертні (аргон, гелій) та активні газы (вуглекислий газ, азот, водень). Найефективнішим з-поміж захисних газів є вуглекислий газ і аргон.

Напівавтоматичне дугове зварювання в атмосфері *вуглекислого газу* провадять лише плавким електродом у вигляді голого дроту великої довжини діаметром 0,8—2 мм.

Вуглекислий газ CO<sub>2</sub> захищає дугу і розплавлений метал від взаємодії з повітрям. У вуглекислому газі зварюють трубопроводи, корпуси суден та інші конструкції з вуглецевих та низьковуглецевих сталей.

В атмосфері *аргону* зварюють сплави на основі алюмінію, титану, магнію, леговані та високолеговані сталі постійним струмом зворотної полярності. Аргонно-дугове зварювання забезпечує кращу якість і більш високу продуктивність, але аргон дорогий.

При *автоматичному* зварюванні, крім автоматичної подачі електрода, автоматизоване переміщення електрода вздовж шва.

### ***Напівавтоматичне та автоматичне дугове зварювання під флюсом***

*Дугове зварювання під флюсом* відрізняється від зварювання в атмосфері захисних газів лише тим, що тут дугу й розплавлений метал захищає від повітря не газ, а спеціальна зерниста речовина — флюс. Флюс виконує ту ж функцію, що й покриття електродів для ручного зварювання, тобто стабілізує дугу, захищає зону зварювання, забезпечує дезоксидацію та легування шва.

Електричний дріт безперервно подається в зону зварювання, а шар флюсу завтовшки 30...60 мм з лійки насипається безпосередньо перед дугою на краї зварюваних заготовок. Дуга горить між кінцем електродного дроту і заготовками, розплавляючи їх краї та дріт, внаслідок чого утворюється зварювальна ванна. Цим способом зварюють заготовки з вуглецевих і легованих сталей, міді, алюмінію, титану та їх сплавів завтовшки 2...100 мм.

Автоматичне зварювання під флюсом відрізняється від напівавтоматичного наявністю механізму для переміщення зварювальної дуги вздовж шва і досконалішою апаратурою для подачі флюсу та його відсмоктування зі шва.

## **Самостійна робота №31**

**Мета:** Паяння металів і сплавів

1.1 Ознайомитись з основними відомостями про паяння металів і сплавів

## 1.2 Опанувати технологію паяння металів і сплавів

### **Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Основні відомості паяння .
- 2 Різновиди припоїв.
- 3 Технологічний процес паяння.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризувати поняття паяння металів.
- 2 Які бувають основні різновиди припоїв.
- 3 Пояснити яким чином відбувається технологічний процес паяння.

## **Паяння металів і сплавів**

**Паяння** – з'єднання металевих деталей в твердому стані за допомогою присадкового сплаву (**припою**). При паянні плавиться лише присадковий метал, який має температуру плавлення нижчу основного металу.

Для одержання міцного з'єднання необхідно, щоб припій добре змочувався поверхнею з'єднуваних металів, мав якісну взаємодію і утворював з ним розчини. Чим вище ступінь взаємної дифузії між розплавленим припоєм і основними металами, тим вищою є механічна міцність з'єднання. Крім того, міцність паяння залежить від чистоти поверхні з'єднуваних деталей. Тому поверхню виробу попередньо чистять, обезжирюють і вилучають окисли.

За допомогою паяння можна з'єднати деталі з вуглецевої і легованої сталі всіх марок, кольорових металів і сплавів, а також з різнорідних металів і сплавів.

### Припої

Для паяння використовують припої двох видів:

- м'які з низькою температурою плавлення (до 400 °С) і відносно малою механічною міцністю з'єднання;
- тверді з високою температурою плавлення (до 900 °С) і високою механічною міцністю з'єднання.

М'які припої, до яких відносять сплави на олов'яній, свинцевій, кадмієвій, вісмутівій і цинковій основах, використовують в тому випадку, коли шов повинен забезпечувати герметичність з'єднання при відносно невисокій механічній міцності (межа міцності шва 30÷100 МПа). Часто застосовують олов'яно-свинцеві припої ПОС-61, ПОС-40 з вмістом олова 61% 40% відповідно.

Тверді припої, до яких відносять сплави на мідній, срібній, алюмінієвій, магнієвій і нікелевій основах, використовують для отримання міцних швів (межа міцності шва може сягати до 700 МПа). Твердими припоями можна паяти мідь, латунь, бронзу, сталь, чавун і інші сплави, крім алюмінію і його сплавів.

### Технологічний процес паяння

Технологічний процес паяння м'яким припоєм включає підготовку поверхні деталей і власне паяння. Підготовка поверхні деталей складається з підгонки з'єднуваних деталей, механічному очищенні від бруду, жирів і оксидних плівок, покритті очищених поверхонь флюсом.

**Флюси** використовують для захисту очищених поверхонь від окислення та для поліпшення змочування рідким припоєм з'єднуваних металів. При паянні м'яким припоєм в якості флюсів найчастіше використовують соляну, фосфорну кислоти, хлористий цинк, суміш хлористого цинку з хлористим амонієм або каніфоль. Іноді використовують також пастоподібні флюси.



Для здійснення паяння паяльник нагрівають до 250-300 °С, робочим кінцем занурюють у флюс, залуднюють припоєм і розігрівають підготовлені до паяння деталі в місцях з'єднання. Одночасно на шов наносять припій, який розплавляють паяльником і вводять в зазор, де він, охолоджуючись, утворює шов. Міцність з'єднання 50-70 МПа.

При паянні твердими припоями раніше підготовлені і оброблені флюсом частини виробів нагрівають разом з припоєм до температури плавлення. В якості флюсів використовують буру ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), сіль борної кислоти ( $\text{Na}_2\text{BO}_3$ ), фтористий калій (KF) тощо. Міцність з'єднання 450 МПа.

## **Самостійна робота №32**

**Мета:** Обробка металів різанням

1.1 Ознайомитись з основами обробки металів різанням

## 1.2 Опанувати різні технології різання металів

### **Питання, що виносяться на самостійне вивчення:**

- 1 Основні відомості про обробку металів різанням.
- 2 Різновиди технології різання металів: газове різання, дугове та променеве.

### **Література:**

1 Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. для учащихся электротехн. спец. /В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990.

2 Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. Посібник. – Львів: «Магнолія», 2007. – 242 с.

### **Питання для самоконтролю:**

- 1 Охарактеризувати основні відомості про обробку металів різанням.
- 2 Проаналізувати різновиди технології різання металів.

**Обробка металів різанням** , технологічні процеси обробки металів шляхом зняття стружки, здійснювані ріжучими інструментами на **металоріжучих верстатах** з метою додання деталям заданих форм, розмірів і якості поверхневих шарів. Основні види обробки металів різанням **точіння, стругання, свердління, розгортання, протягання, фрезерування і**

зубофрезерування, шліфування, хонінгування і ін. Закономірності обробка металів різанням. розглядаються як результат взаємодії системи верстат — пристосування — інструмент — деталь. Будь-який вигляд обробки металів різанням характеризується режимом різання, що є сукупністю наступних основних елементів: швидкість різання  $v$ , глибина різання  $t$  і подача  $s$ . Швидкість різання — швидкість інструменту або заготовки у напрямі головного руху, в результаті якого відбувається відділення стружки від заготовки подача — швидкість у напрямі руху подачі. Наприклад, при точінні (рисунок 32.1) швидкістю різання називається швидкість переміщення оброблюваної заготовки відносно ріжучої кромки різця (окружна швидкість) в  $m\text{-кодів}/\text{мін}$ , подачею — переміщення ріжучої кромки різця за один зворот заготовки в  $mm/об$ . Глибина різання — товщина (у  $mm$ ) шару металу, що знімається, за один прохід (відстань між оброблюваною і обробленою поверхнями, виміряне по нормалі). У перетині шару металу (рисунок 32.1), що зрізається, розглядаються такі елементи різання (фізичні параметри): товщина шару, що зрізається, і ширина шару, що зрізається; їх величина при постійних  $t$  і  $s$  залежить від головного кута в плані  $j$ .

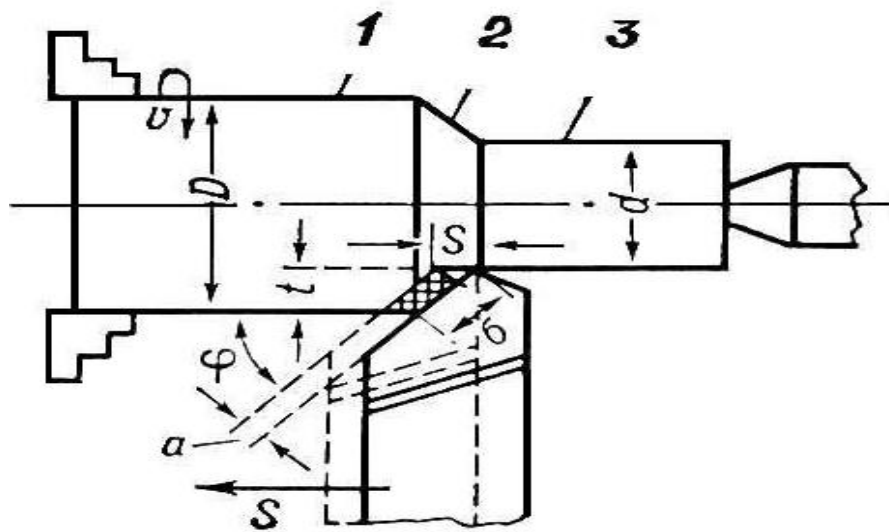


Рисунок 32.1 – Елементи режиму різання по точінні: 1 – оброблювання повергнення, 2 – поверхня різання, 3 – оброблена поверхня,  $D$  діаметр обробленої заготовки,  $d$  – діаметр деталі після обробки,  $a$  і  $b$  – товщина і ширина шару, що розрізається.

### **Газове різання металів**

**Газове різання** є одним з поширених способів термічного різання металів. Суть цього способу в тому, що метал в зоні різання нагрівають газокисневим полум'ям до температури горіння (запалювання), після чого подають струмінь кисню, в якому згоряє метал і видуються утворені оксиди.

Газове різання можливе лише в тих металах, які мають температуру згоряння нижче температури плавлення. Такими металами і сплавами є залізо, вуглецева сталь з вмістом вуглецю до 0,7 %, деякі сорти легованої сталі.

Різання заліза і сталі здійснюється спеціальними різальними горілками – різачками. Різак відрізняється від пальника наявністю спеціального каналу для підведення струменю кисню.

Газове різання поділяється на ручне і машинне.

При машинному різанні рух різачка по лінії різку механізовано, і різ отримують більш точним, внаслідок відсутності вібрацій і нерівномірності швидкості руху. Є машини з фотоелектронним копіюванням контуру вирізки по кресленню: машини для різання листів, машини з дистанційним керуванням.

**Термічне різання** високолегованих хромонікелевих корозійностійких сталей, чавуну, кольорових металів можна виконати способом киснево-флюсового різання. Суть його полягає в тому, що в зону різання разом з киснем вводиться порошковий флюс, основним компонентом якого є залізний порошок. При згорянні заліза виділяється додаткова теплота і утворюються легкоплинні шлаки, які видаляються із зони різання. При різанні кольорових металів до складу шлаку вводять також алюмінієвий порошок або кварцовий пісок.

### ***Дугове та променеве різання металів***

Електрична дуга як потужне концентроване джерело тепла може бути використана для різання металу. **Ручне дугове різання** проводиться з силою струму на 20...30 % більшою ніж при зварюванні. Різання можна виконувати плавкими або неплавкими електродами. Для видалення розплавленого металу можна застосовувати стиснене повітря. Якість поверхні після різання низька.

**Плазмове різання** ґрунтується на тому, що метал розплавляється та видувається із зони різання струменем розігрітої плазми. Практично всі метали можна розрізати плазмовим різанням. Як плазмоутворюючі гази застосовуються азот, водень, аргонноводневу суміш.

Висока концентрація енергії **лазерного променя** дозволяє використовувати його для різання різних матеріалів, в т. ч. неметалевих. Лазерним променем можна розрізувати метали, скло, кераміку, алмази. Під дією лазерного променя