

І. І. ВАСИЛЕНКО, В. В. ШИРОКОВ, Ю. І. ВАСИЛЕНКО

КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник:

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

**„Магнолія-2006”
Львів-2008**

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(лист № 1.4/18 - Г - 857 від 02.10.06р.)*

Рецензенти:

*Федірко В. М. - доктор технічних наук, професор (Фізико-механічний
інститут НАН України);
Семерак М. М. — доктор технічних наук, професор (Львівський дер-
жавний аграрний університет);
Сиротюк В. М. — кандидат технічних наук, професор (Львівський дер-
жавний аграрний університет).*

Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І.

В19 Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. посібник. - Львів:
"Магнолія 2006", 2008. - 242 с

ISBN 966-2025-02-2 . "Магнолія 2006"

Викладено фізичні основи електроматеріалознавства та загальні
відомості про основні класи електротехнічних матеріалів - діелектри-
ків, провідників, напівпровідників, магнітних матеріалів та їх власти-
вості. Наведено основні марки та характеристики конструкційних ста-
лей для енергетичного обладнання.

Посібник призначено для студентів енергетичних спеціальностей
вищих навчальних закладів III - IV рівнів акредитації, а також студентів
коледжів і технікумів.

УДК 621.039.53 /315
ББК 31.23

© І. І. Василенко, В. В. Широков,
Ю. І. Василенко, 2008.
© "Магнолія 2006", 2008.

ISBN 966-2025-02-2

ЗМІСТ

ВСТУП 6

**РОЗДІЛ 1. АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЕ ВЧЕННЯ І ФІЗИЧНІ
ОСНОВИ ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА 8**

1.1. Розвиток атомно-молекулярного вчення 8
1.2. Будова атома і періодична система елементів
Д. І. Менделєєва 14
1.3. Міжатомні та міжмолекулярні зв'язки 18
1.4. Зонна теорія твердого тіла 27
Запитання для самоконтролю 30

РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 32

2.1. Загальні відомості 32
2.2. Особливості будови твердих тіл 33
2.3. Механічні властивості 39
2.4. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання 44
2.5. Матеріали ядерної енергетики 45
2.6. Матеріали теплової енергетики 50
2.7. Матеріали газових турбін і парогазових установок 54
2.8. Матеріали гідроенергетики 58
Запитання для самоконтролю 59

РОЗДІЛ 3. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ 60

3.1. Фізична суть електропровідності (загальні положення) ... 60
3.2. Електропровідність металів 61
3.3. Температурна залежність питомого опору металічних провідників
..... 64
3.4. Надпровідність 67
3.5. Матеріали високої провідності 76
3.6. Сплави високого опору 80
3.7. Сплави для термопар 83
3.8. Благородні метали 84
3.9. Тугоплавкі метали 86
3.10. Електричні властивості металічних сплавів 92

3.11. Припої і флюси.....	92
3.12. Неметалічні провідникові матеріали	97
<i>Запитання для самоконтролю</i>	101

РОЗДІЛ 4. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ..... 102

4.1. Загальні положення	102
4.2. Механізм провідності напівпровідників.....	103
4.3. Напівпровідники <i>n-типу</i>	106
4.4. Напівпровідники <i>p-типу</i>	108
4.5. Напівпровідникові випростувачі	109
4.6. Методи визначення типу електропровідності напівпровідників.....	113
4.7. Вплив світла на електропровідність напівпровідників ...	113
4.8. Напівпровідникові матеріали.....	115
<i>Запитання для самоконтролю</i>	119

РОЗДІЛ 5. ФІЗИКА ДІЕЛЕКТРИКІВ..... 120

5.1. Діелектричні (електроізоляційні) матеріали	120
5.2. Поляризація діелектриків	122
5.3. Діелектрична проникність	124
5.4. Залежність діелектричної проникності від різних факторів 127	
5.5. Діелектричні втрати.....	129
5.6. Вплив різних чинників на $\text{tg}\delta$	131
5.7. Пробіи діелектриків.....	133
5.8. Електропровідність і пробіи газоподібних діелектриків ...	135
5.9. Електропровідність і пробіи рідких діелектриків.....	140
5.10. Електропровідність і пробіи твердих діелектриків.....	143
<i>Запитання для самоконтролю</i>	149

РОЗДІЛ 6. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ150

6.1. Полімери	150
6.2. Пластичні маси (пластмаси, пластики)	161
6.3. Каучуки	165
6.4. Волокнисті матеріали	167

6.5. Бітуми	169
6.6. Електроізоляційні лаки і компаунди.....	170
6.7. Смоли	173
6.8. Нафтові електроізоляційні оливи.....	176
6.9. Слюдяні матеріали.....	181
6.10. Неорганічні скла	185
6.11. Керамічні матеріали	189
6.12. Нелінійні діелектрики	193
6.13. Фізико-хімічні і механічні властивості діелектриків.....	199
<i>Запитання для самоконтролю</i>	209

РОЗДІЛ 7. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ..... 210

7.1. Фізичні основи	210
7.2. Феромагнетики, антиферомагнетики і феромагнетки ...	215
7.3. Магнітно-м'які матеріали	222
7.4. Спеціальні феромагнетики.....	228
7.5. Магнітно-тверді матеріали.....	231
7.6. Металокерамічні матеріали	234
<i>Запитання для самоконтролю</i>	235

Список використаної та рекомендованої літератури 236

Предметний покажчик..... 238

ВСТУП

Сьогодні види виробництва енергії в різних країнах дуже суттєво відрізняються. В Україні, Франції і Бельгії відповідно 47,3, 76,4 і 56,6 % електроенергії виробляється на АЕС, а в більшості інших розвинутих країн цей показник лежить у межах 30 - 40 %, решта виробляється на ТЕЦ і ГЕС. Довготривала експлуатація електростанцій залежить від надійності конструкційних матеріалів та прогнозування довготривалої стійкості конструкційних елементів системи котел парова турбіна - турбогенератор. Матеріал робочих елементів цієї системи в процесі експлуатації зазнає дії корозійних середовищ та високих механічних і теплових навантажень, які спричиняють пошкодження трубних елементів котлів і найбільшу кількість аварійних зупинок енергоблоків ТЕС і ТЕЦ. Пошкодження відбувається внаслідок деградації сталей і сплавів і зміни їх структури і механічних характеристик - жаротривкості, границі міцності σ_b , границі текучості σ_0 , та інших. Вирішальний вплив на експлуатаційну стійкість конструкційних елементів мають процеси повзучості, корозії, корозійно-механічної втоми, корозійного розтріскування та водневого окрихчення.

На сьогодні чітко визначені марки сталей і сплавів для цільового призначення, відпрацьовані технології виготовлення конкретних деталей та вузлів енергетичного обладнання. Розробляються також нові і модифіковані конструкційні матеріали та вдосконалюються традиційні сталі і сплави, застосовуються нові способи поверхневого зміцнення елементів конструкцій. Всі ці заходи спрямовані на поліпшення довготривалості та надійності енергетичного обладнання.

Розвиток енергетики та електроніки супроводжується ростом одиничної потужності електроагрегатів і застосуванням новітніх якісніших електротехнічних та конструкційних матеріалів. Підвищуються робочі напруги електричних машин і апаратів, повітряних та кабельних ліній електропередач. Одночасно зростає питома потужність (потужність, віднесена до одиниці об'єму чи маси) машин, підвищуються робочі температури ізоляції. У деяких випадках електрична апаратура експлуатується за наднизьких температур (інколи близьких до абсолютного нуля - криогенних) і зростають вимоги до холодостійкості матеріалів. Часто електротех-

нічні матеріали працюють за підвищеної вологості навколишнього середовища, зазнають впливу хімічно активних середовищ, різних проникаючих випромінювань та інших чинників. Тому ці матеріали повинні мати не лише високі і стабільні в часі електричні (магнітні), але й фізико-хімічні та механічні властивості: нагрівостійкість, теплопровідність, радіаційну стійкість, еластичність, ударну в'язкість, низьку гігроскопічність тощо за доброї технологічності та невисокої собівартості. Їх раціональне застосування сприяє збільшенню коефіцієнта корисної дії електромашин та апаратів, підвищенню надійності, зменшенню їх ваги та розмірів, зниженню експлуатаційних затрат.

У виробництві електронного обладнання широко застосовується мікроелектроніка. Зменшуються розміри й маса електронної апаратури за одночасного покращання її надійності та довговічності. Розміри окремих функціональних елементів зменшуються до десятих часток мікрметра. Успішний розвиток мікроелектроніки забезпечується підвищенням якості існуючих та створенням і застосуванням нових матеріалів, виготовленням вузлів і цілих схем на основі нових технологій.

Все зростаючі енергетичні потреби людства, вимоги з точки зору екологічної безпеки спонукають до нових рішень та розв'язання інженерно-фізичних проблем, які виникають у процесі розробки заходів щодо підвищення надійності та ефективності використання діючих енергетичних об'єктів, зокрема атомних. Наприклад, досягнення у сфері керованого термоядерного синтезу привели до розробки енергетичних термоядерних реакторів (ТЯР) типу Токамак: ЕТРТ (Росія), UWMAK-1 і 2; PPPL, OPNL (США), JAERI (Японія), CULHAM (Великобританія), ITALY (Італія). Створюються нові реактори, проекти яких міжнародні, наприклад TFTR, IET, IT-60, T-15, ШТОР, ІТЕР. Ефективність використання високотемпературних атомних, термоядерних та нетрадиційних джерел енергії можливе лише у випадку розширеного застосування найкращих відомих та нових конструкційних і електротехнічних матеріалів.

Пропонований посібник рекомендовано для студентів вузів, коледжів і технікумів неелектричних спеціальностей.



АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНЕ ВЧЕННЯ І ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОМАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

1.1. Розвиток атомно-молекулярного вчення

Атомно-молекулярне вчення зародилось 25 століть назад у Стародавній Греції в дискусіях філософів при розв'язуванні логічних задач, зокрема про те, що відбудеться з каменем, якщо його весь час подрібнювати. Більшість філософів вважала, що цей процес можна продовжити безмежно. *Левкіпп* (500 - 440 рр. до н. е.) і його школа стверджували, що при подрібненні виникає така маленька частинка, яку далі ділити неможливо, а матеріальний світ дискретний і складається з найдрібніших частинок і пустоти. Ці найменші частинки *Демокріт* (460 - 370 рр. до н. е.) назвав неподільними, тобто атомами, і наділив їх розміром, формою і здатністю рухатись: "Як трагедія, чи комедія можуть бути написані одними і тими ж буквами, так і вся різноманітність, що твориться у світі, здійснюється атомами, які займають різне положення і виконують різні рухи". Худіння золотих рук статуй від дотику багатьох уст *Демокріт* пояснив втратою ними незримих частинок - атомів, а чуттєві сприйняття (запахи) - потоками атомів, що відокремлюються від певних тіл. Послідовник Демокріта *Епікур* (342 - 270 рр. до н. е.) наділив атоми внутрішнім джерелом руху і здатністю взаємодіяти між собою.

Геніальна догадка *Левкіппа*, *Демокріта* й *Епікура* виглядає на диво сучасною, хоча на той час не була підтверджена експериментально і про неї забули (аж до XIX ст.). У 1808 р. *Дальтон* сформулював атомістичну теорію, згідно з якою всі речовини складаються з атомів, які не можна ні створити, ні знищити: атоми однієї речовини ідентичні і мають однакову масу.

Модель атома Резерфорда. У 1911 р. *Резерфорд* вперше експериментально встановив існування ядра в атомі, на основі чого

запропонував планетарну його модель. Згідно з цією моделлю атом нагадує мініатюрну Сонячну систему і складається з невеликого позитивно зарядженого ядра, навколо якого по кругових або еліптичних орбітах рухаються на відносно великих відстанях негативно заряджені частинки - електрони, подібно до того, як планети обертаються навколо Сонця. Ядра складаються з протонів і нейтронів, а електрони розміщені на декількох оболонках на різних відстанях від ядра. Число протонів відповідає порядковому числу елемента в періодичній таблиці і дорівнює числу електронів. Тому атом електронейтральний.

Модель Резерфорда не давала відповіді на питання: як може вічно існувати такий атом? Обертаючись навколо ядра, електрони повинні випромінювати енергію, втрачати швидкість і падати на ядро, чого не спостерігається. Не пояснювала модель, чому атомні спектри складаються з окремих ліній і чому атоми випромінюють або поглинають світло тільки певних частот тощо.

Атом Бора-Зоммерфельда. Для пояснення лінійчастого характеру спектрів датський фізик *Бор* у 1913 р. запропонував, опираючись на квантову теорію Планка, нову модель атома. Відповідно квантової теорії енергія може випромінюватись чи поглинатись тільки порціями (квантами). Енергія електрона, який рухається навколо ядра, має тільки певні значення, тобто енергія квантована і залежить від радіуса орбіти. Чим більший радіус орбіти електрона, тим більша його енергія. Оскільки енергія електронів квантована, то квантовані й радіуси орбіт, тобто вони можуть мати тільки певні значення. Під час руху по одній з таких орбіт електрон не випромінює енергію. Для переміщення на більш віддалену від ядра орбіту (рис. 1.1) електрон повинен поглинути фотон (квант світлової енергії) для компенсації роботи з подолання сили притягання електрона ядром.

Згідно з квантовою теорією енергія фотона - кванта світла частоти ν дорівнює $h \cdot \nu$, де h - стала Планка ($6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж-с). Для переходу електрона з орбіти з енергією E_1 на іншу орбіту з енергією E_2 , поглинуте світло повинно мати частоту ν , яка визначається **рівнянням Планка**

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1$$

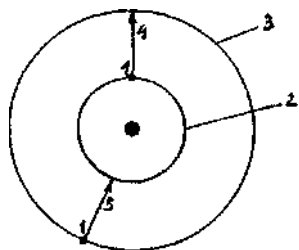


Рис. 1.1. Походження спектральних ліній: 1 - електрон; 2, 3 - орбіти з енергіями E_1 і E_2 ; 4 - поглинена енергія рівна $E_2 - E_1$; частота поглинутого світла $\nu = (E_2 - E_1)/h$; 5 - випромінена енергія рівна $E_2 - E_1$; частота випроміненого світла $\nu = (E_2 - E_1)/h$

Спектри поглинання виникають при переході електрона на більш віддалену від ядра орбіту з більшою енергією, а спектри випромінювання тоді, коли електрони, що перейшли раніше на орбіти з більшою енергією, "падають" зворотню на орбіти з меншою енергією. Бор приписав орбітам квантові числа. Найближча до ядра (рис. 1.3) орбіта K з найменшою енергією характеризується квантовим числом n , рівним 1. На цій орбіті знаходиться електрон атома водню в основному стані. Наступному рівню відповідає орбіта L з квантовим числом 2 і т. д. Якщо електрон отримає енергію, достатню для вивільнення від сил притягання ядра (рис. 1.2), то відбувається іонізація атома ($A \rightarrow A^+ + e^-$).

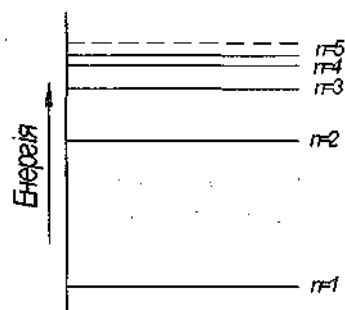


Рис. 1.2. Рівні енергії для деяких значень квантового числа n .

Штрихова лінія відповідає рівню, на якому електрон має енергію, достатню для того, щоб покинути атом: відбувається іонізація атома

Широко застосовується позначення оболонок в міру віддалення від ядра відповідно літерами K, L, M, N,

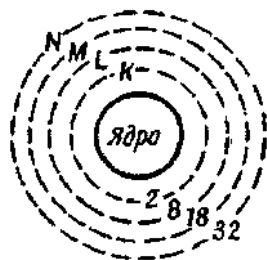


Рис. 1.3. Перші чотири електронні оболонки атомів

O, P і Q. Перші чотири оболонки атома схематично показані на рис. 1.3.

Найбільше число z електронів у даній оболонці дорівнює подвоєному квадрату номера цієї оболонки n , тобто головного квантового числа:

$$z = 2n^2.$$

Тому число електронів в першій оболонці дорівнює 2, у другій - 8, у третій - 18 і четвертій - 32. Більшого числа електронів в одній оболонці відомих атомів не буває. Зовнішня оболонка атома вміщає не більше 8 електронів.

Дослідження показали, що спектральні лінії, які відповідають переходу електрона з одного рівня на інший, часто складаються з декількох близько розташованих окремих ліній, що вказує на різну енергію зв'язку окремих електронів даного енергетичного рівня. Отже, і в межах однієї оболонки електрони мають різні енергії, а значить розміщуються на одній і більше підоболонках, інакше - еліптичних орбітах, або підрівнях енергії. Для характеристики форми еліптичної орбіти (її ексцентриситету) Зоммерфельд ввів друге квантове число l , яке може приймати значення від $(n-1)$ до 0, де n — номер головного квантового числа. Якщо, наприклад, $n = 4$, то $l = 3, 2, 1$ і 0. Кожному значенню l співставляють літеру:

$l = 0$	1	2	3
s	p	d	f

Якщо головне квантове число електрона $n = 2$, а друге квантове число $l = 0$, то вважають, що це 2,5-електрон.

Хвильова теорія атома. Явище заломлення і дифракції світла відносно до хвильової теорії пояснюється законами поширення хвиль. Для пояснення інших властивостей світла - лінійчастого виду атомних спектрів і фотоелектричного ефекту необхідно звертатись до корпускулярної теорії.

Така двоїста природа світла навела в 1924 р. де Бройля на думку, що частинкам притаманні деякі хвильові властивості. Він висунув припущення, що довжина хвилі λ , для частинки з масою m , яка рухається із швидкістю v , визначається рівнянням

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Геніальна догадка де Бройля підтверджена експериментально. Виявилося, що умови квантування Бора зводяться до вимоги, щоб на кожній електронній орбіті розміщалося ціле число довжин хвиль де Бройля (рис. 1.4).

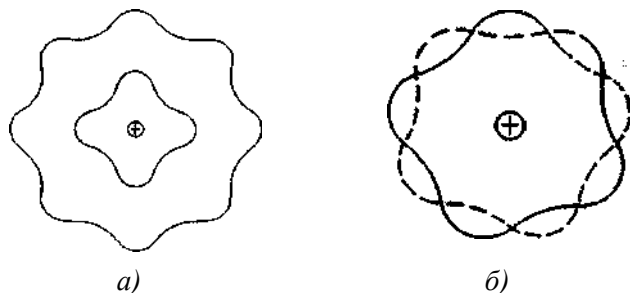


Рис. 1.4. Хвильова природа електрона: а - стоячі хвилі; при обертанні електрона навколо ядра положення максимумів і мінімумів хвиль збігається (рисунок дає двомірну картину тримірних хвиль); б - картина хвильового руху не відповідає розв'язку рівняння Шредінгера; максимум при одному оберті електрона повністю гаситься мінімумом при наступному оберті

Спочатку ідею де Бройля не сприймали серйозно: "Ідеї диссертанта, конечно, вздорны, но развиты с таким изяществом и блеском, что я принял диссертацию к защите". Так оцінював ідею тоді ще дисертанта де Бройля його науковий керівник Поль Ланжевєн. А через шість років дисертант отримав Нобелівську премію.

У моделі атома Бора-Зоммерфельда визначені швидкість електрона і орбіта. Щоб експериментально визначити положення електрона в просторі, необхідно використати світло з малою довжиною хвилі. Але при взаємодії з електроном такі фотони змінюють його швидкість. Уникнути цього можна, використавши світло з великою довжиною хвилі, але тоді неможливо визначити радіус орбіти електрона. Гейзенберг у 1927 р. сформулював принцип невизначеності - неможливо одночасно виміряти швидкість частинки та визначити її положення в просторі. Тому модель атома Бора-Зоммерфельда перестала задовольняти вчених.

Ці труднощі долаються розв'язанням 1924 р. хвильового рівняння Шредінгера, яке отримане за умови, коли електрон розгля-

дається як хвиля і на орбіті, по якій рухається електрон, вкладається ціле число довжин хвиль (див. рис. 1.4).

Розв'язання хвильового рівняння дозволило визначити ймовірність знаходження електрона в даній малій області простору. На рис. 1.5 показана ймовірність виявлення електрона на відстані r від ядра атома водню в основному стані.

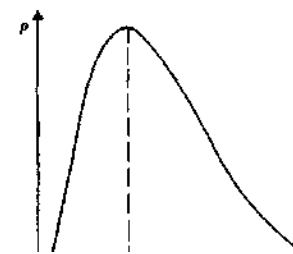


Рис. 1.5. Густіша ймовірності для атома водню в основному стані (Ймовірність ρ того, що електрон знаходиться на відстані r від ядра)

Електрон може знаходитись ближче чи далі від ядра, ніж 0,053 нм, але ймовірність виявити електрон тоді різко зменшується.

* Область простору, в якій ймовірність знаходження електрона становить 95 %, називається атомною орбіталлю.

У такій моделі електрон не обертається навколо ядра. Прийнято розглядати електрон як хмаринку, форма якої і є формою орбіталі. Орбіталь, яка відповідає найнижчому значенню енергії (при $l=0$) названо 1s-орбіталлю. Вона може бути зображена у вигляді сфери з центром в ядрі атома (рис. 1.6).

Розміщення електронів на кожній наступній орбіталі можливе лише після заповнення попередньої. У випадку, коли наявні декілька орбіталей рівної енергії, то жодна з них не може бути заповнена електронною парою, до розміщення на інших хоча б по одному електрону.

Чотири квантові числа Хвильове рівняння Шредінгера має обмежену кількість розв'язків, тому повна енергія атома може мати тільки деякі певні значення. Розв'язок хвильового рівняння отри-

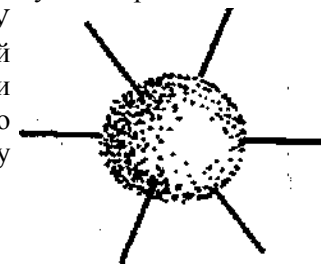


Рис. 1.6. s-орбіталь з ядром у центрі

мується, коли орбіталі охарактеризовані чотирма квантовими числами. *Перше квантове число n* введене Бором, *друге l* - Зоммерфельдом. При розв'язанні хвильового рівняння вводиться *третьє квантове число*, яке характеризує положення орбіти даного електрона в атомі. Його часто називають *магнітним квантовим числом* і позначають m_l . Це число може приймати значення будь-яких чисел від $+l$ до $-l$, включаючи 0. Тому для будь-якої підгрупи кількість можливих значень магнітного квантового числа m_l дорівнює $2l + 1$. Наприклад, при $l = 2$ воно може мати п'ять значень: $+2, +1, 0, -1, -2$.

Четверте квантове число називають спіновим квантовим числом m_s . Поряд з обертанням електрона навколо ядра, відбувається обертання електрона і навколо своєї осі, яке створює відповідне магнітне поле і надає електрону магнітний і механічний момент. Обертання електрона може відбуватися за годинниковою стрілкою або проти неї відносно орбіти електрона. Залежно від цього спін електрона може набувати значень $+1/2$ або $-1/2$.

*Згідно з принципом виключення (принципом Паулі) жодні два електрони в атомі не можуть мати однакові набори усіх чотирьох квантових чисел. Це значить, що якщо будь-які два електрони в одному атомі мають одні й ті ж значення n, l і m_l то вони повинні мати різні значення m_s тобто їх спіни мають бути спрямовані в протилежні сторони.

1.2. Будова атома і періодична система елементів Д. І. Менделєєва

* *Однозначною ознакою хімічного елемента є заряд ядра, рівний числу протонів в ядрі і атомному номеру елемента в періодичній системі. Відносні атомні маси елементів - це усереднені значення атомних мас їх ізотопів.*

В електронейтральних атомах загальне число електронів рівне числу протонів, тобто атомному номеру елемента Z . Електрони в атомах розміщені на різних оболонках (енергетичних рівнях), число яких визначається номером періоду. Поблизу ядра з даним Z

розміщені найбільш міцно зв'язані з ним електрони з $n = 1$, потім електрони з $n = 2$, діюче поле притягання яких ядром послаблене відштовхуванням від електронного шару з $n = 1$, розміщеного ближче до ядра.

При заданому n спочатку заповнюються підоболонки s -електронів ($l = 0$), потім p -електронів ($l = 1$), d -електронів ($l = 2$) і f -електронів ($l = 3$), оскільки в кожному шарі електрони зв'язані з ядром тим сильніше, чим менше l . З точки зору просторового розміщення це означає, що спочатку заповнюються внутрішні шари й оболонки, потім зовнішні. В міру зростання Z електронні оболонки періодично утворюють аналогічні зовнішні електронні конфігурації. Однакові зовнішні конфігурації валентних електронів визначають аналогічні хімічні властивості елементів.

Періодичність хімічних, оптичних, електричних і магнітних властивостей атомів залежно від Z зумовлена подібністю будови зовнішніх електронних оболонок.

Число елементів в періоді визначається формулами:

$$> \text{ для непарних періодів } L_n = \frac{(n+1)^2}{2}$$

$$> \text{ для парних періодів } L_n = \frac{(n+2)^2}{2}$$

де L - число елементів в періоді, n - номер періоду.

Згідно з наведеними формулами, у 1-му періоді вміщається 2, у 2-му і 3-му - по 8, у 4-му і 5-му - по 18, а в 6-му 32 і незавершеному 7-му періоді також повинно бути 32 елементів, тобто їх число у періодах дорівнює числу електронів на енергетичних рівнях.

Число перехідних елементів в усіх періодах рівне 10 і визначається різницею між максимальними числами електронів на M і L енергетичних рівнях: $18 - 8 = 10$, тобто максимальному числу електронів на d - підрівні.

Число лантаноїдів і актиноїдів дорівнює різниці між максимальним числом електронів на N і M енергетичних рівнях: $32 - 18 = 14$, тобто рівне максимальному числу електронів на f -підрівні.

Періодичність розміщення елементів у періодичній системі зумовлена послідовним характером заповнення енергетичних рівнів,

що наглядно видно при зростанні номера групи і номера періоду. Початок забудови нових оболонок відбувається в атомах основної підгрупи першої групи періодичної системи (Оводень, [^]літій, [^]натрій, [^]калій, [^]рубідій, [^]цезій і О франції). На зовнішній оболонці вказаних атомів знаходиться слабо зв'язаний з атомом один електрон. При переході до наступних елементів (основних елементів другої підгрупи: > берилію, > магнію, > кальцію, У стронцію, > барію і > радію) на зовнішній оболонці з'являється ще один електрон, який суттєво стабілізує її і міцність зв'язку цих електронів з ядром зростає. Подальша добудова зовнішньої оболонки стабілізує її ще більше і стабілізація досягає максимуму в атомах інертних газів, які за винятком гелію, мають на зовнішній оболонці по вісім електронів. Стабілізація зумовлена збільшенням заряду ядра, яке викликає зростання сил притягання електронів до ядра. Так, при переході від літію до фтору (2-й період) заряд ядра збільшується від $Z = 3$ до $Z = 9$, у результаті радіуси атомів зменшуються (рис. 1.7).

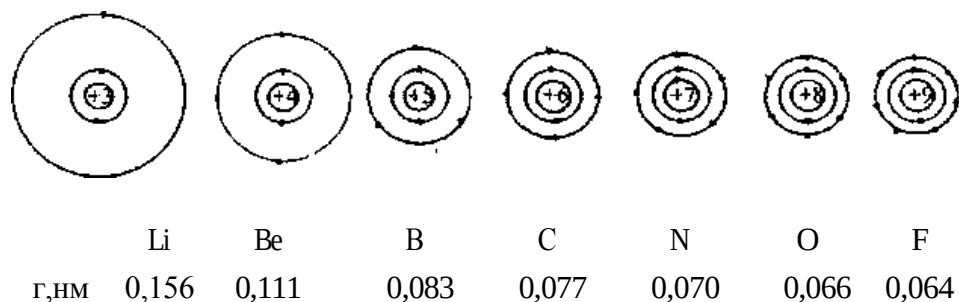


Рис. 1.7. Атомні радіуси елементів другого періоду періодичної таблиці Менделєєва

Тому здатність атомів віддавати електрони (типово металічні властивості) яскраво виражена в атомів літію і поступово зменшується при переході від літію до фтору, який є типовим неметалом, тобто елементом, атоми якого здатні приєднувати електрони. Здатність атомів віддавати чи приєднувати електрони характеризує їх валентність.

Валентність (від лат. valentia - сила) - це міра здатності атома хімічного елемента (або атомної групи) утворювати хімічні зв'язки з іншими атомами (або атомними групами).

Кількісно валентність визначається числом атомів водню, яке даний елемент може приєднувати або заміщати. За валентністю елементи поділяють на дві групи: всім металам і водню притаманна додатна валентність, тоді як іншим (неметалам) -- від'ємна валентність. Елемент з додатною валентністю позначають знаком (+) справа зверху від його символу. Число знаків відповідає числу утворених елементом зв'язків, наприклад Na^+ , Ba^{++} , Al^{+++} , або Na^+ , Ba^{2+} , Al^{3+} . Елементи з від'ємною валентністю позначаються знаком (-), наприклад О або O^{2-} .

В усіх елементів першої групи періодичної системи, починаючи від літію, зовнішня, найбільш віддалена від ядра оболонка вміщує один електрон. Цей електрон притягується позитивно зарядженим ядром. Сила притягання залежить від заряду ядра, відстані від електрона до ядра (атомного радіуса) і відштовхування внаслідок електронними оболонками. При переході від літію до натрію і далі заряд ядра зростає, але цей ефект нейтралізується збільшенням атомного радіуса і відштовхуванням внутрішніми оболонками. І хоча всі елементи цієї групи можуть відносно легко віддати свій зовнішній (валентний) електрон іншим атомам, ця тенденція наростає зі збільшенням атомного номера. Тому металічні властивості елементів в усіх групах періодичної таблиці у напрямі „верх-низ” зростають.

**Елементи, які належать до однієї підгрупи, мають ідентичний характер розміщення електронів на зовнішніх електронних рівнях, а елементи, які належать до різних підгруп однієї і тієї ж групи, - тільки подібний. Цим пояснюються відмінності у властивостях елементів головної і допоміжної підгруп у групах.*

Сучасна модель будови атома

→ У центрі знаходиться позитивно заряджене ядро, діаметр якого дорівнює близько 0,0001 діаметра всього атома. Весь додатний заряд і майже вся маса атома зосереджені в його ядрі (маса електрона рівна 1/1836 маси атома водню).

→ Ядро атома складається з протонів і нейтронів (загальна назва - нуклони). Число протонів у ядрі рівне порядковому номеру елемента. Атомні маси елементів є середнім значенням з масових чисел природних сумішей ізотопів.

→ Навколо ядра по замкнутих орбітах обертаються електрони, які можна уявити як у вигляді хмаринки, так і окремих частинок. Число електронів рівне позитивному заряду ядра.

Маси і заряди фундаментальних частин наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Маси і заряди фундаментальних частинок

Частинка	Заряд, Кл	Відносний заряд	Маса, кг	Маса, $\wedge_{\text{ат. од.}}$
Протон	$+1,6022 \cdot 10^{-19}$	+1	$1,6726 \cdot 10^{-27}$	1,0073
Нейтрон	0	0	$1,6750 \cdot 10^{-27}$	1,0087
Електрон	$-1,6022 \cdot 10^{-19}$	-1	$9,1095 \cdot 10^{-31}$	$5,4858 \cdot 10^{-4}$

1.3. Міжатомні та міжмолекулярні зв'язки

Іонні зв'язки. При з'єднанні у молекули валентні електрони атомів намагаються утворити пари або октети, тобто найбільш стійкі електронні структури типу конфігурації електронів в інертних газах. Такі конфігурації зумовлюють значну інертність цих газів і низьку їх здатність з'єднуватись з іншими елементами.

Атоми всіх елементів основної підгрупи першої і другої груп періодичної системи, що мають на зовнішній оболонці відповідно один і два електрони, при утворенні хімічних сполук легко віддають ці електрони, перетворюючись відповідно в одно- і двозаряд-

ні іони. Атомам елементів основних підгруп сьомої і шостої груп, навпаки, не вистачає відповідно одного і двох електронів для утворення октетів. Вказані атоми добудовують зовнішні оболонки до октетів, приєднуючи вивільнені електрони елементів основної підгрупи перших двох груп, і стають негативно зарядженими іонами. Такий перерозподіл електронів між атомами супроводжується вивільненням енергії.

* Електричний заряд іона виражає його валентність. Валентність, що з'являється внаслідок перерозподілу електронів, називається **електровалентністю, або іонною валентністю**. Валентність рівна числу електронів, відданих чи приєднаних атомом при перетворенні його в іон. На рис. 1.8,а наведено схему утворення молекули хлориду натрію, а на рис. 1.8,б сульфід магнію. На зовнішній оболонці атома натрію знаходиться один електрон, слабо зв'язаний з ядром. Втрата такого електрона відбувається за порівняно незначної затрати енергії, а перехід його на зовнішню оболонку атома хлору супроводжується вивільненням енергії. Утворені позитивний іон натрію і негативний іон хлору більш стійкі порівняно з відповідними атомами, тому що на їхніх зовнішніх оболонках розміщено, як і в інертних газах, по вісім електронів.

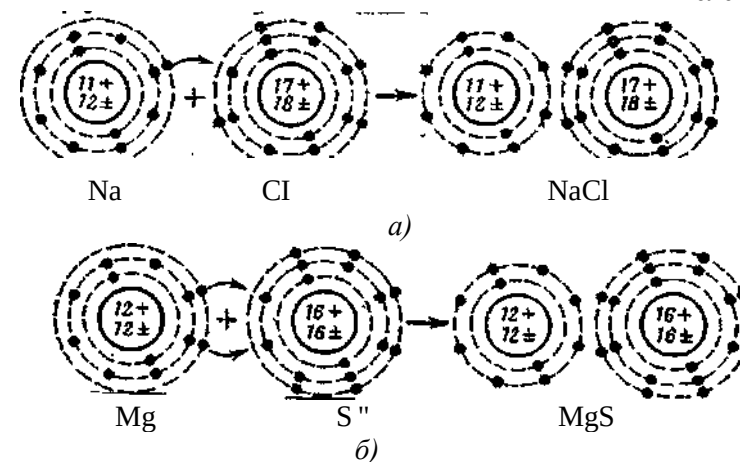
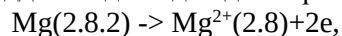


Рис. 1.8. Процес переходу електрона при утворенні неорганічних солей: а) хлористого натрію (NaCl); б) сульфід магнію (MgS)

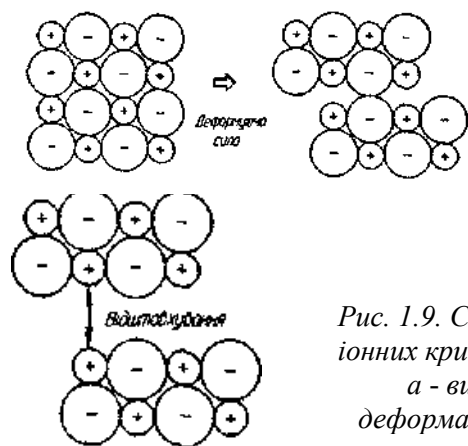
Протилежно заряджені іони натрію і хлору електростатично притягуються й утворюють іонний зв'язок. Рушійною силою процесу є зниження енергетичного рівня утвореного іонного з'єднання: $\text{Na}^+(\text{газ}) + \text{Cl}^-(\text{газ}) \rightarrow \text{NaCl}(\text{ТВ.})$

Ця реакція екзотермічна. Іонні з'єднання не утворюються, якщо їх енергетичний рівень вищий, ніж у вихідних елементів.

Магній і алюміній для набуття електронної конфігурації атома неону повинні віддати відповідно два і три електрони:



Прикладом іонного з'єднання, що виникає внаслідок переходу двох електронів з утворенням в обох іонах зовнішньої оболонки з восьми електронів, може служити сульфід магнію (рис. 1.8, б). Іонний зв'язок між іонами магнію і сірки є результатом електростатичного притягання між іонами Mg^{2+} і S^{2-} .



Іонні кристали крихкі. Невеликі зсуви при деформації кристалічної ґратки взаємно зближують однойменно заряджені іони (рис. 1.9). Відштовхування між ними спричинює виникнення в кристалі тріщин і крихке руйнування.

Кристали (NaCl , KCl та ін.) розчиняються у воді і дисоціюють на іони. Це зумовлено зменшенням сили електростатичного притягання між іонами, яка рівна згідно із законом Кулона

$$F = \frac{e_1 \cdot e_2}{\varepsilon \cdot r^2}$$

де ε - діелектрична стала (для води $\varepsilon = 81$).

Полярні молекули води орієнтуються біля іонів кристала (рис. 1.10) і притягуються цими іонами. У свою чергу молекули води притягують іони кристала до себе, послаблюючи тим самим зв'язок між іонами кристалічної ґратки, і спричинюють їх перехід у розчин.

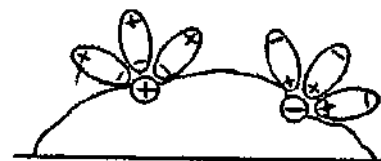


Рис. 1.10. Відрив іонів іонного кристала при його розчиненні

Для розділення іонного з'єднання на окремі іони необхідно затратити значну кількість енергії. Наприклад, для хлористого калію вона становить 163 ккал/моль. Ця затрата енергії компенсується виділенням енергії гідратації іонів при переведенні їх у розчин. Для іонів калію (K^+) вона рівна 80, хлору (Cl^-) 79, а для молекули хлористого калію $80 + 79 = 159$ ккал/моль. Нестача $163 - 159 = 4$ ккал/моль покривається тепловим рухом, тому розчинення супроводжується поглинанням теплоти з довкілля.

**Отже, іонний зв'язок виникає між різнорідними атомами, зумовлюється електростатичною взаємодією протилежно заряджених іонів, типовий для неорганічних молекул.*

Ковалентні зв'язки. Для утворення ковалентного зв'язку атоми повинні зблизитись настільки, щоб відбулось перекриття їх атомних орбіталей. Спільна пара електронів утворює ковалентний зв'язок. Електрони займають одну і ту ж орбіталь, а їх спіни направлені в протилежні сторони. У результаті появи спільної пари електронів кожний атом має на зовнішній оболонці по вісім електронів (октет). Спільні електрони утворюються тоді, коли взаємно перекриваються напівзаповнені атомні орбіталі сусідніх атомів.

При виникненні ковалентного зв'язку кожний з електронів, що створює цей зв'язок, перебуває в певні періоди часу в просторі

між ядрами атомів, притягується обома ядрами й одночасно притягує обидва ядра до себе і зв'язує їх в одну систему.

У методі молекулярних орбіталей при розгляді ковалентних зв'язків використовують закони квантової механіки і розраховують розподіл електронної густини для усієї молекули. У просторі між ядрами густина електронів зростає. Це згущення електронів екранує ядра одне від одного. І хоча відштовхування між позитивно зарядженими ядрами існує, переважає сила притягання між кожним із ядер і "згустком" електронів між ними. Саме ця сила притягання ядер до "згустка" електронів між ними утримує атоми в молекулі.

Ковалентні зв'язки утворюють молекули водню, води, кисню, хлору та багатьох інших газів. Газоподібний водень складається з молекул, що вміщують по два атоми водню, зв'язок між якими здійснюється в результаті утворення спільної електронної пари (рис. 1.11).

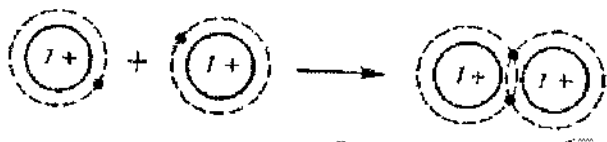


Рис. 1.11. Утворення електронних пар (ковалентного зв'язку) в молекулі водню

У молекулі води (рис. 1.12) атом кисню має на зовнішній оболонці вісім електронів, за рахунок утворення двох спільних електронних пар з двома атомами водню. Зовнішня оболонка атома кисню вміщує 8 електронів (октет), як у інертного газу неону, а оболонка атома водню - 2 електрони, як і в інертного гелію

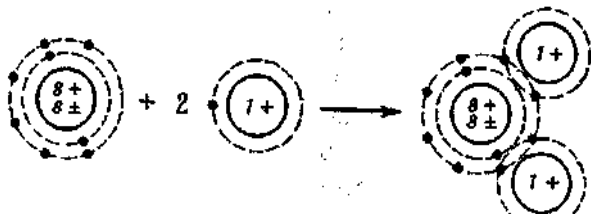


Рис. 1.12. Атоми в молекулі води, з'єднані ковалентними зв'язками

Дуже поширений ковалентний зв'язок в органічних сполуках. Існує багато тисяч сполук вуглецю. Атом вуглецю, що має чотири валентних електрони, може набути повний октет за виникнення спільних чотирьох електронних пар з чотирма атомами водню (рис. 1.13). Для полегшення розрізнення електрони одних атомів позначені кружечками, інших хрестиками.

У молекулі діоксиду вуглецю CO_2 , атом вуглецю розділяє по два електрони з кожним із двох атомів кисню і кожний з трьох атомів отримує повний октет валентних електронів.

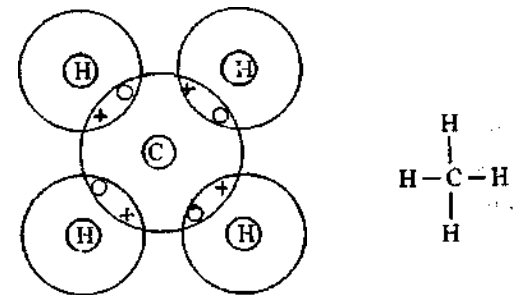


Рис. 1.13. Спосіб зображення хімічних зв'язків у молекулі метану

Кожна спільна пара електронів відповідає одному ковалентному зв'язку і позначається однією рисою. У молекулі метану, що складається з одного атома вуглецю і чотирьох атомів водню, ковалентні зв'язки схематично показані на рис. 1.13, справа. Дві спільні електронні пари, наприклад між вуглецем і киснем у молекулі CO_2 , утворюють подвійні зв'язки, які зображаються двома рисками, три спільні пари - трьома.

Розглянуті речовини з ковалентними зв'язками склалися з окремих молекул. Крім того, існує низка таких речовин, що мають макромолекулярні структури. До останніх належать алмаз, нітрид бору $(\text{BN})_n$, оксид кремнію $(\text{SiO})_n$, карбід кремнію $(\text{SiN})_n$ та ін. Сильні ковалентні зв'язки в цих макромолекулах зумовлюють високі температури плавлення і твердість вказаних матеріалів.

Більшість хімічних сполук з ковалентними зв'язками нерозчинні у воді, але добре розчиняються в таких органічних розчинниках, як пропанон і тетрахлорметан, які також є речовинами з ко-

валентними зв'язками. Внутрішньомолекулярні зв'язки, тобто зв'язки між атомами в молекулі, міцні. Міжмолекулярні сили (сили притягання між молекулами) набагато слабші, і молекули мають можливість рухатись незалежно одна від одної. Такі сполуки мають низьку температуру плавлення і багато з них при кімнатній температурі є рідинами. Оскільки сили притягання між молекулами малі, температура їх кипіння низька.

Металічний зв'язок з'являється при взаємодії атомів елементів, які мають надлишок вільних валентних орбіталей відносно числа вільних валентних електронів. При достатньому зближенні двох атомів, наприклад, у результаті конденсації парів, орбіталі зовнішніх оболонок перекриваються, утворюючи молекулярні орбіталі.

**Внаслідок багаторазового перекриття орбіталей зовнішні електрони кожного окремого атома піддаються впливу великої кількості інших атомів, делокалізуються і можуть вільно рухатись по всій ґратці свого тіла. їх називають електронами провідності, або колективізованими електронами (електронним газом).*

Ці електрони хаотично рухаються між позитивними іонами, електростатично їх притягують і забезпечують стабільність ґратки. Теорія металічного зв'язку дозволяє пояснити низку фізичних та механічних властивостей металів. Під дією прикладених навантажень ґратка металу може змінювати свою форму (рис. 1.14) без утворення тріщин, тому що в процесі зміщення однієї частини кристала відносно іншої позитивної іони ґратки постійно притягуються колективізованими електронами, тоді як при подібному зміщенні в іонних кристалах спостерігається відштовхування між одноіменно зарядженими іонами (див. рис. 1.9).

Металічний зв'язок також зумовлює високі тепло- та електропровідність металів. Якщо кінець прутка металу нагріти, то кінетична енергія електронів у цьому місці зростає і поширюється через систему делокалізованих електронів по всьому об'єму. При прикладанні до кінців металічного зразка різниці потенціалів делокалізовані електрони зміщуватимуться в напрямі додатного потенціалу.

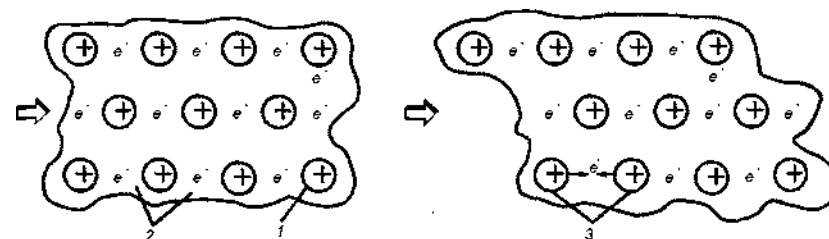


Рис. 1.14. Деформація кристалічної ґратки металу:

1 - катіон металу; 2 - делокалізовані валентні електрони;
3 - притягання між: катіонами і делокалізованими електронами

Для металів характерна велика кількість молекулярних орбіталей з різною енергією. Тому при освітленні метал поглинає світлові хвилі практично будь-якої довжини. Освітлення металу збуджує електрони, а їх перехід на більш низькі рівні супроводжується випроміненням світла і металічним блиском.

Міжмолекулярні зв'язки. Утворення розглянутих вище типів хімічного зв'язку (іонного, ковалентного і металічного) супроводжується перебудовою електронних оболонок взаємодіючих атомів. Існують також молекулярний і водневий зв'язки, виникнення яких зумовлюється не перебудовою електронних оболонок, а їх деформацією.

Міжмолекулярний зв'язок має місце між молекулами газоподібних і рідких матеріалів. Він у більшості випадків слабший, ніж звичайний хімічний зв'язок, тому молекулярні кристали плавляться при невисоких температурах і мають високу леткість.

Диполь-дипольні зв'язки. У твердих тілах молекули утворюють впорядковані структури. Молекули розміщуються таким способом, що позитивно заряджені частини одних молекул стикаються з негативно зарядженими сусідніх і навпаки.

Полярні кристали добре розчиняються в полярних розчинниках. У процесі розчинення міжмолекулярні зв'язки в кристалах руйнуються, на що затрачається енергія. Вона компенсується енергією, вивільненою за взаємодії полярної молекули розчинника з полярною молекулою кристала. Якщо розчинником є вода, то вивільне-

на енергія названа *енергією гідратації*, якщо інші речовини - *енергією сольватації*.

Сили Ван-дер-Ваальса. Сили притягання існують і між неполярними молекулами. Навіть атоми інертних газів слабо притягаються один до одного та за низьких температур переходять у рідкий стан. Причину виникнення цих сил взаємного притягання атомів чи молекул пояснив фізик-теоретик *Лондон* (1927 р.), який вбачав її у виникненні миттєвих диполів при зближенні частинок між собою. Оскільки молекули неполярні, то розподіл електронної густини в середньому симетричний (рис. 1.15, зверху). Але в певний момент часу в одній із молекул може виникнути несиметричне розміщення електронів і в ній з'являється миттєвий дипольний момент (рис. 1.15, знизу).

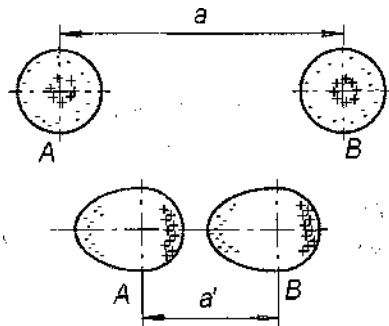


Рис. 1.15. Утворення диполя при зближенні атомів

Цей миттєвий диполь молекули А може притягувати електрони сусідньої молекули В, і обидві молекули отримують дипольні моменти, направлені так, що молекули будуть притягуватися одна до одної. Притягання дуже короткотривале, бо в наступний момент диполь молекули А може бути спрямований в протилежну сторону. Тоді наведений (індукований) дипольний момент у молекулі В буде направлений так, що між молекулами знову виникне притягання.

* Дипольні моменти виникають лише на мить, але сумарний ефект їх взаємодії спричинює виникнення постійно діючих сил притягання. Така взаємодія називається **дисперсійною**, а притягання між неполярними молекулами зумовлене дією сил **Ван-дер-Ваальса** (інакше дисперсійних або лондонівських).

Індукований дипольний момент легше виникає в довгих молекулах, а також при збільшенні молекулярної маси. За великої відстані між молекулами індуковані диполі у них не створюються і взаємне притягання відсутнє. На дуже малих відстанях виникає відштовхування між їх електронними оболонками, яке переважає над індукційним ефектом і молекули взаємно віддаляються.

1.4. Зонна теорія твердого тіла

***Зонна теорія** - теорія валентних електронів, які рухаються в періодичному полі кристалічної ґратки. Результати зонної теорії є основою сучасної фізики металів, напівпровідників і діелектриків.

Енергетичні зони. Якщо в окремому атомі (молекулі) рух електронів локалізований в невеликій області простору порядку 10^{-8} см, то валентні електрони у твердих тілах можуть переміщуватись у всьому макроскопічному об'ємі, переходячи від атома до атома по вузлах кристалічної ґратки. Рух валентних електронів займає проміжне положення між внутрішньоатомним рухом і переміщенням вільних електронів у вакуумі.

Електрон в атомі може мати лише деякі певні дискретні рівні енергії, тоді як вільний електрон може рухатися з будь-якою енергією і його енергетичний спектр утворює безперервну область значень від нуля до безмежності. Можливі значення енергії електрона в кристалі зображені на рис. 1.16. Електрони внутрішніх атомних оболонок міцно зв'язані з ядрами і залишаються локалізованими в окремих атомах. їм відповідають дискретні нижні рівні.

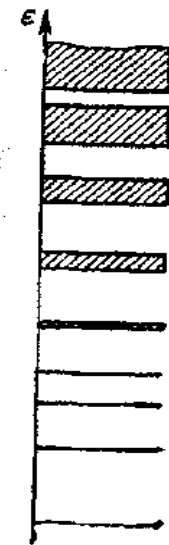


Рис. 1.16. Дискретні рівні внутрішніх електронів і енергетичні зони валентних електронів у кристалах

Зовнішні валентні електрони утримуються в атомах слабше і можуть вільно переходити від атома до атома. Можливі значення енергії цих електронів утворюють окремі квазібезперервні області - енергетичні зони з великою кількістю близько розміщених рівнів. Енергетична область тим ширша, чим слабший зв'язок електрона з ядром.

Якщо розмістити атоми у вигляді кристалічної ґратки, але на відстанях d , значно більших за відстань d_0 реальних кристалах, то енергетичні рівні електронів зображені лініями (рис. 1.17, справа). При зближенні атомів і утворенні кристалічної ґратки відбувається зміщення рівнів валентних електронів, їх розщеплення на близько розташовані підрівні і перехід цих підрівнів у зони (рис. 1.17, зліва).

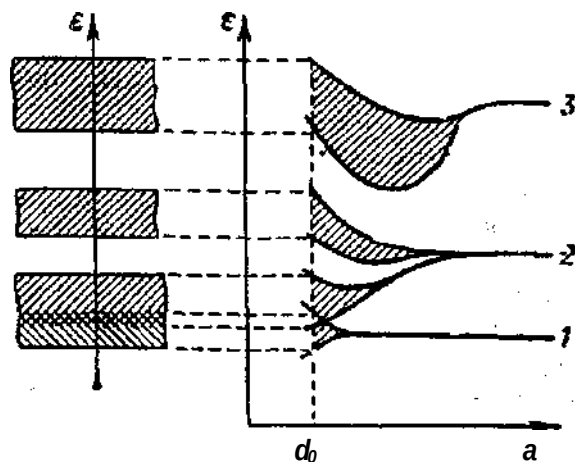


Рис. 1.17. Утворення енергетичних зон у кристалі з атомних електронних рівнів: d_0 - міжатомна відстань у кристалах

Розміри атомних орбіт внутрішніх електронів малі порівняно з міжатомними відстанями в кристалах, і стан руху цих електронів практично не змінюється, рівні їх не зміщуються і не перетворюються в зони. Тому ядро разом із усіма внутрішніми електронами поводить себе у твердому тілі як єдине ціле - іон (атомний залишок).

Зонна теорія розглядає рух валентних електронів у полі цих атомних залишків. Вона пояснює низку фундаментальних і властивостей твердих тіл, тобто існування їх у вигляді металів, напівпровідників і діелектриків. В усіх цих матеріалах однакові за порядком міжатомні відстані і енергія взаємодії, а питомий електроопір відрізняється на 26 порядків (від 10^8 Ом·м для металів до 10^{18} Ом·м для діелектриків).

У твердих тілах можуть існувати повністю заповнені електронами зони. Їх названо **валентними зонами**. Електрони в цих зонах не беруть участі в електропровідності, оскільки відсутні вакантні енергетичні рівні, на які могли б переходити електрони під дією зовнішнього електричного поля і створювати струм. Якщо в матеріалах наявні і вільні, не заповнені електронами зони, то такі матеріали також не проводять струм, аж поки в ці зони не перескочать внаслідок інтенсивного теплового руху чи інших чинників електрони із заповненої валентної зони. Тоді ці, раніше вільні зони стають зонами провідності.

Зони провідності і валентні зони розмежовані між собою **забороненими зонами**. Чим ширша заборонена зона, тим більшу енергію потрібно затратити для "перекидання" електронів з валентної зони в зону провідності. Схематично вказані зони зображені на рис. 1.18, 1.19. Для діелектриків ширина забороненої зони перевищує 3 еВ і за звичайних температур теплового руху недостатньо для такого перекидання.

У напівпровідниках заборонена зона значно вужча (до 3 еВ) і вже за кімнатних температур енергії теплового руху достатньо для подолання частиною електронів забороненої зони і напівпровідники проявляють деяку електропровідність, яка різко зростає з підвищенням температури. Тільки за мінусових температур, близьких до абсолютної, перехід електронів з валентної зони в зону провідності не відбувається і напівпровідники ведуть себе як діелектрики. Між: напівпровідниками і діелектриками не має принципової різниці, а лише кількісна відмінність у ширині забороненої зони.

У металах (рис. 1.19, в) над заповненою валентною зоною розміщена частково заповнена зона - зона провідності, а заборонена зона відсутня. Навіть під дією слабого електричного поля енергія

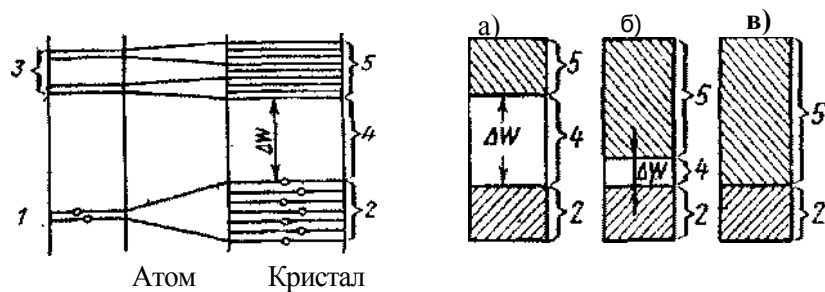


Рис. 1.18. Енергетичні діаграми ізолюваного атома (зліва) і твердого кристалічного діелектрика (справа): 1 - нормальні енергетичні рівні атома; 2 - заповнена електронами зона; 3 - рівні збудженого атома; 4 - заборонена зона; 5 - вільна зона

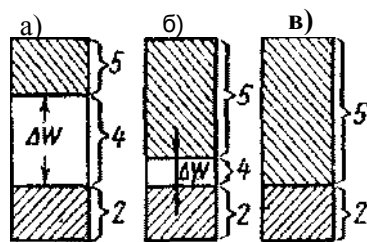


Рис. 1.19. Енергетичні діаграми твердих діелектриків (а), напівпровідників (б) і провідників (в). Позначення 2, 4, 5 - ті ж, що й на рис. 1.18

електронів у зоні провідності зростає і електрони переходять на більш високі незайняті енергетичні рівні, створюючи в металі струм. Тому тіла з частково заповненою вільною зоною є **металами**, а тіла, в яких енергетичний спектр електронних станів складається лише з заповнених, пустих та вільних зон - **напівпровідниками і діелектриками**.

ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОТРОЛЮ

1. Охарактеризуйте фундаментальні частини атома?
2. Опишіть будову атома згідно з моделлю Резерфорда. Які недоліки цієї моделі?
3. На якому принципі ґрунтується модель атома Бора? Що являє собою фотон?
4. Поясніть спектри поглинання та випромінювання атомів.
5. Поясніть суть хвильової теорії атома.
6. Чим визначаються стан електрона в сучасній моделі атома?

7. Охарактеризуйте принципи побудови періодичної системи.
8. Що характеризує порядковий номер елемента в періодичній системі?
9. Чим зумовлені основні електричні та хімічні властивості атомів?
10. Охарактеризуйте іонний, металічний та ковалентний зв'язки.
11. Поясніть механізм виникнення сил Ван-дер-Ваальса.
12. Поясніть суть зонної теорії твердого тіла.



2.1. Загальні відомості

Матеріали, які використовуються в енергетичному обладнанні, електротехніці та електроніці, умовно поділяють на ► *конструкційні*, ► *електротехнічні* та ► *спеціального призначення*. До *конструкційних* належать у першу чергу залізобетонні сплави-сталі, чавуни й деякі сплави на основі міді (латуні, бронзи) та алюмінію (дюралі і силуміни). Вони використовуються для виготовлення деталей машин, апаратів, механізмів, будівельних конструкцій тощо. Деякі конструкційні матеріали (латуні, бронзи та ін.) можуть застосовуватися як суто електротехнічні (провідникові) матеріали, а типові діелектрики (пластмаси, полімери) - для виготовлення конструкційних деталей (каркаси, котушки тощо).

* *Електротехнічними* називають матеріали, які проявляють специфічні властивості при дії електричного або магнітного полів чи їх сукупності.

За властивостями, які проявляються в електричному полі, матеріали поділяють на ► *провідникові*, ► *напівпровідникові* та ► *діелектричні*, а за відношенням до магнітного поля - на ► *сильномагнітні* і ► *слабوماгнітні*.

Провідниковими є матеріали з сильно вираженою електропровідністю. Умовно до провідникових зараховують матеріали з питомим електроопором ρ в межах від 10^{-8} до 10^{-4} Ом·м (рис. 2.1).

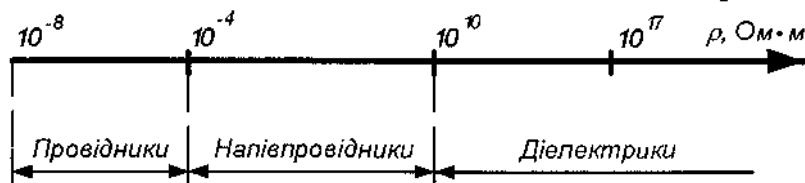


Рис. 2.1. Наближені діапазони питомих опорів провідників, напівпровідників та діелектриків

Напівпровідниковими називають матеріали з питомою провідністю 10^{-4} до 10^{+10} Ом·м. Вона сильно залежить від концентрації і виду домішок та зовнішніх енергетичних факторів (температури, освітленості та ін.)

Діелектриками називають матеріали, здатні до поляризації і в яких може існувати електростатичне поле. Питомий опір діелектриків 10^{10} - 10^{18} Ом·м.

2.2. Особливості будови твердих тіл.

Будь-яка речовина може перебувати в одному з трьох агрегатних станів: ► *твердому*, ► *рідкому* ► *газоподібному*. Четвертим станом є ► *плазма* - сильно іонізований газ. *Агрегатний стан* характеризується відношенням середньої потенціальної енергії атомів E_n до середньої їх кінетичної енергії E_k :

> $E_n/E_k > 1$ - для *твердих тіл*;

> $E_n/E_k \approx 1$ - для *рідин*;

> $E_n/E_k < 1$ - для *газів*.

У газоподібному стані відстані між окремими молекулами речовини настільки великі, що молекули практично не притягуються одна до одної, рухаючись хаотично, заповнюють весь можливий об'єм.

У твердих тілах і рідинах молекули розташовані компактно на міжмолекулярних відстанях і їх взаємне притягання набагато більше, ніж у газах, внаслідок чого тверді тіла і рідини мають сталий власний об'єм.

Кристали. У твердих тілах атоми здійснюють тільки невеликі теплові коливання біля своїх рівноважних положень і можуть створювати впорядковану періодичну просторову структуру. Таке регулярне розміщення атомів твердого тіла утворює *кристалічну ґратку*.

* Тіла, які мають кристалічну ґратку, називаються **твердими тілами**.

Більшість природних і технічних твердих матеріалів є *полікристалами*, а окремі кристали названо *монокристалами*. Кристалічні тверді тіла плавляться за постійної температури. Кристалічну

гратку можна побудувати, вибравши для цього певний "будівельний" блок (цеглинку) - елементарну комірку (рис. 2.2), якщо її багаторазово зміщувати (транслявати) по трьох напрямках, подібно до побудови стіни з цеглинок.

* **Елементарна комірка** - найменша частинка кристала, яка дає уявлення про характеристики його структури (будови).

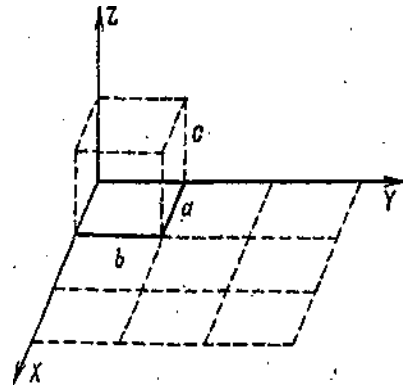


Рис. 2.2. Побудова просторової всі гратки кристала шляхом трансляції

Алотропічні перетворення. Найбільш поширеними серед конструкційних і електротехнічних матеріалів є > об'ємноцентрована, > гранецентрована кубічна Гратки і > гексагональна Гратка (рис. 2.3). Низка матеріалів може існувати в станах з різними кристалічними гратками.

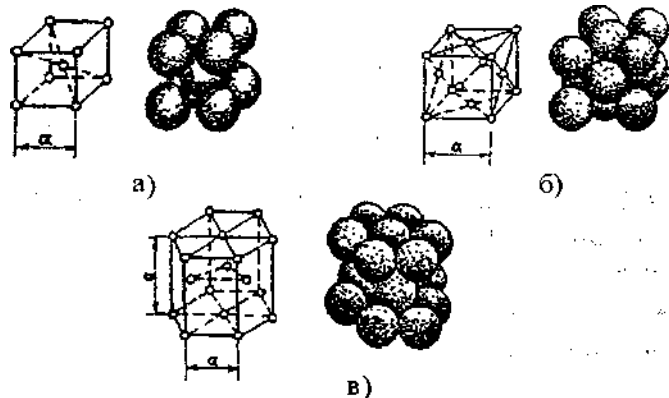


Рис. 2.3. Елементарні кристалічні гратки: об'ємноцентрована кубічна (а); гранецентрована кубічна (б); гексагональна щільноукладена (в)

*Існування матеріалу в декількох кристалічних формах називається **алотропією**, або **поліморфізмом**.

Алотропічна форма, яка існує при найбільш низькій температурі, позначається через *a*, наступна - через *S* і т. д.

* Температура переходу з однієї модифікації в іншу називається **температурою поліморфного (алотропічного) перетворення**.

Так, залізо має дві температури поліморфного перетворення: 911 і 1392 °С. За температур нижче 911 °С залізо має об'ємноцентровану кубічну гратку, а в діапазоні температур 911 - 1392 °С гранецентровану кубічну гратку.

Алотропічні перетворення можуть кардинально змінити властивості матеріалу. Вуглець, наприклад, може існувати у вигляді алмазу (найтвердішого у природі матеріалу) і дуже м'якого графіту. Алмаз має тривимірну кристалічну структуру, яка характеризується тетраедричним розташуванням атомів вуглецю в гратці (рис. 2.4, а). Кожний атом вуглецю зв'язаний з чотирма сусідніми атомами ковалентними зв'язками й утворює кристалічну структуру кубічного типу. Чистий алмаз є діелектриком. Графіт - типовий шаруватий кристал. У почергових плоских шарах атоми вуглецю зв'язані ковалентними силами і розташовані у вершинах шестикутників. Поміж шарами (рис. 2.4, б) діють сили Ван-дер-Ваальса, які значно слабші порівняно з ковалентними. Цим зумовлена анізотропія графіту, коли в площинах шарів та в

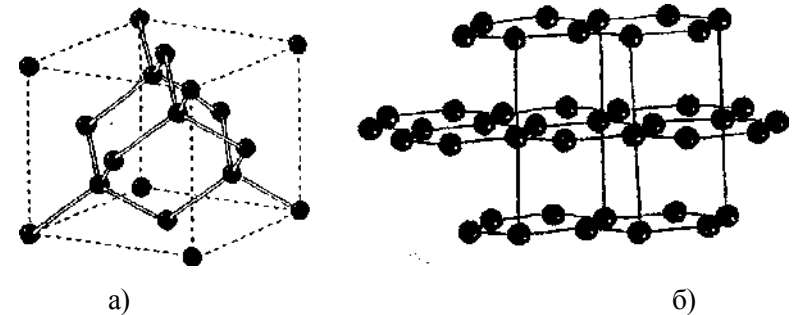


Рис. 2.4. Кристалічна структура алмазу (а) і графіту (б)

перпендикулярному напрямі фізичні та механічні властивості графіту суттєво відрізняються. Внаслідок слабкої міжшарової взаємодії шари графіту легко зміщуються та від'єднуються. Графіт має високу температуру плавлення ($3850\text{ }^{\circ}\text{C}$) і є добрим провідником електричного струму.

Анізотропія. Кристалічна ґратка складається з низки паралельних кристалографічних площин, розміщених одна від одної на певних відстанях. В окремих атомних площинах може бути розміщена різна кількість атомів (рис. 2.5), внаслідок чого властивості кристала в різних напрямках неоднакові.

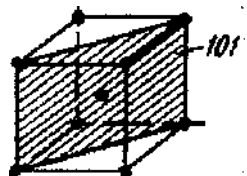


Рисунок 2.5 Площини в ґратці об'ємноцентрованого куба

** Різниця властивостей кристала в різних напрямках називається **анізотропією**.*

Анізотропія може виникати і в полікристалічних тілах у процесі виготовлення деталей із застосуванням пластичної деформації. Наприклад, у процесі волочіння або прокатування кристали видовжуються і орієнтуються переважно в напрямку найбільшої пластичної деформації.

Дефекти будови кристалічних тіл.

** У звичайних умовах кристалічні тіла складаються з великої кількості кристалів, які називаються **зернами**.*

Ці зерна по-різному орієнтовані в просторі і утворюють полікристал. Поверхні розділу зерен називаються **границями зерен**. Зерна в полікристалах не є "ідеальними" кристалами. Реальні кристали мають різні види дефектів.

Існують **точкові**, **лінійні** і **поверхневі** структурні недосконалості кристалічної ґратки.

** **Точковими дефектами** називаються такі недосконалості кристалічної ґратки, розміри яких близькі до розмірів атома. До точкових дефектів відносять вакансії (рис. 2.6, а), міжвузлові і домішкові атоми (рис. 2.6, б),*

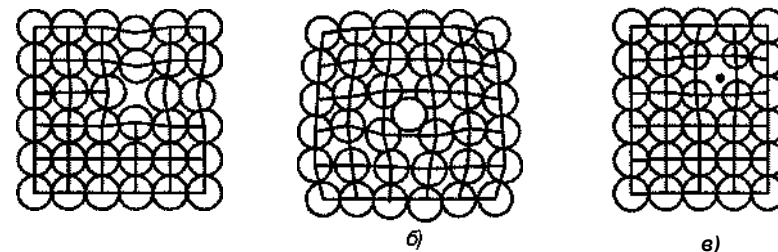


Рис. 2.6 Точкові дефекти в кристалічній ґратці: а) вакансія; б) міжвузловий атом; в) домішковий атом втілення

****Вакансії** - це незайняті атомами вузли кристалічної ґратки, а міжвузлові атоми - це атоми, які вишили з вузлів ґратки і розмістились між ними.*

Домішкові атоми можуть або заміщувати атоми основного металу (домішки заміщення, рис. 2.7, а), або втілюватися у вільні місця ґратки (домішки втілення, рис. 2.7, б).

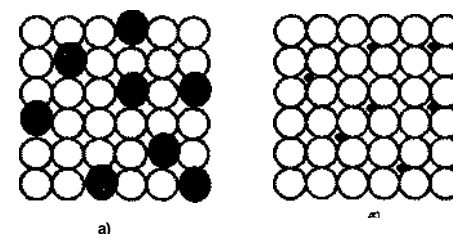


Рис. 2.7. Схема атомно-кристалічної структури твердого розчину: а - заміщення; б - втілення

Точкові дефекти навіть за незначної концентрації суттєво впливають на фізичні властивості кристалів. Наприклад, тисячні частки атомного відсотка деяких домішок можуть у 10^5 - 10^6 разів змінити питомий електроопір чистих напівпровідникових кристалів, хоча зміна їх механічних властивостей буде незначною.

Лінійні дефекти мають малі розміри у двох вимірах (їх поперечні розміри не перевищують декількох міжатомних відстаней), а їх довжина може досягати розмірів кристала. Ці недосконалості називаються **дислокаціями**. Розрізняють **крайову** (лінійну) і **гвинтову** дислокації. Крайову дислокацію можна уявити (рис. 2.8), як край 3 півплощини (екстраплощини). Цей край (ядро дислокації) складається з ланцюжка атомів, розміщених перпендикулярно до поверхні рисунка, легко зміщується під дією незначних напружень,

прикладених перпендикулярно до ядра дислокації, вправо (вліво), і може утворювати зв'язки з ланцюжком атомів 1.

При цьому сусідня атомна площина стає напівплощиною й утворює дислокацію вздовж ланцюжка атомів 2, а екстраплощина 3 стає площиною (дислокація перемістилась на одну міжатомну відстань). Необхідно пам'ятати, що сама екстраплощина не переміщується.

**Лінійні дефекти дуже суттєво впливають як на механічні, так і фізичні властивості матеріалів*

Залежність міцності кристалів від густини дислокацій виражена кривою АБВ на рис. 2.8. Найвища міцність у бездефектного кристала (точка А, рис. 2.8), а найнижча за густини дислокацій $10^5 - 10^8$ (точка Б, рис. 2.8). В останньому випадку вони під дією незначних напружень легко переміщуються в кристалі (міцність кристала мінімальна). Зростання густини дислокацій викликає їх взаємне гальмування, і міцність матеріалу зростає (точка В, рис. 2.8).

Аморфні тіла. Енергія кристала за впорядкованого розміщення атомів менша, ніж за нерегулярного, тому кристалічний стан більшості твердих тіл - явище природне. Однак у процесі затвердіння матеріалу атоми не завжди мають можливість розміститись регулярно.

Тверді тіла, які характеризуються хаотичним розміщенням атомів (молекул), названі **аморфними.*

В аморфних тілах атоми коливаються навколо хаотично розміщених положень рівноваги і тому не утворюють кристалічну ґратку.

**Аморфні тіла - некристалічні і характеризуються ізотропністю властивостей за всіма напрямками.*

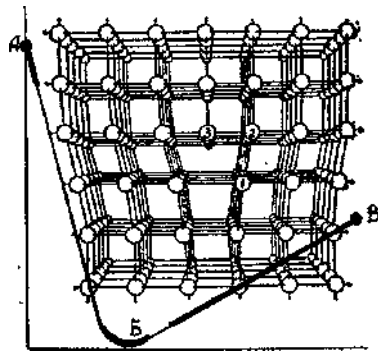


Рис. 2.8. Перспективне зображення розміщення атомів біля крайової дислокації. Крива АБВ відображає залежність міцності від кількості дислокацій

До аморфних тіл належать: *>природні* (смола, бітум, опал, янтар та ін.) і *>штучні* (пластмаси, скло, желатина, плавлений кварц, бакеліт та ін.). Ізотропність аморфних тіл зумовлена хаотичним, не орієнтованим розміщенням у них атомів і молекул. Відмінність властивостей аморфних речовин від кристалів проявляється в плавному переході їх при нагріванні з твердого стану в рідкий, тобто при нагріванні аморфні тіла розм'якшуються поступово.

Аморфні тіла можна розглядати як переохолоджені рідини. Один і той же матеріал, наприклад кварц, може існувати в кристалічному або аморфному стані (рис. 2.9).

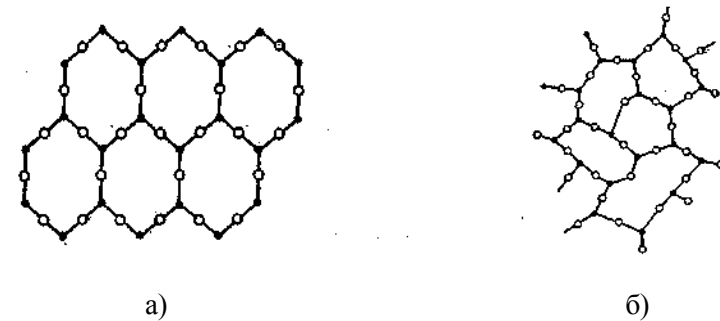


Рис. 2.9. Структури кристалічного кварцу (а) і аморфного кварцового скла (б)

2.3. Механічні властивості

Металічні матеріали. Для металів характерний металічний зв'язок і здатність до пластичної деформації. Неметали з іонним і ковалентними зв'язками руйнуються крихко (без деформації).

За навантаження матеріалу його деформація може бути пружною, коли під дією зовнішньої сили змінюється відстань між окремими атомами, а при знятті навантаження атоми повертаються на попередні місця і деформація зникає. Пластична деформація залишається після зняття навантаження. Переміщена частина кристала не повертається на старе місце. Пружній деформації відпопадає пряма лінія ОА (рис 2.10, а), а пластичній відрізок АВ. На ділянці ОА спостерігається пропорційність між видовженням і напруженням.

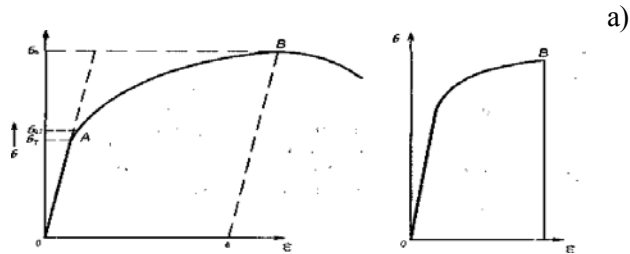


Рис. 2.10. Зміна деформації залежно від напруження: а — пластичного матеріалу; б- крихкого матеріалу

* **Мінімальне напруження, за якого починається плинність, тобто пластична деформація називається границею текучості σ_T .** Мінімальне напруження, при якому пластична деформація досягає 0,2 %, називається умовною границею текучості $\sigma_{0.2}$.

Вище точки А напруження спричинює пружну і залишкову пластичну деформації. За максимального значення навантаження в точці В матеріал починає руйнуватися. Ця точка на кривій а-б називається границею міцності і позначається через σ_B . Деформація зосереджується у середині робочої частини зразка, у матеріалі зароджуються тріщини. Зразок видовжується, одночасно площа поперечного перерізу зменшується, навантаження падає і зразок руйнується.

Крихкі матеріали руйнуються без видимої пластичної деформації (точка В, рис. 2.10, б), а пластичні матеріали в процесі деформації зміцнюються.

***Пластичність** (здатність матеріалу отримувати перед руйнуванням залишкову деформацію) характеризується відносним видовженням S і відносним звуженням y зразка при розриві:

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\%; \quad \psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$$

де l_0 - початкова довжина робочої частини зразка, м; l_k - кінцева довжина зразка після розриву, м; F_0 - початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка, м²; F_k - найменша кінцева площа поперечного перерізу зразка після розриву.

* **Твердість** - опір поверхневого шару матеріалу деформації за контактної взаємодії з індентором.

* **Ударна в'язкість** - здатність матеріалу поглинати роботу пластичної деформації.

Як правило, індентор виготовляють з алмазу або із загартованої інструментальної сталі. У більшості випадків твердість (рис. 2.11) визначається твердомірами >ТШ - вдавлюванням у поверхню сталевий загартованої кульки (прес Брінелля), > ТК - алмазного

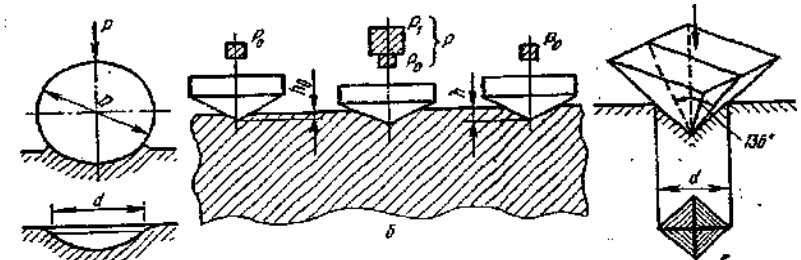


Рис. 2.11. Схеми випробування на твердість: а - за Брінеллем; б - за Роквеллом; в - за Віккерсом

конуса, або загартованої сталевий кульки (прилад Рок-велла) і > алмазної піраміди (прилад Віккерса).

Її визначають за ударних випробувань зразків з надрізом на маятниковому копрі (рис. 2.12).

Ударну в'язкість α_n , Дж/м² визначають за формулою $\alpha_n = A/F_0$, де A - робота, затрачена на руйнування зразка, F_0 - площа перерізу зразка в місці надрізу, м².

***Стійкість до зношування** - опір матеріалу зношуванню (зменшенню розмірів) при терті.

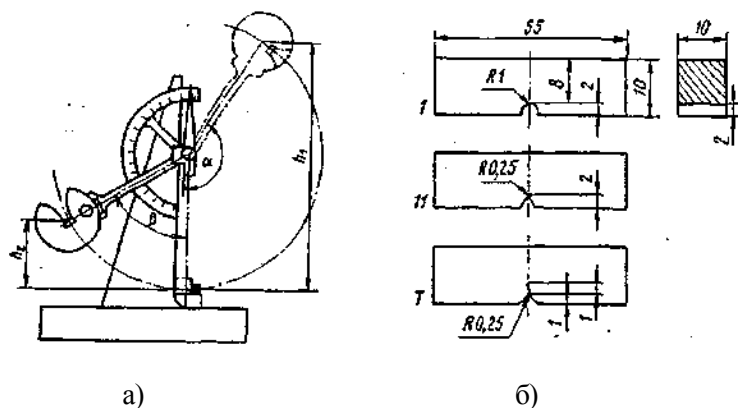


Рис. 2.12. Схема копра для дослідження на удар (а) і зразки (б)

* **Витривалість** - здатність матеріалу витримувати до руйнування повторнозмінні навантаження.

Найбільше напруження, за якого метал витримує задану кількість циклів навантаження (для сталей 10^7 , для кольорових металів 10^8) не руйнується, називається **границею витривалості** (рис. 2.13).

Високотемпературна міцність. За підвищених температур міцність металу залежить від двох факторів - температури і часу (рис. 2.14). За низьких температур г міцність металів практично не залежить від тривалості дії навантаження і при

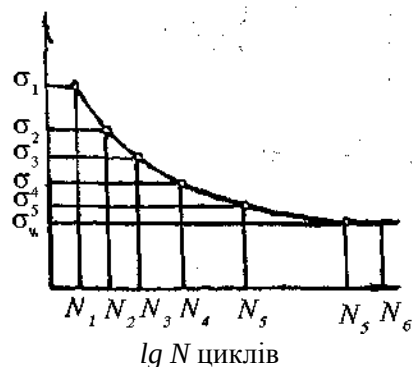


Рис. 2.13. Крива втоми в координатах σ -lg N: σ - максимальне напруження циклу; N - число циклів напружень; $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_5$ - максимальні напруження; $N_1, N_2, \dots, N_5$ - відповідні їм числа циклів, при яких були зруйновані зразки; σ_w - границя витривалості; N_6 - базове число

напруженнях нижче σ_w руйнування не відбувається. З підвищенням температури із збільшенням тривалості випробувань міцність зменшується і тим більше, чим вища температура. Так, за t_4 напруження σ_3 спричинює руйнування за 10^6 с, а при напруженні σ_1 - уже за 10^2 с, тобто в 10 000 разів швидше. За високих температур міцність матеріалів характеризується довготривалою міцністю, тобто границею міцності для даної температури за певний час дії напруження, яке зумовлює руйнування матеріалу. Довготривала міцність позначається а з індексом, який показує тривалість дії навантаження в годинах. Наприклад σ_{100} - напруження, за якого метал руйнується протягом 100 год.

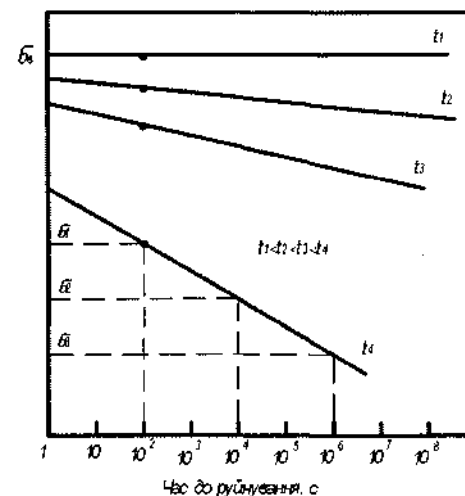


Рис. 2.14. Залежність міцності від температури і часу випробування

* **Границя повзучості $\sigma_{пз}$** - напруження, яке викликає задану швидкість деформації за даної температури.

Вуглецеві сталі - залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю до 2,14 %. Їх поділяють на:

► **сталі звичайної якості**, в яких вміст сірки та фосфору не перевищує 0,04 % кожного. Їх маркують Ст0, Ст1, ..., Ст6;

► **якісні сталі** з вмістом сірки та фосфору не більше 0,03 % кожного. Маркуються числами, які вказують вміст вуглецю в сотих частках відсотка. Наприклад, марка сталі 20 означає, що сталь якісна і містить 0,20 % вуглецю

► **високоякісні сталі** з вмістом сірки і фосфору не більше 0,020 % кожного. Після числа, що вказує вміст вуглецю, ставиться літера А. Наприклад, 20 А означає, що сталь містить 0,20 % вуглецю і є високоякісна. В енергетиці застосовуються якісні і високоякісні маловуглецеві та легovanі сталі.

Леговані сталі. Для покращання механічних, фізичних, хімічних і технологічних властивостей сталей в їх склад вводять легуючі елементи: нікель, хром, молібден, вольфрам та ін. Такі сталі називаються *легованими*. Леговані сталі маркуються числами і літерами, які вказують приблизний хімічний склад сталі. Легуючі елементи позначаються початковою літерою назви елемента: >Н -нікель, >Х - хром, >М - молібден і т. д. Дев'ять наступних елементів позначається літерами: >Г - марганець, >С - кремній, >Д - мідь, >Р - бор, >Б - ніобій, >П - фосфор, >Ф - ванадій, >Ю -алюміній, >Ч - рідкоземельні елементи. Перше число в марці вказує вміст вуглецю в сотих частках відсотка за масою (у високо-вуглецевих сталях - у десятих частках). Цифри після літер означають приблизний вміст даного легуючого елемента у відсотках. При вмісті елемента менше 1 % цифра після літери не ставиться. *Наприклад, сталь марки 08Х18Н12Т містить 0,08 % вуглецю, 18 % хрому, 12 % нікелю і до 0,1 % Ti.*

Чавуни - залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю 3-4,5 %. Залежно від того, в якому стані в чавуні перебуває вуглець, чавуни поділяються на *білі* (весь вуглець міститься у вигляді цементиту) і *сірі* (весь або частина вуглецю знаходиться у вигляді графіту). У свою чергу, *сірі чавуни (СЧ)* залежно від форми графітових виділень, поділяють на >високоміцні (ВЧ) і >ковкі (КЧ). У сірих чавунах графітові виділення мають форму пластинок, а у високоміцних та ковких чавунах - форму, близьку до кульки.

2.4. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання*

Для виготовлення енергетичного обладнання широко використовують переважно маловуглецеві леговані сталі, зокрема жароміцні і жаротривкі.

**Жаротривкими (окалиностійкими) називаються сталі і сплави, стійкі проти хімічного руйнування поверхні в газових середовищах при температурах вище 550 °С, які експлуатуються в ненавантаженому або слабонавантаженому стані.*

* Таблиці 2.1 - 2.9 параграфів 2.5 - 2.8 взяті з монографії [10]

Жаротривкість досягається легуванням сталей хромом, алюмінієм та кремнієм. У процесі окиснення на поверхні утворюються щільні оксиди Cr_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 > які гальмують подальше окиснення.

** Жароміцними називають сталі і сплави з підвищеними механічними характеристиками за високих температур.*

Для підвищення жароміцності сталі легують хромом, молібденом, ванадієм, вольфрамом тощо.

2.5. Матеріали ядерної енергетики

Основою ядерної енергетики є атомні електростанції (АЕС). Найбільша кількість атомних електростанцій експлуатується в США, Японії, Франції, Росії, Швеції і Швейцарії. Якщо в 1975 р. потужність світової ядерної енергетики становила 50 ГВт, то у 2000 р. вже 2500 ГВт, тобто зросла в 50 разів.

Вимоги до безпеки енергетичних атомних установок надзвичайно високі, тому особливой ваги набувають якість конструкційних матеріалів і технологій виготовлення обладнання, контролю ступеню їх деградації в процесі багаторічної експлуатації та точність визначення залишкового ресурсу матеріалу найбільш відповідальних деталей і вузлів з метою їх вчасної заміни чи ремонту.

Матеріали для реакторів. Основним елементом кожної ядерної енергетичної установки є *реактор* з активною зоною, в якій відбуваються реакції розпаду ядерного палива та виділення теплової енергії.

Найбільш відповідальним і складним з усього комплексу енергообладнання АЕС є корпус реактора, який виготовляють з високоміцних пластичних хромомолібденованадієвих сталей марок 15Х2МФА, 15Х2НФМА, 25Х2НМФ та деяких ін.

У корпусі реактора вмонтовано систему з ядерним паливом у твелах, зібраних у паливних касетах. Оболонка твелів з товщиною стінки до 1 мм виготовляється із сплавів циркону типу Zircaloy-2 та Zircaloy-4, що мають малий переріз захоплення нейтронів.

Реактор є джерелом нейтронного випромінювання і захищається матеріалами з високою здатністю до поглинання енергії радіаційного випромінювання. Одним з ефективних матеріалів є бораль-металокерамічний композит з дрібних частинок карбіду бору, зв'язаних алюмінієм. Листи з боралю плакують з обох боків алюмінієвими листами. Близько 1 % бору додається до бетону облаштування реактора.

Корпуси парогенераторів виготовляються з перлітних сталей, а трубки з аустенітної корозійностійкої сталі марки 08X18H10T. Трубки поступово, хоча і дуже повільно, руйнуються внаслідок корозійних та ерозійних процесів. Тому в теперішній час для виготовлення трубок все частіше використовують сплави типу Inconel з вмістом нікелю в межах 31 - 72 %, хрому - 14 - 31 %, молібдену - 3 - 9 %, ніобію з танталом у межах 1 - 5 % і вуглецю - 0,01 - 0,1 %.

Особливе місце в енергетичному матеріалознавстві займають матеріали магнітопроводів, для виготовлення яких знайшли застосування магнітном'які сталі типу 08X17M, а саме 0X16, 02X16, 0X16MTI 02X16MT.

Ресурс працюючих реакторів на сьогодні складає близько 40 років. Одночасно розробляються конструкції реакторів нового покоління підвищеної надійності з експлуатаційним ресурсом до 60 років.

Для цього вдосконалюються корпусні сталі і технологія виготовлення з них якісного обладнання. Сталі повинні мати:

- ▶ високу міцність, пластичність і в'язкість;
- ▶ опірність радіаційному окрихченню;
- ▶ мінімальний рівень наведеної радіації;
- ▶ стійкість проти теплового окрихчення та корозійного розтріскування і здатність зберігати заданий рівень механічних характеристик протягом усього терміну експлуатації.

Конструкційні елементи внутрішнього насичення реактора (корпусні елементи, деталі механізмів керування, кронштейни та ін.) виготовляються виключно з корозійностійких сталей і сплавів. Кріпильні елементи виготовляються із сталей 10X11H20T3P, ХН35ВТ і т.п., пружини з мартенситних сталей 20X13, 30X13, Х17Н2, аустенітних сталей типу ХХ35ВТЮ або 0Х18Н10Т у наклепаному стані.

Матеріали парогенераторів. З усіх систем АЕС, окрім реактора, в надзвичайно складних умовах експлуатуються теплообмінні поверхні парогенераторів - трубні вузли. Вони зазнають корозійних пошкоджень під впливом води обох контурів, руйнуються внаслідок корозійного розтріскування, ▶ ерозійного та ▶ корозійноерозійних пошкоджень.

Матеріали системи турбіна-турбогенератор. У процесі експлуатації у більшості випадків пошкоджуються такі елементи системи турбіна-турбогенератор:

- > ротори парових турбін внаслідок корозійного розтріскування та корозійної втоми;
- > лопаті турбін внаслідок ерозійно-корозійних пошкоджень;
- > бандажні кільця турбогенераторів внаслідок корозійного розтріскування.

Зазнають пошкоджень трубки конденсаторів, шпильки та болти.

Для виготовлення роторів застосовують сталі 40Х, 40Н, 34ХМА, 35ХН1М2ФА та ін. (табл. 2.1, 2.2).

Лопаті парових турбін виготовляють із сталей 10Х13, 20Х13, 15Х11МФ та ін.

Ще кінцево не вирішена проблема захисту від корозійного розтріскування бандажних кілець турбогенераторів, розрив яких викликає серйозні аварії в турбінних цехах. Такі руйнування мали місце на електростанціях у різних країнах.

Робочі напруження в бандажних кільцях досягають $\frac{2}{3} \sigma_0$. Матеріал кілець повинен мати високу в'язкість руйнування, стійкість до корозії і корозійного розтріскування, низьку магнітну проникність, невисокий коефіцієнт термічного розширення. Діаметр бандажних кілець досягає 2000 мм, довжина 1250 мм при товщині стінки до 120 мм, тому матеріали для кілець повинні мати добру оброблюваність куванням. Для виготовлення бандажних кілець використовуються немагнітні сталі типу 18Mn-8 Ni-4 Cr і 18Mn-4Cr (табл. 2.3).

Таблиця 2.1

**Хімічний склад роторних перлітих сталей для парових турбін,
що використовуються в Україні та Росії**

Марка сталі	Вміст легуючих елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	
45	0,42-0,50	0,17-0,37	0,5-0,8	≤0,25	≤0,25	-	-	≤30,040	≤0,040	
40Н	0,37-0,45	0,17-0,37	0,5-0,8	≤0,3	0,8-1,30	-	-	≤0,040	≤0,040	
40Х	0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	0,8-1,2	≤0,5	-	-	≤0,022	≤0,025	
34ХМА	0,30-0,40	0,17-0,37	0,4-0,7	0,9-1,2	≤0,5	0,20-0,30	-	≤0,025	≤0,025	
34ХНЗМА	0,30-0,40	0,17-0,37	0,5-0,8	0,7-1,1	2,75-3,75	0,25-0,40	-	≤0,025	≤0,025	
35ХНІМ2ФА	0,32-0,40	0,17-0,37	0,5-0,8	1,3-1,7	1,3-1,7	0,40-0,50	0,1-0,2	≤0,022	≤0,025	
25ХІМФА*	0,21-0,29	0,25-0,50	0,3-0,6	1,5-1,8	≤0,40	0,90-1,05	0,22-0,32	≤0,025	≤0,025	
26ХНЗМ2ФА										

*Використовується також сталь 25ХІМ1Ф. Допустимий вміст міді до 0,25 %. Сумарна масова частка сірки та фосфору в сталях 34ХМА, 34ХН1МА, 34ХНЗМА і 35ХНІМ2ФА не повинна перевищувати 0,045 %.

Таблиця 2.2

**Хімічний склад сталей для виготовлення валів
і поковок монолітих роторів парових турбін в Україні та Росії**

Марка сталі	Масова частка елементів, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Cu	P
34ХМ1А	0,30-0,38	0,17-0,37	0,40-0,70	0,90-1,20	≤0,40	0,40-0,55	-	-	≤0,25	≤0,025
38ХНЗМФА	0,31-0,42	0,17-0,37	0,25-0,55	1,20-1,50	3,00-3,40	0,35-0,45	-	0,10-0,20	≤0,25	≤0,025
20ХЗМВФ	0,16-0,24	0,17-0,40	0,25-0,60	2,40-3,30	≤0,50	0,35-0,65	0,30-0,50	0,60-0,85	≤0,20	≤0,025

Таблиця 2.3

**Хімічний склад деяких поширених в енергомашинобудуванні
немагнітних сталей типу 8Мн-8Ni-4Cr і 18Мн-4Cr для
виготовлення бандажних кілець**

№ п/п	Марка сталі	Масова частка елементів, %							
		C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Інші
1	9Mn3Cr5Ni	0,74		9,94	3,75	5,05	0,025	0,009	Mo = 0,38 Ti = 0,25 Cu = 0,54
2	60X3Г8Н8В	0,55-0,68	0,29-0,50	7,5-7,9	3,0-4,0	7,5-9,5	0,018-0,030	0,010-0,030	W = 0,73
3	60X3Г8Н8	0,62	0,25	8,91	3,77	8,29	0,015	0,015	—
4	60X3Г8Н8Ф	0,61-0,66	0,29	8,01-8,31	3,2-3,8	8,5-8,8	0,021	0,008	V = 0,11-1,40
5	55X4Г18	0,54-0,55	0,68	18,5-18,8	4,8	—	0,040	0,002	Al = 0,1
6	55X4Г19	0,59	0,53	20,0	4,6	—	0,028	0,010	V = 0,14
7	50X4Г18	0,55	0,74	17,7	4,51	—	0,037	0,003	—
8	50X4Г18Ф	0,55	—	18,0	5,0	—	0,020	—	V = 0,12
9	P750	0,53	0,5	18,8	4,49	—	0,020	0,008	—
10	40X4Г18	0,4	—	17,5	3,5	—	—	—	—
11	40X4Г18Ф	0,43	—	18,31	3,53	—	—	—	V = 1,23
12	40X4Г18Ф1	0,46	0,26	18,35	4,3	—	0,007	0,014	V = 1,67
13	18Mn4Cr	0,5	0,55	18,0	4,5	0,1	—	—	—
14	18Mn4CrB	0,49	0,39	18,3	4,3	од	0,043	0,008	—
15	18Mn4CrD	0,5	0,46	17,9	4,23	0,18	0,041	0,004	—
16	18Mn4CrФ	0,58	0,70	18,8	4,46	—	0,038	0,003	V = 0,13
17	18Mn4Cr	0,51	0,63	17,7	3,4	1,1	0,071	0,011	—

2.6. Матеріали теплової енергетики

Окремі конструкційні елементи ТЕС працюють в корозійних середовищах при різних температурах і тисках та різного виду навантаженнях.

Для виготовлення конструкційних елементів, допоміжного обладнання і трубопроводів ТЕС і ТЕЦ застосовують маловуглецеві сталі із вмістом до 0,25 % вуглецю. Вони добре обробляються пластичною деформацією в холодному і нагрітому станах, дешеві, недефіцитні і мають задовільні механічні характеристики до температур 450 - 500 °С, добре зварюються. До таких сталей відносять марки 15К, 18К, 20К і 22К (К-котельна сталь), а також марки 10, 20, 35, 45. Барабани котлів виготовляють із сталей 16ГМНА і 20К.

Для підвищення корозійно-механічних характеристик сталей їх легують хромом, нікелем, марганцем, ванадієм, молібденом та ін. Дані щодо призначення типових сталей для виконання конструкційних елементів у тепловій енергетиці наведено в табл. 2.4-2.7.

Найбільш вразлива ланка ТЕС і ТЕЦ - парові котли. Практично 80 % аварійних зупинок зумовлені руйнуванням деталей котлів, зокрема екранних і пароперегрівних труб.

Легуючі елементи вводять в низько- і середньолеговані сталі головним чином для їх зміцнення, яке досягається внаслідок підвищеної здатності легованих сталей до прогартування, за рахунок зміцнення фериту і утворення дрібнодисперсних карбідів. Це спричинює підвищення жароміцності і довговічності сталей.

Метал теплообмінних поверхонь і парових турбін ТЕС і ТЕЦ експлуатується за одночасної дії агресивних середовищ, механічних напружень і підвищених температур. Значна частина конструкційних елементів котлів і турбінного тракту зазнає деградації внаслідок повзучості і високотемпературної малоциклової втоми. Основний вплив має температура. Встановлено, що перевищення розрахункової робочої температури тільки на 5 °С знижує абсолютну тривкість аустенітних сталей на 25 - 30 %, а ферито-перлітних на 35 - 40 %. У реальних експлуатаційних умовах метал теплообмінних поверхонь періодично працює при температурах, вищих від середньостатистичної.

Таблиця 2.4

Призначення перлітних і феритно-перлітних сталей

Марка сталі	Вид напівфабрикату	Призначення	Максимальна робоча температура, °С
<i>Феритно-перлітні сталі</i>			
Сталі 20, 20К	Труби, лист	Труби екранів барабаних котлів, плоскі деталі	4420
<i>Перлітні сталі</i>			
16ГНМА	Великогабаритні елементи	Барабани котлів, корпуси, що працюють під тиском	4450
12МХ	Великогабаритні елементи труби	Пароперегрівники, паропроводи, що працюють при температурах до 530°С, місткості для робочих температур до 540 °С	530-540
15ХМ	Труби, поковки профільний прокат	Паропроводи і пароперегрівники, місткості під тиском	5550
12Х1МФ	Труби, поковки профільний прокат	Колектори котлів, пароперегрівники, паропроводи і корпуси обладнання високого і надкритичного тиску для роботи при температурах до 570 °С, обігрівальні елементи при температурах до 580 °С	5570-585
15Х1М1Ф	Труби, поковки	Колектори котлів і пароперегрівники високого і надкритичного тиску	5575
12Х2МФСБ	Труби	Поверхні нагрівання котлів, пароперегрівники	5585
12Х2М	Лист, поковки труби	Корпуси, трубні пакети теплообмінників, що працюють при температурах до 500 °С, паропроводи з робочою температурою до 545 °С	5545

Призначення мартенситних та мартенситно-феритних сталей

Таблиця 2.5

Марка сталі	Призначення	Максимальна робоча температура при довготривалій експлуатації (до 10 тис год)	Температура початку утворення окалини в повітрі, °С
<i>Жаротривкі мартенситно-феритні сталі</i>			
15Х5	Труби	600-650	-
40Х9С2	Труби рекуператорів, теплообмінники, риштування	-	850
20Х13	Деталі парових турбін, труби, елементи котлів	-	700
<i>Жаротривкі мартенситні сталі</i>			
15Х5М	Деталі насосів, засувки	600	650
15Х5ВФ	Кріпильні елементи	600	650
13Х14МЗВФР	Диски, лопаті та інші деталі парових турбін, що працюють в умовах підвищеної вологості	550	750
15Х11МФ	Робочі та напрямні лопаті парових турбін	580	750
18Х11МНФБ2 ОХ12ВНМФ20 Х13	Лопатки парових турбін, деталі засувки, ротори парових і газових турбін. Лопаті парових турбін, засувки, шпильки, труби	600/500	750/750
15Х12ВНМФ	Ротори, диски і лопаті парових турбін, шпильки	780	950
18Х12ВМБФР	Поковки елементів, лопаті парових турбін, засувки, шпильки, труби	650	750

Призначення аустенітних жаротривких сталей

Таблиця 2.6

Марка сталі	Призначення	Рекомендована робоча температура, °С	Термін експлуатації*	Температура початку інтенсивного утворення окалини, °С
1	2	3	4	5
10Х11Н20ТЗР	Деталі парових турбін (поковки, прокат), лист	700	Обмежений	850
10Х1Ш23ТЗМР	Пружини і кріпильні деталі	700	»	850
37Х12Н8Т8МФБ	Диски парових турбін	630	Довготривалий	750
45Х14Н14В2М	Поковки, елементи трубопроводів	650	»	850
09Х14Н16Б	Труби пароперегрівників і трубопроводи надкритичного тиску, лист	650	»	850
09Х14Н19В2БР1	Ротори, диски і лопаті парових турбін	700	»	850
08Х16Н13М2Б	Поковки дисків і роторів, лопаті парових турбін, шпильки	600	Дуже довготривалий	850
09Х16Н15М3Б	Труби пароперегрівників і трубопроводи високого тиску	650	Дуже довготривалий	850
12Х18Н9	Труби, теплообмінники	800	Довготривалий	850
12Х18Н10Т 12Х18Н12Т	Труби, плоскі деталі	600	Дуже довготривалий	850
31Х19Н9МВБТ	Ротори і диски парових турбін, шпильки	600	Те саме	850

продовження табл. 2.6

1	2	3	4	5
10X23H18	Труби, арматура	1000	Довготривалий	1050
20X23H18	Газоходи, камери згоряння, обігрівальні елементи	1000	»	1050
10X11H20T2P	Деталі парових турбін (поковки, профільний прокат, листи)	700	Обмежений	850
12X25H16Г7AP	Плоскі елементи і профільний прокат	950	»	1050- 1100

Примітка. Обмежений термін експлуатації - від 100 до 1000 год, довготривалий - від 1000 до 10 000 год, дуже довготривалий - понад 10000 год (звичайно 50- 100 тис.год).

2.7. Матеріали газових турбін і парогазових установок

Газові турбіни широко використовуються в енергетиці, О літакобудуванні, ^магістральних трубопроводах для транспортування нафти, газу тощо. Енергетичні газові турбіни застосовуються для приводу електричних генераторів.

Потужність і ККД газових турбін зростають із збільшенням : температури паливних газів на вході. Тому основний принцип • розробки сучасних газових турбін базується на підвищенні температури газів. З цією метою розробляються нові сплави, композиційні матеріали і технології підвищення жаротривкості і жароміцності деталей газових турбін формуванням відповідних поверхневих шарів.

Матеріали газових турбін повинні мати > високу міцність, > опірність корозії, повзучості, тепломеханічній втомі та ерозійному зношуванню, >добре зварюватися і >мати низький коефіцієнт термічного розширення. Матеріал турбінних лопатей повинен мати високий опір до довготривалої дії підвищених температур, які можуть досягати 0,8T_{пл} за одночасної дії згинальних напружень (до 130 МПа) та агресивних продуктів спалювання.

Таблиця 2.7

Хімічний склад і механічні характеристики жаростійких енергетичних сталей (ГОСТ 5632—72)

Марка сталі	Масова частка елементів, %				
	C _{max}	Mn _{max}	Si _{max}	Cr	Ni
10X11H20TP	0,10	0,10	0,80	10,0-12,5	18,0-21,0
10X11H23T3MP	0,10	0,60	0,60	10,0-12,5	21,0-25,0
37X12H18T8MФБ	0,34-0,40	7,50-9,50	0,03-0,80	11,5-13,5	7,0-9,0
45X14H14B2M	0,40-0,50	0,70	0,80	13,0-15,0	13,0-15,0
09X14H16Б	0,07-0,12	1,0-2,0	0,60	13,0-15,0	14,0-17,0
09X14H19B2BP1	0,07-0,12	2,0	0,60	13,0-15,0	18,0-20,0
08X16H13M2Б	0,06-0,12	1,0	0,80	15,0-17,0	12,5-14,5
09X16H15M3Б	0,04	0,80	0,80	15,0-17,0	14,0-16,0
12X18H10T	0,12	2,0	0,80	17,0-18,0	9,0-11,0
12X18H12T	0,12	2,0	0,80	17,0-19,0	11,0-13,0
31X19H9MBBT	0,28-0,35	0,80-1,50	0,80	18,0-20,0	8,0-10,0
10X23H18	0,10	1,0	0,10	22,0-25,0	17,0-20,0
20X23H18	0,20	2,0	1,0	22,0-25,0	17,0-20,0
11X11H20T2P	0,10	1,0	1,0	10,0-12,5	18,0-21,0
12X25H16Г7A	0,12	5,0-7,0	1,0	23,0-26,0	15,0-18,0
					0,30-0,45N

Температура газів у сучасних турбінах сягає до 1100 °С (у двигунах літаків до 1300 °С), тому лопаті газових турбін виготовляються виключно із жаротривких жароміцних сплавів (в меншому обсязі із жаротривких сталей). До температур 500 °С застосовуються корозійностійкі хромисті сталі 1 2Х3Ш і 20Х13Ш, а до 580 °С - сталі 15Х11МФ-Ш і 15Х12ВНМФ-Ш та ін. Сфери застосування жаростійких сталей і сплавів для експлуатації газових турбін за вищих температур (600 - 1100 °С) наведено в табл. 2.8. Вище 1100 °С працездатні лопатки із жароміцних нікелевих і ренійвмісних сплавів. Високі результати отримано при виготовленні лопатей турбін із сплаву на основі інтерметаліду Ti₃Al.

Найбільш ефективний і широковживаний спосіб підвищення жаростійкості і корозійної стійкості лопатей газотурбінних двигунів є нанесення плазмовою металізацією поверхневих покриттів з

Таблиця 2.8

Застосування жаростійких сталей і сплавів

Сталь, сплав (клас)	Призначення	Робоча темпера- тура, °С	Час роботи, год
1	2	3	4
<i>Сталі</i>			
13Х12Н2В2МФ (марте нситна)	Деталі газових турбін	600	Тривалий
2Х12Н2ВМФ (мартенситна)	Диски ротора компресора, лопаті та інші навантажені деталі	600	»
15Х12ВНМФ (мартенситно-феритна)	Лопаті, поковки, кріпильні елементи	780	»
31Х19Н9МВБТ (аустенітна)	Те ж	630	»
4Х15Н7Г7Ф2МС (аустенітна)	Лопаті, кріпильні елементи	650	Обмежений
37Х12Н8Г8МФБ (аустенітна)	Диски роторів турбін, кріпильні елементи		
08Х16Н13М2Б (аустенітна)	Диски роторів, ротори, лопаті, болти	600	Тривалий

продовження табл. 2.8

1	2	3	4
10Х11Н20ТЗР (аустенітна)	Диски роторів, кільцеві деталі, кріпильні елементи та інші деталі компресора і турбіни	700	»
09Х14Н19В2БР1 (аустенітна)	Диски роторів, ротори, лопаті	700	»
08Х15Н24В4ТР (аустенітна)	Робочі і напрямні лопаті, кріпильні елементи, диски роторів	700	»
10Х23Н18 (аустенітна)	Лопаті третього і четвертого ступеня газової турбіни	1000	»
20Х23Н18 (аустенітна)	Лопаті третього і четвертого ступеня газової турбіни	1000	»
<i>Залізо-нікелеві сплави</i>			
ХН35ВТ (аустенітна)	Диски роторів, ротори, лопаті, кріпильні елементи, пружини	650	Дуже тривалий
ХН35ВТЮ (аустенітна)	Диски роторів і лопаті турбін і компресорів двигунів	750	Обмежений
<i>Нікелеві сплави</i>			
ХН77ТЮР (аустенітна)	Диски роторів, робочі лопаті, кільцеві деталі та інші деталі турбін	750	Обмежений
ХН70МВТЮБ (аустенітна)	Лопаті	850	»
ХН80ТБЮ (аустенітна)	Лопаті, кріпильні елементи	700	Дуже тривалий
ХН70ВМТЮ (аустенітна)	Лопаті	850	Те ж
ХН73МБТЮ (аустенітна)	Диски роторів	750	Тривалий
ХН70ВМЮТ (аустенітна)	Лопаті, кріпильні елементи	750	»
ХН70ВМТЮФ (аустенітна)	Лопаті	850 800	Обмежений Тривалий
ХН70ВМЮ	»	850	Обмежений
ХН62МВКЮ	Лопаті, диски роторів	900	—
ХН65ВМТЮ	Лопаті робочі і напрямні, кріпильні елементи	800	Тривалий

продовження табл. 2.8

1	2	3	4
ХН55ВМТКУ	Лопаті	950 800	Обмежений Тривалий
ХН55ВМКЮ	Лопаті та інші елементи турбін	950	Тривалий
ХН55МВЮ	Лопаті, диски роторів	900	Короткочасний
ХН60КМВЮБ	Лопаті	850	Тривалий
ХН62ВМКТЮБ	Диски роторів, лопаті	900 800	Короткочасний Тривалий
ХН60ВТ	Листові деталі турбін	1000	Обмежений
ХН60Ю	» » »	1250 1100	Обмежений Тривалий

керамічних матеріалів, а також легування поверхневих шарів методами дифузійного насичення.

Високими експлуатаційними властивостями характеризується поверхнєве покриття складу CoCrFeZrO_2 . Відмінні захисні властивості мають нанесені електронно-променевим і плазмовим методами покриття оксидами тугоплавких металів $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, ZrO_2MgO , $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$ та ін.

2.8. Матеріали гідроенергетики

Сталі для трубопроводів. Для виготовлення трубопроводів використовуються вуглецеві та низьколеговані сталі з доброю зварюваністю, холодностійкістю та пластичністю, а також низьколеговані сталі підвищеної та високої міцності. Основні марки сталей та їх механічні характеристики наведено в табл. 2.9.

Матеріали гідротурбін. Для виготовлення литих гідротурбін (робочих коліс) використовують низьколеговані сталі 20ГСЛ, 15Г2ВЛ, 0Х12НДЛ та ін. Крім литих, виготовляють зварювально-литі гідротурбіни масою понад 100 тонн із товщиною стінок 300-500 мм. Наприклад, диски робочих коліс гідротурбін Красноярьської ГЕС мають товщину 475 мм і до них приварені лопаті змінної товщини від 200 до 30 мм та висотою до 4 м. Для підвищення стійкості проти втомного руйнування поверхню коліс зміцнюють поверхневим пластичним деформуванням.

Таблиця 2.9

Характеристики деяких сталей, використовуваних для трубопроводів ГЕС

Сталь		Механічні характеристики		
Марка	Стан*	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
В СтЗсп5	ГК	250	380	26
В СтЗГпс		240	380	25
16Д	ГК	240	380	26
22К	ГК	190	440	18
09Г2С	ГК	330	480	21
09Г2	ГК	310	450	21
14Г2АФ	НабоГВ	400	550	20
13ХГН2МД	ГВ	600	700	14

Примітка: ГК - гарячекатана; В - після відпуску; Н - нормалізація; ГВ - після гартування з відпуском.



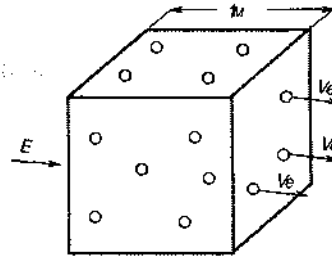
ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. Яка відмінність між аморфними та кристалічними матеріалами?
2. Назвіть основні дефекти будови кристалічних тіл.
3. Охарактеризуйте алотропічні перетворення в кристалічних матеріалах.
4. Назвіть основні механічні випробування матеріалів.
5. Чим відрізняються сталі від чавунів? Для чого проводять легування?
6. Охарактеризуйте жароміцність і жаротривкість матеріалів енергетичного обладнання.
7. Якими елементами легують сталі ядерної енергетики?
8. Охарактеризуйте основні властивості матеріалів теплової енергетики.
9. Назвіть основні матеріали для газових турбін і парових установок.
10. Чому в гідроенергетиці застосовують нелеговані та низьколеговані сталі?



3.1. Фізична суть електропровідності (загальні положення)

Відомо, що електричний струм у речовині являє собою впорядковане переміщення електричних зарядів під впливом прикладеної електричної напруги. Необхідною умовою електропровідності є наявність у речовині вільних (здатних захоплюватися силами електричного поля) заряджених матеріальних частинок - носіїв заряду.



Нехай в одиниці об'єму даної речовини знаходиться n носіїв заряду, а заряд кожного з цих носіїв дорівнює q . Тоді сумарний вільний заряд одиниці об'єму дорівнює добутку nq . За відсутності електричного поля ці носії внаслідок теплових коливань nq 3.1. Переміщення зарядів в хаотично рухаються зі швидкостями v і не створюють струму. Якщо ж у цьому об'ємі діє зовнішнє електричне поле з напруженістю E перпендикулярно до однієї з граней куба (рис. 3.1), то на кожний носій заряду діє сила, рівна

$$F = Eq$$

і він отримує компонент швидкості v спрямований в напрямку поля в той чи інший бік залежно від знака заряду.

Добуток $v_e n a n q$, рівний кількості електрики, яка проходить через одиницю поперечного перерізу речовини, є густиною струму J :

$$J = n \cdot q \cdot v_e. \quad (3.1)$$

У звичайний вираз закону Ома $I = U/R$ для зображеного на рис. 3.1 тіла замість I підставляємо JS , замість U - El , замість R - $\rho \frac{l}{S}$ і після скорочення отримуємо:

$$J = E/\rho = E\gamma \quad (3.2)$$

тобто найбільш загальну форму запису закону Ома.

Прирівнявши праві частини (3.1) і (3.2), отримуємо:

$$\gamma = nqv/E, \quad (3.3)$$

де γ - питома об'ємна провідність.

Формула (3.2) є загальною для всіх видів електропровідності, тому що при її виведенні не розглядались конкретні носії заряду.

** Відношення $u = v_e/E$, яке визначає швидкість носіїв заряду при напруженості поля, що дорівнює одиниці, називається рухомістю носіїв зарядів.*

Вводячи в (3.3) величину u , отримуємо:

$$\gamma = nqu. \quad (3.4)$$

3.2. Електропровідність металів

У металах і їх сплавах є велика кількість вільних, тобто не зв'язаних з конкретними атомами, електронів. В кристалі об'ємом 1 см^3 міститься 10^{23} - 10^{22} атомів. Якщо прийняти, що атоми в металі іонізовані однократно, то концентрація вільних електронів рівна концентрації атомів. Ці вільні електрони та іони кристалічної ґратки перебувають у безперервному хаотичному русі. Іони тільки коливаються навколо своїх положень рівноваги, а вільні електрони можуть переміщатися у всьому об'ємі металу. Розміри електронів дуже малі порівняно з відстанями між іонами ґратки, а хаотичний рух подібний до руху молекул газу. Інколи їх називають "електронним газом".

Гіпотеза про електронний газ підтверджується експериментально, а саме:

► За тривалого протікання струму в колі, складеному з провідників різних металів, атоми одного металу не проникають в інші, тобто атоми металу не переміщуються разом зі струмом.

► За раптової зупинки провідника, який швидко рухався, вільні електрони за інерцією продовжують деякий час рухатись і на кінцях загальмованого провідника виникає різниця потенціалів.

Якщо в металі відсутнє електричне поле, то рух електронів є хаотичний, тобто в будь-який момент швидкості окремих електронів спрямовані в різні напрями (рис. 3.2).

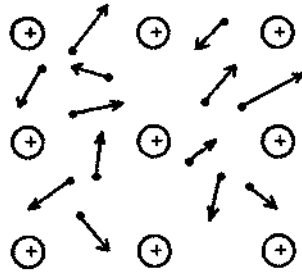


Рис. 3.2. Напрямок руху електронів за відсутності поля

Такий рух не викликає струму, тому що внаслідок повної хаотичності в кожному напрямі буде рухатись стільки ж електронів, як і в протилежному. Геометрична сума швидкостей v_m електронів для достатньо великого об'єму металу дорівнює нулю і струм відсутній.

Якщо ж ми прикладемо до кінців провідника різницю потенціалів, тобто створимо в середині металу градієнт електричного поля, то на кожний електрон діятиме сила $F = Ee$. Електрон з масою m , розташований в "пустому" міжіонному просторі, який не гальмує його руху, отримає пришвидшення в напрямку E , яке дорівнює:

$$a = F/m = E e/m,$$

де відношення e/m складає $1,759 \cdot 10^{11}$ Кл/кг. Через певний час t

компонента швидкості електрона в напрямі поля становитиме

$$v_t = at = E \frac{e}{m} t$$

а сумарна швидкість дорівнюватиме сумі швидкостей v_m і v_e .

Електрон у процесі руху буде наштовхуватися на іони ґратки. Після кожного співударяння швидкість електрона спадає до нуля, потім знову зростає з попереднім пришвидшенням. Таким чином, v буде змінюватись з часом t згідно з пилкоподібним графіком, схематично зображеним на рис. 3.3.

Експериментально встановлено, що середня довжина шляху вільного пробігу електрона в металах високої провідності становить в нормальних умовах $10^{-4} - 10^{-5}$ мм, а при дуже низьких температурах - значно більше, тобто електрони рухаються без зіткнень по рядку сотень параметрів ґратки. Найбільше значення швидкості v_e даного електрона в кінці кожного періоду пришвидшення тривалістю τ (час вільного пробігу електрона) дорівнює:

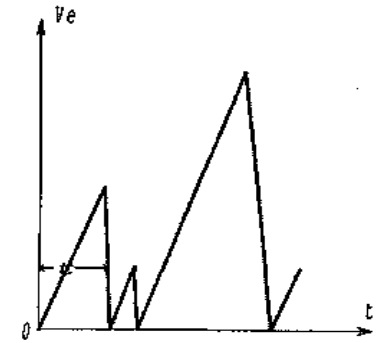


Рис. 3.3. Графік зміни в часі швидкості v_e електрона в металі (схематично)

$$v_{e \max} = E \cdot \frac{e}{m} \cdot \tau$$

а середня його швидкість за час τ становить

$$v_{e \text{ сеп}} = E \cdot \frac{e}{m} \cdot \frac{\tau}{2} \quad (3.5)$$

За нормальної температури швидкість v_m для металів складає приблизно 10^5 м/с, а швидкість v_e - порядку 10^{-4} м/с, тобто $v_m \gg v_e$. Тому середнє значення $\tau_{\text{сеп}}$ для всіх електронів дорівнює

$$\tau_{\text{сеп}} = l/v_m$$

де l - середня довжина вільного пробігу електрона. Підставивши значення у (3.5), отримаємо середнє значення $v_{e \text{ сеп}}$ швидкостей v_e для всіх електронів:

$$v_{e \text{ сеп}} = E \frac{e}{m} \cdot \frac{l}{2v_m} \quad (3.6)$$

Наявність компоненти v_e створює впорядкований рух зарядів в напрямку градієнта електричного поля. Якщо у формулу (3.3) замість g підставити заряд електрона e , замість v_e - вираз $v_{e \text{ сеп}}$ з (3.6), отримуємо:

$$\gamma = \frac{ne^2 l}{2mv_m} \quad (3.7)$$

Згідно з атомно-кінетичною теорією ідеальних газів кінетична енергія електронів лінійно зростає з температурою:

$$\frac{mv_m^2}{2} = \frac{3kT}{2}$$

де k - стала Больцмана, T - абсолютна температура. Підстановка v_m з (3.8) у (3.7) дає:

$$\gamma = \frac{ne^2 l}{2\sqrt{3mkT}} \quad (3.9)$$

або

$$\rho = \frac{2\sqrt{3mkT}}{ne^2 l} \quad (3.10)$$

3.3. Температурна залежність питомого опору металічних провідників

Рух вільних електронів у металі можна розглядати як поширення плоских електронних хвиль, які в строго періодичному потенціальному полі поширюються без розсіювання енергії. Тому в ідеальній кристалічній ґратці довжина вільного пробігу електрона дорівнює безмежності, а електроопір - нулю. Розсіювання електронів і електроопір з'являються за наявності в ґратці дефектів. Ефективне розсіювання хвиль відбувається, коли розмір дефектів перевищує четвертину довжини хвилі. У металах енергія електронів провідності перебуває в межах 3 - 15 eV і їй відповідає довжина хвилі 0,3 - 0,7 нм. Тому будь-які мікронеоднорідності створюють перешкоди поширенню електронних хвиль і зумовлюють зростання питомого електроопору.

У чистих металах з бездефектною структурою довжина вільного пробігу електронів обмежується лише тепловими коливаннями атомів кристалічної ґратки. Тому з підвищенням температури, яке збільшує амплітуду теплових коливань атомів, зростає розсіювання електронів та відповідно питомий електроопір.

Типова крива зміни питомого опору металічного провідника від температури наведена на рис. 3.4.

В області 1 за температури $T_{нд}$ в ряді металів виникає *надпровідність*. У бездефектних чистих металах при наближенні до 0 К питомий електроопір також прямує до нуля (пунктирна лінія), а довжина вільного пробігу електрона прямує до безмежності. Близька до лінійної ділянка II простягається до температури плавлення $T_{пл}$, за якої для більшості металів спостігається різке зростання питомого електроопору. Виняток становлять вісмут і галій, які мають складну кристалічну структуру і при їх плавленні питомий електроопір зменшується.

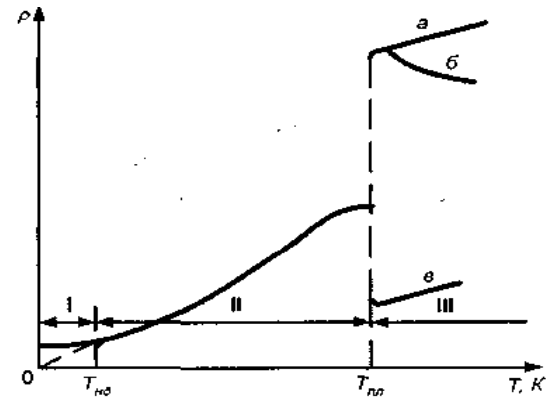


Рис. 3.4. Залежність питомого опору металічного провідника від температури в широкому її діапазоні

* Відносне зменшення (збільшення) питомого опору за зміни температури на один градус називається **температурним коефіцієнтом питомого опору**:

Величина α є функцією температури і в області лінійної залежності $\rho(T)$ визначається згідно з рівнянням:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)]$$

де ρ_0 і α_ρ - відповідно питомий опір і температурний коефіцієнт питомого опору, які відповідають початку температурного діапазону, тобто температурі T_0 ; ρ - питомий опір при температурі T . Розсіювання електронних хвиль у металі зумовлюється тепловими коливаннями ґратки і дефектами структури.

* Розсіювання на статичних дефектах не залежить від температури і при наближенні до абсолютного нуля опір реальних матеріалів прямує до певного сталого значення, названого **залишковим опором**.

Тому залежність електроопору від температури можна виразити рівнянням

$$\rho = \rho_T + \rho_{\text{зал}}$$

де ρ_T - питомий опір, зумовлений розсіюванням електронів провідності на теплових коливаннях ґратки; $\rho_{\text{зал}}$ - залишковий опір, викликаний наявними в металі хімічними домішками та фізичними дефектами структури (дислокаціями, вакансіями та ін.).

Вказана закономірність встановлена в 1864 р. Л. Маттісеном і називається *правилом Маттісена*. Згідно з цим правилом, залишковий опір фізично досконалого металу за дуже незначної концентрації дефектів і домішок не залежить від температури і зростає із збільшенням їх концентрації. За низької температури ($= 4$ К) загальний опір технічно чистих металів визначається в основному залишковим опором.

Правило Маттісена задовільно виконується лише в області низьких і високих температур, за винятком деяких металів (Аі, Сі, Аg, Мg, Мо), в яких із зниженням температури до $T = T_{\text{мін}}$ опір зменшується і після досягнення мінімального значення починає зростати.

Мінімум опору зумовлюється незначною кількістю домішок заліза, марганцю та ін. у металі і спостерігається як в полікристалічних тілах, так і монокристалах. У дуже чистих металах мінімуму опору не виявлено.

За допомогою правила Маттісена проводять якісну оцінку сумарної кількості дефектів та домішок у металах за зміною їх електроопору із зниженням температури. Чим чистіший і досконаліший метал, тим сильніша ця зміна.

3.4. Надпровідність

У 1911 р. Х. Камерлінг-Оннес в Лейдені встановив, що за певного зниження температури електричний опір ртуті раптово зникає. Він застосував оригінальний метод - виготовив ртутне кільце, розмістив його між полюсами електромагніта, охолодив нижче 4,15 К і створив магнітне поле. За законом електромагнітної

індукції Фарадея в кільці почав циркулювати електричний струм. Електрони проходили по металу без найменшого опору з його боку. Якщо б ртуть проявляла електроопір, то струм зник би за частки секунди. Протягом 2000 годин, а потім і кількох років не вдалось зафіксувати найменшого зменшення струму. Струм створив магнітне поле. Магнітний потік, що пронизував кільце, ще до того як був виключений електромагніт, також з часом не зменшувався.

Надпровідність виявлена у кількох десятків чистих металів і більше тисячі сплавів. На рис. 3.5 наведено залежність питомого опору ρ від температури двох надпровідних металів - свинцю і талію і, для порівняння, кадмію, який не переходить в надпровідний стан. У той же час найкращі провідники - мідь, золото і срібло - взагалі не переходять у надпровідний стан. Не стають надпровідниками магнітні (залізо, кобальт, нікель) і лужні (літій, натрій, калій та ін.) метали.

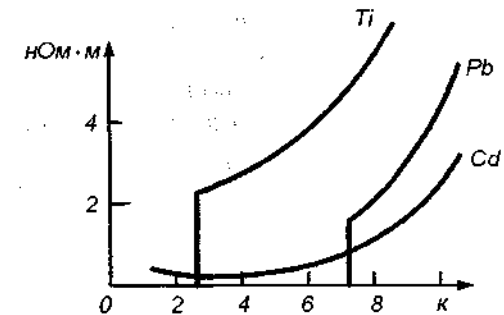


Рис. 3.5. Залежність питомого опору ρ талію, свинцю і кадмію від температури (в області наднизьких температур)

Ефект Мейснера. У надпровідниках спостерігаються явно виражені аномалії теплових, оптичних і особливо магнітних властивостей. У 1933 р. німецькі фізики В. Мейснер та Р. Оксенфельд виявили, що в надпровідному стані, тобто за $T < T_k$, матеріали стають ідеальними діамагнетиками і в них не проникає магнітне поле (рис. 3.6).

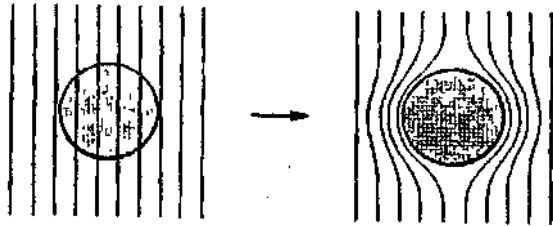


Рис. 3.6. Ілюстрація до ефекту Мейснера: у надпровіднику (праворуч) лінії магнітної індукції виштовхуються

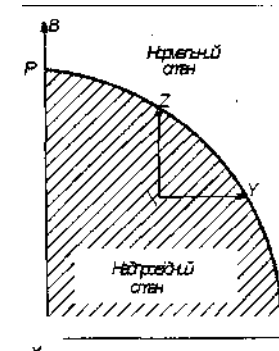
Силкові лінії магнітного поля огинають надпровідник. Діамагнетик відштовхує магнітне поле незалежно від того, який полюс магніту наближати до нього. Це пояснюється тим, що в надпровіднику за дії слабкого магнітного поля ($H < H_k$) у приповерхневому шарі певної товщини виникають такі наведені кільцеві незгасаючі струми (їх часто називають *екранувальними струмами*), які компенсують зовнішнє прикладене поле. Глибина проникнення магнітного поля є в межах $10^{-7} - 10^{-8}$ м. Якщо розмістити над надпровідником магніт, то внаслідок магнітного відштовхування він зависає в повітрі (*стан левітації*). Дослід умовно названо "*труною Магомета*", яка походить з відомої легенди про те, що в Аравійській пустелі мусульмани бачили в печері труну з тілом пророка Магомета, яка висіла в повітрі без будь-якої опори.

Стан надпровідності легко руйнується, якщо напруженість магнітного поля перевищить критичне значення H_k . При переході матеріалу під дією магнітного поля з надпровідного стану до стану нормальної провідності, розрізняють надпровідники I і II роду. У надпровідників I роду цей перехід відбувається стрибкоподібно, а у надпровідників II роду - поступово (рис. 3.7). В інтервалі напружень $H_{n01} - H_{n02}$ у матеріалі одночасно наявні нормальна і надпровідна фази, співвідношення об'ємів цих фаз залежить від H . Магнітне поле поступово проникає в надпровідник II роду.

Критична напруженість магнітного поля для надпровідників I роду становить 10^5 А/м, а для надпровідників II роду 10^7 А/м. Залежність надпровідного стану матеріалу від температури і напруженості магнітного поля показана на рис. 3.8. Область між графі-

Рис. 3.7. Залежність зміни магнітної індукції в середині

Рис.3.8 Діаграма стану надпровідника від напруженості зовнішнього магнітного поля:
а - надпровідник I роду; б - надпровідник II роду



ком і осями координат (заштрихована) відповідає надпровідному стану, а незаштрихована область нормальному стану.

Руйнування надпровідності, тобто перехід з надпровідного стану в нормальний, відбувається як при підвищенні температури (перехід з точки X у точку Y), так і за зростання магнітної індукції (перехід з точки X у точку Z).

Фізична природа надпровідності. В ансамблі квантових частинок з цілочисельним спіном (бозонів) за абсолютного нуля температури частинки займають один найнижчий за енергією дозволений рівень. Жодного обмеження на число бозе частинок, які можуть розміститись на одному й тому ж енергетичному рівні, немає. Тому при $T = 0$ К усі вони сконденсовані на одному рівні.

Частинки з напівцілим спіном, тобто ферміони (до них належать електрони або дірки, що мають спін $\pm 1/2$), підпорядковуються **принципу Паулі**: на кожному з енергетичних рівнів можуть перебувати одночасно лише два електрони з протилежними спінами. Тому всі електрони, навіть за $T = 0$ К, не можуть зайняти один і той самий найнижчий енергетичний рівень, а змушені поступово заселяти все вищі і вищі за шкалою енергетичні рівні, тобто заповнювати енергетичну зону. Тому з електронами чогось

подібного до бозе-конденсації на найнижчому рівні при $T = 0$ °К не відбувається і електронна рідина ніколи (навіть за $T = 0$ °К) не може бути надплинною. Це багато років не давало змоги збагнути зв'язок поміж такими схожими явищами, як *надплинність* та *надпровідність*.

Явище надплинності дало початок досліджень у новій галузі фізиці квантових рідин. Властивості надплинності притаманні лише частинкам з цілим спіном, тобто бозонам. Рідкий гелій складається з атомів ізотопу. Не, які належать до бозонів. Це перша квантова рідина, вивчена фізиками.

Надплинність дозволила зрозуміти явище надпровідності і в 1957 р. сформулювати *теорію надпровідності*. Виглядало природно, що надпровідність зумовлена надплинністю електронів. Тільки в одному випадку (*надплинність*) без тертя "*течуть*" атоми, а в іншому (*надпровідність*) - без опору "*течуть*" електрони.

Але відомо, що властивість надплинності притаманна тільки частинкам з цілим спіном, а в електронів спін "*напівцілий*" і дорівнює $\frac{1}{2}$. Вихід знайшов американський теоретик *Л. Купер*, який у 1956 р. запропонував модель спарювання, коли носії зарядів можуть об'єднуватися в пари з нульовим спіном. Такі комплекси з двох електронів або двох дірок уже можуть створювати конденсат і викликати надпровідність.

За спарювання ефективними носіями струму є пари електронів або дірок. Тоді подвоєний заряд електрона відіграє роль одиничного заряду в надпровідності. При вимірюванні різних електричних властивостей нових надпровідників заряд $2e$ дійсно з'являється в усіх результатах. Магнітний потік через надпровідне кільце квантований і може дорівнювати лише цілому числу квантів магнітного потоку. Величина цього кванта

$$\Phi_0 = hc / 2e,$$

де $2e$ - подвоєний заряд електрона, тобто заряд електронної пари. Струм підлаштовується так, щоби потік магнітного поля був кратний (Φ_0). Цей струм не затухає тільки тому, що усе величезне число електронних пар рухається як єдине ціле, в одному ритмі. Але як відбувається спарювання, яким чином один електрон впливає на інший, до кінця не з'ясовано. Запропоновано низку механі-

змів спарювання - ► *фононний*, ► *ексітонний* та ін. Та який саме реалізується в досліджуваних матеріалах поки що не відомо. Можливо, спрацьовують поєднання різних механізмів. Розглянемо фононний механізм.

Мікроскопічна теорія надпровідності Бардіна-Купера-Шріффера (БКШ). Іони кристалічної ґратки за $T < T_c$ коливаються навколо положень рівноваги.

* *Кванти цих пружних коливань називаються фононами. Електрон-фононна взаємодія - це взаємодія електронів з динамічною (рухливою) ґраткою.*

Завдячуючи електрон-фононній взаємодії, два електрони можуть утворювати куперівську пару із зарядом $2e$. Якщо n_s - концентрація надпровідних електронів, то концентрація куперівських пар буде $n_s/2$.

Система спарених електронів утворює єдиний квантовий стан, що охоплює весь надпровідник. За $T \leq T_c$ сила спарювання (притягання) з надлишком компенсує кулонівське відштовхування і утримує електрони в їх узгодженому русі. Надпровідні (спарені) електрони дрейфують когерентно (узгоджено) без витрат енергії. Згідно з теорією БКШ, в утворенні пар беруть участь не по два окремих електрони, а всі електрони металу.

Куперівські пари виникають лише тоді, коли електрони притягуються один до одного, що можливо в середовищі позитивно заряджених іонів ґратки, поле яких послаблює кулонівське відштовхування між електронами. Притягуватися можуть тільки електрони з протилежним спрямуванням імпульсу і спіну, розташовані по близу рівня Фермі. Процес у спрощеному вигляді можна уявити на ступиним чином. Електрон, переміщуючись у регулярній ґратці кристала, притягує найближчі позитивно заряджені іони, створюючи миттєве збільшення концентрації позитивного заряду (рис. 3.9).

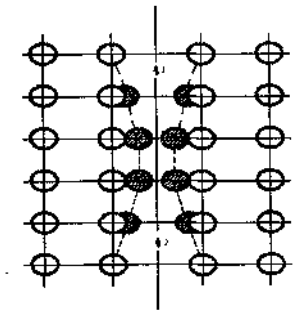


Рис 3.9. Схема утворення електронних пар в надпровідному матеріалі

Другий електрон, що рухається за першим, притягується областю зі збільшеною концентрацією додатного заряду. У результаті ці обидва електрони через посередництво кристалічної ґратки взаємно притягуються і утворюють куперівські пари. Щоб другий електрон ("партнер") притягувався іонним згущенням, перший повинен віддалитися настільки, щоб кулонівське відштовхування було менше, ніж притягання. Отже, притягуватись і рухатися синхронно будуть електрони лише на значних відстанях за рахунок взаємодії з фононами. Кулонівське відштовхування на відстанях порядку 10^{-7} м зменшується ще й тому, що між електронами - "партнерами" розміщена велика кількість позитивно заряджених іонів та інших електронів. Парні утворення електронів постійно розпадаються і знову створюються. Назагал всі пари утворюють електронний конденсат, енергія якого менша, ніж у сукупності роз'єднаних нормальних електронів.

Температура переходу матеріалу з надпровідного стану в нормальний визначається міцністю зв'язку між спареними електронами. Чим міцніші ці зв'язки, тим потрібна більша енергія (температура) для їх руйнування. Це значить, що надпровідність зберігатиметься при більш високих температурах.

Високотемпературна надпровідність (ВТНП). У 1986 р. науковці Цюріхської (Швейцарія) філії американської транснаціональної компанії IBM Алекс Мюллер та Йоганнес Георг Беднорц виявили

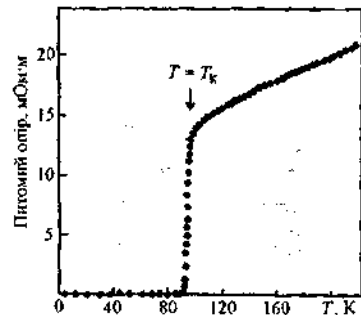


Рис. 3.10. Електроопір зразка $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$ як функція температури

високотемпературну надпровідність у системі Ва-Ла-Су-О за температур 30 - 35 К. У цілому світі почався науковий штурм щодо досягнення надпровідності за азотної температури (77,4 К). Мети досяг фізик К. Чу, який на зразках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$ зафіксував надпровідний стан за температури 92 К (рис. 3.10) Після 1989 р. підвищення T_c вдалось досягти у матеріалах $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ та $\text{Cu}_{24}\text{Pb}_2\text{Sr}_2\text{Ag}_2\text{O}_{32}$ (рис. 3.11).

Результати К. Чу з метою вчасного закріплення пріоритету були опубліковані на першій сторінці газети "Нью-Йорк Таймс" 31 грудня 1986 р. Про важливість проблеми свідчить той факт, що у США в обговоренні задачі з ВТНП брали активну участь президент Рейган, бізнесмени, юристи, державні діячі.

Вважається, що з усіх винаходів двадцятого століття високотемпературна надпровідність може мати найбільше практичне значення. У першу чергу вона дозволить в багато разів покращити використання енергії. Надпровідниками енергію можна буде передавати з одного місця в інше на будь-якій відстані без теплових втрат, які складають в середньому 20 - 40 %. Застосування ВТНП може з надлишком компенсувати всю енергію АЕС та багатьох теплових електростанцій.

Використання ВТНП кардинально покращить накопичення і зберігання електроенергії. Циркулюючий у надпровіднику струм можна вводити в мережу саме тоді, коли в цьому виникає необхідність, а на сьогодні процеси виробництва і використання електроенергії не можна достатньо рознести в часі. Застосування високотемпературних надпровідників у різних електричних машинах - двигунах, генераторах тощо зробить їх надкомпактними і потужними.

Струм, що тече в надпровідниковому кільці, створює сильне магнітне поле, а потужні магніти потрібні, наприклад, для утримання плазми в термоядерних установках типу "Токамак". Тепер

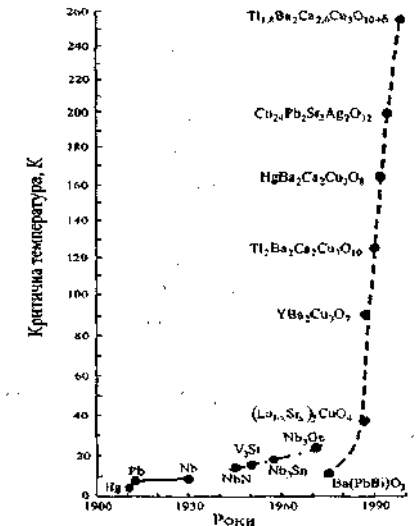


Рис. 3.11. Хронологія зростання критичної температури різних надпровідників. Суцільна лінія окремі елементи; пунктир сплави та сполуки; штрихова оксидні надпровідники

для цього використовують цілі ріки рідкого гелію, на виробництво якого витрачається надзвичайно багато енергії.

Важливе застосування надпровідників в елементах мікроелектроніки. Вже розроблені надмініатюрні надпровідні перемикачі, "комірки" пам'яті, які охолоджуються в сотні раз дешевшим і більш доступним за гелій рідким азотом. Створені перші обчислювальні машини на "теплих" надпровідниках. На жаль, ще не усунені складні проблеми поєднання технологій виготовлення інтегральних схем з надпровідниками і напівпровідниками. Виникають проблеми з величиною струму, що може протікати через надпровідники. З них витісняється лише достатньо слабе магнітне поле, а сильне руйнує надпровідність, тобто надпровідний стан сам себе знищує. Ця проблема вирішується застосуванням надпровідних плівок, які пропускають без втрати надпровідності струми до 10^6 А/см^2 , що дозволяє виготовляти перемикачі, магнетометри, трансформатори та інші пристрої, які працюють на рідкому азоті.

Уже сьогодні впроваджуються надпровідники, в структурі яких важливу роль відіграє кисень, а зміна вмісту кисню і впорядкування його іонів по певних вузлах кристалічної ґратки породжує або нищить надпровідність. Для запобігання проникнення чи витікання кисню розроблені відповідні технологічні засоби. Наприклад, багатожильні системи, в яких розміщено джерело атомів кисню, виготовляють із зовнішніми покриттями для запобігання його витіканню в навколишнє середовище.

Силова надпровідна електротехніка та кріоелектроніка. Розроблені до сьогоднішнього дня ВТНМ дуже крихкі. Виготовлення з них дротин для котушок надпровідних електромагнітів, кабелів надпровідних ліній електропередач та ін. пов'язане з подоланням певних труднощів. Один з варіантів вирішення проблеми - надпровідник виготовляють у вигляді тонких дротин, які поміщають у мідну оболонку. Роль цієї оболонки двояка: підведення холоду до надпровідного осердя та "перехоплення" струму за переходу надпровідника в нормальний стан. Такі композитні електротехнічні надпровідні вироби з критичним струмом $I_k = 10^5 - 10^6 \text{ А/см}^2$ і критичним магнітним полем $10 - 10^2 \text{ Тл}$ використовують у потужних електротехнічних системах для термоядерних і магнітогідро-

динамічних генераторів, накопичувачах енергії, електромоторах та експериментальних лініях електропередач.

В Інституті монокристалів НАН України розроблена технологія виготовлення надпровідників нанесенням на них лакових ізоляційних покриттів при протягуванні дротин.

Перспективними для практичного застосування є тонкі плівки ВТНП, які найчастіше отримують методами електропроменевого випаровування, лазерного розпилювання та ін. При цьому забезпечується кероване розпилювання окремих металів (Y, Ba, Si) на підкладку, на якій ці метали вступають в реакцію з киснем. Дуже важливим є раціональний вибір матеріалу підкладки, тому що параметри ґратки плівки і підкладки та температурні коефіцієнти розширення у них повинні бути близькі між собою.

Надпровідні електромагніти. У надпровідних соленоїдах магнітні поля досягають 200 000 ерстедів, а енерговитрати в них в 1000 разів менші, ніж у звичайних електромагнітах. Після зняття напруги струм, а значить і магнітне поле, не зникають і магніт працює практично без енерговитрат. Як напівпровідникові матеріали для промислових електромагнітів використовують жорсткі напівпровідникові сплави та інтерметаліди, що характеризуються високими критичними струмами і критичними полями. Зокрема, найтехнологічнішим вважається сплав на основі ніобію і титану з параметрами: $I_k = 10^5 \text{ А/см}^2$ і $H_k = 10^5$ ерстедів. Надпровідні електромагніти застосовуються в установках керованого термоядерного синтезу "Токомак", МТД-перетворювачах теплової енергії в електричну, у потягах, що рухаються без тертя над рейками на магнітних подушках та ін. Магнітне поле, створене вмонтованими під долівкою вагона надпровідними електромагнітами, відштовхує їх від металевої колії спеціальної конструкції, в якій наводиться керована комп'ютером "струмова хвиля". Остання рухається перед вагоном і попід ним і забезпечує одночасно тягу та підвіс вагона.

В Японії на експериментальному полігоні в Яманаші на захід від Токіо у 2003 р. пройшло успішне випробування нового тривагонного надшвидкісного потяга. Його швидкість досягла 581 км/год, тобто швидкості кращих винищувачів часів Другої світової війни.

3.5. Матеріали високої провідності

До цих матеріалів належать провідники з питомим електричним опором у нормальних умовах не більше 0,1 мкОм·м. Це *мідь*, *срібло*, *алюміній*, *золото*, *вольфрам та ін.* Найважливіші усереднені фізичні характеристики цих та інших металів наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Головні усереднені властивості металів при 20 °С

Метал	Темпера- тура плав- лення, С	Густина Мг/м³	Коефіцієнт теплопровід- ності, Вт/(м К)	Питомий опір, мк Ом·м	Т°К питомого опору, 10⁴, °К
1	2	3	4	5	6
Ртуть Hg	-38,9	13,60	10	0,958	9
Цезій Cs	28,5	1,87	-	0,210	48
Галій Ga	29,7	5,91	-	0,560	-
Калій К	63,7	0,87	92	0,069	58
Натрій Na	97,8	0,97	125	0,046	50
Індій In	156,0	7,28	25	0,090	47
Літій Li	186,0	0,53	71	-	-
Олово Sn	232,0	7,31	65	0,120	41
Кадмій Cd	321,0	8,65	93	0,076	42
Свинець РЬ	327,0	11,40	35	0,210	37
Цинк Zn	420,0	7,14	111	0,059	-
Магній Mg	651,0	1,74	167	0,045	42
Алюміній Al	657,0	2,70	209	0,028	42
Срібло Ag	961,0	10,50	415	0,016	40
Золото Au	1063,0	19,30	293	0,024	38
Мідь Си	1083,0	8,94	390	0,017	43
Берилій Be	1284,0	1,85	167	0,040	60
Нікель Ni	1455,0	8,90	95	0,073	65
Кобальт Со	1492,0	8,71	79	0,062	60
Залізо Fe	1539,0	7,87	73	0,098	60
Паладій Pd	1554,0	12,10	72	0,110	-
Титан Ti	1725,0	4,50	15	0,480	33
Хром Сг	1850,0	7,10	-	0,210	-
Платина Pt	1770,0	21,40	71	0,105	-
Торій Th	1850,0	11,50	-	0,186	23

1	2	3	4	5	6
Цирконій Zr	1860,0	6,50	17	0,410	45
Іридій Ir	2410,0	22,50	-	-	-
Ніобій Nb	2500,0	8,57	50	0,140	30
Молібден Мо	2620,0	10,20	151	0,057	46
Тантал Та	2996,0	16,70	54	0,135	38
Реній Re	3180,0	20,50	71	0,210	32
Вольфрам W	3410,0	19,30	168	0,055	46

продовження табл. 3.1

Мідь - метал червонувато-оранжевого кольору (густина 8,9 г/см³, $t_{пл} = 1083$ °С). Її отримують металургійною переробкою сульфідних мідних руд. Вміст міді в рудах не перевищує 12 %. Тому руду попередньо збагачують до 20 - 40 % міді. Збагачену руду плавлять у печах і отримують так звану чорну мідь, яка вміщує 97 -98 % міді. Для електротехнічних виробів застосовують мідь після її додаткового електролітичного очищення (рафінування).

Мідь має низку цінних властивостей, які забезпечують її широке використання як провідникового матеріалу, а саме:

- *малий питомий опір;*
- *відносно високу механічну міцність;*
- *задовільну в більшості випадків стійкість до корозії;*
- *високу пластичність і здатність прокатуватись у листи, стрічки, протягуватись у дріт діаметром до тисячних часток міліметра;*
- *добру здатність до паяння і зварювання.*

Питома провідність міді та її механічні характеристики дуже чутливі до наявності домішкових атомів (рис. 3.12). Так, 0,5 % цинку, кадмію чи срібла знижують питому провідність міді на 5 %, нікелю, олова або алюмінію на 25 - 40 %, а берилію, миш'яку, заліза, сірки та фосфору на 55 % і більше.

Одночасно домішки олова, кадмію, алюмінію підвищують твердість і міцність міді. Дуже шкідливими домішками в міді є вісмут, свинець, кисень, фосфор, сірка і водень.

Вісмут і свинець майже не розчинні в міді і утворюють з нею легкоплавкі евтектики відповідно Cu-Bi з 99,8 % Bi і Cu-Pb з 99,94 % Pb ($t_{пл}$ цих металів відповідно 270 і 327 °С). Структура сплавів

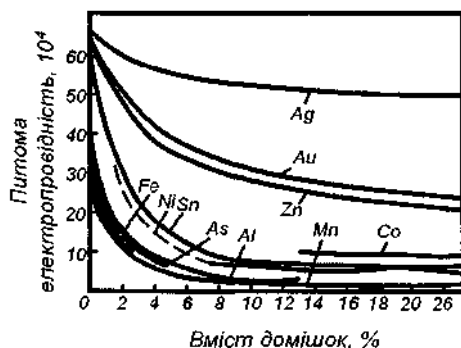
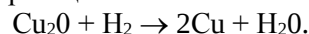


Рис. 3.12. Вплив домішок на електропровідність міді

складається з раніше виділених кристалів міді, навколо яких розміщені оболонки вісмуту чи свинцю. Нагрів сплаву вище температури плавлення цих металів спричинює руйнування зв'язку між кристалами міді (червоноламкість), що унеможливило прокатування вказаних сплавів.

Червоноламкість міді викликає також кисень. За низьких температур мідь окрихчується сіркою.

Відпал міді в атмосфері водню зменшує в кілька разів її твердість. Проникаючи в глибину металу за підвищених температур водень вступає в реакцію з киснем, який знаходиться в технічній міді у вигляді закису Si_2O за реакцією



Тиск утвореної водяної пари може досягати кількох тисяч атмосфер і ініціювати виникнення мікротріщин, які знижують вакуумну щільність міді і її окрихчують. Таке окрихчення названо "водневою хворобою". Для запобігання водневій хворобі вміст кисню в міді не повинен перевищувати 0,001 %.

Промисловість випускає провідникову мідь шести марок з різною кількістю домішок. У найбільш чистій міді (марка М 000) сума всіх домішок не перевищує 0,01 %. Для виготовлення провідників виробів застосовують

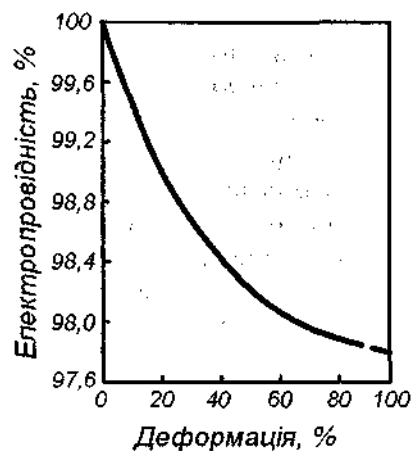


Рис. 3.13. Вплив наклепу (деформації) на електропровідність міді

мідь з вмістом домішок не більше як 0,1 - 0,5%. Це наступні марки: М0 (99,95 % чистої міді), М1 (99,90 %), М2 (99,70 %), М3 (99,50 %), М4 (99 %). Мідний дріт виготовляють круглого (діаметром від 0,02 до 10 мм) і прямокутного перерізу (шини) з меншою стороною в межах 0,8 до 4 мм, з більшою стороною - від 2 до 30 мм.

Механічні властивості міді значною мірою визначаються технологією виробництва. За холодної протяжки отримують тверду (марки МТ) мідь з великою міцністю (до 400 МПа), твердістю і малою пластичністю (видовження при розриві 1 - 2 %). Якщо тверду мідь відпалити, то отримується м'яка мідь (марки ММ), яка має значно меншу міцність (до 200 МПа), але високу пластичність (видовження за розриву 30 - 40 %).

Тверду мідь використовують за необхідності забезпечення високої **▶ механічної міцності**, **▶ твердості** і **▶ зносостійкості**: для контактних провідів, ножів рубильників, колекторів тощо. М'яку мідь застосовують у вигляді прямокутного і круглого дроту для струмоведучих жил кабелів і обмоткових провідів.

Алюміній - метал сріблясто-білого кольору, є другим за застосуванням після міді провідниковим матеріалом (густина $2,7 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл}} = 660^\circ\text{C}$). Його отримують електролізом глинозему Al_2O_3 в розплаві кріоліту Na_3AlF_6 . Питомий опір алюмінію в 1,6 раза більший, ніж у міді, але алюміній в 3,5 раза легший від неї. Тому провідник з алюмінію рівної електропровідності легший. Він характеризується високою пластичністю і малою міцністю. Відпалений алюміній високої чистоти має $\sigma_p = 58 \text{ МПа}$; $\sigma_{0,2} = 20 \text{ МПа}$; твердість 25 НВ, $\epsilon = 85\%$, $\epsilon_{\text{ср}} = 40\%$.

Алюміній кристалізується в гранецентрованій ґратці, не має алотропічних модифікацій. Він - хімічно активний метал, але початкове окиснення спричинює утворення оксидної плівки товщиною до 10 нм, яка ізолює метал від навколишнього середовища і захищає його від подальшої корозії. Однак вона створює великий перехідний опір в місцях контакту алюмінієвих провідників і унеможливило паяння алюмінію звичайними методами. Тому з цією метою застосовують спеціальні пасту - припої, або ультразвукові паяльники.

Для створення надійної електричної ізоляції на поверхню алюмінію електрохімічною обробкою наносять оксидні плівки товщи-

ною 0,03 - 0,04 мм. Недоліком оксидної ізоляції провідників є її низька гнучкість і значна гігроскопічність. З оксидованого алюмінію виготовляють різні котушки без додаткової ізоляції. Найбільш широко оксидна ізоляція використовується в електролітичних конденсаторах та в деяких типах випрямлювачів і розрядників.

Важливе практичне значення має захист від гальванічної корозії контактів алюмінію з міддю, якщо область контакту зазнає впливу вологи. Тому для захисту від зволоження місця з'єднання алюмінієвих і мідних провідників покривають лаками. Алюміній стійкий в органічних кислотах, а в неорганічних тільки за їх низької концентрації.

Найбільш чистий алюміній вміщує 99,999 % Al і використовується переважно для наукових цілей. У промисловості в електротехніці використовують алюміній технічної чистоти АЕ з вмістом домішок не більше 0,5 %. Алюміній високої чистоти А97 застосовують для виготовлення фольги і корпусів електролітичних конденсаторів.

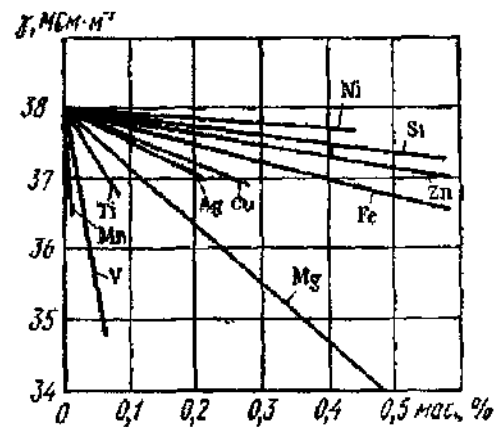


Рис. 3.14. Залежність питомої провідності відпаленого алюмінію від вмісту домішок

Домішки зменшують питому провідність цього металу (рис. 3.14). Найбільше зниження викликають домішки ванадію, титану і марганцю. Домішки, які не утворюють з алюмінієм твердих розчинів, мало впливають на його електропровідність.

3.6. Сплави високого опору

Сплави високого опору - це провідникові матеріали з питомим опором в нормальних умовах не меншим 0,3 мк·Ом·м. Вони застосовуються для електровимірювальних приладів (шунти, компен-

сацийні, додаткові та зразкові опори), для реостатів і електронагрівальних елементів. В електровимірювальних приладах ці сплави повинні мати якнайменше значення температурного коефіцієнта електроопору та малу термоелектрорушійну силу відносно міді. Найбільш поширені сплави на мідній основі - ► **манганін** і ► **константан** та 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 мкОм·м, 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 α_c 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 α_c константану близьке до нуля і, звичайно, має від'ємний знак. Вміст нікелю в сплаві відповідає максимуму ρ і мінімуму α_c (рис. 3.15). Константан добре протягується в дріт і прокатується в стрічку.

Константан застосовується для виготовлення реостатів і електронагрівальних 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 3 с) 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.

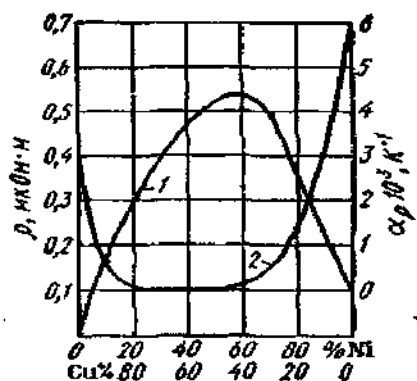


Рис. 3.15. Залежність питомого опору (1) і температурного коефіцієнта питомого опору (2) мідно-нікелевих сплавів від відсоткового вмісту компонентів

Хромо-нікелеві сплави (ніхром) та хромоалюмінієві сплави (фехраль) використовують для виготовлення нагрівальних елементів електричних печей, плиток і тощо. Їх склад та електротехнічні властивості наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Склад і властивості сплавів високого електроопору

Марка сплаву	Назва	Склад*			Питомий електроопір при 20 °С, Ом·мм ² /м	Темпер. коеф. електроопору (10 ⁻⁵), °К	Граничні температур °С
		Cr	Ni	Al			
X13Ю4	Фехраль	12–15	0,6	3,5 – 5,5	1,26	5	1000
1Х17Ю5	Сплав № 1	16–19	0,6	4,6 – 6,0	1,30	1	1000
1Х25Ю5	Сплав № 2	23–27	0,6	4,5 – 6,5	1,40	—	1150
X20Н80	Ніхром	20–23	75–80	0,2	1,11	1	1100
X15Н60	Ніхром	15–18	55–61	0,2	1,13	1,7	1050

* решта залізо

З них виготовляють дріт діаметром до 0,02 мм, стрічку перерізом 0,1 – 1 мм і більше. Згадані сплави стійкі проти хімічного руй-

У місцях контакту константових 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 константових резисторів у вимірювальних схемах. У той же час велике значення термо-е.р.с. дозволяє успішно використовувати константан для виготовлення мідь-константових термопар.

Хромо-нікелеві сплави (ніхром) та хромоалюмінієві

нування поверхні в газових середовищах за температур 550 °С і вище в ненавантаженому і слабонавантаженому станах. У результаті легування сталі хромом, алюмінієм чи кремнієм в процесі окиснення на поверхні сталі утворюються щільні оксиди Cr₂O₃, Al₂O₃, або SiO₂, дифузія крізь які утруднена. Тому тонка оксидна плівка гальмує процес подальшого окиснення. Чим вищий вміст легуючих елементів, тим вища окислостійкість сплаву і тим вищою може бути робоча температура.

Виникнення терморушійної сили. В області контакту двох різних металів між ними виникає контактна різниця потенціалів, зумовлена різними рівнями в них енергії Фермі E_F . 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 унеможливує 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.

3.7. Сплави для термопар

Переважна більшість термопар виготовляється з дротинок різних металічних сплавів. Якщо дві такі дротини зварити з одного кінця і розмістити цей кінець (гарячий спай) в нагріту зону, температуру якої вимірюють (рис. 3.16), а два інші холодні кінці приєднати до чутливого вольтметра (гальванометра), то внаслідок різниці температур між нагрітим спаєм і холодними кінцями термопари виникає різниця потенціалів. Ця різниця потенціалів фіксується гальванометром. Якщо термопару проградувати, тобто встановити точну залежність термо-е.р.с. від температури, то можна визначити температуру зони, в якій розміщений гарячий спай. Покази шкали гальванометра переводять в градуси.

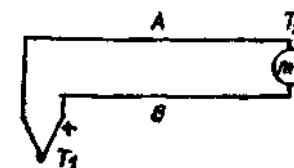


Рис. 3.16. Схема термопари

Матеріали для термопар повинні

бути жаротривкими і проявляти прямолінійну залежність електрорушійної сили від температури. Точність вимірювання температури підвищується із зростанням величини термо-е.р.с.

Для вимірювання температур найширше використовують наступні сплави: 1) *копель* (56 % Cu і 44 % Ni); 2) *алюмель* (95 % Ni, решта - Al, Si і Mn); 3) *хромель* (90 % Ni і 10 % Cr); 4) *платинородій* (90 % Pt і 10 % Rh) / *чисті метали мідь, платина і залізо*. З них виготовляють термопари для вимірювання температур: Уплати-нородій-платина до 1600°C; >мідь-константан і мідь-копель до 350°C; > залізо-константан, залізо-копель і хромель-копель до 600 °C; >хромель-алюмель до 1000 °C.

Найбільше значення термо-е.р.с. при даній різниці температур має термопара хромель-копель, а найменше термопара платино-родій-платина (рис. 3.17).

Завдячуючи високій хімічній інертності, найбільш високою точністю і стабільністю характеризуються платино-платинородієві термопари.

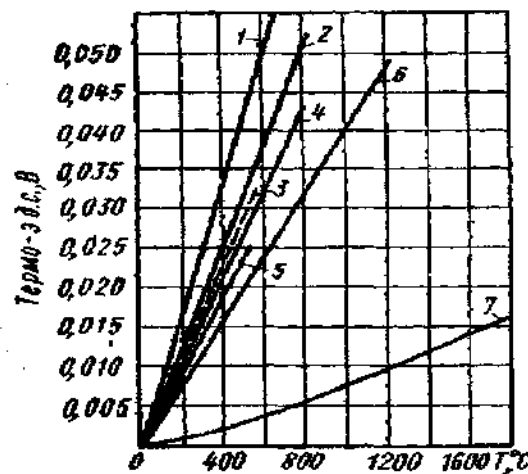


Рис. 3.17. Залежність термо-е.р.с. від різниці температур гарячого і холодного сплавів для термопар: 1 - хромель-копель; 2 - залізо-копель; 3 - мідь-копель; 4 - залізо-константан; 5 - мідь-константан; 6 - хромель-алюмель; 7 - платино-родій - платина

3.8. Благородні метали

Срібло - блискучий білий метал з кубічною гранецентрованою граткою (густина 10,5 г/см³ $t_{пл} = 960$ °C), стійкий до окиснення при

нормальній температурі. Має найвищу з усіх відомих речовин електро- і теплопровідність. Срібло - надзвичайно пластичний матеріал, його можна прокатати у фольгу товщиною 10⁻⁵мм. Модуль пружності срібла 7000 - 8200 МПа, модуль зсуву 2830 МПа, твердість за Брінеллем HB 25, границя міцності 138 - 144 МПа, відносне видовження 48 - 50 %. Висока питома теплоємність, теплопровідність і електропровідність забезпечують мінімальний нагрів контактів порівняно з іншими металами. Срібло також наносять на поверхню діелектриків і використовують як електроди при виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів.

Порівняно з іншими благородними металами срібло має нижчу хімічну стійкість і чутливе до утворення непровідних плівок сульфідів Ag₂S за взаємодії з вологим сірководнем. Тому срібні контакти не слід розміщати поряд з гумою, ебонітом та іншими сірковмісними матеріалами. Широке використання срібла обмежується його дефіцитністю та високою вартістю.

Золото - блискучий метал жовтого кольору з кубічною гранецентрованою граткою і високою пластичністю (густина 19,3 г/см³ $t_{пл} = 1064$ °C). Міцність золота за розтягу становить 150 МПа, а відносне видовження - близько 40 %. Його можна прокатати в листки товщиною 8·10⁻⁵ мм, які відсвічують синювато-зеленим кольором. Золото хімічно інертне. В електронній техніці використовується як контактний матеріал. Його перевага - стійкість до утворення сірчистих і оксидних плівок. Тонкі плівки золота використовують як напівпрозорі електроди у фоторезисторах та напівпровідникових елементах. Використовується золото також для нанесення корозійнотривких покриттів.

Платина - благородний сірувато-білий блискучий метал з кубічною гранецентрованою граткою (густина 21,45 г/см³ $t_{пл} = 1770$ °C). Чиста платина - надзвичайно пластичний метал, її можна прокатати у фольгу товщиною 0,0025 мм і витягнути в дротину діаметром 0,001 мм. Границя текучості 37 - 70 МПа, границя міцності 150 - 170 МПа, відносне видовження 50 %, відносне звуження 90 %. Вона практично не з'єднується з киснем і дуже стійка до різних хімічних реагентів, розчиняється лише в "*царській горілці*". Застосовується в пірометрії (термопари), для виготовлення хімічної

апаратури, в електропромисловості. Зокрема, тонкі дротинки з платини використовуються для рухомих систем в електрометрах та інших чутливих приладах.

Сплави платини з іридієм, які мають високу твердість, зносостійкість і окислостійкість, використовуються для виготовлення контактів. Чиста платина має низьку твердість і для контактів малоприматна.

Паладій - сріблясто-білий метал (густина $11,97 \text{ г/см}^3$, $t_{\text{пл.}} = 1552 \text{ }^\circ\text{C}$), який за зовнішнім виглядом нагадує платину. Кристалізується в гранецентрованій кубічній гратці. У відпаленому стані паладій м'який, пластичний і легко обробляється. Його границя міцності = 200 МПа, відносно видовження $\approx 40 \%$. Холодна прокатка збільшує твердість паладію у 2 - 2,5 рази. Паладій інтенсивно поглинає водень (до 900 об'ємів на 1 об'єм металу), який виділяється за нагріву до 300 - 500 $^\circ\text{C}$ і ним можна наповнювати деякі види газорозрядних приладів. Високодисперсний паладій широко застосовується як каталізатор, а сплави паладію з міддю і сріблом - для виготовлення контактів.

3.9. Тугоплавкі метали

До тугоплавких відносять метали з температурою плавлення вище 1700 $^\circ\text{C}$. Це > *вольфрам*, > *молібден*, > *тантал*, > *ніобій*, > *хром*, > *ванадій*, > *титан*, > *цирконій* і > *реній*. Названі метали за нагріву до високих температур на повітрі інтенсивно окислюються. Тому вони застосовуються для роботи нагрівальних елементів у вакуумі, або інертному середовищі.

Вольфрам - світло-сірий, дуже важкий (густина $19,3 \text{ г/см}^3$) і найбільш тугоплавкий ($t_{\text{пл.}} = 3410 \text{ }^\circ\text{C}$) з усіх металів. Його добувають шляхом збагачення мінералів вольфрамиту і шееліту до чистого WO_3 , який відновлюють воднем за температури 900 $^\circ\text{C}$ та отримують порошок металічного вольфраму. Пресуванням порошку за тиску 200 МПа отримують стрижні, які термообробляють в атмосфері водню, кують, волочать, прокатують у листи тощо. Внаслідок механічної обробки вольфрам набуває волокнистої будови, стає гнучким. За зменшення діаметра вольфрамового дроту до 5 мм, його міцність підвищується до 500 - 600 МПа, а тонких

ниток - до 3000 - 4000 МПа. Однак при нагріві до високих температур в деформованому вольфрамі внаслідок рекристалізації відбувається укрупнення зерен, і зниження його міцності та пластичності. Для поліпшення властивостей у вольфрам вводять присадки, які сповільнюють процес рекристалізації та ріст зерна. Найефективніше діє присадка оксиду торію Th_2O_3 .

Вольфрам входить до складу жароміцних і надтвердих сталей (швидкоріжучі, інструментальні) і твердих сплавів, використовуються в електротехніці (нитки ламп розжарювання) і радіоелектроніці (катоди і аноди електронних приладів), електровакуумній техніці (електроди, підігрівачі, пружини, гачки рентгенівських трубок тощо). З вольфраму виготовляють електроди для електродугового зварювання, контакти, інші вироби.

Молібден - світло-сірий метал з густиною $10,2 \text{ г/см}^3$, $t = 2620 \text{ }^\circ\text{C}$, хімічно стійкий (на повітрі окиснюється за температур вище 400 $^\circ\text{C}$). Промисловою сировиною для добування молібдену є молібденіт MoS_2 . Мікроструктура спеченого і деформованого молібдену подібна до мікроструктури аналогічно обробленого вольфраму, але після рекристалізації молібден, на відміну від вольфраму, характеризується відносно високою пластичністю. Серед інших тугоплавких металів у молібдену найменший питомий опір. Поєднання високої міцності і пластичності роблять його одним з кращих провідникових матеріалів для виготовлення складних деталей. З молібдену виготовляють сітки й електроди електронних ламп, рентгенівських трубок, деталі електровакуумних приладів, вакуумнощільних термічно узгоджених введів у балони з тугоплавкого скла. Молібден використовується також для нагрівальних елементів електропечей, які в захисній атмосфері можуть тривало експлуатуватися за температур до 1700 $^\circ\text{C}$.

Молібден часто вживають для легування сталей з метою підвищення їх жароміцності. Ці сталі використовуються в авіа- та автомобілебудуванні для виготовлення лопатей турбін, деталей реактивних двигунів та ін. Сплави молібдену кислотостійкі і використовуються для виготовлення апаратів хімічного виробництва. Зокрема сплав Fe-Ni-Mo стійкий в усіх кислотах (крім HF) до температури 100 $^\circ\text{C}$. Оксиди MoO_2 і MoO_3 є каталізаторами нафтохімічних та інших процесів.

Тантал - світло-сірий із синюватим вилиском метал (густина 16,6 г/см³ $t_{пл}$ = 2996 °C), який отримують із танталіту $Fe(TaO_3)_2$ методами порошкової металургії подібно як вольфрам і молібден. Відмінність полягає в тому, що процес спікання допресованих брусків проводять у вакуумних печах через те, що тантал поглинає гази і стає крихким. Деформацією за кімнатної температури з танталу отримують дріт, прутки, листи, стрічки і фольгу товщиною до 10 мкм. Тантал характеризується високою пластичністю. Його границя міцності залежить від механічної і термічної обробок і змінюється в межах від 350 до 1250 МПа.

У промисловості використовується ► *тантал підвищеної чистоти* T , ► *тантал високої чистоти* $ТЧ$ і ► *сплави танталу з ніобієм* $ТН$. Із танталу виготовляють аноди і сітки генераторних ламп, катоди і різні допоміжні деталі електровакуумних приладів. Тантал використовується у виробництві електролітичних і тонкоплівкових конденсаторів, які отримують анодуванням. Завдячуючи підвищеній діелектричній проникності п'ятиоксиду Ta_2O_5 ($\epsilon = 25$) досягається висока питома ємність конденсаторів. Тантал застосовують також для виготовлення тонкоплівкових резисторів. Тонкі плівки отримують методом катодного або іонно-плазмового розпилення в чистому аргоні.

Реній - один з найважчих тугоплавких металів (густина 21,032 г/см³, $t_{пл} = 3180$ °C). Отримують реній методом порошкової металургії. Реній і його сплави з вольфрамом можуть використовуватись у термopарах для вимірювання температур до 2800 °C у вакуумі, водні та інертному середовищі, а також у виробництві електроламп і електровакуумних приладів замість вольфраму. Тонкі плівки ренію, отримані шляхом випаровування електронним променем у високому вакуумі, використовують для створення прецизійних резисторів в інтегральних схемах. Сплави ренію з іншими тугоплавкими металами (W, Mo, Ta) високожароміцні і застосовуються для виготовлення деталей надзвукових літаків, ракет та ін.

Ніобій - світло-сірий *тугоплавкий метал* (густина 8,57 г/см³, $t_{пл} = 2500$ °C), хімічно стійкий, входить в склад хімічно- і жаротривких сталей, з яких виготовляються деталі ракет, ракетних двигунів, хімічної та нафтоперегінної апаратури. Ніобієм та його сплавами покривають тепловіддаючі елементи (твели) ядерних реак-

торів. Ніобій характеризується високим газопоглинанням за температур 400 - 900 °C. Тому в електровакуумних приладах деталі з ніобію одночасно виконують функції геттера.

Ванадій - метал, елемент V групи періодичної системи. ($t_{пл} = 1919$ °C, $T_{кип} = 3400$ °C, густина 6,11 г/см³). Вміст ванадію в земній корі такий же, як міді, хрому, нікелю. Чистий ванадій (99,9 %) - високопластичний, піддається різноманітним видам обробки тиском (куванню, штамповці, пресуванню тощо). Йому притаманні парамагнітні властивості, нижче 4,5 К він переходить у стан надпровідності.

Основне застосування знаходить як основа для створення жароміцних конструкційних сплавів, а також сплавів для ядерної енергетики, оскільки має високу корозійну стійкість та малий переріз захоплення теплових та швидких нейтронів.

За питомою міцністю (ст/у) в інтервалі температур 500... 1000 °C ванадій та сплави на його основі переважають такі на основі Ti, Fe, Ni, Co, Nb і тому є перспективними для оболонок тепло виділяючих елементів реакторів на швидких нейтронах і першої стінки термоядерних реакторів.

Інші метали

Хром - метал сіро-сталевого кольору (густина 7,19 г/см³, $t = 1850$ °C), має високу стійкість до окиснення і використовується для нанесення захисних покриттів. Хромування проводять в електролітах або насиченням хромом поверхневих шарів сталевих виробів шляхом дифузії. Хром є обов'язковим компонентом нержавіючих, кислотоопірних, жароміцних сталей і великої кількості сплавів (ніхроми, хромалі та ін.)

Залізо (сталь) - блискучий сріблясто-білий метал, який утворює поліморфні модифікації. За температур до 768 °C (точка Кюрі, рис. 3.18) стійка модифікація α -фаза з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою (густина 7,8 г/см³, $t_{пл} = 1539$ °C).

Для провідників застосовують м'яку сталь з вмістом вуглецю 0,10 - 0,15 %, електропровідність якої в 6 - 7 разів нижча, ніж у міді. Сталь - найбільш дешевий і доступний з високою механічною міцністю провідниковий матеріал. Питомий опір заліза залежить від вмісту домішок (рис. 3.19). Найбільший вплив на електричні властивості заліза мають домішки кремнію, які підвищують

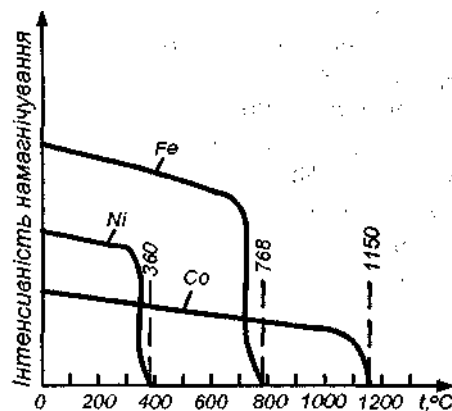


Рис. 3.18. Зміна магнітних властивостей заліза, нікелю і кобальту залежно від температури

питомий електроопір заліза. Це явище використовується при виплавці легованих кремнієм електротехнічних сталей, які, завдячуючи підвищеному питому електроопору, мають менші втрати на вихрові труми, ніж чисте залізо. Маловуглецеві сталі використовують для виготовлення корпусів електровакуумних і напівпровідникових приладів, які можуть працювати за температур до 500 °C.

Нікель - сріблясто-білий метал з жовтуватим відтінком (густина 8,9 г/см³; $t_{пл} = 1453$ °C); феромагнітний (точка Кюрі 358 °C, рис. 3.18). Нікель достатньо міцний ($\sigma_t = 400 - 600$ МПа) і пластичний (відносне видовження 30 - 50 %), дуже стійкий до корозії у повітрі, воді та розчинах лугів. Широко використовується у електровакуумній техніці як матеріал для арматури електронних ламп і деяких типів катодів, для виготовлення акумуляторів, хімічної апаратури, нанесення антикорозійних покриттів, а також як легуючий елемент магнітних і провідникових матеріалів.

Ртуть - рідкий за нормальної температури метал (густина 13,52 г/см³, $t_{пл} = -38,97$ °C), який за нагріву на повітрі легко окислюється. Застосовується в ртутних випрямлячах, контактних термометрах, ртутних електродах тощо. Ртуть і її сполуки надзвичайно отруйні.

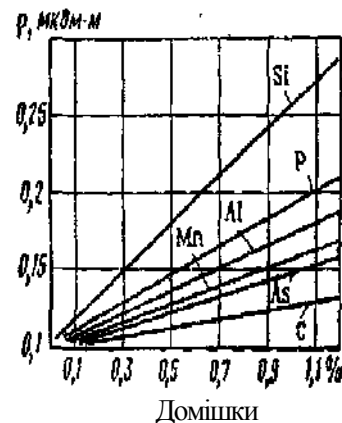


Рис. 3.19. Залежність питомого опору сталі від вмісту різних домішок

Свинець - м'який, пластичний, маломіцний метал сіруватого кольору (густина 11,34 г/см³, $t_{пл} = 327,4$ °C), має високий питомий опір і високі антикорозійні властивості; він стійкий проти дії води, сірчаної і соляної кислот, але розчиняється в азотній і оцтовій кислотах. Свинець та його сплави широко використовують для виготовлення захисних оболонок кабелів, плавких запобіжників, пластин свинцевих (кислотних) акумуляторів.

Олово - сріблясто-білий, м'який, тягучий метал (густина 7,29 г/см³, $t_{пл} = 232$ °C), який можна розкатати в тонку фольгу. За звичайної температури олово на повітрі не окислюється. Це метал, стійкий у воді, а розведені кислоти діють на нього повільно. Олово використовується для нанесення захисних покриттів, воно входить до складу бронз та сплавів для паяння. Тонка олов'яна фольга інколи використовується для обкладок конденсаторів.

Біметали. З метою зменшення витрат дорогих кольорових металів при виробництві деяких електротехнічних виробів використовують біметал. Це маловуглецева сталь (залізо), вкрита ззовні шаром міді або алюмінію. Для виготовлення біметалу застосовують:

► **гарячий спосіб**, за якого сталюну болванку поміщують у форму, а проміжок між нею і стінками форми заповнюють розпаленою міддю (алюмінієм); після охолодження біметалеву заготовку прокатують і протягують у виріб;

► **холодний (електролітичний) спосіб** - мідь осаджують на сталевий дріт в гальванічних ваннах. До холодного способу можна віднести отримання біметалу прокаткою плоскої біметалічної заготовки, зварюванням вибухом.

Біметал має електричні та механічні характеристики, проміжні між властивостями мідного (алюмінієвого) та сталевих провідників. Його застосовують для ліній зв'язку, електропередач, шин тощо. У теплових реле, вимикачах, термометрах і т. п. застосовується термічний біметал, який складається з двох пластинок різних металів з неоднаковими коефіцієнтами термічного розширення, зварених між собою. За нагрівання біметалева пластинка прогинається.

3.10. Електричні властивості металічних сплавів

Багато металів з однаковим типом кристалічної ґратки змішуються в будь-яких пропорціях і утворюють безперервні ряди твердих розчинів (рис. 3.20).

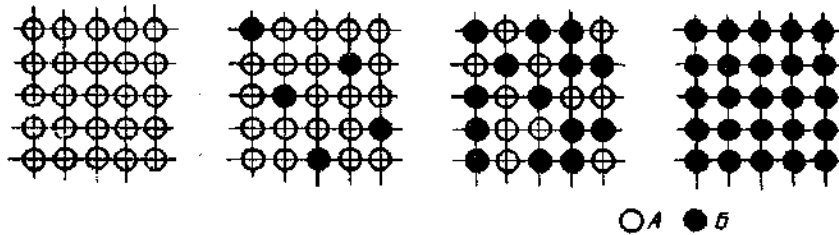


Рис. 3.20. Кристалічні ґратки твердих розчинів заміщення при необмеженій розчинності компонентів

Розміщення атомів різних металів у вузлах кристалічної ґратки спричиняє значні флуктуації періодичного потенціального поля кристала і сильне розсіювання електронів. Повний опір сплаву можна виразити у вигляді суми:

$$\rho_{\text{спл}} = \rho_T + \rho_{\text{зал}}$$

де ρ_T - опір, викликаний розсіюванням електронів тепловими коливаннями ґратки; $\rho_{\text{зал}}$ - залишковий опір, зумовлений розсіюванням електронів на неоднорідностях сплаву.

В бінарних твердих розчинах А-Б залишковий опір зростає як при добавці атомів Б до металу А, так і при добавці атомів А до металу Б. Залишковий опір досягає максимального значення за рівного атомного вмісту кожного з компонентів.

3.11. Припої і флюси

***Припої** - це чисті метали та спеціальні сплави, які застосовуються для створення механічно міцних швів за з'єднання металевих частин паянням.

Припої повинні мати температуру плавлення, значно нижчу, ніж з'єднувані ними металеві частини. Припої поділяють на ► *легкоплавкі* та ► *тугоплавкі*.

Легкоплавкі (м'які) припої мають температуру плавлення нижче 427 °С. Їх границя міцності на розтяг рівна 16 - 100 МПа. У процесі паяння розплавлений припій під дією капілярних сил заповнює зазор між відповідно пригнаними поверхнями з'єднуваних деталей. Якщо розплавлений припій утворює на поверхні металу суцільну плівку, то вважають, що він змочує поверхню. Змочування металу припоєм відбувається в тому випадку, коли сили притягання між атомами припою і атомами металу більші, ніж між атомами в самому припої. На поверхні розділу між припоєм і металом часто відбуваються інтерметалічні реакції. Отже, змочування за своєю природою частково являє собою хімічне явище. **Дуже важлива властивість припою** - його здатність розтікатися по поверхні металу і в рідкому стані проникати в вузькі зазори під дією капілярних сил. За надто великого зазору припій їх не здатен заповнити. У більшості випадків зазор може становити до 0,13 мм. Для отримання якісних паяних з'єднань його поверхні повинні бути чистими і вільними від оксидів. *Старанне очищення поверхні основного металу перед паянням від бруду, жиру і оксидів сприяє отриманню міцних паяних з'єднань.*

Найбільшу частину з усіх застосовуваних м'яких припоїв займають олов'янисто-свинцеві. Вони мають велику рідкотекучість і застосовуються для з'єднання більшості металів. За паяння цими припоями оптимальний розмір зазору складає від 0,08 до 0,13 мм, чим забезпечується досить висока міцність паяних швів. Олов'янисто-свинцеві припої мають задовільну корозійну стійкість в більшості середовищ. Деякі марки та характеристики м'яких припоїв наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Легкоплавкі припої

Марка припою	Склад припою, % маси	Температура плавлення, °С	Руйнівне напруження за розтягу, МПа	Галузь застосування
1	2	3	4	5
—	Олово чисте	232	50	Паяння і лудіння міді, латуні та бронзи з утворенням корозійностійких швів

продовження табл. 3.3

1	2	3	4	5
ПОС-90	Олово 89- 91, свинець 11-9	220	49	Те саме
ПОС-61	Олово 60-61, свинець 40-39	190	43	Те саме, але при більш низькій температурі
ПОС-40	Олово 39-41, свинець 61-59	238	38	Те саме, але при підвище- ній температурі
ПОС-10	Олово 9-10, свинець 91-90	299	32	Те саме, але для паяння частин невідповідального призначення
ПОССу 40-2	Олово 39-41, сурма 2, сви- нець – решта	229	43	Паяння і лудіння мідних проводів й частин з міді та бронзи з утворенням гер- метичних швів
ПЗ00	Цинк 60, кадмій 40	300	35	Паяння проводів і деталей з алюмінію та алюмінієвих сплавів

Тугоплавкі (тверді) припої. Температура плавлення вища 427 °С, границя міцності - 100-500 МПа. Найбільш поширеними твердими припоями є >мідно-цинкові (ПМЦ-54, ПМЦ-48 та ін.) і >мідно-срібні (ПСр) з різними добавками, а також >сплави алюмінію з міддю, цинком і кремнієм. Найчастіше застосовуються мідно-срібні припої, які характеризуються малим питомим електроопором і тому широко застосовуються для паяння струмопровідних елементів з чорних і кольорових металів.

У табл. 3.4 наведено основні марки і характеристики тугоплавких припоїв.

Для паяння алюмінієвих проводів та деталей з алюмінію і його сплавів застосовують припої на алюмінієвій основі з добавками міді, кремнію і олова. Отримані паяні шви характеризуються підвищеною механічною міцністю і стійкістю проти атмосферної корозії. Мідно-цинкові припої застосовують для паяння мідних, латунних, бронзових і сталевих деталей, але шви крихкі і нестійкі проти вібрацій та ударних навантажень.

Флюси для паяння бувають ►рідкі (водний розчин хлористого цинку, спиртовий розчин канифолі та ін.), ►тверді порошкоподіб-

Таблиця 3.4

Тугоплавкі припої

Марка припою	Склад припою, % маси	Температура плавлення, °С	Руйнівне напруження при розтягванні, МПа	Галузь застосування
ПСр-72	Срібло 72, мідь 28	779	36	Паяння струмопровідних деталей з міді, латуні бронзи та інших металів, крім алюмінію
ПСр-70	Срібло 70, мідь 26, цинк 4	775	35	Те саме, але з більшою стійкістю проти корозії
34-А	Алюміній 66, мідь 28, кремній 6	525	18	Паяння деталей з алюмі- нію та його сплавів з ут- воренням швів з підви- щеною механічною міц- ністю

ні (бура, борна кислота, канифоль тощо), які за нагріву сприяють або пришвидшують змочування металів припоями. **Основне призначення флюсу** видалення з поверхні оксидів та інших забруднень і захист від повторного окиснення поверхонь за нагріву. Флюс знижує поверхневий натяг розплавленого припою, покращує його текучість і зчеплення з металом. Він повинен легко витіснятися розплавленим припоєм з поверхні металу. Флюс наноситься на поверхні перед паянням і повинен мати наступні властивості:

- при температурі паяння бути рідким і ефективно видаляти оксиди та інші неметалічні матеріали;
- захищати попередньо зачищену поверхню від повторного окиснення;
- витіснятися припоєм;
- покращувати змочування поверхні металу припоєм.

Склад і деякі властивості окремих флюсів наведено в табл. 3.5.

Найбільш поширена думка, що під дією флюсу оксидні плівки металу і припою розчиняються або розпушуються та спливають на поверхню основної маси флюсу. Оскільки більшість оксидів є тугоплавкі, то в цьому випадку вважають, що флюс змочує, коагулює і переводить у завислий стан оксиди, розпушені під прони-

Таблиця 3.5

Флюси для паяння м'якими припоями

Марка, або назва флюсу	Склад, % маси	Загальна характеристика і галузь застосування
Каніфоль світла	Ефіри смоляних кислот	Для паяння струмопровідних частин з міді, латуні та бронзи
КЭ	Каніфоль 25-30, етиловий спирт 70-75	Те саме
ВТС	Вазелін 66, триетано-ламін 6,5; саліцилова кислота 6,3; етиловий спирт 21,2	Для паяння провідникових виробів з міді, латуні, алюмінію, бронзи, константану, манганіну, срібла, платини та її сплавів
ФА	Солянокислий анілін 1,8; гліцерин 1,5; каніфоль 96,7	Те саме, більш активізований флюс, який добре очищає поверхні з'єднуваних металів
ФП	Каніфоль 16, хлористий цинк 4, вазелін 80	Для паяння виробів з чорних і кольорових металів з утворенням швів підвищеної міцності (не потребує наступного промивання водою)

каючою і послаблюючою дією флюсу. Потім розплавлений флюс утворює на поверхні очищеного металу захисний шар, який запобігає повторному утворенню кисневих плівок.

Рідкий припій заміщує флюс і взаємодіє з основним металом. Шар припою поступово, та з припиненням нагріву твердне. Схематично механізм дії флюсу наведено на рис. 3.22.

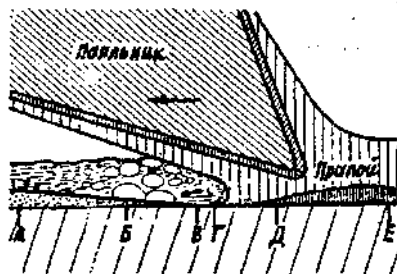


Рис. 3.22. Механізм дії флюсу. А — флюс на поверхні окисненого металу, Б - киплячий флюс видаляє оксиди, В - основний метал в контакті з розплавленим флюсом, Г - заміщення розплавленого флюсу рідким припоєм, Д - взаємодія припою з основним металом, Е - затверділий припой

Таблиця 3.6.

Флюси для паяння твердими припоями

Склад, % маси	Загальна характеристика і галузь застосування
Прожарена бура	Для паяння виробів з міді, бронзи, платини, нікелю і сталей (мідними і мідно-цинковими припоями). Залишки флюсів видаляють, щоб уникнути корозії
Плавлена бура 21, борна кислота 70, фтористий калій 9	Для паяння виробів з міді, латуні, бронзи, нержавіючої та вуглецевої сталі (мідними припоями)
Борний ангідрид 36, фтористий калій 42, фтороборат калію 22	Те саме, але для паяння срібними припоями
Фтористий натрій 10, хлористий цинк 8, хлористий літій 32, хлористий калій 50	Для паяння деталей з алюмінію і його сплавів (алюмінієвими припоями). Залишки флюсу видаляють, щоб уникнути корозії

За паяння міді, латуні і бронз легкоплавкими припоями на свинцевій основі застосовують каніфоль, розчин каніфолі в етиловому спирті та інші сполуки на її основі. Оскільки каніфоль є слабо-активним флюсом, то перед її нанесенням поверхні металів, які спаюють, старанно зачищають. За паяння тугоплавкими припоями каніфоль та інші флюси, які розкладаються за високих температур, застосовувати не можна. Для високотемпературного паяння сталі, міді та мідних сплавів використовують буру $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ і її суміш з борною кислотою H_3BO_3 . Для паяння алюмінію в якості флюсів використовують особливо активні речовини - сполуки на основі хлористого літію, фтористого натрію, хлористого цинку і хлористого калію. Температура плавлення твердого флюсу повинна бути нижчою від температури плавлення припою, а температура паяння - меншою від температури термічного розпаду флюсу. Залишки флюсу виводять промиванням швів гарячою водою за допомогою щіток.

3.12. Неметалічні провідникові матеріали

Електровугільні вироби. До них відносять щітки для електричних машин, контактні деталі тощо. Електровугільні вироби отримують із суміші графіту, сажі, коксу, антрациту методами по

рошкової металургії. У виробництві електровугільних виробів використовують зв'язуючі речовини - кам'яновугільні та синтетичні смоли (бакелітові, кремнійорганічні та ін.).

З метою видалення з вуглецевих матеріалів летких речовин їх, за винятком графіту і сажі, прожарюють за 1200 - 1300 °С, потім подрібнюють до порошкоподібного стану і в певних пропорціях змішують (іноді з добавками металічних порошоків). У суміш порошоків вводять зв'язуючі речовини (смоли) і старанно перемішують. Отриману електровугільну суміш сушать, розмелюють, просівають і дістають порошок, з якого пресуванням в сталених пре-сформах отримують різноманітні електровугільні вироби. Якщо зв'язуючий матеріал розм'якшується або полімеризується, то пресування проводять за підвищених температур і тисків 100 -300 МПа.

Вироби значної довжини виготовляють видавлюванням нагрітої пластичної вихідної маси крізь сталений мундштук. Отримані заготовки випалюють за температур до 1300 °С для спікання вихідних частинок і цементації їх коксом, який утворюється із зв'язуючих органічних речовин.

Електровугільні вироби, які містять сажу, кокс та інші неграфітові компоненти, після випалювання додатково графітизують за температур 2400 - 2800 °С. Неграфітові компоненти у цьому випадку перетворюються в графіт, а більшість інших домішок випаровується.

Після графітизації електрощітки (групи ЕГ) набувають м'якості, зменшується коефіцієнт тертя і різко знижується питомий електроопір. За наявності в матеріалі значної пористості його просочують лаками, воскоподібними речовинами, а інколи розплавленими металами - оловом, свинцем тощо. Після просочування металами електровугільних виробів різко зростає їх механічна міцність і електропровідність. Остаточну форму і чистоту поверхні вони набувають після механічної обробки, яка завершується свердлінням отворів під гнучкі з'єднувальні проводи.

Для створення надійного електричного контакту між тілом електрощітки і щіткотримачем в електричній машині частину поверхні електрощіток після механічної обробки обміднують гальванічним методом на товщину 10-15 мкм. Гнучкі (багатожильні) про-

води закріплюють у тілі електрощітки їх розвальцьовуванням, па-янням або запресовуванням.

Поміж електровугільних виробів найширше застосовуються щітки для електричних машин, а саме: графітні, вугільно-графітні, металографітні та електрографітні.

Графітні щітки виготовляють з натурального графіту. Вони працюють безшумно і застосовуються за швидкостей від 20 до 40 м/с. їх питомий опір становить 8-30 мк·Ом·м.

Вугільно-графітні щітки вироблять з графіту, коксу і зв'язуючих смол. Вони мають підвищену твердість, механічну міцність і абразивність. Ці щітки застосовують за колових швидкостей 10-40 м/с. їх питомий опір становить 100 - 400 мк·Ом·м.

Металографітні щітки виготовляють з порошоків міді і графіту, інколи з добавками порошку олова й срібла. Ці щітки мають низький питомий електроопір (0,3-0,8 мк·Ом·м), а при зниженому вмісті міді їх питомий електроопір 5-22 мкОм·м. їх використовують за колових швидкостей 20 - 25 м/с.

Електрографітні щітки виготовляють з графіту, коксу, сажі та зв'язуючих смол. Після пресування і випікання щітки графітизують при 2500 °С. для збагачення їх графітом та забезпечення підвищеної механічної міцності. Питомий електроопір щіток 2-75 мкОм·м. Вони використовуються в електричних машинах з важкими умовами комунікації. Допустима колова швидкість для них 40 - 90м/с.

Контактні деталі для транспорту - електровозів, тролейбусів та інших струмознімальних пристроїв мають у готовому вигляді дуже малий питомий електроопір (0,02 - 0,05 мкОм·м). їх виготовляють з електровугільних та мідіо-графітових матеріалів.

** Металокерамічні матеріали та вироби - матеріали, які отримують пресуванням металевих порошоків з наступним їх спіканням за температур 1000 - 1400 °С.*

Один з двох або більше порошоків повинен мати вищу температуру плавлення порівняно з іншими. За спікання більш легкоплавкі порошки плавляться і заповнюють пори між частинками більш тугоплавкого металу, чим забезпечується монолітність металокерамічних виробів. Для отримання пористої металокераміки за-

стосовують твердофазне спікання частинок порошку металу з приблизно однаковою температурою плавлення. Для виготовлення металографітних щіток електричних машин, електричних контактів тощо у вихідну суміш металевих порошоків додають порошок графіту.

Технологію порошкової металургії застосовують у випадках складності отримання виробів з надто тугоплавких металів або за необхідності отримати вироби із сплавів металів і неметалів. Ця технологія дає можливість отримувати готові вироби з точно заданими розмірами без додаткової механічної обробки, в результаті чого підвищується продуктивність праці і зменшуються втрати на відходи.

Металокерамічні контакти вигідно вирізняються, порівняно з металевими, *високою зносостійкістю*. В електричних машинах низької напруги застосовують металокерамічні контакти, виготовлені на основі порошоків срібла й оксиду кадмію ($\text{CdO} \approx 15\%$).

З порошоків срібла, вольфраму (40 - 50 %) і нікелю (2-3 %) виготовляють металокерамічні високоструміві дугорозмикаючі контакти. Металокерамічні контакти, отримані з порошоків міді і графіту (3-5 %), мають високу стійкість проти зварювання при розмиканні великих струмів (30 000 - 10 000 А). У цих контактах пористість не повинна перевищувати 2-5 %. З цією метою металокерамічні вироби повторно пресують і відпалюють.

Для виготовлення тонко плівкових резисторів застосовують металодіелектричні композиції з неорганічною зв'язкою - *кермети*. У них в широкому діапазоні можна змінювати питомий електроопір. Найчастіше застосовується мікрокомпозиція Cr-SiO_2 , тонкі плівки якої дістають методом термічного випаровування і конденсації у вакуумі з наступною термообробкою для стабілізації властивостей. У процесі термообробки проходить витіснення оксидного прошарку між зернами з утворенням фази Cr_3Si . У результаті опір міжзеренних ізоляційних прошарків замінюється опором контактування.

Для товстоплівкових мікросхем використовують резистори, отримані на основі композиції скла з паладієм і сріблом. Порошок скла з розміром зерен 2-5 мкм змішують з порошком срібла і паладію і додають органічну зв'язку з розчинником. Отриману масу наносять на керамічну підкладку і спікають у звичайній атмосфері.

Провідникові матеріали на основі оксидів. Чисті оксиди металів у нормальних умовах є діелектриками. При неповному окисненні, а також за добавок деяких домішок їх провідність різко зростає. Такі матеріали можна використовувати як контактні і резисторні шари. Плівки отримують термічним вакуумним випаровуванням і конденсацією з наступним відпалом на повітрі й окисдуванням відкладеного на діелектричну підкладку металічного олова та ін. Матеріалами найчастіше служать оксидні плівки олова SnO_2 або індію In_2O_3 . Вони добре зчіплюються з керамічною (скляною) підкладкою і при неповному окисненні металу питомий опір плівок складає $10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Такі плівки можна використовувати за температур нижче 240°C , оскільки при більш високих температурах відбувається доокислення і незворотні зміни електроопору. Тонкі плівки олова та індію мають високу прозорість у видимій та інфрачервоній частині спектра.

Висока оптична прозорість і підвищена електропровідність дво-окису олова і оксиду індію дають можливість застосовувати їх для електропровідних покриттів на внутрішніх стінках скляних балонів електровакуумних приладів, електродів електролюмінісцентних ламп конденсаторів тощо.



ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОТРОЛЮ

1. Як і чому змінюється опір провідників зі збільшенням температури?
2. Як змінюється опір металу при наявності домішок?
3. Чому опір твердого сплаву вищий, ніж: у його складових компонентів?
4. Що таке температурний коефіцієнт питомого опору?
5. Які сплави застосовуються для виготовлення термопар?
6. Які властивості провідникових матеріалів є основними?
7. Від яких чинників залежить питомий опір провідників?
8. За яких умов виникає надпровідність?
9. Який зв'язок між: надпровідністю матеріалів і надплинністю гелію?

РОЗДІЛ 4



НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

4.1. Загальні положення

Велика група речовин за електричною провідністю займає проміжне місце між призначено добрим діелектриками як, наприклад, янтар (бурштин), кварц чи фарфор (порцеляна), та металевими провідниками (табл. 4.1). Цю групу речовин назвали *напівпровідниками*.

Таблиця 4.1 Питомий опір електротехнічних матеріалів різних класів за 20 °C і постійної напруги

Клас матеріалів	$\rho, \text{Ом м}$	Число порядків за значенням	Знак у широкому інтервалі температур	Тип електропровідності
Провідники	$10^{-8} - 10^{-4}$	4	додатний	електронна
Напівпровідники	$10^{-6} - 10^{+10}$	16	від'ємний	електронна
Діелектрики	$10^{+7} - 10^{+18}$	11	від'ємний	іонна, електронна

Проходження електричного струму через напівпровідники, як і метали, не спричинює в них хімічних змін. Це значить, що вільними носіями зарядів в обох випадках є електрони, а не іони. Однак суттєва кількісна відмінність між питомими провідностями вказує на існування глибоких якісних відмінностей в умовах проходження струму через метали і напівпровідники.

Різниця в провідності напівпровідників і металів за нормальних температур зумовлена величезною різницею в концентрації електронів провідності. В 1 м³ металів знаходиться $10^{28} - 10^{29}$ вільних електронів, тобто на кожний атом металу припадає по одному вільному електрону, тоді як у напівпровідниках концентрація вільних електронів у сотні тисяч і навіть мільйони разів нижча.

За підвищення температури швидкість впорядкованого переміщення електронів провідності під дією поля як у металах, так і напівпровідниках зменшується. Тому в металах електропровідність із зростанням температури знижується. У напівпровідниках, незважаючи на подібне зниження швидкості впорядкованого переміщення електронів, провідність різко зростає. Це однозначно свідчить про те, що з підвищенням температури в напівпровідниках має місце надшвидке зростання числа вільних електронів, тоді як у металах кількість електронів провідності практично не залежить від температури.

За температур, близьких до абсолютного нуля, питомий опір провідників різко знижується, а провідність зростає і може переходити в надпровідність. У напівпровідниках спостерігається протилежна картина. Внаслідок різкого зменшення числа електронів провідності за наднизьких температур питомий опір напівпровідників близький до опору діелектриків. За високих температур кількість вільних електронів зростає настільки, що провідність напівпровідників співмірна з провідністю металів.

4.2. Механізм провідності напівпровідників

Напівпровідники з власною провідністю, або напівпровідники типу i. Розглянемо власну провідність ідеально чистого напівпровідника з ідеально впорядкованим розміщенням атомів у вузлах кристалічної ґратки на прикладі германію або кремнію - елементів IV групи періодичної системи елементів. Атоми у вузлах ґратки зв'язані між собою чотирма валентними електронами (рис. 4.1,а). Такий зв'язок називають ковалентним, або парноелектронним. За температури, близької до абсолютного нуля, усі валентні електрони беруть участь у створенні міжатомних зв'язків і заповнюють всі енергетичні рівні валентної зони, а в зоні провідності електрони відсутні (рис. 4.1, б). Зона провідності відмежована від валентної забороненою зоною $\Delta W = W_c - W_v$, де W_c - нижня межа зони провідності; W_v - верхня межа валентної зони.

Ширина забороненої зони ΔW для германію і кремнію дорівнює відповідно 0,72 і 1,12 еВ. Для переходу електрона з валентної зони в зону провідності необхідна додаткова енергія, яка дорів-

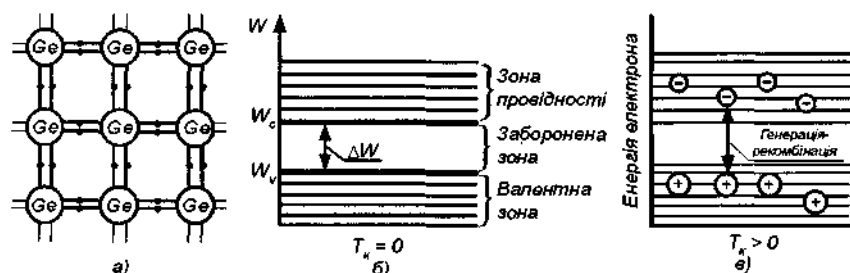


Рис. 4.1. Кристалічні ґратки чистого германію (а), енергетична діаграма напівпровідника при $T_k = 0$ і відсутність вільних зарядів (б), поява носіїв вільних зарядів (електронів і дірок) при $T_k > 0$ (в)

нює енергії забороненої зони або більша від неї. Цю енергію електрон може отримати за нагрівання кристала напівпровідника, опромінення його світлом або з інших додаткових джерел енергії.

Чим температура вища за абсолютний нуль, тим більша частина валентних електронів переходить у зону провідності, звільняючи енергетичні рівні у валентній зоні. Вакантний енергетичний рівень у валентній зоні названо діркою провідності, яка поводить себе як додатний заряд, що дорівнює заряду електрона. Кількість дірок у валентній зоні дорівнює кількості вільних електронів у зоні провідності (див. рис. 4.1, в). Утворення пар електрон-дірка називають **генерацією пар носіїв зарядів**.

Електрони в зоні провідності і дірки у валентній зоні перебувають у хаотичному тепловому русі, і дірки можуть захоплювати електрони. Це призводить до зникнення пар електрон-дірка, тобто відбувається їх рекомбінація (див. рис. 4.1, в).

За температури, вищої від абсолютного нуля, коли в кристалі існує певна концентрація пар електрон-дірка, під дією зовнішнього електричного поля відбувається напрямлене переміщення електронів у зоні провідності проти напрямку поля і переміщення дірок у валентній зоні у напрямку поля. Таким чином, провідність кристала визначається переміщенням як електронів, так і дірок, тому густина струму

де J_e і J_d - відповідно густина електронного і діркового струмів. У напівпровідниках з власною електричною провідністю кількість електронів N_e і N_d дірок однакова. Оскільки рухливість електронів дещо більша, ніж рухливість дірок, то електронний струм I_e трохи більший, ніж I_d . Рухливість визначається шляхом, який проходить електрон або дірка за одну секунду за напруженості $E = 1$ В/см. Оскільки рухливість є відношення швидкості переміщення електрона V_e , чи дірки V_d , до напруженості електричного поля в напівпровіднику, то рухливість електрона $\mu_e = V_e / E$, а рухливість дірки $\mu_d = V_d / E$. Тоді **електронний і дірковий струми визначаються** за формулами:

$$I_e = N_e e V_e = N_e e \mu_e E;$$

$$I_d = N_d e V_d = N_d e \mu_d E$$

де e - заряд електрона чи дірки, - напруженість електричного поля, N_e і N_d відповідо число електронів і дірок. Сумарний струм у напівпровіднику:

$$I = I_e + I_d, \text{ або } I = N_e e \mu_e E + N_d e \mu_d E. \quad (4.1)$$

При власній електропровідності напівпровідника число електронів і дірок однакове, тобто

$$N_e = N_d = N.$$

Тоді вираз (4.1) набуває такого вигляду:

$$I = N \cdot e (\mu_e + \mu_d) E. \quad (4.2)$$

Необхідно підкреслити, що як електронна, так і діркова провідність зумовлені переміщенням лише електронів відповідно у зонах провідності і валентній. Рух електронів у валентній зоні створює враження, що в напрямку електричного поля переміщуються позитивно заряджені іони, чого насправді немає. Сказане наглядно можна проілюструвати на ланцюжку атомів напівпровідника, в одному місці якого утворився позитивно заряджений іон (рис. 4.2) внаслідок переходу електрона з валентної в зону провідності. Під дією сил поля електрон послідовно переноситься від атома 2 до іона 1. Атом 2 стає при цьому позитивно зарядженим іоном і до нього переходить електрон від атома 3, який перетворюється в позитивно заряджений іон і т. д.

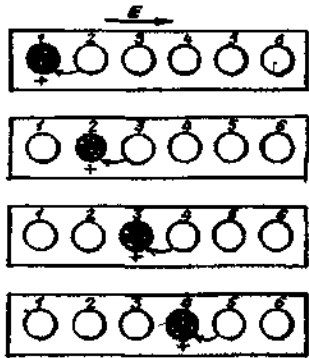


Рис. 4.2. Модель "діркової" провідності в напівпровідниках: світлі кружечки - нейтральні атоми, темний кружечок - додатний іон. Стрілками вказано напрямок послідовних переходів електронів від нейтральних атомів до іонів. Місце додатного заряду переміщується у зворотному напрямі - по полю

Таким чином, у валентній зоні напівпровідника відбувається переміщення електронів від нейтральних атомів проти зовнішнього поля, рівнозначне переміщенню дірок у напрямку поля.

За кімнатної температури концентрація електронів і дірок становить: для германію - $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, для кремнію - $1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. З підвищенням температури ці концентрації різко зростають (при 800°C - у сотні мільйонів разів). Тому провідність напівпровідників з підвищенням температури різко зростає, незважаючи на протидіюче цьому зростанню зниження швидкості впорядкованого переміщення вільних електронів.

4.3. Напівпровідники n-типу

Ідеально чистих напівпровідників у природі не існує, а найменші сліди домішок докорінно змінюють їх властивості. Розглянемо вплив домішок на прикладі дуже важливих для техніки напівпровідників германію чи кремнію.

Якщо невелику частину атомів чотиривалентного германію чи кремнію в їх кристалічних ґратках замінити п'ятивалентними атомами миш'яку As (арсену) або сурми Sb (стибію), то чотири з п'яти валентних електронів атомів домішки утворюють міцні ковалентні зв'язки із сусідніми атомами германію (кремнію), а п'ятий електрон атома домішки зв'язаний з атомами германію (кремнію) дуже слабо і навіть за кімнатної температури за рахунок теплового руху переходить у зону провідності, тобто стає вільним

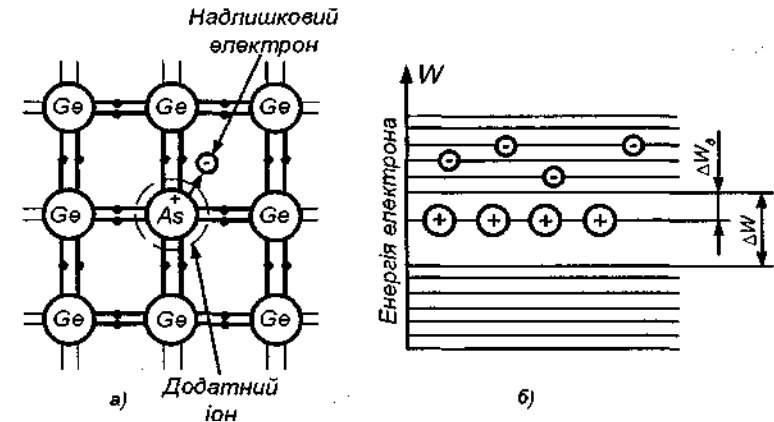


Рис. 4.3. Виникнення вільного електрона в кристалі напівпровідника n-типу (а) і відображення цього процесу на енергетичній діаграмі (б)

(рис. 4.3, а). При цьому домішковий атом стає позитивно зарядженим ближче нижньої межі зони провідності (рис. 4.3, б). На рисунку схематично зображено чотири таких позитивних іонів у вигляді кружечків з хрестиками в середині. Оскільки вплив п'ятивалентних домішкових атомів миш'яку або сурми на чотиривалентні атоми германію або кремнію якісно однаковий, то в подальшому розглядатимемо тільки напівпровідник германій з домішками миш'яку.

Майже кожен атом домішки миш'яку спричинює утворення одного вільного електрона. Дірка при цьому не створюється, тому що іон миш'яку міцно зв'язаний з чотирма сусідніми атомами германію подвійними зв'язками і перехід електронів від сусідніх нейтральних атомів германію до іонів миш'яку унеможливується.

Кількість електронів, яка переходить під дією теплової чи іншої енергії з домішкового рівня в зону провідності в багато разів перевищує ту кількість електронів, що переходить в зону провідності з валентної зони, тому що енергія зв'язку ΔW_d домішкового електрона дорівнює $0,01 \text{ eV}$, а ΔW власного - $0,7 \text{ eV}$, тобто $\Delta W_d < \Delta W$. Отже, кількість електронів у кристалі чотиривалент-

ного матеріалу за внесення п'ятивалентної домішки в багато разів перевищує кількість дірок. Тому такий напівпровідник має, головним чином, електронну провідність, яку названо провідністю n-типу (від слова *negativ*) і є «напівпровідником, а домішка, що віддає електрони, називається донорною. Хоча кількість атомів домішки дуже незначна - приблизно 1 атом на $10^7 - 10^8$ атомів германію провідність германію за рахунок домішки за кімнатної температури зростає в багато разів.

4.4. Напівпровідники p-типу

При введенні у чотиривалентний кристал германію домішки тривалентного індію (In) чи галію (Ga), частина домішкових атомів заміщує у вузлах ґратки атоми основного кристала (рис. 4.4, а). Для утворення ковалентних зв'язків між атомом домішки і германію не вистачає одного електрона, тому що атоми домішки мають лише три валентні електрони і атом домішки утворює міцні зв'язки тільки з трьома сусідніми атомами германію, а четвертий зв'язок є незаповнений. У цих умовах будь-який електрон сусіднього атома германію може легко відірватись і заповнити цей зв'язок, при цьому атом індію виявиться зарядженим негативно, а атом германію, що віддав свій валентний електрон, перетвориться в іон (дірку), який зв'язаний із сусідніми атомами тільки трьома зв'язками.

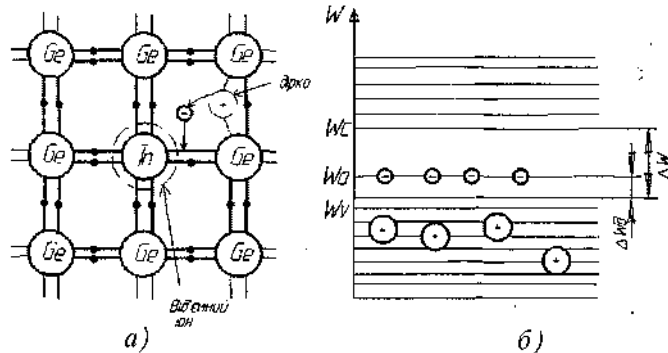


Рис. 4.4. Виникнення дірки в кристалі напівпровідника p-типу (а) і відображення цього процесу на енергетичній діаграмі (б)

Ці дірки можуть бути заповнені електронами за рахунок розриву будь-яких зв'язків сусідніх атомів германію, у результаті чого дірки переміщуються, а атоми домішок перетворюються в нерухомі негативно заряджені іони. Енергетичний рівень домішки W розміщений у забороненій зоні біля валентної зони, тому досить невеликої енергії $\Delta W_d = W_a - W_v \leq \Delta W$, щоб електрони з верхніх рівнів валентної зони перескочили на рівні атомів домішок і заповнили відсутні зв'язки (див. рис. 4.4, б). Внаслідок цього у валентній зоні виникають вакантні енергетичні рівні (дірки), а атоми домішок стають негативними іонами. Отже, кількість дірок у напівпровіднику з тривалентними домішками збільшується, а кількість електронів провідності не зростає.

Напівпровідники з надлишком дірок мають діркову провідність і називаються **напівпровідниками p-типу (positive), або **p - напівпровідниками**. Домішка з меншою валентністю спричинює виникнення дірок у валентній зоні і називається **акцепторною**}. У напівпровіднику p-типу (з акцепторною домішкою) **основними** носіями електричного струму є **дірки**, а **неосновними** - **електрони**. У напівпровіднику n-типу з донорними домішками, навпаки, **основними** носіями струму є **електрони**, а **неосновними** - **дірки**.*

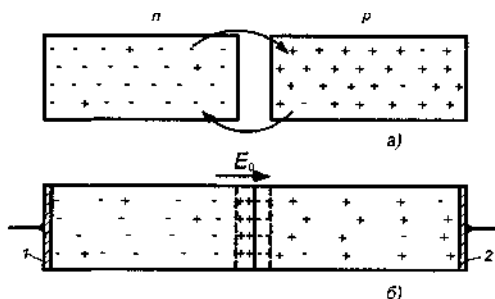
Таким чином, у напівпровідниках з власною провідністю повна провідність є сумою приблизно однакових електронної і діркової провідності. У напівпровідниках з домішками повна провідність є сумою домішкової і власної провідності. Домішкова провідність перевищує власну провідність при низьких температурах. За високих температур, коли значно зростає кількість електронів у зоні провідності внаслідок їх переходу з валентної зони, а всі атоми домішок іонізовані, власна провідність напівпровідника може бути більшою, ніж домішкова.

4.5. Напівпровідникові випростувані

За контакту напівпровідника p-типу, в якому велика концентрація дірок і мала електронів, з напівпровідником n-типу з високою концентрацією електронів і незначною дірок, на межі контак-

ту (різний тип провідності) відбувається дифузійне переміщення дірок з р-області в п-область і електронів у протилежному напрямі (рис. 4.5, а). Густина діркової та електронної складових дифузійного струму відповідно $I_{p \text{ диф}}$ та $I_{n \text{ диф}}$.

Рис. 4.5. Схема утворення р-n переходу двох напівпровідників



Внаслідок цього при контакті ділянки обох напівпровідників збіднюються на рухомі носії зарядів і їх провідність знижується. Створюється заірний шар товщиною $\Delta l = 10^{-4} - 10^{-5}$ см з великим електроопором. Цей шар називається *р-n переходом*. В області *р-n* переходу виникає подвійний електричний шар і контактна різниця потенціалів ϕ_k . У германієвих переходах $\phi_k = 0,1 - 0,35$ В, а у кремнієвих $\phi_k = 0,5 - 0,75$ В.

Приконтатна ділянка напівпровідника п-типу, в яку перемістилися дірки з напівпровідника *р-типу*, заряджається позитивно, а приконтатна ділянка напівпровідника *р-типу*, у яку продифундували електрони з напівпровідника п-типу, заряджається негативно (рис. 4.5, б). Цей перерозподіл зарядів спричинює появу в зоні контакту електричного поля з напруженістю E_0 з напрямленістю від напівпровідника п-типу до р-типу. Створене електричне поле гальмує подальше дифузійне переміщення дірок з напівпровідника р-типу у напівпровідник п-типу і електронів у протилежному напрямку. Через *р-n* перехід можуть переміщатись лише неосновні носії заряду - дірки з напівпровідника п-типу та електрони з напівпровідника *р-типу*, створюючи дрейфові струми густиною $I_{p \text{ др}}$ і $I_{n \text{ др}}$.

За постійної температури й відсутності зовнішнього електричного поля густина повного струму через *р-n* типу перехід дорівнює нулеві:

$$I_{n \text{ диф}} + I_{p \text{ диф}} + I_{p \text{ др}} + I_{n \text{ др}} = 0.$$

Якщо електронний напівпровідник з *р-n* переходом з'єднати з мінусом батареї, а дірковий - з плюсом (рис. 4.6, а), то електрони і дірки почнуть рухатись до границі, назустріч одні одним і, зустрічаючись, будуть рекомбінувати, а на їх місце надходитимуть нові вільні електрони і дірки. Електроопір заірного шару зменшуватиметься і струм у цьому пропускному напрямі буде великим.

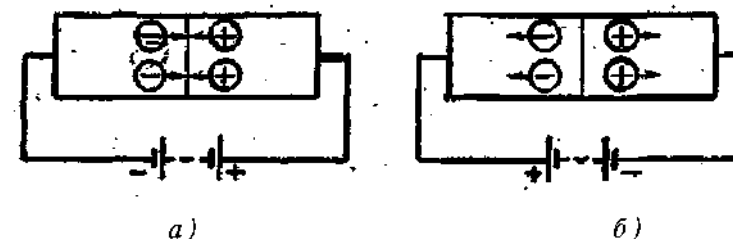


Рис. 4.6. Рух вільних електронів (кружечки із знаком "-") і дірок (кружечки із знаком "+") при проходженні струму через *р-n* перехід: а) пропускне включення; б) заірне включення

Якщо ж електронний напівпровідник з'єднати з плюсом батареї, а дірковий з мінусом, то зовнішнє поле буде рухати електрони і дірки від границі у протилежні напрями (див. рис. 4.6, б). Заірний шар при цьому розширюється, електроопір шару різко зростає і струм у цьому напрямі буде дуже малий.

Отже, за прикладання прямої напруги (рис. 4.6, а) опір *р-n* переходу незначний, а струм великий. При зворотній напрузі опір *р-n* типу в багато разів більший і зворотний струм малий. Таким чином, *р-n* перехід має односторонню провідність і використовується в техніці для випростування змінного струму.

Напівпровідникові випростувачі з германію, кремнію та інших напівпровідників широко використовується у техніці, особливо в радіотехніці. Вольт-амперна характеристика, тобто крива залежності сили струму через випростувач від прикладеної до нього напруги для германієвого випростувача наведена на рис. 4.7. З кривої видно, що вже за напруги 0,75 В у пропускному напрямі струм перевищує 1 А, тобто опір германію малий. У заірному

напрямі струм малий (близко 0,05 мА) і практично не залежить від напруги до 400 В. Якщо ж зворот на напруга перевищує пробивну напругу U_n , то зворотний струм різко зростає і може спричинити електричний пробій р-п переходу. При цьому внаслідок ударної іонізації відбувається лавиноподібне зростання кількості додаткових пар зарядів. При електричному

пробіі р-п перехід не руйнується, але перегрівання р-п переходу його руйнує.

У напівпровідниковій електроніці найчастіше застосовуються ► площинні (рис. 4.8, а) і ► точкові (рис. 4.8, б) р-п-переходи.

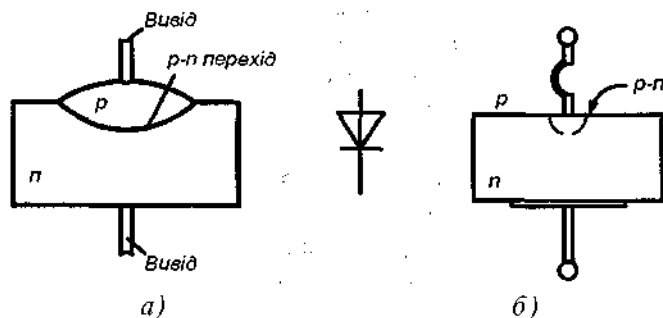


Рис. 4.8. Площинний (а) та точковий (б) р-п переходи

Площинний р-п- перехід - це шарувато-контактний елемент в об'ємі кристала на межі двох напівпровідників з провідностями р-п типів, а в точковому р-п переході використовується пластина германію або кремнію з електропровідністю n-типу товщиною 0,1 - 0,6 мм і площею 0,5 - 1,5 мм². До пластинки точково приєднується сталевий дріт.

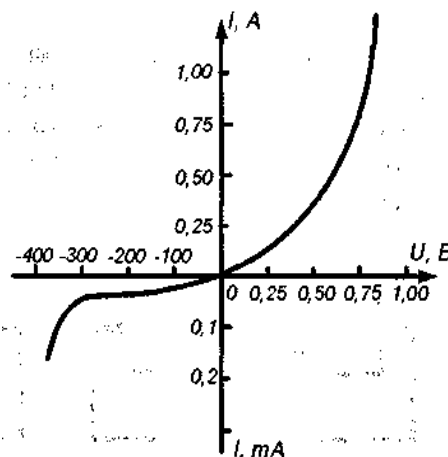


Рис. 4.7. Вольт-амперна характеристика р-п переходу

4.6. Методи визначення типу електропровідності напівпровідників

Суть методу зводиться до нагріву T_x одного кінця напівпровідника (рис. 4.9). Якщо досліджується напівпровідник «-типу, то на гарячому кінці за рахунок затрати зовнішньої теплової енергії вивільняється значно більше число електронів, ніж на холодному кінці, і електрони дифундують до холодного кінця. Нагрітий кінець напівпровідника заряджається позитивно, а хо-

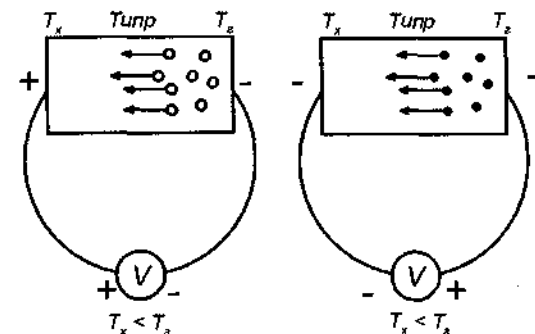


Рис. 4.9. Визначення типу провідності напівпровідника

лодний - негативн (див. рис. 4.9, справа).

За нагріву одного кінця напівпровідника р-типу в ньому значно більше число електронів переходить із валентної зони на акцепторні рівні домішкових атомів, ніж у холодному кінці. Надлишок дірок з валентних до зони нагрітого кінця дифундує у холодний і гарячий кінець заряджається негативно відносно холодного кінця (див. рис. 4.9, зліва).

Тип електропровідності (р або n) напівпровідника можна визначити також за зміною знака поперечної ЕРС Холла. Для цього пластину напівпровідника встановлюють у зовнішнє поперечне поле H і прикладають у напрям довжини пластинки різницю потенціалів. У результаті зміщення рухомих носіїв заряду до однієї з граней пластинки виникає поперечна ЕРС. Напрямок зміщення зарядів визначається за правилом "лівої руки".

4.7. Вплив світла на електропровідність напівпровідників

Під дією світлової енергії в напівпровідниках зростає кількість носіїв. зарядів, що приводить до зростання електропровідності (фо-

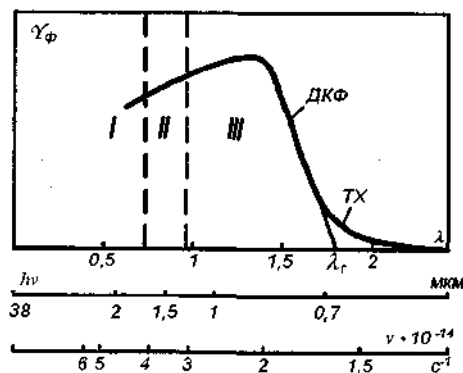


Рис. 4.10. Фотопровідність германію залежно від довжини хвилі падаючого випромінювання: I – видима область спектра; II – червона; III – інфрачервона; ДКФ – довгохвильовий край фотопровідності; ТХ – “тепловий хвіст кривої”

електрона з верхнього рівня валентної зони на найнижчий рівень зони провідності, тобто рівною ширині забороненої зони напівпровідника. Цій енергії відповідає гранична довжина хвилі, а за довгохвильовим краєм фотопровідності можна визначити ширину забороненої зони напівпровідника (рис. 4.10).

Граничну довжину хвилі λ_m і енергію квантів, достатню для початку виникнення фотопровідності, визначають екстраполяцією стрімко падаючої ділянки кривої до перетину з віссю абсцис. Ширина забороненої зони різних напівпровідників є в межах від десятих часток до 3 еВ, тому фотопровідність може проявлятися в інфрачервоній, видимій або ультрафіолетовій частині спектра.

Для германію порогова довжина хвилі близька до 1,8 мкм. Фотопровідність за довжин хвиль, менших 1,8 мкм, визначається переходом електронів з більш низьких рівнів валентної зони на більш високі зони провідності.

На рис. 4.10 наведено “тепловий хвіст” до 1,9 - 2 мкм, який характеризує незначну фотопровідність, зумовлену квантами з енергією, дещо меншою ширини забороненої зони напівпровідника. Наявність “теплого хвоста” можна пояснити двома явищами:

топровідності). Фотопровідність чітко свідчить про квантову природу світла. Енергія фотона витрачається у власному напівпровіднику на перекидання електронів з валентної зони в зону провідності і утворення пар електрон-дірка. Енергія кванта повинна бути достатньою для

* Окремі електрони внаслідок сумування енергії фотонів і енергії теплових коливань гратки переходять в зону провідності.

* Ширина забороненої зони внаслідок теплових коливань гратки підлягає флуктуаціям. Фотон з енергією $h\nu < W$, поглинутий в області кристала, в якій миттєва ширина забороненої зони, менша за середню, збуджує пару електрон-дірка.

В області малих довжин хвиль (лівіше максимуму кривої на рис. 4.10) спад фотопровідності пояснюється зростанням коефіцієнта поглинання з ростом частоти і зменшенням глибини проникнення енергії. Поглинання відбувається в тонкому поверхневому шарі і мало позначається на провідності всього об'єму напівпровідника.

Збільшення інтенсивності опромінення квантами з енергією, достатньою для появи фотопровідності, збільшує її внаслідок зростання числа носіїв зарядів. Одночасно зростає рекомбінація носіїв і сумарна дія обох чинників характеризується пологою ділянкою кривої.

4.8. Напівпровідникові матеріали

З великої кількості напівпровідникових матеріалів у техніці застосовують в основному > германій, > кремній, > селен і > карбід кремнію. Деякі характеристики простих напівпровідників наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Ширина забороненої зони елементарних напівпровідників (при 300 К), еВ

Елемент	Група в періодичній таблиці	Ширина забороненої зони	
		еВ	10^{19} Дж
Бор	III	1,10	1,76
Кремній	IV	1,12	1,79
Германій	IV	0,72	1,15
Фосфор	V	1,50	2,40
Миш'як	V	1,20	1,92
Сірка	VI	2,50	4,00
Селен	VI	1,70	2,72
Телур	VI	0,36	0,58
Йод	VII	1,25	2,00

До складних напівпровідників належать сполуки елементів різних груп періодичної системи, відображені формулами $A^{IV}B^{VI}$ ($SiCl_4^{III}B^{VI}$ ($InSb$, $GaAs$, GaP), $A^{II}B^{VI}$ (CdS , ZnS) і деякі окиси (наприклад Cu_2O).

Германій (Ge). Сировиною для видобутку германію служать цинкові та сульфідні руди. Спочатку отримують тетрахлорид германію ($GeCl_4$, з якого дістають діоксид германію (GeO_2) - порошок білого кольору. Цей порошок відновлюють у водневій печі за температур 650 - 700 °С до елементарного германію. Порошок германію протравлюють і сплавляють у виливки, які служать вихідним матеріалом для отримання дуже чистого матеріалу методом зонного розплавлення або безпосереднього витягування монокристалів з розтопу.

За зонного розплавлення (рис. 4.11) вилівок германію кладуть у графітову ємність і встановлюють у кварцову трубу, через яку постійно проходить інертний газ. З допомогою високочастотного контура зливки локально розплавляють. Домішки краще розчиняються у рідкій фазі германію, ніж у твердій, і виносяться розплавленою зоною, яка переміщується вздовж виливки одночасно з переміщенням високочастотних витків. У результаті багаторазового очищення домішки концентруються біля одного кінця виливки. Забруднений кінець виливки відрізають.

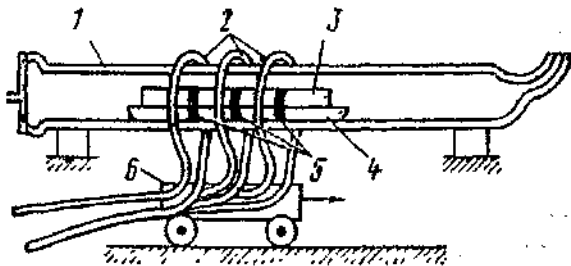


Рис. 4.11. Схема пристрою для зонної плавки: 1 - кварцова труба; 2 - витки контура високочастотного генератора; 3 - злиток очищеного германію; 4 - графітовий човник; 5 - зони плавлення, позначені в площині витків; б - рухома каретка, на якій закріплені витки

Для отримання монокристалів германій розплавляють у вакуумній печі (тиск $\sim 10^{-3}$ Па). На кінець штока закріплюють затравку 10 (рис. 4.12), яку орієнтують у необхідному кристалографічному напрямі. За поступового опускання штоку в розплав затравка розплавляється з поверхні. Після цього шток із затравкою повільно обертається навколо своєї осі і піднімаються разом зі стовпчиком розтопу, що підтримується поверхневим натягом. У зоні більш низьких температур над розплавленою поверхнею стовп розплаву твердне, утворюючи одне ціле із затравкою.

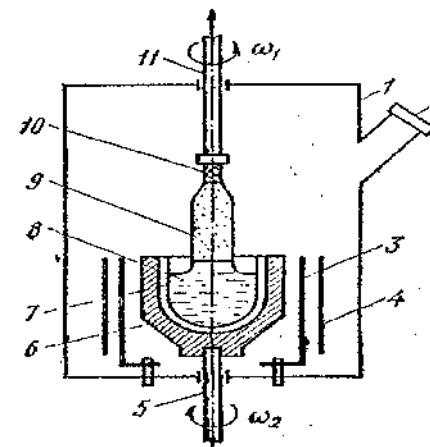


Рис. 4.12. Схема установки для витягування монокристалів з розплаву: 1 - робоча камера; 2 - вікно спостереження; 3 - нагрівач електроопору або високочастотний індуктор; 4 - теплові екрани; 5 - шток для обертання тигля; 6 - графітовий тигель; 7 - кварцовий вкладиш; 8 - розплав; 9 - виростаючий монокристал; 10 - затравка; 11 - шток для кріплення затравки

Швидкість витягування змінюється в межах 10^{-5} - 10^{-4} м/с. Витягуванням отримують монокристали германію діаметром у десятки міліметрів. З метою отримання германію з певною величиною і типом електропровідності в процесі витягування в монокристал вводять строго дозовані домішки. Для виготовлення напівпровідникових приладів зливки германію розрізають на пластинки і протравлюють для видалення поверхневих дефектів.

З германію виготовляють випростувачі змінного струму, транзистори, перетворювачі Холла, фототранзистори та ін. Германієві прилади можуть експлуатуватись в діапазоні температур -60 - +70 °С і повинні захищатись від дії волого повітря.

Кремній (Si). Одним з найважливіших матеріалів для його добування служить кремнезем (SiO_2). Отримують кремній також відмовленням парами цинку $SiCl_4$. Кремній - це темно-сірий мета-

лоподібний крихкий матеріал. Питомий опір ідеально чистого кремнію за кімнатної температури близько 10^6 Ом·см. Діелектрична проникливість $\varepsilon = 12$. Залежно від природи елемента-домішки розрізняють ►електронну (за наявності домішок V групи) і ►діркову (домішки III групи) провідності. За підвищених температур (≥ 600 °C) реагує з галогенами, утворюючи сполуки типу SiX_4 , а також з киснем, азотом і сіркою. У розчинах кислот (за винятком сумішей азотної і плавикової) не розчиняється.

Верхня границя робочої температури напівпровідникових приладів на основі кремнію досягає 80 - 200 °C, тоді як на основі германію - всього 70 - 80 °C. Тому кремнієві напівпровідники застосовують ширше, ніж германієві. Кремній використовують також в інтегральних напівпровідникових схемах у радіоелектроніці.

Селен (Se) - елемент шостої групи періодичної системи. Його отримують із залишків електролітичного рафінування міді. Селен у твердому стані існує у різних модифікаціях: >склоподібний (аморфний), >моноклінний і >гексагональний. Чорний аморфний селен отримують швидким охолодженням розплаву до кімнатної температури. Його питомий опір $\rho \approx 10^{11}$ Ом·м. Сірий гексагональний селен має питомий опір $\rho \approx 10^2 - 10^3$ Ом·м. Ширина забороненої зони власної провідності становить біля 2 еВ. Його дістають з розплавленого аморфного селену повільним охолодженням від температури плавлення (220 °C) до кімнатної. Сірий кристалічний селен є домішковим напівпровідником р-типу.

Характеристики напівпровідникових матеріалів погіршуються під дією вологи, фонових випромінювань та ін. Для захисту напівпровідникові прилади вміщують у герметичні металічні, керамічні чи пластмасові корпуси.

Карбід кремнію (SiC) - крихкий полікристалічний матеріал, що утворюється хімічним з'єднанням кремнію та вуглецю за кінцевої температури ~ 2000 °C. Легований фосфором, сурмою чи вісмутом карбід кремнію має темно-зелене забарвлення і електропровідність я-типу, а легований галієм, алюмінієм або бором дістає темнофіолетове забарвлення і провідність р-типу. Карбід кремнію є домішковим напівпровідником і лише за температури 1400 °C і вище у ньому виникає власна електропровідність. З мо-

нокристалів карбіду кремнію високої чистоти виготовляють діоди і транзистори на робочі температури до 700 °C, а також світлодіоди.

Електропровідність напівпровідників змінюється під впливом температури, світла, електричного поля, механічних напружень. На цих змінах ґрунтується принцип дії відповідно ►терморезисторів (термісторів), ►фоторезисторів, ►нелінійних резисторів (варисторів), ►тензорезисторів та ін.

Напівпровідникові системи можна використовувати для перетворення різних видів енергії в енергію електричного струму (сонячні батареї, термоелектричні генератори), а також як нагрівальні елементи (селітові стрижні).

Виготовлені з напівпровідникових матеріалів прилади вигідно вирізняються: У великим терміном експлуатації; У малими габаритами і масою; У простотою і надійністю конструкції; У споживанням малої потужності і малою інерційністю.

Використання напівпровідникових матеріалів забезпечує бурхливий розвиток мікроелектроніки, зменшення маси і розмірів електронної апаратури, збільшення густини монтажу при одночасному підвищенні довговічності і надійності.



ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОТРОЛЮ

1. Назвіть характерні властивості напівпровідників.
2. Що являють собою власна і домішкова електропровідності напівпровідників?
3. Що таке р-п перехід?
4. Яка структура й основні властивості германію та кремнію?
5. Які структура й основні властивості селену?
6. Які склад і основні властивості карбіду кремнію?
7. У виробництві яких приладів застосовують напівпровідникові матеріали?

РОЗДІЛ 5



ФІЗИКА ДІЕЛЕКТРИКІВ

5.1. Діелектричні (електроізоляційні) матеріали

***Діелектрики** - речовини, які погано проводять електричний струм.

їх питомий електроопір у межах $10^7 - 10^{18}$ Ом-м. Існують ► **тверді**, ► **рідкі** і ► **газоподібні** діелектрики. Зовнішнє електричне поле викликає поляризацію діелектриків. У деяких з них поляризація існує і за відсутності зовнішнього поля (> **п'єзоелектрики**, > **піроелектрики**, > **сегнетоелектрики**, > **електрети**).

*** Електроізоляційні матеріали** - діелектрики з великим питомим опором, які застосовуються для ізоляції (від французького слова *isoler* - роз'єднувати) частин електричних пристроїв, як наприклад, обмоток електричних машин і апаратів, ліній електропередач тощо.

Електроізоляційні матеріали забезпечують протікання електричного струму по наперед визначених в електричних пристроях шляхах, запобігають небажаним електричним контактам і витіканню струму. Якість ізоляції забезпечує надійність роботи електричних установок.

Електроізоляційні матеріали в основному характеризуються: У **електроопором ізоляції**, > **електричною міцністю** і > **діелектричними втратами**. Чим вищий електроопір ізоляції, тим менші струми витікання і краща якість ізоляції.

Полярні і неполярні діелектрики. Діелектрики поділяються на два класи: > **полярні (дипольні)**; У **неполярні (нейтральні)**.

Електричні заряди можуть бути нерівномірно розподілені між атомами в молекулі. В одній частині молекули переважають додатні заряди, а в іншій - від'ємні. Такі молекули можна розглядати як систему з двох електричних зарядів $+q$ і $-q$, рівних за вели-

чиною, але протилежних за знаком, розміщених на деякій відстані / один від одного, тобто як диполь (рис. 5А). Добуток величини заряду q на відстань між зарядами l називається дипольним моментом. Величина дипольного моменту молекули складає:

$\mu = q \cdot l$, де q - сумарний позитивний (або чисельно рівний йому сумарний негативний) електричний заряд молекули, а l - плече диполя.

Дипольний момент необхідно розглядати як вектор, додатний напрям якого спрямований від додатного заряду до від'ємного.

*** Молекули, в яких має місце несиметричне розміщення електричних зарядів, називаються полярними.**

Вони мають дипольний момент, відмінний від нуля. Прикладами полярних молекул можуть бути вода, йодистий калій KJ та інші. Молекула води має вигляд рівнобедреного трикутника (рис. 5.2, в). У молекулі води сумарний позитивний і негативний заряди не співпадають у просторі, і молекула має значний дипольний момент. До полярних речовин належить багато спиртів, кислот, ефірів та ін. У молекулі KJ електричний момент рівний

$$\mu = 23 \cdot 10^{-30} \text{ Кл} \cdot \text{м}$$

і спрямований від позитивно зарядженого іона калію до негативно зарядженого іона йоду.

Молекули, які побудовані симетрично, тобто такі, в яких центри ваги як позити-



Рис. 5.1. Схема полярної молекули (диполя)

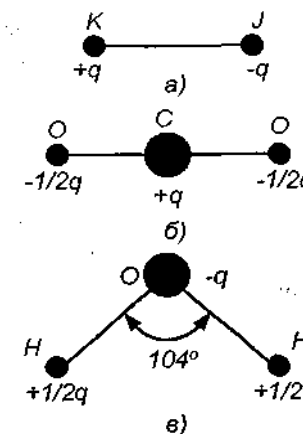


Рис. 5.2. Схеми просторової будови молекул: йодистого калію KJ (а), вуглекислого газу CO_2 (б) і води H_2O (в)

вних, так і негативних зарядів співпадають з центром симетрії молекули, а значить і іонів, є неполярними (рис. 5.2,6). У молекулах неполярних речовин (наприклад CO_2) $l = 0$, тому і $\mu = 0$.

5.2. Поляризація діелектриків

*** Поляризація діелектриків** - це зміщення електричних зарядів у діелектрику під дією прикладеного електричного поля.

За поляризації відбувається переміщення зв'язаних з певними молекулами речовини зарядів, які не можуть покинути дану молекулу, на відміну від електропровідності, зумовленої рухом вільних носіїв зарядів на великі відстані.

Поляризація відбувається у всіх молекулах діелектрика і супроводжується переміщенням у просторі великої кількості зарядів на дуже малу відстань (у межах молекули). Зміщення зарядів за поляризації можна в багатьох випадках розглядати як "пружне". Після припинення дії прикладеного до діелектрика електричного поля зміщені заряди повертають у вихідне положення.

Існує кілька видів поляризації з різними механізмами. Найбільш типові - >електронна, >іонна і >дипольна.

*** Електронна поляризація** - зміщення електронів відносно ядра атома, в усіх атомах, молекулах чи іонах будь-якого діелектрика.

За накладення зовнішнього електричного поля воно здійснюється за надзвичайно короткий час (порядку 10^{-14} - 10^{-15} с), близький до періоду світлових коливань, завдячуючи тому, що електрони мають дуже малу масу.

Навіть у найпростішому атомі водню під дією зовнішнього електричного поля електрон зміщується на певну відстань від ядра. Це зміщення тим більше, чим вища напруженість електричного поля і чим слабше електрони зв'язані з ядром атома.

*** Іонна поляризація** - зміщення одного відносно іншого іонів гетерополярної (іонної) молекули.

Протікає іонна поляризація також швидко (10^{-12} - 10^{-13} с).

Процеси електронної та іонної поляризації схожі між собою. Їх можна розглядати як різновидності деформаційної поляризації, за якої відбувається зміщення (а не поворот) зарядів один відносно одного в напрямку електричного поля (рис. 5.3, рис. 5.4).

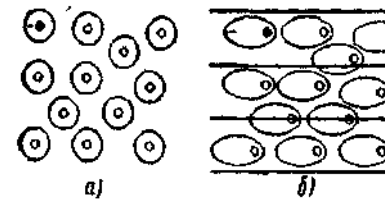


Рис. 5.3. Спрощена схема моделей атомів водню: а) до поляризації; б) після поляризації

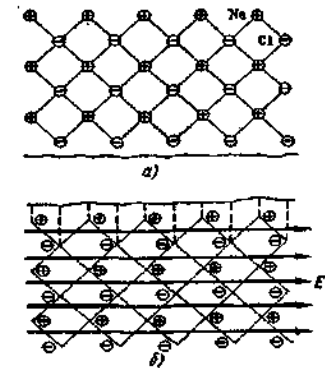


Рис. 5.4. Ідеалізована схема розміщення іонів кам'яної солі: а) у вузлах ґратки за відсутності електричного поля; б) зміщених з вузлів на невеликі відстані під впливом поля

На процес деформаційної поляризації не впливає температура діелектрика і тому відсутні незворотні втрати енергії. Після зняття напруження, електрична енергія, яка витрачається на поляризацію атома (молекули), повністю повертається джерелу електричної енергії, і тому при деформаційній поляризації відсутні діелектричні втрати.

Дипольна, або орієнтаційна, поляризація притаманна лише полярним діелектрикам і зводиться до повороту в напрямку електричного поля постійних дипольних моментів молекул (рис. 5.5), які безперервно перебувають у хаотичному тепловому русі.

Тому на дипольну поляризацію суттєво впливає температура, з підвищенням якої хаотичний рух молекул зростає і поляризація зменшується. В ідеальному випадку дипольна поляризація пови-

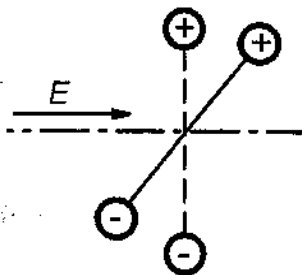


Рис. 5.5. Схема орієнтаційної поляризації дипольної молекули. Пунктиром показано положення молекули до поляризації, суцільною лінією - після поляризації

нна проявлятися лише в газах, рідинах і аморфних, не дуже в'язких, діелектриках. У кристалічних діелектриках за температур, нижчих їх температури плавлення, диполі закріплені на своїх місцях настільки міцно, що не можуть орієнтуватися в напрямку поля, тому дипольна поляризація, як правило, не відбувається (за винятком деяких кристалів з нещільним упаковуванням молекул).

Процесії встановлення і зникнення (після зняття з діелектрика напруги) дипольної поляризації вимагають відносно значного (порівняно з безінерційною деформаційною поляризацією) часу і тим більшого, чим більші розміри молекул та в'язкість (коефіцієнт внутрішнього тертя) речовини. Він може бути того ж порядку, що і час півперіоду змінних напружень у радіо- та електротехніці. Тому, на відміну від деформаційної, дипольна поляризація викликає розсіювання електричної енергії і діелектричні втрати (нагрів діелектрика). Орієнтація молекул за дипольної поляризації буде тим узгодженішою, чим більші зовнішнє поле, поляриність молекули і менша динамічна в'язкість речовини.

5.3. Діелектрична проникність

***Діелектрична проникність** - величина, яка показує у скільки разів зростає ємність конденсатора, якщо вакуум між його обкладками заповнити діелектриком.

Як показує дослід, ємність конденсатора залежить не лише від його розмірів, форми і взаємного розміщення обкладок, а й від властивостей діелектрика, що заповнює простір між його обкладками.

Якщо C_0 - ємність конденсатора, між обкладками якого є вакуум, а C - ємність того ж конденсатора, простір між обкладками

якого заповнений будь-яким діелектриком, то ємність C виявиться в ϵ разів більшою від ємності C_0 , тобто

$$C = \epsilon C_0.$$

***Величина ϵ показує також:**, у скільки разів сила взаємодії електричних зарядів у середовищі менша, ніж: у вакуумі.

Якість конденсатора залежить не лише від ϵ , але й від ізолюючих властивостей діелектрика. Чим кращі ці властивості, тим менше витікання зарядів через діелектрик.

Діелектрична проникність має особливо велике значення у виробництві електричних конденсаторів. Чим вона вища, тим менші розміри конденсатора за заданої його ємності. Значну роль діелектрична проникність відіграє при виготовленні багат шарової ізоляції з різних електроізоляційних матеріалів. У шарі з меншою діелектричною проникністю виникає найбільша електрична напруга. Оскільки діелектрична проникність повітря значно менша порівняно з поширеними електроізоляційними матеріалами, то дуже важливо видаляти повітряні проміжки. Застосування електроізоляційних матеріалів з високою електричною міцністю дозволяє зменшити товщину ізоляції. Діелектричні втрати, які виникають в ізоляції за змінного електричного поля, спричинюють нагрівання електроізоляційного матеріалу, що може призвести до його руйнування. Чим менші діелектричні втрати, тим надійніша ізоляція. Важливе значення має її механічна міцність.

В полярному діелектрику позитивні і від'ємні заряди в кожній молекулі однакові, але зміщені в просторі. За відсутності зовнішнього поля молекули діелектрика розташовані хаотично (рис. 5.6, а), а результуюча дія їх зарядів дорівнює нулю. Під дією електричного поля молекули повертаються так, що їх електричні осі встановлюються по можливості за лініями поля (рис. 5.6, б) Ця орієнтація зростає із зростанням напруженості поля. Тепловий рух молекул інтенсифікується за підвищення температури і сприяє хаотичній орієнтації молекул. Внаслідок дії цих конкуруючих чинників лише частина молекул орієнтується своїми осями близько до напрямку поля.

Розглянемо плоский конденсатор в якому ліва обкладка заряджена позитивно, а права від'ємно (рис. 5.7). Зростання ємності

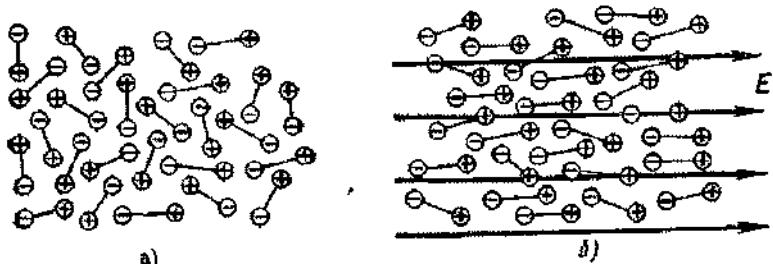


Рис. 5.6. Розміщення дипольних молекул а) до поляризації; б) після поляризації

конденсатора з підвищенням ϵ діелектрика вказує на те, що електричне поле всередині діелектрика змінюється, а саме: напруженість поля в діелектрику зменшується в ϵ разів порівняно з вакуумом. Оскільки різнойменні заряди притягуються, а однойменні відштовхуються, то біля лівої (позитивно зарядженої обкладки) на поверхні діелектрика виникає від'ємний заряд, а біля правої - додатний. Внаслідок цього поле E_n , створене поляризаційними зарядами, спрямоване протилежно до поля E_0 , створеного на обкладках, і ослабляє його. Тому результуюче поле в діелектрику виявляється слабшим, ніж за відсутності діелектрика. Якщо, крім розглянутої впорядкованої орієнтації полярних молекул, під дією поля відбувається також зміщення зарядів у межах кожної окремої молекули (рис. 5.3, 5.4), то поляризаційні заряди на поверхні діелектрика додатково зростають і ще більше ослаблюють результуюче поле.

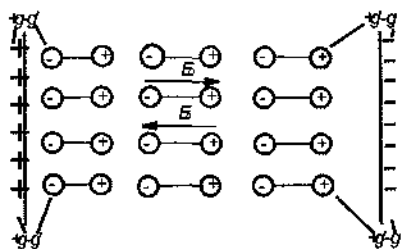


Рис. 5.7. Поле E_n створене поляризаційними зарядами $+q'$ і $-q'$, спрямоване протилежно полю E_0 , яке створене зарядами $+q$ і $-q$ на обкладках конденсатора

5.4. Залежність діелектричної проникності від різних чинників

Діелектрична проникність ϵ залежить від частоти прикладеної до діелектрика ► напруги, ► температури, ► вологи, тиску і т. д.

Залежність ϵ від частоти. Час для встановлення електронної чи іонної поляризації дуже малий порівняно з півперіодом змінної напруги для вживаних в електро- і радіотехніці частот. Тому поляризація діелектриків, в яких проявляється лише деформаційний механізм поляризації, повністю встигає відбутись за значно менший час, ніж час півперіоду змінної напруги, і частота зміни напруги не впливає на діелектричну проникність ϵ (рис. 5.8). Електрична енергія, затрачена на поляризацію молекули, повністю повертається до джерела енергії, внаслідок чого деформаційна поляризація не викликає в матеріалі діелектричних втрат.

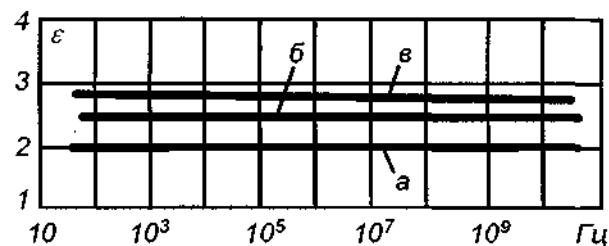


Рис. 5.8. Залежність діелектричної проникності ϵ від частоти для твердих неполярних діелектриків: а – політетрафторетилен; б – полістирол; в – полідихлор-стирол

У випадку дипольної поляризації, за підвищення частоти змінної напруги значення ϵ полярного діелектрика спочатку залишається незмінним (рис. 5.9, кр. б), а починаючи з деякої критичної частоти, за якої поляризація не встигає повністю встановитися (протягом одного півперіоду), ϵ починає знижуватися і наближається до достатньо високих частот до значень, характерних для неполярних діелектриків.

Залежність ϵ від температури. Температура не впливає на процес електронної поляризації неполярних діелектриків, тому ос-

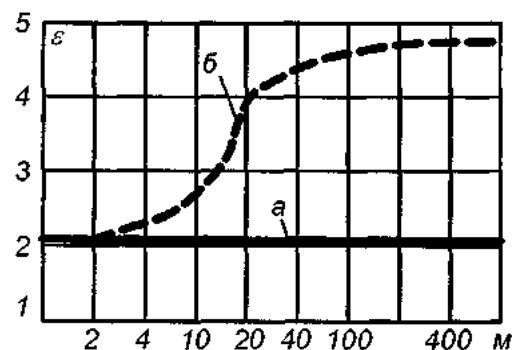


Рис. 5.9. Залежність діелектричної проникності ϵ від довжини хвилі для неполярного діелектрика - трансферматорної оливи (а) і тої ж оливи, але з добавкою 20 % сильно полярної рідини - нітробензолу $C_6H_5NO_2$ (б)

лекул практично не відбувається. З температурою внаслідок зменшення в'язкості речовини можливість орієнтації диполів полегшується, що супроводжується зростанням діелектричної проникності (рис. 5.11).

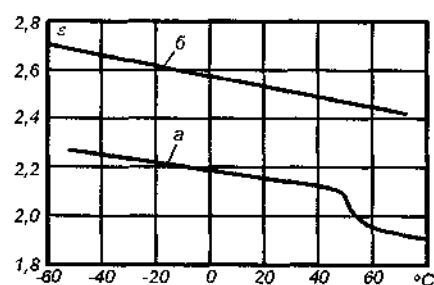


Рис. 5.10. Залежність діелектричної проникності ϵ від температури для неполярних діелектриків: а - парафін; б - полістирол

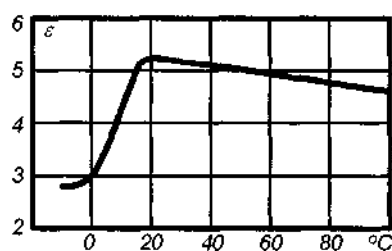


Рис. 5.11. Залежність діелектричної проникності ϵ совола від температури (частота 50 Гц)

тання від неї не залежить. Але з підвищенням температури внаслідок розширення діелектрика в одиниці його об'єму зменшується кількість молекул, що може призвести до деякого зменшення ϵ (рис. 5.10).

За іонного механізму поляризації в більшості випадків спостерігається зростання ϵ з підвищенням температури у полярних діелектриках у низькотемпературній області орієнтація мо-

Але при значному підвищенні температури збільшуються теплові коливання молекул і, як наслідок, зменшується ступінь їх орієнтації. Через це крива залежності $\epsilon(T)$ після проходження максимуму спадає.

Залежність ϵ від вологи. Якщо ϵ діелектрика менша ϵ води, то зволоження діелектрика зумовлює значне зростання ϵ . Однак, практично використати цей ефект не вдається, оскільки зволоження супроводжується погіршенням інших важливих характеристик: ► зменшенням питомого електроопору, ► зростанням кута діелектричних втрат і ► електричної міцності діелектрика.

Вплив напруги на ϵ . Для лінійних діелектриків у більшості випадків ϵ практично не залежить від напруги. Сильно виражена залежність діелектричної проникності ϵ від прикладеної до діелектрика електричної напруги характерна для сегнетоелектриків.

5.5. Діелектричні втрати

*** Діелектричні втрати** - це втрати енергії, які виникають ..; у товщі електроізоляційного матеріалу при дії на нього змінного електричного поля і перетворюються в тепло.

Максимум поляризації діелектрика тією чи іншою мірою відстає в часі від максимуму напруженості поля, тобто виникає деякий зсув фаз поляризації порівняно з фазами напруженості поля. За відсутності такого зсуву відсутні й відповідні діелектричні втрати. Діелектричні втрати не виникають і тоді, коли час релаксації настільки великий, що поляризація не встигає завершитись.

Поряд з вказаними діелектричними втратами мають місце втрати, зумовлені невеликою провідністю матеріалу. Вона викликається наявністю у всіх реальних діелектриків деякої кількості домішок. Діелектричні втрати, спричинені домішковою провідністю, за абсолютною величиною в більшості випадків дуже малі.

Діелектричні втрати можуть привести до перегріву електроізоляційного матеріалу, погіршення його ізоляційних властивостей і передчасного зношення та руйнування діелектрика. Як правило, втрати потужності в матеріалі чи виробі з цього матеріалу, за інших рівних умов, прямо пропорційні квадрату прикладеної до цього матеріалу електричної напруги.

Відомо, що як за дії постійної напруги, так і змінної, діюче значення якої рівне за величиною постійній напрузі, втрати потужності P в металічних провідниках однакові, не залежать від частоти напруги та визначаються як

$$P = U^2/R,$$

де U - напруга, В; R - опір провідника, Ом.

Діелектричні втрати спостерігаються в обох випадках. В першому зумовлюються наскрізним струмом. У цьому випадку якість матеріалу характеризується значеннями питомого об'ємного і поверхневого опорів.

При змінній напрузі, крім втрат, зумовлених наскрізним струмом, з'являються втрати від сповільненої поляризації діелектрика.

У діелектриках розсіювання потужності залежить від частоти і значення напруги. Чим вище частота і значення напруги, тим більші втрати. Вони також зростають із збільшенням ємності і залежать від матеріалу діелектрика. *При розгляді діелектричних втрат звичайно мають на увазі втрати за змінної напруги, тому що вони в багато разів більші, ніж: за постійної.*

Кут діелектричних втрат. Найчастіше втрати потужності в діелектрику оцінюють кутом діелектричних втрат, а також тангенсом цього кута.

На (рис. 5.12) зображена векторна діаграма струмів і напруг у конденсаторі при дії змінної напруги. Якщо б у діелектрику конденсатора потужність не розсіювалась (ідеальний діелектрик), то вектор I випереджував би вектор напруги U на 90° і струм був би чисто реактивним.

Насправді ж зсув фаз φ для реального діелектрика дещо менший 90° . Повний струм через конденсатор можна розкласти на дві компоненти - активний I_a і реактивний I_p . Оскільки в конденсаторі з високоякісним діелектриком кут зсуву фаз близький до 90° , то для більшої наглядності використовують кут δ , який доповнює

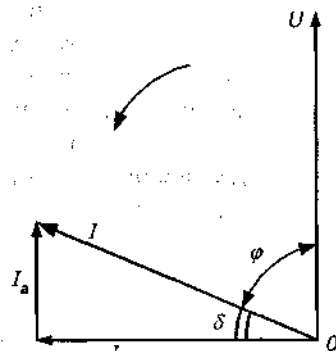


Рис. 5.12. Спрощена діаграма струмів у діелектрику з втратами

кут φ до 90° :

$$\delta = 90 - \varphi.$$

*Кут δ називається **кутом діелектричних втрат**, а тангенс цього кута дорівнює відношенню активного і реактивного струмів:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p.$$

$\operatorname{tg} \delta$ не залежить від $>$ форми поля, $>$ розмірів та $>$ форми зразка і широко застосовується для оцінки діелектричних втрат. Ця величина набагато чутливіша до змін властивостей речовини ніж величина ϵ .

Діелектричні втрати P ділянки ізоляції з ємністю C , як бачимо на рис. 5.12, дорівнюють

$$P = UI_a = UI_p \operatorname{tg} \delta \quad (5.1)$$

Підставивши в (5.1) значення сили струму, що проходить через ділянку ізоляції з ємністю C .

$$I_p = U \omega C,$$

де $\omega = 2\pi/\sim$ кутова частота, отримаємо:

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (5.2)$$

Вираз (5.2) справедливий для будь-яких розмірів і конфігурації ділянки ізоляції. За високих частот ω діелектричні втрати великі і в потужних короткохвильових радіоустановках навіть за значень $\operatorname{tg} \delta$ порядку 0,01 кількість виділеного тепла настільки велика, що може спричинити руйнування і розтоплення скла чи фарфору.

Величина $\operatorname{tg} \delta$ найкращих електроізоляційних матеріалів для високочастотної техніки та високих напруг $\approx 3 \cdot 10^{-4}$ і навіть менше. До таких матеріалів, зокрема, можна віднести неполярні полімери, для яких $\operatorname{tg} \delta$ не перевищує $\sim 0,0006$.

5.6. Вплив різних чинників на $\operatorname{tg} \delta$

Вплив частоти. Якщо втрати в діелектрику зумовлені лише наскрізною провідністю, то вони не залежать від частоти. І навпаки, якщо втрати в конденсаторі спричиняються головним чином опором монтажних чи інших провідників та самих електродів, то розсіювання енергії зростає пропорційно квадрату частоти. Тому конденсатори, призначені для роботи на високих частотах, повинні мати мінімальний опір провідників, пластин і перехідних контактів.

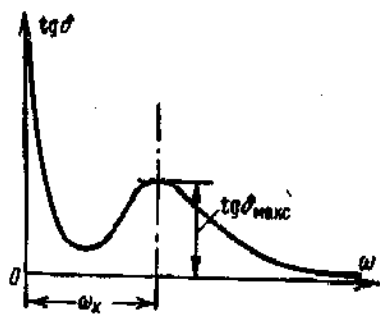


Рис. 5.13. Теоретична залежність тангенса кута втрат від частоти прикладеної до діелектрика напруги

кладеної до діелектрика напруги і частоти поля. Матеріал для роботи в таких умовах характеризується низькими значеннями кута втрат і діелектричної проникності.

Вплив температури. Як правило, $tg\delta$ суттєво зростає з підвищенням температури. Збільшення $tg\delta$ неполярному діелектрику зумовлено зростанням у ньому струму провідності. У полярного діелектрика діелектричні втрати за певної температури T_1 досягають максимального значення (рис. 5.14).

Це пояснюється двояким впливом підвищення температури: з одного боку, зростає ступінь орієнтації диполів, а значить і $tg\delta$; з іншого зменшуються втрати енергії на подолання опору в'язкого середовища і зменшення $tg\delta$. Зростання $tg\delta$ до температури T_1 , зумовлене втратами енергії на поворот все більшої кількості полярних молекул. Зменшення

Вплив частоти поля на значення $tg\delta$ показано на рис. 5.13. У випадку чисто дипольного механізму втрат частота відповідає такому співвідношенню між частотою зовнішнього електричного поля і часом τ релаксації диполів, за якого втрата енергії на подолання диполями опору в'язкого середовища найбільша.

Діелектричні втрати мають суттєве значення для матеріалів установок високої напруги, високочастотної апаратури, оскільки вони пропорційні квадрату при-

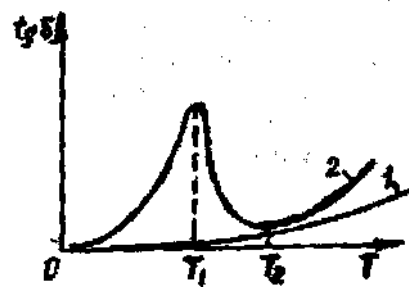


Рис. 5.14. Залежність тангенса кута діелектричних втрат від температури діелектрика: 1 - неполярний діелектрик; 2 - полярний діелектрик

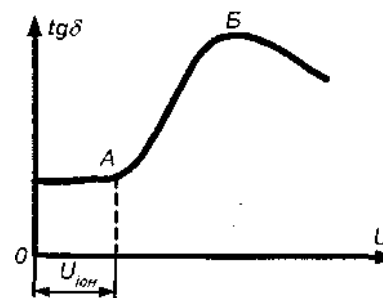


Рис. 5.15. Крива іонізації (схематично)

відності внаслідок зменшення в'язкості і збільшення швидкості переміщення носіїв струму (вільних іонів).

Вплив напруги. В багатьох випадках напруга практично не впливає на значення $tg\delta$. В окремих же випадках до певних значень напруги U величина $tg\delta$ не змінюється (рис. 5.15, точка А), але при подальшому зростанні напруги U крива $tg\delta(U)$ різко піднімається внаслідок процесу іонізації повітря чи інших газів у включеннях, вкраплених у матеріал ізоляції.

Після досягнення максимуму в точці Б крива починає знижуватись, тому що зменшується спад напруги на газових включеннях внаслідок зростання їх провідності. Робоча напруга ізоляції повинна бути нижчою від напруги іонізації U_{ion} (точка А).

5.7. Пробій діелектриків

* Електричний пробій - це руйнування матеріалу діелектрика (ізолятора) під дією електричної напруги, при якій матеріал втрачає свої електроізоляційні властивості і пропускає через себе електричний струм.

Настає пробій (точка П, рис. 5.16), якщо прикладена до діелектрика напруга перевищує критичне для даного діелектрика значення (пробивну напругу $U_{пр}$) і викликає розряд через діелектрик.

Практично відбувається коротке замикання між електродами. Після розряду в рідкому й газоподібному діелектриках зруйновані частинки внаслідок їх рухомості замінюються іншими і елект-

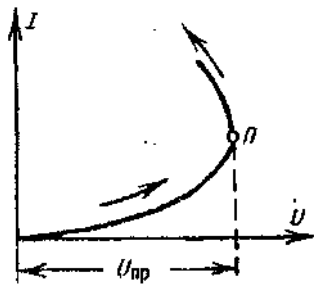


Рис. 5.16. Залежність струму скрізь ізоляцію від напруження на ній

вольт, кіловольтах, мегавольтах на міліметр, сантиметр або метр товщини h (В/мм, кВ/мм, МВ/м та ін.):

$$E_{\text{міц}} = U_{\text{пр}} / h$$

Визначаючи $U_{\text{пр}}$ у вольтах, а h в метрах, отримуємо основну одиницю для $E_{\text{міц}}$ - вольт на метр (В/м). Електрична міцність діелектрика змінюється в широкому діапазоні значень. Це пояснюється тим, що вона залежить від багатьох чинників - напруги (постійна, змінна, імпульсна), швидкості її наростання та ін.

* Діелектрики характеризуються **коефіцієнтом міцності** (запасом міцності) - відношенням пробивної напруги діелектрика до робочої за нормальних умов його роботи.

* **Пробивна напруга ($U_{\text{пр}}$)** - критична напруга для матеріалу діелектрика, з досягненням якої настає електричний пробій.

Вона залежить від якості матеріалу і товщини діелектрика h . Із збільшенням товщини пробивна напруга зростає, однак не строго пропорційно товщині:

$$U_{\text{пр}} = E_{\text{міц}} \cdot h$$

Значення пробивної напруги залежить також від >тривалості дії (із зменшенням тривалості вона зростає), > від температури, >тепловідведення, > циклічності дії, ^розмірів і > форми елек-

трична міцність відновлюється. За пробою твердого діелектрика відбувається зміна його твердості, змінюються склад і структура самого матеріалу (сплавляється, обвуглюється тощо) і електрична міцність невідновлюється.

* **Електрична міцність ($E_{\text{міц}}$)** - здатність електроізоляційного матеріалу протидіяти рушійчій

Вона визначається найменшою граничною напругою ($U_{\text{пр}}$), що припадає на одиницю товщини матеріалу, за якої матеріал руйнується. Вимірюється у

тродів, > частоти змінного струму та ін. причин.

Пробивна напруга діелектриків, які застосовуються в електричних машинах, трансформаторах, оливних вимикачах та ін. височастотній апаратурі, **визначає їх електричну міцність**. Пробивна напруга для найпоширеніших в практиці діелектриків складає в кВмм: ► для повітря - 3, ► мармуру - 7, ► фарфору - 25, ► скла - 10 - 40, ► бакеліту - 25, ► трансформаторної оливи - 16, ► непросоченого паперу - 7-9, ► фібри - 2-5, ► слюди - 100 - 200, ► міканіту - 25, ► ебоніту - 8 - 10.

У більшості випадків електрична міцність високоякісних твердих діелектриків вища, ніж рідких і газоподібних. Цим пояснюється "поверхневий розряд" або "перекриття" твердої ізоляції значної товщини за не великої відстані між найближчими точками електродів (рис. 5.17).

Розряд проходить не по товщині твердої ізоляції, а в прилеглому до неї рідкому, чи газоподібному (повітряному) діелектрику (показано стрілкою б). Тому пористі діелектрики із значною кількістю газових включень мають набагато меншу електричну міцність, ніж монолітні діелектрики з того ж матеріалу.

Просочування пористих діелектриків високоякісними електроізоляційними речовинами суттєво збільшує їх електричну міцність. Наприклад, просочення кабельного паперу оливкоаніфольним компаундом підвищує його міцність з 3 - 5 до 40 - 80 МВ/м.

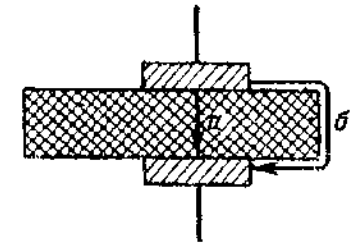


Рис.5.17. Пробій (а) і перекриття (б) ізоляції (схематично)

5.8. Електропровідність і пробій газоподібних діелектриків

Електропровідність газів. У природному стані гази майже не проводять електричний струм, тобто є діелектриками, ізолюючі властивості газів пояснюються тим, що атоми і молекули в них є нейтральними, незарядженими частинками. Тільки дуже мала частина атомів у цих умовах дисоціює на електрони та іони, рух

яких під дією поля спричинює електричний струм. Наприклад, для повітря степінь дисоціації становить близько 10^{-12} . Заряджені частинки в газах можуть виникати під впливом дії зовнішніх чинників: космічних, рентгенівських, ультрафіолетових променів, сильного нагріву газу тощо. Електропровідність газу, зумовлена дією таких зовнішніх чинників, називається несамостійною.

Зовнішні іонізатори надають атомам (молекулам) газу додаткової енергії, під дією якої електрони відокремлюються від молекул, перетворюючи їх у позитивні іони. Вивільнені електрони стають вільними носіями негативного заряду, а позитивні іони - носіями позитивного заряду. Вільні електрони можуть "приліпитись" до нейтральних молекул і перетворити їх у негативно заряджені іони. Таким чином, у газі під дією зовнішніх іонізаторів виникає невелика кількість електронів, позитивно та негативно заряджених іонів, які перебувають у безладному тепловому русі. Певна частина електронів і позитивно заряджених іонів рекомбінують, утворюючи нейтральні атоми і молекули.

Під дією напруженості електричного поля між електродами, розділеними шаром газу, електрони та іони переміщуються від одного електрода до іншого і створюють у газі електричний струм. У процесі спрямованого руху заряджені частинки на своєму шляху співударяються з нейтральними молекулами газу, які перебувають у хаотичному тепловому русі. За відносно невеликих значень напруженості поля після зіткнення частинки розлітаються, як пружні кульки, не викликаючи іонізації нейтральних молекул. Отже, нових заряджених частинок не створюється. Сила струму між електродами визначається тільки кількістю утворених у газі під впливом зовнішніх чинників заряджених частинок та швидкістю їх переміщення, яка зростає пропорційно напруженості електричного поля. У цих умовах дотримується закон Ома (область ОА, рис. 5.18.). За подальшого зростання напруги на вольт-амперній характеристиці з'являється горизонтальна ділянка (область АВ, рис. 5.18), тобто закон Ома не виконується. Зростання напруги ще не викликає збільшення кількості в газі заряджених частинок і струм не зростає. Це постійне, не залежне від напруги значення сили струму називається струмом насичення. За нього усі заряджені частинки досягають електродів, а нові ще не утворюються.

Якщо після досягнення в газі струму насичення продовжувати підвищувати напругу, то хід вольт-амперної характеристики раптово порушується і струм різко зростає. Стрибок струму вказує на зростання в газі числа заряджених частинок під впли-

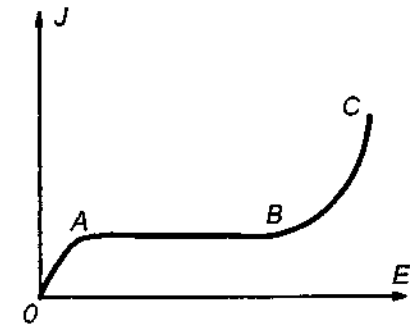


Рис. 5.18. Вольт-амперна характеристика газоподібного діелектрика

вом самого електричного поля. Це значить, що поле надає окремим іонам (електронам) настільки великої швидкості (енергії), що за співударів цих заряджених частинок з нейтральними молекулами останні розбиваються на іони та електрони. Число заряджених частинок тепер визначається не зовнішніми іонізуючими чинниками, а дією самого поля.

Чим сильніше поле, тим більша частина нейтральних молекул іонізується і струм зростає. Вказаний процес називається **ударною іонізацією газу (область ВС, рис. 5.18). За неї струм у газі швидко збільшується навіть за незначного підвищення напруги.*

Утворені за ударної іонізації електрони та іони збільшують у газі кількість рухомих зарядів, а останні у свою чергу набувають під дією поля швидкостей, достатніх для ударної іонізації нових молекул. Процес іонізації самопідсилюється, іонізація газу досягає великого значення і виникає "лавина" заряджених частинок (рис. 5.19). Мінімальна напруга, за якої виникає ця лавина, є **напругою пробоя газу** ($E = E_{np}$).

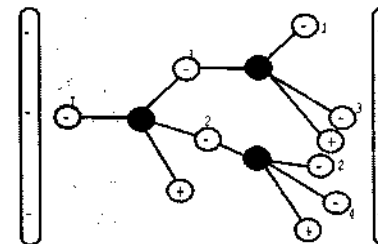


Рис. 5.19. Вільний електрон 1 за співудару з нейтральною молекулою розціплює її на електрон 2 і вільний позитивно заряджений іон. Електрони 1 і 2 за подальших співударів з нейтральними молекулами знову розціплюють їх на електрони 3 і 4 та вільні позитивно заряджені іони і т. д.

У багатьох видах електротехнічних конструкцій (лінії електропередач, трансформатори та ін.) зовнішньою ізоляцією є повітря. Пробивна напруга між двома розміщеними в газі електродами залежить як від *хімічного складу газу*, *його тиску*, *температури*, *відстані між електродами*, так і *форми та розмірів електродів*.

Пробій газоподібних діелектриків. У однорідному електричному полі, наприклад, у проміжку між двома кульковими електродами (рис. 5.20), якщо відстань між ними h набагато менша від діаметра d кульок, за зростання напруги відразу виникає пробій всього проміжку між електродами у вигляді іскри, яка за достатньої потужності джерела

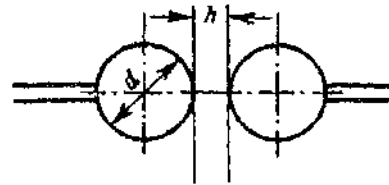


Рис. 5.20 Газовий проміжок між кульковими електродами

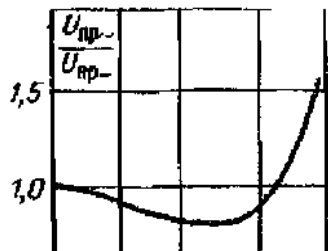


Рис. 5.21. Відношення величини пробивної напруги газового проміжку за змінної напруги до пробивної напруги цього ж проміжку за постійної напруги

озону O_3 та оксиду азоту NO . У газі виникає коронуючий розряд (корона). За подальшого підвищення напруги розміри корони зростають і відбувається іскровий або дуговий розряд між електродами, тобто повний пробій газового проміжку між ними. Пробивна напруга залежить від частоти електричного струму (рис. 5.21) та тиску газу

струму переходить в електричну дугу.

У випадках неоднорідного поля, розряд у газі спочатку виникає в місцях з високою напруженістю електричного поля (біля електродів з найбільшою кривизною поверхні, загострень і т. д.). Розряд спостерігається у вигляді світло-фіолетового світіння в шарі повітря біля електрода з меншим радіусом, супроводжується характерним шипінням (потріскуванням) і утворенням

(рис. 5.22). Пробій газу настає за дуже короткий час (мікросекунди), тому амплітудне значення пробивної напруги змінного струму з частотою менше тисячі герц практично дорівнює значенню пробивної напруги за постійного струму (див. рис. 5.21). Із зростанням частоти пробивна напруга спочатку дещо знижується, але потім зростає.

Зменшення тиску газу знижує значення пробивної напруги до мінімуму (рис. 5.22), після якого пробивна напруга зростає в міру збільшення розрідженості газу. Така залежність пояснюється двома чинниками:

- ▶ значенням енергії, якої досягають заряджені частинки під дією поля на момент зіткнення з нейтральними молекулами;
- ▶ ймовірністю зіткнення заряджених частинок з нейтральними.

У полі напруженістю E кінетична енергія зарядженої частинки W в момент зіткнення з нейтральною молекулою становить:

$$W = E g \lambda, \quad (5.3)$$

де g - заряд частинки, λ - середня відстань, яку проходить заряджена частинка до зіткнення. Якщо енергія W досягає значення "порогу іонізації" W_i , тобто стає достатньою для розділення зустрічної молекули на електрон та іон, то за $W \geq W_i$ може виникнути пробій газу, тому що новоутворені внаслідок іонізації заряджені частинки також будуть розганятись полем до значень W_i й іонізувати інші молекули. Процес розвиватиметься до повного пробою газового проміжку між електродами.

Із зростанням тиску газу зменшується середня відстань між молекулами, а значить і λ . Через це виконання умови пробою (5.3) настає при значному збільшенні E . У високому вакуумі, навпаки, λ збільшується, але одночасно зменшується ймовірність зіткнення заряджених частинок з нейтральними молекулами розрідженого газу. Вплив останнього чинника переважає і пробій газу відбувається за більших значень E . Очевидно, що за певного значення

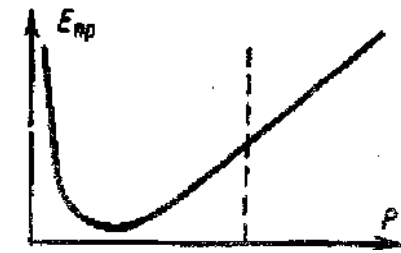


Рис. 5.22. Залежність електричної міцності газу від тиску (схематично). Вертикальна пунктирна лінія відповідає нормальному атмосферному тиску

тиску газу співвідношення вказаних чинників таке, що пробій газу настає за мінімальних значень E (мінімум на кривій, рис. 5.22).

Експериментально встановлено, що в однорідному полі значення **пробивної напруги** газового проміжку визначається **законом Пате на:**

$U_{пр} = A \cdot p \cdot h$, де A - величина, залежна від тиску газу p і товщини шару газу h .

Таким чином, пробивна напруга будь-якого газу зростає із збільшенням тиску газу p і товщини шару газу h між електродами (рис. 5.23). При зменшенні p і h пробивна напруга зменшується до мінімального значення, після чого починає зростати (ліва частина {/-подібної кривої).

Зростання пробивної напруги за дуже малих відстаней між електродами пояснюється скороченням середньої відстані / , на якій заряджені частинки набувають енергії, достатньої для ударної іонізації. Тому ударна іонізація настає за більш високих напруг.

5.9. Електропровідність і пробій рідких діелектриків

Електрична провідність. У рідких діелектриках електрична провідність зумовлена рухом іонів, які утворюються за дисоціації **домішок** >води, >солей, >лугів, >кислот та ін., а в окремих випадках і дисоціації молекул самого діелектрика. Молекули домішок легко піддаються електролітичній дисоціації: утворюються позитивно і негативно заряджені іони (катіони і аніони). За переміщення іонів в електричному полі на електродах виділяються хімічні речовини. Кількість виділеної речовини пропорційна кіль-

кості пропущеної через рідину електрики і визначається законами Фарадея.

У процесі експлуатації відбувається забруднення рідких діелектриків внаслідок їх старіння та попадання в діелектрик різних домішок з довкілля. Утворюються *суспензії (дисперсна фаза -тверда речовина, дисперсійне середовище - рідина) та емульсії (обидві фази - рідини)*. На поверхні частинок дисперсної фази **розміщені заряди**. Такі заряджені частинки дисперсної фази називаються **моліонами**. Моліони за дії прикладеного електричного поля переміщуються до електродів і розряджаються на них. Це явище **називається електрофорезом**. Отже, **електропровідність рідких діелектриків** зумовлена впорядкованим переміщенням за накладання електричного поля іонів і моліонів. **Моліонна електропровідність** за своєю фізичною природою близька до іонної. Електрофорез відрізняється від електролізу тим, що за його виникнення на електродах не виділяються нові речовини, а тільки змінюється відносна концентрація дисперсної фази в різних частинах об'єму.

На переміщення відносно великих заряджених частинок за іонної і моліонної електропровідності суттєво впливає в'язкість середовища. Чим більша в'язкість середовища, тим менша швидкість руху частинок і менша електропровідність.

Пробій рідких діелектриків. В електроізоляційній техніці як рідкі діелектрики найчастіше застосовуються старанно очищені від води та інших забруднень нафтові електроізоляційні оливи: >трансформаторні, >конденсаторні, >кабельні. Ці оливи є нейтральними або слабополярними діелектриками.

Електрична міцність електроізоляційних олив, яка визначається в стандартному пристрої (рис. 5.24), різко знижується за наявності в них краплинок води в колоїдному стані, завислих у рідкому діелектрику частинок смолистих речовин та інших забруднень. Найбільш шкідливе забруднення діелектрика водою (рис. 5.25).

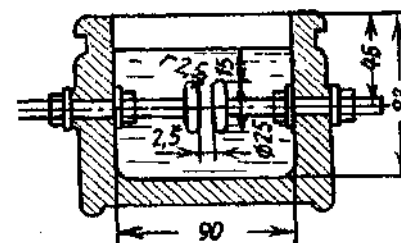


Рис. 5.24. Пристрій для дослідження оливи на пробій

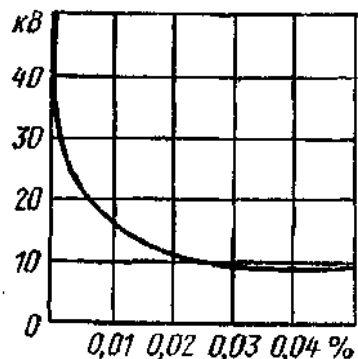


Рис. 5.25. Вплив домішок емульсійної води (у %) на пробивну напругу шару оливи товщиною 2,5 мм

металевими електродами, яким проходить електричний розряд і відбувається пробій діелектрика. Шкідливість забруднення рідкого діелектрика водою підсилюється у присутності гігроскопічних волокнистих домішок. Волокна паперу, бавовняної пряжі та ін. більш гігроскопічні, ніж олива, тому поглинають розчинену в ній воду і стають каналами проходження струму.

Підвищення температури забрудненого водою та смолистими речовинами рідкого діелектрика покращує його електричну міцність (рис. 5.26), тому що краплинки води та смолистих речовин розчиняються в діелектрику і запобігають утворенню в рідкому діелектрику струмопровідних каналів.

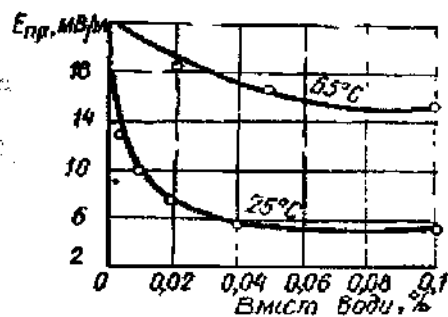


Рис. 5.26. Залежність електричної міцності нафтової оливи від вмісту в ній води (при різних температурах оливи)

5.10. Електропровідність і пробій твердих діелектриків

Електропровідність. Як зазначалося раніше, діелектрики - речовини, які погано проводять струм. У будь-якій речовині в електричному полі електрони і ядра атомів зазнають дії сил з його боку. Внаслідок цього частина зарядів спрямовано переміщується на значні відстані й утворює електричний струм, а частина зарядів перерозподіляється в межах молекул так, що центри ваги додатних і від'ємних зарядів зміщуються один відносно одного, викликаючи поляризацію діелектрика. Залежно від того, який з цих двох процесів - електропровідність чи поляризація - переважає, речовини ділять на ізолятори і провідники.

Кількісна різниця в електропровідності діелектриків і металів з точки зору класичної фізики полягає в тому, що в металах наявні вільні електрони, а в діелектриках всі електрони зв'язані, тобто належать окремим атомам. Електричне поле не відриває ці електрони, а тільки дещо зміщує їх у межах окремих атомів. Таке пояснення не точне. Згідно з квантомеханічною теорією тверде тіло як з діелектрика, так і з металу являє собою наче "гігантську молекулу", в якій кожен електрон належить всьому кристалу. Причиною відмінної поведінки електронів у металі і діелектрику є різний характер розподілу електронів на рівнях енергії.

Електропровідність діелектриків мала, але завжди відмінна від нуля (табл. 5.1).

Таблиця 5.1

Питомий електроопір ρ та електрична міцність $E_{міц}$ деяких твердих діелектриків, які застосовуються як електроізоляційні матеріали

Діелектричний матеріал	ρ , Ом-см	$E_{міц}$ В/см
Кварцове скло	10^{16} - 10^{18}	$2 \cdot 3 \cdot 10^5$
Поліетилен	10^{15} - 10^{16}	$4 \cdot 10^5$
Слюда	10^{14} - 10^{16}	$1 - 2 \cdot 10^6$
Електрофарфор	10^{13} - 10^{14}	$3 \cdot 10^5$
Мармур	10^8 - 10^9	$2 \cdot 3 \cdot 10^5$

Носіями струму в діелектриках є електрони та іони. *Електропровідність діелектриків зумовлена тими ж причинами, що й електропровідність напівпровідників.* У звичайних умовах електронна провідність діелектриків мала порівняно з іонною. Іонна провідність спричинюється переміщенням як власних іонів, так і до-мішкових.

Можливість переміщення іонів по кристалу тісно пов'язана з дефектністю кристала. Якщо, наприклад, у кристалі наявні вакансії (незайняті іонами вузли ґратки), то під дією поля іон може перескочити на сусіднє з ним вакантне місце, а на місці цього іона утворюється нова вакансія. У цю новоутворену вакансію може перескочити інший іон, тобто відбувається упорядкований у напрямку поля рух вакансій, який приводить до перенесення заряду через весь кристал і виникнення струму.

Переміщення іонів може відбуватися і по міжвузловому просторі. Підвищення температури спричинює збільшення кількості іонів у цьому просторі і зумовлює зростання провідності. Суттєвий вклад у загальну провідність може внести також поверхнева провідність.

Об'ємна і поверхнева електропровідність. Загальний опір тіла з постійним поперечним перерізом s і довжиною l визначається за формулою:

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (5.11)$$

де ρ - питомий об'ємний опір матеріалу,

$$\rho = R \frac{s}{l} \quad (5.12)$$

У системі СІ питомий опір визначається в Ом·м.

$$1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 100 \text{ Ом} \cdot \text{см} = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} = 10^6 \text{ мкОм} \cdot \text{м} = 10^8 \text{ мкОм} \cdot \text{см}.$$

Для вивчення електропровідності твердого діелектричного матеріалу зразок з цього матеріалу розміщують між: двома металічними електродами, до яких підводиться електрична напруга (рис. 5.27). Струм витікання I , який проходить крізь товщу матеріалу і стабілізується за достатньо великий проміжок часу після включення зразка під постійну напругу U , також є постійним.

Електроопір R_{i3} , поміщеного між електродами відрізка ізоляції становить:

$$R_{i3} = U/I_{i3}, \text{ Ом.} \quad (5.4)$$

Провідність ізоляції G_{i3} - величина, обернена R_{i3} .

$$G_{i3} = 1/R_{i3} = I_{i3}/U, \text{ См.} \quad (5.5)$$

Крім об'ємної провідності ізоляції G , яка кількісно визначає можливість протікання струму через товщу ізоляції, необхідно враховувати також поверхневу провідність ізоляції G_s , яка характеризує можливість протікання струму по зволоженій і забрудненій по верхні діелектрика.

Поверхневий R_n і об'ємний R опори ізоляції, а також поверхневий I_s і об'ємний I струми визначають за формулами:

$$I = UG = U/R; \quad (5.6)$$

$$I_s = UG_s = U/R_s \quad (5.7)$$

З рис. 5.27 видно, що

$$I_{i3} = I + I_s \quad (5.8)$$

Так що

$$1/R_{i3} = 1/R + 1/R_s \quad (5.9)$$

$$R_{i3} = \frac{RR_s}{R + R_s} \quad (5.10)$$

або

Тобто опір ізоляції визначається як результуюча двох опорів, увімкнених паралельно один до одного між електродами ► **об'ємного** і ► **поверхневого опорів**.

Величина питомого електроопору діелектрика залежить від наявності >домішок, >вологості, >температури, >значення прикладеної напруги та ін. **Найбільший вплив на питомий опір гігроскопічних діелектриків, тобто таких, які здатні поглинати вологу, має поглинута діелектриком волога. Присутність навіть ма-**

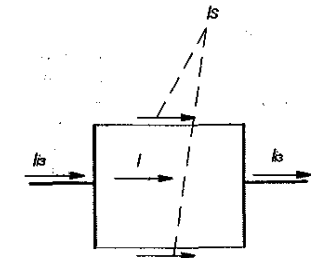


Рис. 5.27. Об'ємний і поверхневий струми витіку через ділянку ізоляції (схематично)

лої кількості вологи може значно зменшити питомий опір діелектрика. Це пояснюється тим, що розчинені у воді домішки дисоціюють на іони. Діелектрична проникність води висока і сприяє дисоціації молекул самого діелектрика. Тому умови роботи електричної ізоляції погіршуються при її зволоженні.

Особливо сильно знижується ρ при зволоженні волокнистих матеріалів, в яких волога може утворювати суцільні плівки на поверхні волокон і утворювати електропровідні канали, які пронизують весь діелектрик від одного електрода до іншого. Для захисту гігроскопічних матеріалів від дії вологи ці матеріали просочують або покривають негігроскопічними лаками, компаундами тощо, які значно зменшують або унеможливають зволоження матеріалу. Волога не знижує ρ суцільних негігроскопічних матеріалів.

Поверхневі шари електричної ізоляції, твердих діелектриків завжди звожуються і забруднюються, і в них з'являється помітна поверхнева електропровідність, яка характеризується питомим поверхневим опором ρ_s . У металічних провідниках поверхневі струми у зволоженому шарі надзвичайно малі порівняно з об'ємними і тому не враховуються.

Поверхневий питомий опір ділянки поверхні твердого діелектрика між паралельними окрайками електродів довжиною b , розміщеними на відстані a одна від одної (рис. 5.28), прямо пропорційний величині b і обернено пропорційний величині a :

$$\rho_s = R_s \frac{b}{a} \quad (5.13)$$

Розмірність ρ_s співпадає з розмірністю опору, тому що величина R виражається в омах, а відношення b/a безрозмірне. Враховуючи, що ρ_s є опір умовного квадрата будь-якого периметра (величини) на поверхні діелектрика, якщо

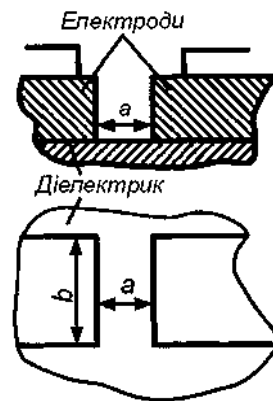


Рис. 5.28. Схема пристрою для визначення поверхневого електроопору

струм тече з однієї сторони квадрата до протилежної, то за $a=b$ отримуємо $R_s = \rho_s$.

Пробій твердого діелектрика. Пробій твердого діелектрика зумовлюється утворенням у ньому провідного каналу, в якому густина струму набагато більша, ніж середня у зразку. Внаслідок виділення в каналі великої кількості джоулевого тепла відбувається руйнування матеріалу (►проплавлення, ►обвуглення, ►розтріскування тощо) і пробій твердого діелектрика викликає незворотне руйнування матеріалу.

У реальних твердих діелектриках пробій настає за менших значень E , ніж в ідеально однорідних, тому що різні неоднорідності полегшують його виникнення.

Фізична картина пробою твердих діелектриків за різних умов суттєво відрізняється. Розрізняють два основні види пробою: > електричний і > електротепловий.

*** Електричний пробій** - це безпосереднє руйнування діелектрика силами електричного поля.

Вторинні процеси (нагрів, розтріскування), які можуть відбуватися в діелектрику під дією поля, за чисто електричного пробою не відбуваються. Електричний пробій викликається взаємодією пришвиджених електричним полем вільних заряджених частинок (електронів та іонів) з молекулами діелектрика або внаслідок непружного зміщення в діелектрику під дією електричного поля зв'язаних зарядів. **Електричний пробій характеризується:**

→ малим часом (порядку мікросекунд) протікання пробою. Якщо пробій не відбувся невдовзі після прикладення напруги, то мало ймовірно, що чисто електричний пробій взагалі відбудеться;

→ слабкою залежністю $E_{пр}$ від частоти прикладеної напруги;

→ малою залежністю електричної міцності від температури;

→ відносно малою залежністю електричної міцності від розмірів діелектрика і електродів

Електротепловий пробій. У діелектрику, який перебуває в електричному полі, виділяється тепло діелектричних втрат. За дії постійної напруги ці втрати тим більші, чим вища прикладена напруга і більша питома провідність γ матеріалу. За дії змінної напруги питомі діелектричні втрати тим більші, чим вищі значення $\epsilon \tan \delta$ матеріалу і чим вища частота f напруги.

Електротепловий пробій (рис. 5.29) розвивається наступним чином: під дією електричної напруги в діелектрику виділяється тепло, зростає температура діелектрика і діелектричні втрати.

Процес підсилюється до моменту руйнування діелектрика в результаті нагріву (буде розплавлений, обвуглений, пронизаний тріщинами і т. п.) і пробій у ньому відбувається за настільки низької на-

пруги, за якої він при низькій температурі в непошкодженому діелектрику не мав би місця. Для виникнення пробію достатньо локального розігріву діелектрика на будь-яких неоднорідностях матеріалу, середня ж температура всього об'єму діелектрика може суттєво і не підвищуватися. Якщо коефіцієнт діелектричних втрат за дії змінної напруги або питома провідність за постійної напруги малі і викликають незначне та повільне підвищення температури, а коефіцієнт теплопровідності діелектрика великий і тепло швидко відводиться з локальної зони нагріву, то розвиток теплового пробію гальмується і діелектрик може тривало працювати, не руйнуючись, за відносно високої напруги.

Електрична міцність для випадку електротеплового пробію (за змінної напруги) залежить від ► частоти напруги, ► температури, ► товщини шару діелектрика й ► умов охолодження, а також ► трьох фізичних параметрів даного діелектрика:

- > коефіцієнта теплопровідності λ ;
- > коефіцієнта діелектричних втрат $\varepsilon \cdot \tan \delta$;
- > температурного коефіцієнта втрат α .

Чим більший коефіцієнт діелектричних втрат, температурний коефіцієнт втрат, час прикладення напруги і чим нижчий коефіцієнт теплопровідності матеріалу, тим сприятливіші умови для виникнення теплового пробію.

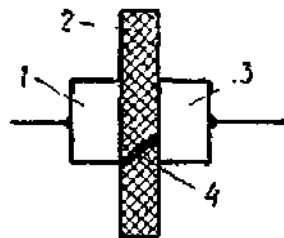


Рис. 5.25. Схема утворення у твердому діелектрику каналу при теплового пробію: 1, 3 - металеві електроди; 2 - діелектрик; 4 - канал з підвищеною провідністю - напрям теплового пробію



ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОТРОЛЮ

1. Опишіть процес електропровідності в газоподібних діелектриках.
2. Опишіть особливості газів, рідин і твердих тіл стосовно вимог, що ставляться до електричної ізоляції.
3. Наведіть класифікацію діелектриків за їх властивостями і галузями застосування.
4. Який склад нафтових електроізоляційних олиф?
5. Які вимоги ставлять до електроізоляційних олиф, що застосовуються у трансформаторах?
6. Від яких чинників залежить електрична міцність рідких діелектриків?

РОЗДІЛ 6



ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

6.1. Полімери

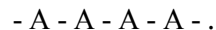
Високомолекулярні діелектрики за звичайних різниць потенціалів практично неелектропровідні і тільки за дуже високих напруг у них може виникнути пробій. Завдяки доброму поєднанню високих електроізоляційних і механічних властивостей, підвищеній стійкості до дії агресивних середовищ, технологічності, високо-молекулярні полімерні матеріали широко застосовують як електроізоляційні матеріали в електротехніці.

* **Полімери** складаються з великих макромолекул, в які входять від декількох тисяч до мільйонів молекул (мономерів) простих речовин. Процес з'єднання між собою мономерів однієї чи кількох речовин названо **полімеризацією**.

За полімеризації елементний склад полімерів такий самий як у мономерів, лише подвійні зв'язки мономерів зникають повністю або їх число різко зменшується.

* Полімери, макромолекули яких утворилися з'єднанням між собою однакових мономерів речовини "А" у вигляді витягнутих ланцюжків або ниток (молекули мають лінійну структуру), названо **лінійними**.

їх схематично зображають у вигляді



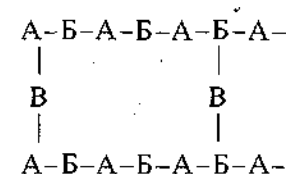
* Лінійні полімери, синтезовані з мономерів різних речовин "А" і "В", названо **співполімерами**:



У макромолекулах полімерів молекули (мономери) міцно з'єднані між собою силами хімічного (ковалентного) зв'язку, а поперечні зв'язки між макромолекулами здійснюються набагато слабшими дисперсійними силами.

Лінійні полімери за відсутності поперечних хімічних зв'язків (зшивань) за нагріву розм'якають, а при охолодженні знову тверднуть. У них поперечні зв'язки між лінійними макромолекулами (ланцюжками) слабкі. Зростання теплового руху за відповідного підвищення температури стає достатнім для розриву цих слабких зв'язків і для переміщення одного ланцюжка відносно сусіднього. До цього типу полімерів відносять поліетилен, полістирол, полівінілхлорид та ін. Це **термопластичні полімери (термопласти)**.

Існує група полімерів, які за достатнього підвищення температури також розм'якають, але одночасно в них починають виникати додатково міцні поперечні хімічні зв'язки між ланцюжками (поперечне зшивання), внаслідок чого утворюються міцні просторові каркаси і відбувається незворотна зміна властивостей полімерів. За охолодження ці полімери тверднуть і вже не розм'якають при повторному нагріві. Достатньо висока температура спричинює деструкцію полімерів, вони розкладаються і обезвуглечуються. Це **термореактивні полімери (реактопласти)**.



вулканізований каучук

або повне



(наприклад бакаліт)

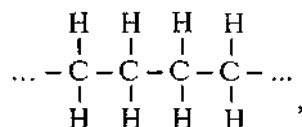
Число поперечних зшивань може бути незначне

* Належність матеріалу до термопластичних, чи термореактивних полімерів легко визначити: якщо полімер за нагріву розм'якає, значить це **термопласт**, якщо ні - **реактопласт**.

Тверді термопластичні полімери (термопласти). Полімеризуватись можуть тільки такі речовини (мономери), в молекулах яких наявні кратні зв'язки, або циклічні групи. За рахунок цих

зв'язків (або за рахунок розкриття циклу) у молекулах вихідної речовини (речовин) утворюються вільні валентності, якими молекули з'єднуються між собою у макромолекули.

Поліетилен. Найпростішим прикладом процесу полімеризації може служити синтез із газоподібного етилену $\text{H}_2\text{C} = \text{CH}_2$ (з одним подвійним зв'язком $\text{C} = \text{C}$ у молекулі) твердого полімеру поліетилену. Внаслідок розриву в молекулі етилену одного з двох зв'язків утворюється бірадикал з двома ненасиченими валентностями. Цими валентностями бірадикали зв'язуються між собою у великі макромолекули



які мають вигляд ланцюжків. Ланцюжок складається з однакових молекул етилену $(-\text{H}_2\text{C} - \text{CH}_2 -)_n$, але зі зміненим характером зв'язку між атомами C (замість подвійного зв'язку $\text{C} = \text{C}$ є простий зв'язок $\text{C} - \text{C}$). Зображена схема будови молекули дещо спрощена, тому що в ланцюжку наявне також незначне число бокових відгалужень $(-\text{CH}_3, -\text{C}_2\text{H}_5 \text{ та ін.})$.

** Поліетилен - твердий непрозорий матеріал світло-сірого або білого кольору.*

Залежно від технології виробництва отримують поліетилен > високого (ПЕВТ), > середнього (ПЕСТ) і > низького (ПЕНТ) тиску.

ПЕВТ виготовляють за високих тисків (до 300 МПа) і температур 180 - 200 °С в присутності незначної кількості кисню (0,005 %). Має відносно невисоку густину (920 - 930 кг/м³) і температуру плавлення (105 - 110 °С), теплостійкість (за Мартенсом) 55 - 60 °С, міцність при розриві 7 - 14 МПа.

ПЕСТ отримують за тиску 3 - 7 МПа і температури до 200 °С, каталізатори полімеризації - оксиди хрому CrO_3 , молібдену MoO_3 . Густина 940 кг/м³, теплостійкість 85 °С, температура плавлення 130 °С, міцність 20 - 23 МПа.

ПЕНТ отримують за тиску 0,3 - 0,6 МПа і температури 60 °С в присутності каталізаторів. Температура його плавлення 125 °С, теплостійкість 70 °С, густина 960 кг/м³, міцність 27 - 33 МПа.

У поліетиленах міститься 55 - 90 % кристалічної фази. Вони дуже пластичні. Видовження за розриву в межах 150 - 600 %, холодостійкість мінус 60 °С, при ударах не ламаються.

нічних розчинниках, стійкі до дії $\rightarrow$ кислот, $\rightarrow$ лугів, $\rightarrow$ води, $\rightarrow$ спиртів, $\rightarrow$ ацетону. При 70 °С починають набухати і розчиняються у ксилолі, бензолі, чотирихлористому вуглеці і мінеральних оливах. Поліетилен малопроникні для води та інших полярних рідин, їх водопоглинання менше 0,004 % за 30 діб перебування у воді.

Поліетилен різних типів широко використовуються в ізоляції кабелів, а з ПЕВТ виготовляють електроізоляційні напівпрозорі плівки товщиною 30 - 200 мкм і шириною від 1 до 1,5 м, стрічки та інші вироби. Технологія переробки ПЕВТ у вироби простіша, ніж технологія переробки поліетилену інших типів.

Поліетилен випускають у гранулах, вироби з яких дістають методом лиття під тиском, гарячим пресуванням та екструзією. Методом екструзії виготовляють різні ізоляційні шланги, трубки, наносять поліетиленову ізоляцію на провід. З більш твердих ПЕСТ і ПЕНТ виготовляють плати, каркаси котушок та ін.

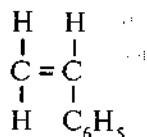
Поліетилен має низьку нагрівостійкість і при тривалому нагріві та доступі повітря окислюються, особливо за одночасного освітлення. Теплове старіння поліетиленів сповільнюється введенням в їх склад ароматичних речовин - антиокислювачів. Старіння під дією світла зменшується за добавки до 2 % сажі. Однак сажа знижує електроізоляційні властивості поліетиленів, вони стають непридатними для електричної ізоляції, проте можуть застосовуватись для захисних оболонок кабельних виробів.

Нагрівостійкість поліетилену суттєво зростає під впливом іонізуючого опромінення, яке спричинює часткове зшивання ланцюжків макромолекул і утворення просторових структур. Опромінений у деформованому стані поліетилен внаслідок осідання за відповідного нагріву відновлює форму і розміри виробу до вихідних значень (існуючих до опромінення). Таке термоосідання використовують в електроізоляційних грубках, муфтах, герметичних покриттях навілок. Вироби після монтажу і нагріву осідають, внаслідок чого ізоляція щільно обтискує провідники. Навивка опроміненою поліетиленовою плівкою в кілька шарів після тер-

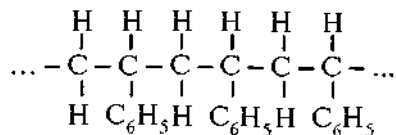
моосідання стає майже монолітною внаслідок щільного з'єднання між собою окремих шарів.

Для отримання пористого поліетилену з малою об'ємною масою і низькою діелектричною проникністю (1,4 - 1,5), придатного і для радіочастотної електричної ізоляції, у поліетилен вводять порофори, які за нагрівання розкладаються з виділенням газів та утворенням рівномірно розподілених по всій товщі матеріалу пор. Подібним способом можна виготовляти пористі матеріали з інших полімерів.

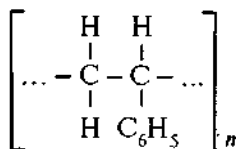
Полістирол. За полімеризації стирулу - рідкого насиченого вуглеводню C_8H_8 з будовою молекули



один зв'язок між сусідніми атомами вуглецю в молекулі стирулу розривається, виникають вільні зв'язки і відбувається з'єднання між собою багатьох молекул стирулу й утворення полістиролу



Макромолекулу полістиролу можна розглядати як ланцюжок однакових молекул (мономерів) стирулу зі зміненим зв'язком між атомами вуглецю - замість подвійного зв'язку $\text{C} = \text{C}$ в молекулі стирулу залишається простий зв'язок $\text{C} - \text{C}$.



де n - ступінь полімеризації, тобто число молекул стирулу, об'єднаних в одну макромолекулу полістиролу.

Густий прозорий полістирол розливають у підігріті скляні фор-

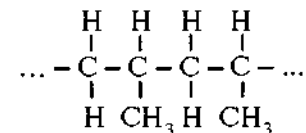
ми, в яких завершується процес полімеризації. У такий спосіб дістають твердий прозорий матеріал у вигляді пластин і стрижнів. Полістирол отримують також у гранулах або у вигляді порошку (емульсійний полістирол).

Полістирол розм'якає за $110 - 120^\circ\text{C}$. Розчиняється в неполярних рідинах: бензолі, ксилолі, чотирихлористому вуглеці та деяких інших. Його основні характеристики: густина 1050 кг/м^3 ; $\sigma_p = (30 - 50) \text{ МПа}$, теплостійкість $75 - 80^\circ\text{C}$; $\alpha = 12 - 18 \text{ кДж/м}^2$, водопоглинання $0,03\%$ маси; холодостійкість -60°C , $\rho_v = 10^{13} - 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 2,4$; $\text{tg}\delta = (2 - 4) \cdot 10^{-4}$; $E_{\text{міц}} = 25 - 30 \text{ МВ/м}$.

Витягуванням полістиролу отримують гнучкі плівки товщиною $20 - 100 \text{ мкм}$ і шириною $10 - 300 \text{ мм}$. Електрична міцність полістирольних плівок висока: $E_{\text{міц}} = 80 - 100 \text{ МВ/м}$. Їх застосовують для ізоляції жил височастотних кабелів і у виробництві конденсаторів.

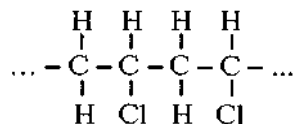
Висока крихкість виробів з полістиролу усувається в сумішах полістиролу із синтетичними каучуками, з яких отримують уда-рнотікні полістироли. З полістиролу виготовляють ізоляційні панелі, каркаси котушок, ізолятори для електровимірювальних приладів.

Поліпропілен отримують полімеризацією пропілену $[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-]$. Структура поліпропілену характеризується відносно правильним розміщенням у просторі бокових груп - CH_3 і атомів - H :



Густина поліпропілену $\sim 900 \text{ кг/м}^3$, відносно видовження за розтягу досягає $500 - 600\%$, температура плавлення $160 - 170^\circ\text{C}$. За тривалої дії бензину і бензолу набухає, а при 100°C розчиняється в ароматичних вуглеводнях, бензолі, толуолі. Електроізоляційні властивості поліпропілену близькі до властивостей поліетилену.

Полівінілхлорид (поліхлорвініл) отримують у вигляді порошку білого кольору полімеризацією мономеру вінілхлориду $\text{H}_2\text{C} = \text{CHCl}$. Його структурна формула



Гарячим пресуванням порошку полівінілхлориду дістають твердий, жорсткий матеріал - вініпласт у вигляді листів, пластин, стрижнів, труб або готових виробів (плати, баки для акумуляторів та ін.). Вироби з вініпласту легко формуються в металевих формах при 150 - 160 °С, добре зварюються, склеюються, обробляються механічно (обточуються, свердляться, фрезеруються тощо), мають високу механічну міцність та ударну в'язкість.

Основні характеристики: $\rho_v = 10^{10} - 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\epsilon = 4$; $\text{tg } \delta = 0,01 - 0,02$; $E_{\text{міц.}} = 20 - 22 \text{ МВ/м}$; теплостійкість (за Мартенсом) 60 - 70 °С; холодостійкість мінус 15-25 °С; водопоглинання 0,4 - 0,6 %. Розкладання вініпласту настає за температури 180 - 200 °С.

* *Поліхлорвініл - полярний діелектрик, стійкий до дії води, лугів, розбавлених кислот, олив, бензину і спиртів.*

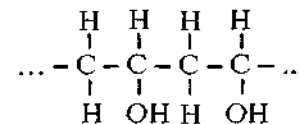
Використовується для виготовлення пластичних мас, гумоподібних виробів та ін.

Полівінілхлоридний пластикат отримують у вигляді гнучкого, еластичного рулонного матеріалу - стрічок товщиною 0,8 - 2,5 мм і шириною до 400 мм, а також листів товщиною 1 - 5 мм кількарязовим пропусканням між нагрітими вальцями суміші порошкоподібного поліхлорвінілу з пластифікаторами, наповнювачами, термостабілізаторами і барвниками.

Барвники (червоний, синій, жовтий та ін.) вводять для розпізнавання проводів при монтажі і для захисту матеріалу від світлового старіння. *Основні характеристики:* $\rho_v = 10^8 - 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\epsilon = 4 - 6$; $\text{tg } \delta = 0,05 - 0,08$; $E_{\text{міц.}} = 1,5 - 2,5 \text{ МВ/м}$; холодостійкість мінус 40 - 50 °С; температура розкладання 200 - 250 °С, водопоглинання 0,2 - 0,5 %.

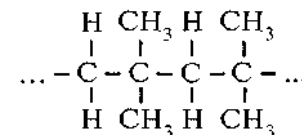
Полівінілхлоридний пластикат застосовують як основну ізоляцію монтажних проводів, для виготовлення гнучких ізоляційних трубок, захисних оболонок шлангів кабелів і липких ізоляційних стрічок. *Пластикат припиняє горіти після винесення його з полум'я.*

Полівініловий спирт. Синтетичний полімер білого кольору з будовою молекули



Стійкий в розбавлених кислотах і лугах. Широко застосовується для виготовлення емаль-лаків, які мають високу механічну міцність. Внаслідок сильно вираженої полярності, високого $\text{tg } \delta$ і розчинності у воді полівініловий спирт майже не застосовується як електрична ізоляція.

Поліізобутилен - полімер ізобутилену $\text{H}_2\text{C} = \text{C}(\text{CH}_3)_2$



Це липка каучукоподібна високомолекулярна речовина (молекулярна маса до 400 000), холодостійка (до -80 °С) і маловологопроникна. Для підвищення твердості поліізобутилен змішують з поліетиленом, вводять у нього наповнювачі.

Капрон належить до групи синтетичних матеріалів - поліамідів, в молекулу яких входять амідні групи - CO - NH -. Це твердий синтетичний матеріал білого або світло-жовтого кольору, який добувають полімеризацією капролактаму. Розплавлений капрон витискають з автоклава у вигляді вузької стрічки у воду, промивають, подрібнюють, просушують і зберігають у гумових мішках для захисту від водопоглинання. Температура плавлення капрону близько 215 °С; водопоглинання 3 % маси; $\rho_v = 10^8 - 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\epsilon = 4$; $\text{tg } \delta = 0,04$; $E_{\text{міц.}} = 1,8 - 2,0 \text{ МВ/м}$.

Капрон широко застосовується у виробництві електромонтажних і конструкційних деталей, а капронове волокно - як ізоляція обмоткових проводів і як основа електроізоляційних лакованих тканин.

* *Органічне скло (поліметилметакрилат) - термопластичний прозорий матеріал (пропускає до 92 % променів видимої області спектра), легко забарвлюється.*

Отримують з рідкої речовини метилметакрилату з добавками перекису бензолу (0,1 %) і пластифікуючих речовин, які зменшують його крихкість. Суміш вихідних компонентів перемішують, підігрівають і розливають у нагріті до 120 °С металічні або із силікатного скла форми. Випускають у вигляді листів. Порошок органічного скла отримують полімеризацією метилметакрилату у водному розчині лужних речовин.

Основні характеристики органічного скла: теплостійкість (за Мартенсом) 60 - 80 °С; холодостійкість мінус 50 - 60 °С; $\rho_v = 10^{10-10^{11}}$ Ом·м; $\epsilon = 3,6$; $\text{tgS} = 6 \cdot 10^{-2}$; $E_{\text{міц}} = 15 - 18$ МВ/м. Органічне скло стійке проти розбавлених кислот, лугів, бензину і мінеральних олив. Розчиняється в ароматичних вуглеводнях (бензолі, толуолі, ксилолі), хлорбензолі, ацетоні та в деяких інших розчинниках.

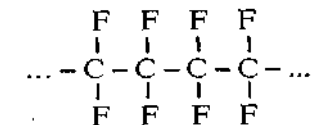
Органічне скло підлягає усім видам механічної обробки, легко склеюється дихлоретановим клеєм, зварюється при температурі 140 - 150 °С і стисканні поверхонь які зварюють. Із нагрітого (115-135 °С) скла легко формують у пресформах або під вакуумом різні вироби.

Поліформальдегід отримують у вигляді порошку білого кольору полімеризацією газоподібного формальдегіду. З порошку литтям під тиском або екструзією виготовляють вироби. Завдячуючи високому вмісту кристалічної фази (75 %) матеріал має підвищені механічні характеристики і чітко виражену температуру плавлення (180 °С). Характеризується підвищеною твердістю, стійкістю проти стирання низьким коефіцієнтом тертя. З поліформальдегіду виготовляють безшумні шестерні, черв'ячні передачі й підшипники.

Вироби з поліформальдегіду можуть експлуатуватись за температур до 100 °С, є волого та хімічно стійкі, стійкі проти іскрових розрядів, мають добрі електричні характеристики і піддаються усім видам механічної обробки. З нього виготовляють ізоляційні основи, каркаси котушок та ін.

Фторорганічні полімери. Фторопласт-4 (фторлон-4) отримують полімеризацією тетрафтор-етилену $\text{F}_2\text{C} = \text{CF}_2$

Внаслідок симетричності будови молекули фторопласт неполярний. Випускається у вигляді пухкого порошку білого або сіруватого кольору, пресуванням якого у сталених пресформах за



Будова молекули фторопласту-4.

кімнатної температури отримують вироби, які для надання їм щільності і монолітності спікають нагріванням у печах. *Фторопласт-4 в зарубіжних країнах зустрічається під назвою "тефлон" або "дайфлон".* Характеристики фторопласту-4: $\rho_v = 10^{15} - 10^{17}$ Ом·м; $\epsilon = 2$; $\text{tg}\delta = (2 - 4) \cdot 10^{-4}$; $E_{\text{міц}} = 30$ МВ/м; (у плівок $E_{\text{міц}} = 100 - 180$ МВ/м; густина 2100 - 2300 кг/м³; холодостійкий (-269 °С).

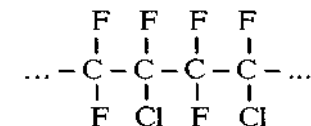
Фторопласт-4 надзвичайно хімічно стійкий, не піддається впливу сірчаної, соляної, азотної і плавикової кислот, лугів і за хімічною стійкістю перевищує золото і платину. Матеріал абсолютно негорючий, негігроскопічний та не змочується водою, смолами і лаками. Для покращення адгезійних властивостей поверхню фторопласту-4 активують:

► обробкою розчином металічного натрію у безводному аміаку або в тетрагідрофурані;

► тліючим розрядом у вакуумі. Активацією створюють на поверхні губчасту структуру, в пори якої проникає клеюча речовина.

За температури близько 330 °С матеріал набуває прозорості, а за 415 °С починає термічно розкладатись з відщепленням токсичного газоподібного фтору. *Фторопласт-4 - дорогий матеріал і застосовується у відповідальних випадках: У за одночасної дії на ізоляцію високих або низьких температур, > хімічно агресивних середовищ тощо.*

Політрифтор хлор етилен - полімер трифторхлоретилену $\text{F}_2\text{C} = \text{CFCl}$, випускається під назвою фторлон-3 (фторопласт-3). Має несиметричну структуру молекули, оскільки атоми хлору більші від атомів фтору і є полярним діелектриком. Формула політрифторхлоретилену:



За нагрівостійкістю (близько 130 °С), температурою розкладання (-300 °С) і хімічною стійкістю фторлон-3 поступається

фторопласту-4, а за радіаційною стійкістю переважає фторопласт-4. Технологія переробки фторлону-3 відносно проста.

Полііміди отримують поліконденсацією ангідриду піромелітової кислоти та діамінів. Полііміди є хімічно стійкими діелектриками, не розчиняються у більшості органічних розчинників, стійкі в розведених кислотах, мінеральних оливах і воді.

Термопластичні полііміди використовують для виготовлення різних пластмасових виробів електроізоляційного та конструкційного призначення. Вироби мають високу нагрівостійкість (220-250 °C) добрі електричні, механічні властивості та радіаційну стійкість. На основі поліімідів виготовляють емаль-лаки для емалювання обмоткових проводів, гнучкі напівпрозорі електроізоляційні плівки тощо.

Поліаміди - синтетичні полімери, в молекулах яких містяться амідні групи - CO - NH -; тверді роговидні чи прозорі склоподібні речовини, з розплавів, або розчинів яких методами екструзії отримують прозорі зносостійкі, стійкі в лугах і розчинниках прозорі поліамідні плівки. Їх використовують як електроізоляційний матеріал. З поліамідного волокна виготовляють тканини.

Гнучкі прозорі плівки товщиною до 0,02 мм виготовляють з органічних полімерів і випускають в сувоях (рулонах). Завдяки високій електричній і механічній міцності їх широко застосовують для ізоляції електричних машин, кабелів, обмоткових проводів і як діелектрики конденсаторів.

Для електроізоляційної техніки важливі плівки з триацетату целюлози, які виготовляють як з різним вмістом пластифікаторів, так і без них. Плівки пластичні, їх відносне видовження в межах 15-20 %. Значення є цих плівок $\sim 3,6$; $tg\delta = 0,007$; гігроскопічність 2-3 %. Застосовуються для ізоляції секцій-обмоток електричних машин і апаратів, а також деяких типів обмоткових проводів. Допустима довготривала робоча температура 90 - 100 °C.

Триацетатні плівки дуже чутливі до тріщин на краях, які легко поширюються і руйнують їх. Тому плівки наклеюють на картон. Отриманий композиційний матеріал характеризується високою електричною та механічною міцністю і широко використовується в ізоляції електричних машин.

Високі електроізоляційні та механічні властивості мають полярні поліетилентерефталатні плівки (майлар, мелінекс та ін.). Ці плівки хімічно стійкі і нагрівостійкі. Їх параметри: границя міцності 120- 180 МПа, відносне видовження 50- 100 %; $\rho = 10^{14}$ Ом·м; $\varepsilon = 3,0$; $tg\delta = 0,007$ (при 50 Гц); робоча температура від -60 °C до + 150 °C.

Полікарбонатні плівки (макрофоль) мають кращі параметри: міцність 100 - 200 МПа, відносне видовження 300 - 400 %; $\rho = 10^{14}$ - 10^{15} Ом·м; $\varepsilon = 2,9$; $tg\delta = 0,006$ (при 50 Гц); $E_{міц} = 60$ -90 МВ/м (за товщин плівки 0,1 мм).

Високою нагрівостійкістю (до 240 °C), низькою гігроскопічністю та високими електроізоляційними властивостями характеризуються поліімідні та плівки з політетрафторетилену. Широко застосовуються неполярні плівки з поліетилену, поліпропілену і полістиролу.

6.2. Пластичні маси (пластмаси, пластики)

Це матеріали на основі природних або синтетичних полімерів, які здатні отримувати задану форму за нагріву під тиском і зберігати її після охолодження. Крім полімеру, що служить зв'язуючою речовиною, пластмаси можуть містити >наповнювачі, >пластифікатори, >стабілізатори, >мастильні речовини, >отверджувачі, >барвники та інші компоненти. Окремі види пластмас (поліетилен, полівінілхлорид та ін.) є чистими полімерами і називаються *незаповненими пластмасами*.

Пластмаси розрізняють за * експлуатаційними властивостями (наприклад, електроізоляційні, вогнетривкі тощо), * природою наповнювача (наприклад, склопласти, графітопласти) і * способом його розміщення в матеріалі (наприклад, шаруваті пластики), а також за типом полімера (амінопласти).

Залежно від характеру перетворень, що відбуваються з полімерами при формуванні, пластмаси підрозділяють на ► *термопласти* (найважливіші з них - на основі поліетилену, полівінілхлориду, полістиролу) і ► *реактопласти* (на основі резольних, кремнійорганічних, фенольних та інших смол). Основні методи переробки термопластів: > *литво під тиском*, > *екструзія*, а реактор

пластів: →пресування і →литво під тиском. З пластмас виготовляють різні вироби - корпуси електровимірювальних приладів, електричних апаратів, кнопки, ручки та ін.

Пластмаси широко застосовують в електротехніці як електроізоляційні і конструкційні матеріали. Вихідним матеріалом для виготовлення більшості виробів слугують прес-порошки - подрібнені і старанно перемішані та висушені складові частини пластмас.

Пресування фасонних виробів здійснюють на гідравлічних пресах у виготовлених з твердої сталі прес-формах, робочі поверхні яких хромують. У прес-форму засипають (рис. 6.1) необхідну кількість прес-порошку.

Якщо пресування здійснюється за одночасного нагріву і тиску, то прес-форма підігрівается гарячою водою, парою та ін. Для підвищення продуктивності пресування широко застосовують попередній підігрів прес-порошку. Після завершення пресування виробів з термопластичного прес-порошку для запобігання деформації ще м'яких виробів їх охолоджують у пресформі, для чого через канали пресформи пропускають холодну воду. Вироби з термореактивного прес-порошку можна видаляти з прес-форми нагрітими. Видалення здійснюється виштовхуванням.

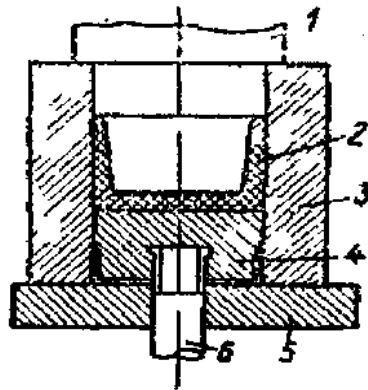


Рис. 6.1. Приклад конструкції прес-форми: 1 - верхній пуансон; 2 - виріб; 3 - матриця; 4 - нижній пуансон; 5 - плита преса; 6 - виштовхувач

Литво під тиском використовують для виготовлення деталей з термопластів. Матеріал розм'якшують за межами прес-форми (у підігрітому циліндрі) і втискають у прес-форму поршнем (плунжером). З ходом поршня в один бік здійснюється заповнення порожнини циліндра, а в протилежний - пресування (рис. 6.2). Безперервний процес витискання розігрітої розм'якшеної термопластичної маси здійснюється шнеком (рис. 6.3). Цей спосіб (шпри-

цювання, екструзія) застосовується для виготовлення стрижнів, труб та інших виробів з незмінним по всій довжині поперечним перерізом. Екструзія широко застосовується для накладання ізоляції і захисних оболонок з поліетилену, полівінілхлориду та інших термопластів на кабельні вироби.

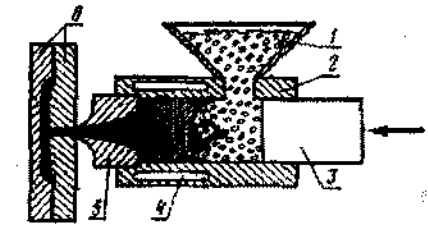


Рис. 6.2. Схема лиття пластмас під тиском: 1 - бункер; 2 - циліндр; 3 - поршень; 4 - нагрівач; 5 - перехідник; 6 - пресформа

Більшість термопластів добре з'єднуються зварюванням за допомогою струменя гарячого повітря, нагрівом у високочастотному полі. Застосовується також склеювання пластмас.

* Фенопласти - пластмаси на основі фенол-формальдегідних смол.



Рис. 6.3. Схема екструдера: 1 - бункер; 2 - циліндр; 3 - шнек; 4 - дорн; 5 - нагрівачі

Випускаються у вигляді → прес-порошків (наповнювачі - дров'яна мука, каолін, графіт та ін.), →шаруватих пластиків (наповнювач - папір, тканина), волокнітів (наповнювач - рублене волокно) →газонаповнених пластиків-пінофенопластів.

Використовуються як корозійнотривкі конструкційні матеріали. Фенопласти та вироби з них завжди забарвлені в чорний або брунатний колір завдяки темному кольору фенол-формальдегідної смоли. Вони ►термостійкі, ►дугостійкі, ►добрі електроізолятори, тому з них виготовляють електротехнічні деталі (розетки, вимикачі) тощо.

* Амінопласти (карбамідні пластики) - пластмаси на основі сечовино- або меланіно-формальдегідних смол.

З прес-порошків на їх основі виготовляють, наприклад, корпуси телевізорів. **Амінопласти** ►термостійкі, ►завжди забарвлені в яскраві соковиті кольори, оскільки меланіно-сечовиноформальдегідні смоли, які є основою цього матеріалу, ►добре поєднуються з забарвлюючими добавками.

Мінора - пінопласт на основі сечовино-формальдегідної смоли, вогнетривкий тепло і звукоізоляційний матеріал (теплоізоляція холодильних камер, місткостей для перевезення рідкого кисню).

Шаруваті пластмаси складаються з шарів листового наповнювача (папір, бавовняна чи скляна тканина) і зв'язуючої речовини. Найширше застосовуються гетинакс, текстоліт і склотекстоліт.

***Гетинакс** - листовий шаруватий матеріал, наповнювачем якого є листи просоченого бакелітовими лаками паперу 0,1 -0,12 мм завтовшки.

Листи після сушіння збирають у пакети і пресують нагрітими до 160 °С стальними плитами. Розплавлена смола склеює листи і переходить в неплавкий стан. Після охолодження листи і дошки гетинаксу обрізують з країв.

З гетинаксу виготовляють різні плоскі електроізоляційні деталі і основи. Дугостійкість гетинаксу невисока внаслідок утворення за іскрових розрядів на його поверхні науглецьованих слідів з високою провідністю. Нагрівостійкість гетинаксу до 105 °С, холодостійкість -65 °С. Гетинакс добре піддається різним видам механічної обробки (свердлінню, різанню та ін.).

*** Текстоліт** - листовий шаруватий матеріал, в якому наповнювачем є бавовняна тканина.

Його технологія виготовлення така ж, як і гетинаксу. Текстоліт →добре обробляється механічно, →міцніший від гетинаксу, але дорожчий. Електричні характеристики текстоліту близькі до гетинаксу.

*** Склотекстоліт** - шаруватий матеріал, в якому наповнювачем є безлужна скляна тканина, а зв'язуючим - фенол-формальдегідні, кремній органічні смоли та суміші кремнійоксидних і кремнійорганічних смол.

Відрізняється склотекстоліт від текстоліту і гетинаксу кращими електричними і механічними характеристиками, але важче обробляється механічно. Основні характеристики шаруватих пластмас наведено в табл. 6.1.

6.3. Каучуки

Натуральний каучук (НК) добувають з молочного соку (латексу) рослин-каучуконосів.

Синтетичний каучук (СК) отримують зі спирту, нафти та природного газу.

Хімічний склад каучуку (C_5H_8), його будова характеризуються наявністю подвійних зв'язків $C = C$. Чистий каучук розм'якшується за нагріву до 50 °С, окрихчується за низьких температур, нестійкий до розчинників і тому мало придатний для електричної ізоляції. Розчин каучуку у бензині (гумовий клей) використовується для міцного склеювання гуми. Захисні оболонки кабелів виготовляються виключно на основі СК.

Крелінійорганічні каучуки відзначаються **високою нагрівостійкістю** (до 250 °С), **доброю холодостійкістю** (від -70 °С до -100 °С) і електроізоляційними властивостями, але мають **невисокі механічні характеристики та дорогі**.

Електроізоляційні гуми. Основним компонентом усіх гум служить →**натуральний (НК) і синтетичний (СК) каучук**. За вулканізації каучуку відбувається розрив подвійних зв'язків $C = C$ і зшивання ланцюжків атомами - S - з утворенням просторових структур. Для цього в каучук вводять сірку (1-3 %) або тіурам. У результаті вулканізації отримують водостійкий, малогазопроникний високоеластичний матеріал - гуму. Для надання гумі необхідних властивостей у вихідну гумову суміш вводять ►**пришвидшувачі процесу вулканізації**, ►**наповнювачі (крейду, тальк, каолін, вуглецеву сажу та ін.)**, ►**протистаріючі домішки**, ►**іноді барвники**.

Гумову суміш (сиру гуму) на екструзійних машинах наносять на жилу проводу або кабелю і вулканізують. Для цього вкриті шаром гуми проводи намотують на металічні барабани і завантажують у вулканізаційні котли, в які впускають насичену водя-

Основні характеристики шаруватих пластмас

Характеристики	Гетинакс низькочастот- ний I, II, III і V	Текстоліт низькочас- тотний А, Б, Г	Скелотекстоліт на основі зв'язуючої смоли		
			фенолофор- мальдегідної	кремній- органічної	епоксидної і кремній органічної
Густина, кг/м ³	1350 – 1450	1300 – 1450	1600 – 1700	1700 – 1800	1800 – 1900
Руйнівна напруга при вигині, Н/м ²	(1000 – 1250) · 10 ⁵	(900 – 1100) · 10 ⁵	(950 – 1200) · 10 ⁵	(1500 – 1700) · 10 ⁵	(2000 – 4200) · 10 ⁵
Руйнівна напруга, при розтягу, Н/м ²	(800 – 1000) · 10 ⁵	(560 – 600) · 10 ⁵	(700 – 900) · 10 ⁵	(900 – 1200) · 10 ⁵	(1750 – 2500) · 10 ⁵
Ударна в'язкість, кДж/м ²	12 – 20	17 – 30	14 – 50	20 – 50	140 – 250
Теплостійкість (за Мартенсом), °С	150 – 160	135 – 150	185 – 200	250 – 260	185 – 200
Літотний об'ємний опір, Ом · м	10 ⁸ - 10 ⁹	10 ⁷ - 10 ⁹	10 ⁹ - 10 ¹⁰	10 ¹¹ - 10 ¹²	10 ¹¹ - 10 ¹²
Діелектрична проникність	6 – 8	6 – 7	5 – 7	5 – 6	6 – 7
Тангенс кута діелектричних втраг (при 50 Гц)	0,04 – 0,08	0,08 – 0,18	0,07 – 0,09	0,006 – 0,012	0,008 – 0,014
Електрична міцність, МВ/м	12 – 20	5 – 10	12 – 20	18 – 30	15 – 25

ну пару або нагріте повітря. Для більшості гум вулканізацію проводять за 140 - 160 °С, а для гум на кремнійорганічному каучуку - за 180 - 200 °С. Тривалість процесу вулканізації становить 30 - 70 хв і більше. У процесі вулканізації гума стає високоеластичною, міцною з достатньо високими електроізоляційними властивостями. *Основні характеристики гум:* $\rho_v \cdot 10^{11} - 10^{12}$ Ом · м; $\varepsilon = 3,5 - 4,5$; $\operatorname{tg} \delta = 0,008 - 0,01$; $E_{\text{міц}} = 20 - 45$ МВ/м. Інтервал робочих температур гумової ізоляції на основі натурального і синтетичного каучуку лежить у межах від -70 °С до +85 °С, а на основі кремнійорганічного каучуку - від -100 °С до +200 °С.

6.4. Волокнисті матеріали

Волокнисті матеріали, завдячуючи дешевизні, досить високій механічній міцності і гнучкості, широко застосовують в електро-техніці. Їх основу складають > *органічні бавовняні*, > *паперові та інші матеріали (в основному з целюлози)*, > *шовк*, > *штучні волокна, отримані переробкою головним чином целюлози і > синтетичні волокна.*

Суттєвим недоліком волокнистих матеріалів є їх висока $\rightarrow$ *гігроскопічність*, $\rightarrow$ *невисока електрична міцність*, $\rightarrow$ *теплопровідність і $\rightarrow$ нагрівостійкість.* Ці недоліки значною мірою усуваються просоченням матеріалу та застосуванням синтетичних волокнистих матеріалів.

Тектури (картони) і папери виготовляють з технічно чистої целюлози, яку отримують з деревини хвойних порід. Для виготовлення електроізоляційних текстур і паперу використовують переважно сульфатну целюлозу *жирного помолу*, за якого відбувається лише розщеплювання на тонкі волокна (волокна механічно не руйнуються, а їхні капілярні канали залишаються закритими), і *пісного помолу*, за якого волокна целюлози розщеплюються переважно впоперек і відкриваються капілярні канали.

З *целюлози жирного помолу* з довгими і тонкими волокнами виготовляють гнучкий і міцний папір. З *целюлози пісного помолу* з короткими товстими волокнами отримують пухкий і дуже гігроскопічний папір з низькою механічною міцністю. Вологість паперів перебуває в межах 5 - 9 %. При її підвищенні погіршуються електроізоляційні властивості та міцність паперів.

Електроізоляційні папери ділять на ► *кабельні*, ► *конденсаторні*, ► *просочувальні*, ► *намотувальні*, ► *мікастрічкові* і ► *креповані*.

Кабельний папір застосовується для ізоляції кабелів високої напруги. Намотування паперу на кабельну жилу здійснюється з натягом, тому папір повинен бути міцний і гнучкий. З метою поліпшення електроізоляційних властивостей після намотування папір просочують електроізоляційною оливою. Електрична міцність непросоченого паперу невисока (6-9 МВ/м), а просоченого трансформаторною оливою 70 - 80 МВ/м. Перед просочуванням паперова ізоляція кабелів старанно просушується.

Кабельні папери маркують літерами К, КМ, КВ, КВУ, КВМУ, які означають: >К - *кабельний*, >М - *багатошаровий*, >В - *високовольтний*, >У - *ущільнений*, і > цифрами від 15 до 240, які позначають номінальну товщину паперу в мікронах.

Конденсаторний папір, просочений діелектриком, використовується у паперових конденсаторах. Просочений нафтовою кон-ден-саторною оливою конденсаторний папір має підвищену електричну міцність (в межах 250 - 300 МВ/м), тоді як непросочений папір - 19-65 МВ/м.

Для виготовлення конденсаторного паперу використовується найбільш чиста сульфатна целюлоза. Товщина паперу є в межах 0,004- 0,003 мм, він випускається в бобінах шириною від 12 до 750 мм.

Просочувальний папір виробляють із сульфатної целюлози товщиною 0,09, 0,11, 0,13 мм і використовують для виготовлення електроізоляційної пластмаси-гетинаксу.

Намотувальний папір виробляють з невібіленої целюлози жирного помолу і застосовують при виготовленні циліндрів та ізоляційних трубок для трансформаторів і електричних апаратів.

Мікастрічковий папір виготовляється з довговолокнутої бавовни з орієнтацією волокна переважно вздовж довжини полотна паперу (для підвищення міцності) і застосовується для виробництва гнучкої слюдяної стрічки. Випускається мікастрічковий папір У рулонах 450 і 900 мм завширшки і товщиною 18-20 мкм.

Крепований папір має на поверхні креп (гофрування), нанесений перпендикулярно до напрямку полотна паперу, завдяки чому

має гнучкість і добре розтягується (видовження 60 %) у повздовжньому напрямі. Застосовується для ізолювання відводів і з'єднань в обмотках трансформаторів та інших оливонаповнених електричних апаратів. Випускається папір у рулонах 500 мм завширшки.

6.5. Бітуми

Бітуми - *аморфні термoplastичні матеріали чорного або темно-брунатного кольору, при низьких температурах крихкі і мають характерний злам у вигляді свища (виразки).*

У їх склад входять складні суміші вуглеводнів. Бітуми добре розчиняються у таких → *вуглеводнях*, як → *бензол*, → *толуол*, слабше у бензині. Нерозчинні у воді і спиртах, слабогігроскопічні.

* *Бітуми бувають штучні (нафтові) - важкі продукти перегонки нафти і природні (викопні), названі асфальтами.*

В електроізоляційній техніці застосовують бітуми марок БН-ІІІ, БН-ІV, БН-V і більш тугоплавкі марок В і Г. Температура розм'якшення від 50 °С для БН-ІІІ до 125 °С для В. Температура розм'якшення асфальтів сягає до 200 °С.

Електроізоляційні властивості бітумів зростають з підвищенням їх тугоплавкості, але при цьому зростає твердість і крихкість. Підвищення температури розм'якшення бітумів досягається продуванням розтопленого бітуму повітрям, внаслідок його окиснення і додаткової полімеризації. Зниження температури розм'якшення бітуму та підвищення його холодостійкості відбувається при сплавленні бітуму з невеликою кількістю нафтової оливи.

Основні параметри бітумів ($\rho = 10^{13} - 10^{14}$ Ом·м; $\epsilon = 2,5 - 3,0$; $\tan \delta = 0,01$; $E_{міц} = 10-25$ МВ/м) мало залежать від вологості. Застосовують бітуми для виготовлення лаків і компаундів.

* *Воскоподібні діелектрики - тверді легкоплавкі матеріали малої міцності і гігроскопічності.*

їх застосовують для просочення і заливання ізоляції, але внаслідок значної усадки при застиганні (до 15-20 %) виникають заповнені повітрям пори, які знижують електричну міцність просоченої ізоляції.

Парафін - найдешевший неполярний діелектрик, густина якого 0,85 - 0,9 Мг/м³ і температура плавлення 50 - 55 °С. Загальна формула парафіну: C_nH_{2n+2} ($n = 10 - 36$). Значення $tg\delta$ для парафіну 0,0003 - 0,0007, а ρ - більше 10^{16} Ом·м. *Парафін не змочується водою, не розчиняється у воді і спиртах, але розчиняється в нафтових оливах, бензині, бензолі. Парафін непридатний для виготовлення лаків, тому що не утворює суцільної міцної плівки при випаровуванні розчинника.*

**Церезин - це суміш твердих вуглеводнів метанового ряду із загальною формулою C_nH_{2n+2} , але з більшою кількістю атомів вуглецю ($n = 39 - 53$) в молекулах, ніж у парафіні, і розгалуженими ланцюжками атомів вуглецю.*

Церезин отримують очищенням мінералу озокериту (гірського воску). Має вищу (65 - 80 °С) температуру плавлення і стійкість до окиснення, ніж парафін. Тому витісняє парафіни, зокрема при просочуванні паперових і слюдяних конденсаторів.

** Синтетичний парафін і синтетичний церезин - високомолекулярні вуглеводні, які отримують при виготовленні синтетичних бензину і олив.*

їх електроізоляційні властивості близькі до натурального парафіну і натурального церезину.

6.6. Електроізоляційні лаки і компаунди

Електроізоляційні лаки і компаунди в процесі виготовлення ізоляції використовуються у рідкому стані, але після його завершення перебувають у твердому стані, тобто належать до твердіючих матеріалів.

** Лаки - колоїдні розчини смол, бітумів, висихаючих олив у легких розчинниках.*

У процесі сушіння розчинник вивірюється, а лакова основа твердне і утворює лакову плівку. Електроізоляційні лаки поділяють на три групи: ►насичувальні, ►покривні і ►клеючі.

Насичувальні лаки застосовують для просочення пористої ізоляції (папір, картон, пряжа, тканина та ін.) з метою підвищення їх

→електричної міцності, → нагрівостійкості, → теплопровідності, →механічної міцності і →зменшення гігроскопічності.

Покривні лаки утворюють на поверхні твердої ізоляції міцні, гладкі, вологостійкі плівки, які підвищують напругу поверхневого розряду і поверхневий опір ізоляції, захищають лаковані вироби від дії вологи. Деякі покривні лаки (емаль-лаки) наносять безпосередньо на метал для створення на його поверхні електроізоляційного шару (ізоляція емальованих провідників та ін.).

Клеючі лаки застосовують для склеювання твердих електроізоляційних матеріалів або приклеювання їх до металу. При виготовленні текстоліту і гетинаксу клеючі лаки є одночасно і насичувальними. Сушіння лаків проводять як за підвищеної температури (до 70 °С), так і за кімнатної. Перші називають лаками гарячого сушіння,, другі - холодного (повітряного) сушіння.

Смоляні лаки - це розчини синтетичних і природних смол.

Бакелітові лаки - розчини бакеліту у спирті. їх використовують в якості насичувальних і клеючих термореактивних лаків при виготовленні текстоліту і гетинаксу, ізоляції електричних апаратів та ін.

Гліфталеві лаки - розчини гліфталевої смоли в сумішах спиртів з рідкими вуглеводнями. Ці лаки термореактивні, їх використовують для склеювання міканітів.

Кремнійорганічні лаки застосовують для створення нагріво- і вологостійких плівок, які утворюються за підвищеної температури сушіння.

Полівінілхлоридні лаки застосовують для захисту ізоляції, яка працює в парах кислот. Лаки стійкі до дії бензину, олив.

Целюлозні лаки - розчини ефірів целюлози. Утворюють термопластичні плівки при холодному сушінні. Найширше застосовують нітроцелюлозні лаки (нітролаки), однак вони погано прилипають до металу, тому перед їх нанесенням попередньо на метал наносять шар ґрунтувального лаку, який висушують за підвищеної температури.

Оливні лаки створюють на основі висихаючих олив, в які для пришвидшення тверднення додають сикативи. Як розчинник застосовують бензин або гас. Застосовують лаки для виробництва лакотканин, лакопаперу і насочування обмоток електричних

6.7. Смоли

машин та апаратів. Оливні лаки швидкого сушіння застосовують при емалюванні листової електротехнічної сталі.

Чорні лаки виготовляють з бітумів, вони дешевші, ніж оливні, і менш гігроскопічні, мають кращі електроізоляційні властивості, але недостатньо еластичні і практично неолівостійкі.

Компаунди містять різні смоли, бітуми, оливи. На відміну від лаків, в їх склад не входять розчинники. Тверді компаунди перед застосуванням нагрівають для досягнення низької в'язкості. Заливні компаунди використовують для заповнення відносно великих порожнин між різними деталями в електричних машинах і апаратах, а також для нанесення відносно товстих покриттів.

У кабелевій техніці широко застосовують *кабелеві компаунди*. *Насичувальні компаунди* служать для насичування паперової ізоляції силових кабелів, а *заливні компаунди* - для заповнення з'єднувальних **та кінцевих муфт**. *Усі перераховані компаунди - термопластичні*. Перед насичуванням і заливанням їх зріджують нагріванням, а за наступного охолодження компаунди тверднуть.

Широко застосовуються *термореактивні епоксидні компаунди*, які являють собою епоксидну смолу з добавками наповнювачів і пластифікаторів. Безпосередньо перед використанням у компаунд **вводять твердник**. *Важливе значення мають також термореактивні поліефірні компаунди на основі ненасичених поліефірних смол*.

Рослинні оливи отримують з насіння різних рослин у вигляді в'язких рідин. Найбільш важливі висихаючі оливи, які при нагріванні, освітленні і стиканні з киснем повітря тверднуть, утворюючи блискучі, міцно зчіплені з поверхнею електроізоляційні плівки. Процес висихання пришвидшується каталізаторами (сикативами). *Найбільш розповсюджені висихаючі оливи - льняна і тунгова*.

Льняну оливу отримують з насіння льону. Температура її застигання близько -20 °С.

Тунгову оливу дістають з насіння тунгового дерева. Порівняно з льняною тунгова олива висихає швидше і створює кращу водонепроникну плівку. Висихаючі оливи застосовуються в електропромисловості для виготовлення електроізоляційних лаків, лако-тканин тощо.

***Природні смоли** - складні за хімічним складом речовини, які виробляються деякими рослинами.

Смоли тверднуть на повітрі, розчиняються в органічних розчинниках і нерозчинні у воді. Утворюються, головним чином, тропічними рослинами (копайський бальзам, шеллак та ін.). У помірній зоні - переважно рослинами родини соснових (каніфоль). Зустрічаються також викопні смоли копал, бурштин (янтар). Використовуються смоли при виготовленні лаків, клеїв та ін. Останнім часом застосування їх скорочується у зв'язку із заміною їх синтетичними речовинами.

***Каніфоль** - крихка смола, яку отримують з природної смоли сосни (живиці) після видалення з неї терпентину (скипидару).

Каніфоль розчиняється в нафтових, рослинних оливах, спирті, **терпентині та ін.** *Електроізоляційні властивості каніфолі:* $\rho = 10^{12}-10^{13}$ Ом·м; $E_{міг} = 10 - 15$ МВ/м; температура розм'якшення 50 -70 °С. Розчинена в нафтових оливах каніфоль вживається при виготовленні насочувальних і заливних компаундів.

***Копали** - тугоплавкі тверді і малорозчинні викопувані смоли, які є продуктами розкладання дерев-смолоносів.

Копали застосовують як добавки до оливних лаків для підвищення твердості їх плівок.

Тверді поліконденсаційні матеріали. За поліконденсації **макромолекули** утворюються внаслідок хімічної взаємодії між функціональними групами, які містяться у вихідних молекулах однієї з різних речовин. Відбувається відщиплення молекул води, хлористого водню, аміаку і кислот, які розкладаються на іони і збільшують електропровідність матеріалу та погіршують електроізоляційні властивості порівняно з діелектриками. З цих матеріалів найбільше використовуються в електротехніці ► *резольні*, ► *новолачні*, ► *поліефірні* та ► *епоксидні смоли*.

***Синтетичні смоли** - синтетичні полімери невеликої молекулярної маси (олігомери), які в результаті тверднення перетворюються в неплавкі і нерозчинні матеріали.

Використовуються ці смоли у виробництві пластмас, лаків, клеїв, герметиків, для обробки тканин, паперу та ін.

**Фенолформальдегідні (фенольні) смоли - продукти поліконденсації фенолу H_5C_6 - OH (або крезолу H_3C - C_6H_4 -OH) з формальдегідом H_2CO .*

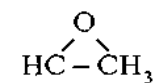
Смоли можуть виготовлятися як *термореактивні*, так і *термопластичні*. Це в'язкі рідини чи тверді речовини. Останні мають добрі електроізоляційні і механічні властивості. Застосовуються у виробництві фенопластів, герметиків, клеїв, лакофарбових матеріалів.

Бакелітова смола. Добувають у реакторі, де перемішують фенол, формалін і каталізатор. Коли за смолоутворення на один моль фенолу припадає не менше одного моля формальдегіду, то утворюється термореактивна смола бакеліт (застаріла технічна назва резолу). Отриману суміш нагрівають до $95^\circ C$ для початку реакції поліконденсації. У нижній частині реактора утворюється густа сиропоподібна маса коричневого кольору - *бакелітова смола*. За кімнатної температури ця смола є твердою крихкою речовиною коричневого кольору. Її застосовують як зв'язуючу речовину для виготовлення пластмас та отримання бакелітових лаків. Полімеризація бакеліту проходить у три стадії і завершується при $110 - 140^\circ C$ і вище. Так, за температури $160^\circ C$ полімеризація відбувається за 1-3 хв з утворенням міцного, але малоеластичного термореактивного матеріалу. Бакелітову смолу застосовують для просочування дерева та інших матеріалів, виготовлення пластмас, зокрема шаруватих - гетинаксу, текстоліту та інших.

** Новолачна смола - густа маса світло-коричневого кольору. Після застигання є термопластичною крихкою речовиною, що розчиняється в етиловому спирті й ацетоні.*

Затвердіває тільки в присутності спеціальних реагентів - отверджувачів. За одночасного нагріву суміші порошкоподібної но-волачної смоли з 15 - 20 % порошку уротропіну в сталених пресформах пресують пластмасові деталі для електричних апаратів низької напруги (основи і кришки вимикачів, патронів) та різні конструкційні деталі (кнопки, держакі тощо).

Епоксидні смоли характеризуються наявністю в молекулі епоксидних груп



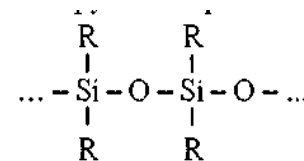
У чистому вигляді вони термопластичні, можуть довготривало зберігатись, не змінюючи своїх властивостей, розчиняються в ацетоні та інших розчинниках. Після добавки твердників смоли швидко тверднуть (полімеризуються) без виділення низькомолекулярних речовин, зокрема води.

Епоксидні смоли, в які безпосередньо перед вживанням ввели твердники, стають термореактивними матеріалами, рівномірно твердіють по всьому об'єму, утворюючи монолітну водонепроникну ізоляцію.

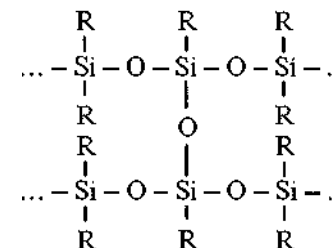
Якщо твердниками є азотвмісні речовини (аміни), то відбувається холодне тверднення, якщо ангідриди органічних кислот, то тверднення проводиться при нагріві до $80 - 150^\circ C$. При твердненні відбувається незначне осідання (0,5 - 2 %), що сприяє утворенню монолітної ізоляції, яка, завдячуючи високій адгезії до різних матеріалів (пластмас, скла, кераміки, металів та ін.), забезпечує герметичність. Тому епоксидні смоли успішно використовуються як матеріали для виготовлення кабельних з'єднувальних і кінцевих муфт. *При використанні епоксидних смол слід дотримуватись відповідних заходів щодо охорони праці, зважаючи на їх токсичність.* Після тверднення епоксидні смоли не токсичні.

Кремнійорганічні смоли (силікони). Основою будови їх молекул є силосанова група по черезних атомів кремнію і кисню

лінійної будови з термопластичними властивостями



просторової структури з термореактивними властивостями



(R - органічні радикали - CH_3 , $-\text{C}_2\text{H}_5$, $-\text{C}_6\text{H}_5$). Висока нагрівос-тійкість кремнійорганічних полімерів зумовлена більшою міцністю силіконового зв'язку Si - O порівняно із зв'язком між двома атомами вуглецю C - C в більшості розглянутих полімерів.

Кремнійорганічні сполуки мають високі електроізоляційні властивості при підвищених температурах, тому їх доцільно застосовувати в композиції з нагрівостійкими неорганічними матеріалами (скловолокно та ін.) у вигляді міканітів, склотканин та ін. Кремнійорганічні сполуки слабогігроскопічні, практично не змочуються водою і можуть використовуватись як гідрофобні покриття.

Кремнійорганічні смоли відносно дорогі, мають низьку механічну міцність і низьку адгезійну здатність до більшості матеріалів, що значно знижує їх застосування.

***Сечовино-формальдегідні смоли** - синтетичні смоли, тверді продукти поліконденсації сечовини з формальдегідом.

Тверднуть з утворенням прозорого матеріалу. Застосовуються у виробництві амінопластів, міпори, клеїв, лаків.

Гліфталеві смоли. Отримують поліконденсацією багатоатомних спиртів (гліколь, гліцерин та ін.) і органічних кислот (фталева, малеїнова та ін.). Для забезпечення гнучкості смоли модифікують жирними кислотами та рослинною олією. Гліфталеві смоли характеризуються > високою клеючою здатністю, > стійкістю проти поверхневих розрядів і > підвищеною (до 130 °C) нагрівостійкістю. Використовуються в електротехніці як основи для клеючих, просочувальних і покривних лаків.

6.8. Нафтові оливи

***Нафтові електроізоляційні оливи** - найпоширеніші рідкі діелектричні речовини, які широко застосовуються для заповнення силових трансформаторів, реакторів, оливних вимикачів, кабелів, конденсаторів та інших елементів електрообладнання.

Рідкі діелектрики добре просочують пористі електроізоляційні матеріали і значно підвищують їхню електричну міцність. Крім

цього, рідкі діелектрики покращують відведення тепла, яке виділяється внаслідок втрат в обмотках і сердечнику трансформатора, до холодних стінок бака трансформатора. Відведення тепла покращується за зменшення в'язкості оливи. В оливних вимикачах високої напруги рідкий діелектрик виконує двояку роль: ізолює струмопровідні частини, охолоджує і гасить каналідуги, що виникає між контактами вимикача.

Оливи отримують шляхом перегонки нафти. Спочатку дістають солярову оливу, яку обробляють сірчаною кислотою, потім лугом, промивають водою, висушують і видаляють з неї хімічно нестійкі сполуки. Часто оливу додатково обробляють *абсорбентами* - речовинами із сильно розвішеною поверхнею, які при стиканні з оливою поглинають вологу і різні полярні домішки. **Обробка** здійснюється перемішуванням нагрітої оливи з подрібненим абсорбентом і наступним відстоюванням або фільтруванням. Ця обробка значно покращує експлуатаційні властивості оливи.

Після очищення, сушіння та фільтрації дістають *трансформаторну оливу* - майже безбарвну, або темно-жовтого кольору рідину, яка є сумішшю вуглеводнів нафтового, парафінового і ароматичного ряду. *Конденсаторні і кабельні оливи* більш старанно очищаються від домішок і тому мають кращі порівняно з трансформаторними електричні характеристики.

*** Нафтові вуглеводні** - стійкі проти окиснення сполуки вуглецю з воднем у вигляді замкнених кілець з бічними ланцюжками. їх вміст в оливах досягає 70-80 %.

***Вуглеводні парафінового ряду** - сполуки вуглецю з воднем у вигляді молекул ланцюжкової структури.

Вони також стійкі проти окиснення.

*** Ароматичні вуглеводні** - циклічні сполуки вуглецю з **водій** нем, стійкі до окиснення.

Вміст їх в оливах не перевищує 10 - 12 %, тому що надмірна їх кількість знижує температуру спалаху оливних парів, спричинює випадання осадів і погіршує електричні властивості оливи. *Виведення цих вуглеводнів з оливи сприяє її швидкому окисненню.*

Трансформаторна олива має кінематичну в'язкість 17 - 18,5 м²/с при 20 °С і 6,5 - 6,7 м²/с при 50 °С; кислотне число (кількість грамів їдкого калію КОН, яка потрібна для нейтралізації вільних кислот, що містяться в одному кілограмі рідкого діелектрика) 0,03-0,1 г; температура спалаху парів 135 - 140 °С; температура застигання мінус 45 °С.

* **Олива** - горюча рідина і тому необхідно строго дотримуватися правил протипожежної безпеки. Протипожежні властивості олив оцінюють за температурою спалаху.

Густина трансформаторної оливи 0,85 - 0,90 т/м³, температурний коефіцієнт об'ємного розширення близько 0,00065 К⁻¹ (використовується для розрахунку розширювачів трансформатора, в які надходить з бака частина оливи при підвищенні температури). За підвищення температури зростає як питома теплоємність, так і коефіцієнт теплопровідності оливи. Олива відводить тепло від занурених у неї обмоток і магнітопроводів трансформатора в 25 - 30 разів інтенсивніше, ніж повітря.

За експлуатації трансформаторів або інших заповнених оливою електричних апаратів оливи зазнають впливу підвищених температур, електричного поля, а інколи стикаються з атмосферним повітрям і парами води. Дія наведених чинників спричинює старіння (окиснення) олив і утворення в них смолоподібних виділень. Нерозчинні в оливах виділення осідають на обмотках та інших частинах трансформатора і зменшують відведення від них тепла, а розчинні - погіршують електричні властивості оливи. Стимулює процес старіння олив розчинена в них вода та контакт з міддю, латунню, залізом, іншими металами, які є каталізаторами старіння. За старіння оливи темніють, у них утворюються кислоти, волога і смоли. Низькомолекулярні кислоти руйнують ізоляцію і викликають корозію металів. Зростає в'язкість і кислотне число олив.

Для сповільнення процесу старіння в оливи вводять *інгібітори* речовини, які гальмують окиснення, але не усувають його повністю. Тому електроізоляційні оливи слід зберігати і перевозити в сухих герметичних місткостях і запобігати проникненню в них вологи і повітря. З цією метою інколи простір над рівнем оливи в трансформаторах заповнюють інертним газом, зокрема азотом.

Незважаючи на всі захисні заходи, олива в процесі експлуатації все ж старіє, в ній утворюються тверді і рідкі продукти окиснення і вода, які різко погіршують електричні властивості олив (рис. 6.4, рис. 6.5). Тому **оливу необхідно періодично очищати**.

Найефективніше процес очищення відбувається розпиленням нагрітої оливи у вакуумі (рис. 6.6). Олива насосом 2 прокачується крізь фільтр 1, теплообмінник 3, електропідігрівач 8 і розпилюється у вакуумному котлі 7.

Пари води і газу відкачуються вакуумним насосом 5, а очищена від них олива стікає на дно котла і насосом 6 через теплообмінник 3 і фільтр-прес 4 подається в трансформатор або тару для зберігання. При проходженні через фільтр-прес тверді частинки забруднень осідають на поверхні листів картону, волога поглинається стінками капілярів, які пропускають очищену оливу.

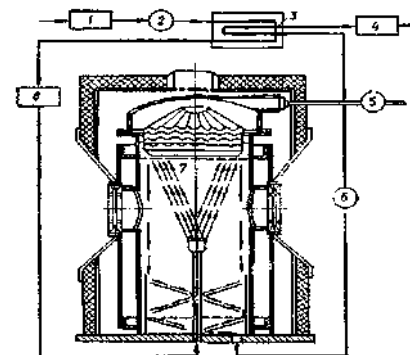


Рис. 6.5. Залежність електричної міцності нафтової оливи від вмісту в ній води (за різної температури)

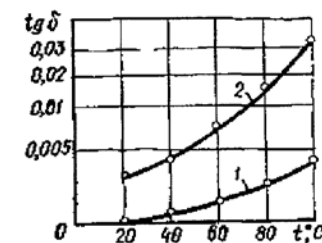


Рис. 6.4. Залежність тангенса кута діелектричних втрат нафтової оливи від температури (при 50 Гц): 1 - свіжа очищена олива; 2 - олива, що була в експлуатації

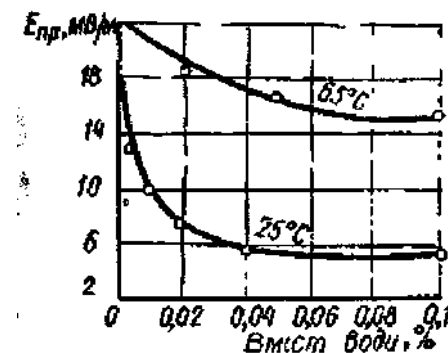


Рис. 6.6. Схема сушіння оливи розпилюванням під вакуумом

Дуже окислену оливу відновлюють (регенерують) кислотно-лужним методом. У неї додають 0,5 - 2 % міцної сірчаної кислоти, яка зв'язує всі нестійкі сполуки в кислий гудрон. Оливу відстоюють і- обробляють лугом для нейтралізації залишків сірчаної і органічних кислот, промивають дистильованою водою і обробляють абсорбентами, потім пропускають її через фільтр-прес.

Конденсаторна олива застосовується для просочування паперових конденсаторів. Просочування підвищує ϵ і $E_{міц}$ діелектрика, що дає можливість зменшити габарити, масу і вартість конденсатора. Температура застигання нафтової конденсаторної оливи ірінус 45 °С, $\epsilon = 2,1 - 2,3$ і $\text{tg}\delta = 0,002$ (при частоті 1 кГц).

Шабельні оливи використовуються для просочування паперової ізоляції силових електричних кабелів з метою підвищення електричної міцності паперової ізоляції і поліпшення відведення тепла. Кабельні оливи поділяються за в'язкістю: *>низької в'язкості МН-2 >середньої в'язкості С-110 і С-220 і >високої в'язкості.*

Нищков'язка олива МН-2 застосовується в оливонаповнених кабелях низького і середнього тиску (до $3 \cdot 10^5$ Па), при цьому забезпечуються, підживлення кабелю оливою за всіх експлуатаційних температур.

- *Середньов'язкі-оливи С-110 і С-220* - це технічно чисті суміші нафтових і парафінових вуглеводнів. Ці оливи застосовуються для прокочування і заповнення оливонаповнених високовольтних кабелі робочу напругу ПО кВ і вище.

Дуже в'язка нафтова олива (з розчищеною в ній каніфоллю) застосовується для просочування кабелів з паперовою ізоляцією до 35 кВ. Висока в'язкість просочувальної оливи запобігає перетіканню її до кабелі за похилих або вертикальних прокладань. *Синтетичні рідкі діелектрики.* Добре очищені нафтові оливи мають відносно низьку вартість, достатньо високу електричну міцність і низькі діелектричні втрати. Інколи, зокрема для забезпечення повної пожежної і противибухової безпеки, ці оливи не можуть використовуватись. У цих випадках використовують хлоровані вуглеводні совол і совтол.

Совол Добувають хлоруванням розплавленого дифенілу $\text{H}_5\text{C}_6 - \text{C}_6\text{H}_5$ пропусканням через нього хлору в присутності каталізаторів (олова, заліза та ін.). Якщо в дифенілі замінити п'ять ато-

мів водню атомами хлору, то утвориться *негорючий оливоподібний продукт совол* $\text{Cl}_3\text{H}_2\text{C}_6 - \text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_2$

Недоліками соволу, які обмежують його застосування, є його *Звисока в'язкість* (майже в десять разів більша, ніж у нафтової оливи), *Звисока температура застигання* (5 °С) і *токсичність у результаті наявності в ньому атомів хлору.*

Для зниження в'язкості соволу його розбавляють трихлорбензолом $\text{C}_6\text{H}_3\text{Cl}_3$ і отримують совтол-2 (суміш 64 % соволу і 36 % трихлорбензолу) і совтол-10 (суміш 90 % соволу і 10 % трихлорбензолу). Совтоли застосовують у виробництві паперових конденсаторів і спеціальних трансформаторів.

Кремнійорганічні рідини вигідно вирізняються малим $\text{tg}\delta$ (від 0,0001 до 0,0003), високою стійкістю проти окиснення, низькою гігроскопічністю, підвищеною нагрівостійкістю (допустима температура довготривалого використання до 250 °С, короточасного - до 350 °С), дуже низькою температурою замерзання (-60 °С) і стабільністю електричних властивостей в широкому діапазоні температур. У практиці широко застосовуються кремнійорганічні рідини ПЭСЖ (ПЭС-Д). Всі кремнійорганічні речовини досить дорогі, що обмежує їх широке використання.

6.9. Слюдяні матеріали

* *Слюди* - група природних матеріалів з шаруватою будовою, які залягають в землі з іншими породами.

їх добувають підземним або відкритим способами із застосуванням бурильно-вибухових робіт. Кристали слюди вибирають з гірничої маси, очищають, розколюють на пластини і дістають колоту слюду. З неї виготовляють відповідальну ізоляцію в турбогенераторах, тягових електродвигунах та ін. Внаслідок шарової структури і слабого зв'язку між пакетами слюда здатна розщеплюватися на дуже тонкі (до 0,006 мм), гнучкі, пружні і міцні листочки. З великої групи природних слюд як електроізоляційні матеріали використовують мусковіт і флогопіт.

Мусковіт - породоутворювальний мінерал ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) переважно сріблястого, інколи із зеленуватим або червонуватим

відтинками. Тонкі листочки мусковіту прозорі. Мусковіт стійкий до дії розчинників і лугів; сірчана і соляна кислоти розкладають його тільки за нагрівання. Мусковіт зберігає свої властивості до температури 500 °С, а за вищих температур тратить хімічно зв'язану воду, спучується і різко втрачає електроізоляційні та інші характеристики. Мусковіт плавиться при 1260 - 1300 °С.

Основні характеристики мусковіту: густина близько 2,8 г/см³, водопоглинання 1,3 - 4,5 %, $\rho = 10^{12} - 10^{14}$ Ом·м для випадку, коли електричне поле перпендикулярне до площин спайності і всього $10^6 - 10^8$ Ом·м вздовж площин спайності; $\varepsilon = 6 - 8$; $\operatorname{tg} \delta = 0,0003 - 0,0005$; $E_{\text{міц}} = 120 - 190$ МВ/м при товщині листочків 0,01 мм; твердість 2,5 - 3,5 (за шкалою Мооса).

Флогопіт - калієвомагнезійна слюда ($\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) бурого, зеленого та чорного кольорів. Тонкі листочки флогопіту напівпрозорі. Флогопіт має $\leq B$ нижчу міцність і ^зносостійкість порівняно з мусковітом. Він використовується у виробництві клеєних листових матеріалів - колекторних міканітів, з яких штампують прокладки для ізоляції мідних пластин у колекторах електричних машин. Завдячуючи порівняно низькому опору стиранню ізоляційні прокладки з флогопіту зношуються однаково з мідними пластинами, що забезпечує нормальну роботу колектора. **Основні характеристики флогопіту децю нижчі ніж у мусковіту. Флогопіт не змінює своїх властивостей до температури 800 °С.**

Фторфлогопіт - синтетична слюда з високою нагрівостійкістю (до 1000 °С), низькою здатністю до водопоглинання (0,5 - 2 %) і кращими електричними властивостями, ніж у природної слюди. Питомий електроопір фторфлогопіту в 15 - 20 разів, електрична міцність в 1,5 раза вищі, а $\operatorname{tg} \delta$ кута діелектричних втрат у 2 рази менший, ніж у природної слюди.

Міканіти - листові або рулонні матеріали, склеєні з окремих листочків колотої слюди шелачною, гліфталевою та іншими смолами або лаками на їх основі. Листочки колотої слюди розкладають на столі в один шар, збризкують лаком, накладають другий шар і т. д. аж до повного набору товщини листа, потім лист піддають гарячому пресуванню.

Всі види міканітів відрізняються як галуззю застосування, так і складом та технологією виготовлення і умовно позначаються

двома або трьома літерами. **Перша літера** визначає >тип міканіту (*К*-колекторний, *П*-прокладний, *Ф*-форму вальний, *Г*-гнутий), **друга** - >вид слюди (*М* - мусковіт, *Ф* - флогопіт, *С* - суміш мусковіту і флогопіту), **третья** - >тип зв'язуючого (*Г* - гліфталева смола, *Ш*-шелачна смола, *К*-кремнійорганічна смола, *П*- поліефірна смола). **Літера А в кінці марки** вказує на >знижений вміст зв'язуючого.

Колекторний міканіт - листовий твердий матеріал у вигляді штампованих і шліфованих пластин, які застосовуються для ізоляції одна від одної мідних пластин у колекторах електричних машин. Виготовляється склеюванням шелачною або гліфталевою смолами листочків колотого флогопіту і дворазовим гарячим пресуванням при 155 °С. На відміну від інших видів міканіту у ньому найменший вміст зв'язуючого (не більше 4 - 6 %). Електричні характеристики колекторного та інших видів міканіту наведені в табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Електричні властивості міканітів

Матеріал	Питомий електроопір ρ , Ом·м	$\operatorname{tg} \delta$	$E_{\text{міц}}$, МВ/м
Колекторний міканіт	$10^{11} - 10^{13}$	0,01 - 0,03	18 - 25
Прокладний міканіт	$10^{11} - 10^{12}$	0,03 - 0,06	15 - 20
Формувальний міканіт	$10^{11} - 10^{12}$	0,05 - 0,09	12 - 18
Гнутий скломіканіт	$10^{11} - 10^{12}$	1,05 - 0,09	12 - 28
Мікафолій	$10^{10} - 10^{11}$	□	13 - 20
Мікастрічка	$10^{10} - 10^{12}$	—	10 - 22

Прокладний міканіт - листовий твердий матеріал, який застосовують для різного виду електроізоляційних прокладок, шайб та ін. Виготовляють його склеюванням колотого мусковіту, флогопіту або їх суміші гліфталевими, шелачними або кремнійорганічними смолами з наступним пресуванням при температурі 150 °С. У прокладних міканітах вміст слюди становить 80 - 95 %. Випускається міканіт у листах товщиною 0,15 - 5 мм.

Формувальний міканіт отримують такою ж технологією, як і прокладний міканіт. Порівняно з прокладним формувальний міканіт має трохи пухку структуру для поліпшення умов отримання з нього за гарячого пресування електротехнічних виробів складної форми, яка зберігається при остиганні відпресованих виробів. Формувальний міканіт застосовують для виготовлення колекторних манжет, каркасів котушок, трубок та інших фасонних виробів. *Гнучкий міканіт* - листовий матеріал, який отримують склеюванням оливогліфталевиими лаками колотого мусковіту чи флогопіту. Застосовується як пазова, міжвиткова і підбандажна ізоляція в електричних машинах і служить матеріалом для виготовлення різноманітних гнучких прокладок. Для підвищення механічних харак-теристик деякі види гнучкого міканіту обклеюють з двох боків мікастрічковим папером.

Гнучкий скломіканіт обклеюється з одного або двох боків безлужною склотканиною для підвищення механічної міцності і гнучкості матеріалу. Міканіти на шелачних і гліфталевих смолах можуть тривало експлуатуватися за температур до 130 °С, міканіти на поліефірних і епоксидних смолах - до 155 °С, а на кремні-йорганічному зв'язуючому - до 180 °С.

Мікафолій складається з одного або кількох шарів колотого мусковіту або флогопіту, наклеєних на густий телефонний папір товщиною 0,05 мм. Як зв'язуюче використовують гліфталевий, оливо-гліфталевий та інші лаки. Випускають мікафолій у вигляді рулонів завширшки 500 мм і більше та в листах розміром 500 x 1000 мм і товщиною 0,15; 0,2 і 0,3 мм. З мікафолію гарячим пресуванням виготовляють трубки для ізоляції болтів і шпильок та інші фасонні вироби, які можуть працювати за температур до 130 °С.

Мікастрічка виготовляється наклеюванням в один шар листочків колотої слюди на тонкий мікастрічковий папір або скляну тканину. Зв'язуючими є оливо-бітумні або оливо-гліфталеві лаки, а у виробництві скломікастрічки - нагрівостійкі кремнійорганічні лаки. Для збереження гнучкості мікастрічку зберігають у герметично закритих металевих коробках.

Слюдинітові та слюдошарові матеріали виготовляють з дрібних відходів слюди (скрапу). Для поліпшення електричних і механічних властивостей слюдинітових паперів у слюдяну пульпу

вводять кремнійорганічні, гліфталеві та інші смоли. Слюдинітові матеріали більш рівномірні за товщиною і більш однорідні порівняно з міканітами, але менш міцні та вологостійкі. Зі слюдинітового паперу виготовляють такі ж електроізоляційні матеріали, як із колотої слюди. За нагрівостійкістю слюдинітові матеріали, залежно від зв'язуючого, належать до В, F і Н класів. Підвищену нагрівостійкість мають склослюдинітові стрічки на кремнійорганічному зв'язуючому.

6.10. Неорганічні скла

**Скла - квазіаморфні тверді матеріали, в яких за наявності ближнього порядку розміщення частинок відсутній дальній порядок.*

Отримують при швидкому охолодженні розплаву склоутворювальних компонентів (оксидів кремнію, бору, фосфору та ін.) і оксидів металів (літію, натрію, калію, магнію та ін.). Такі скла прозорі в тій чи іншій області оптичного діапазону. За повільного охолодження розплаву може відбутися часткова кристалізація скла і воно втрачає прозорість, а його механічна міцність зменшується.

Виробництво скла вперше виникло 4000 років до н. е. в Стародавньому Єгипті. Завдячуючи високій хімічній стійкості та дешевизні і доступності сировини, найбільш поширені силікатні скла. Сировиною для виготовлення скла є кварцовий пісок SiO_2 (основна склоутворювальна речовина), сода Na_2CO_3 , доломіт $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$, крейда та деякі інші компоненти. Ці матеріали подрібнюють, змішують у необхідних пропорціях і отримують шихту, яку завантажують в скловарну піч і розплавляють. За нагрівання шихти з неї видаляється волога і гази, а оксиди калію, натрію, кальцію тощо хімічно взаємодіють з кремнеземом і утворюють складні сполуки, які називаються силікатами. Силікати плавляться за 1350 - 1600 °С і утворюють скломасу. З неї видуданням, пресуванням, відливкою, витяжкою тощо виготовляють різноманітні вироби. Видуданням в металеві форми отримують лампові балони, пресуванням - скляні ізолятори та інші вироби.

Залежно від хімічного складу силікатні скла ділять на чотири групи: >лужні, >лужні з добавками важких оксидів, >малолужні і >безлужні.

Лужні скла містять велику кількість лужних оксидів (переважно Na₂O), є легкоплавкими (≈ 1350 °C) і застосовуються переважно для отримання шибок, побутового посуду, пляшок та ін. Вони вирізняються великим температурним коефіцієнтом лінійного розширення, низькою термостійкістю та електричними характеристиками.

Лужні скла із вмістом важких оксидів - флінти (містять PbO) і крони (містять BaO), мають підвищені значення електричних характеристик і застосовуються для виготовлення конденсаторів, ізоляторів та ін.

Малолужні скла використовуються для виготовлення скляних ізоляторів високої напруги. Після формування нагрітий ізолятор виймають з форми і рівномірно охолоджують обдуванням його з усіх боків холодним повітрям. Міцність загартованого ізолятора в кілька разів вища порівняно з незагартованими і вища, ніж у фарфорових ізоляторів. Це дало можливість на 10-20% зменшити їх габаритні розміри.

Безлужні скла застосовують для виготовлення скляного волокна електроізоляційних склотканин.

Електротехнічні скла застосовуються в електротехніці і електроніці як ізоляційний і конструкційний матеріали. З них виготовляють ізолятори ліній електропередач, герметичні вводи, конденсатори та ін. У тонкій (2-5 мкм) скляній ізоляції випускають мікропроводи.

Для електроізоляції застосовують безлужні і малолужні алюмосилікатні скла, які характеризуються великим питомим електроопором, високою вологостійкістю, електричною і термічною міцністю.

В електровакуумному приладобудуванні електровакуумне скло застосовують як основний конструкційний матеріал. З нього виготовляють =>електронні лампи, =>електропроменеві і рентгенівські трубки, =>газорозрядні лампи, =>герметичні виводи електровакуумних приладів з металічним корпусом та ін. Електровакуумні скла мають високі діелектричні характеристики і узго-

джені з металами (для запобігання розтріскуванню спаїв) коефіцієнти термічного розширення а. За його значеннями (а -10^{-7} , град⁻¹) **електровакуумні скла підрозділяють на наступні основні групи:** >кварцове (6-10), >вольфрамове (37-40), >молібденове (47-50), >титанове (72 - 75), >платинове (84 - 92) і >залізне (110 - 120). Кварцове скло виготовляють із чистого SiO₂ за температур вищих 1700 °C. Характеризується найменшим із всіх відомих речовин значенням температурного коефіцієнта лінійного розширення, високою границею міцності при стиску (до 2100 МПа). Воно дуже стійке до дії теплових імпульсів. Сильно нагріте кварцове скло можна занурити в холодну воду, не викликаючи його руйнування. Висока термічна стійкість кварцового скла пояснюється дуже малим коефіцієнтом об'ємного розширення, який у 25 разів менший, ніж у звичайного скла. Завдячуючи високій термічній стійкості та хімічній інертності, з кварцового скла виготовляють хімічний посуд, тонкі нитки для вогнетривких тканин тощо. *Висока прозорість для випромінювань в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній області спектра* дає можливість застосовувати кварцове скло для виготовлення лінз, призм, балонів ламп ультрафіолетового випромінювання та ін.

Скло в товстому шарі - крихкий матеріал, але тонкі скляні вироби мають підвищену гнучкість. Дуже тонкі (до 100 мкм) скляні волокна настільки гнучкі, що можуть використовуватись для виготовлення тканин. Велика гнучкість і міцність волокон пояснюється орієнтацією молекул поверхневого шару при витягуванні скловолокна з розплавленої маси через фільтри. Зі скляних ниток, скручених з окремих волокон, виготовляють склотканини, стрічки, шланги та ін. Скляні тканини використовують для виготовлення склотекстолітів. **Переваги скляної волокнистої ізоляції порівняно з органічними волокнами:** >висока нагрівостійкість, >механічна міцність, >відносно мала гігроскопічність і >добрі електроізоляційні властивості.

Світловоди застосовуються для передачі світлової інформації у волокнистій оптиці. Їх виготовляють з тонких (5-15 мкм) скляних волокон, які з'єднують у джгути (кабелі). Передача зображення може відбуватися як прямолінійним, так і криволінійним шляхом. Для запобігання просочування світла з одного волокна в

інше їх виготовляють з світлоізолюючою оболонкою із скла з меншим показником переломлення світла n_2 , ніж у серцевині волокна «. Світловий промінь, потрапляючи із серцевини з n_1 на поверхню оболонки з n_2 , може багаторазово відбиватись і проходити вздовж волокна. Світловий кабель діаметром 5 - 6 мм може вміщати декілька сотень тисяч волокон. Для передачі зображення необхідно, щоб відносно розміщення волокон на вхідному і вихідному торцях було однакове.

** **Ситали** (скорочення слів "силікат" і "кристал") - склоподібні матеріали, які складаються з однієї або декількох кристалічних фаз, рівномірно розміщених у склоподібній фазі.*

Вони займають проміжне положення між звичайними склами і керамічними матеріалами, тому їх інколи називають *склокерамікою*. На відміну від скла, ситали непрозорі, але в тонкому шарі пропускають світло. Головна відмінність ситалів від скла полягає в тому, що ситали мають переважно кристалічну будову, а від кераміки - значно меншим розміром зерен. Відрізняються ситали високою *>міцністю, >твердістю, >хімічною та термічною стійкістю, >нижчим коефіцієнтом лінійного розширення та >кращими електричними властивостями порівняно зі звичайними склами*. Ситали з низьким коефіцієнтом лінійного розширення нагрівостійкі, і їх механічна міцність мало змінюється при нагріванні до 700 - 800 °C.

Виготовлення ситалових виробів проходить у декілька стадій. Спочатку із скломаси спеціально підбраного складу формують вироби звичайними методами. Стимуляторами кристалізації служать TiO_2 і FeS , фториди і фосфати деяких лужних і лужноземельних металів. Отримані з аморфною структурою вироби нагрівають спочатку до 500 - 700 °C для утворення зародків кристалізації, а потім до 900 - 1100 °C - для розвитку дрібнодисперсної (до 2 мкм) кристалічної фази об'ємом 80 - 95 %. Виготовлені таким способом ситали названо *термоситалами*.

Стимуляторами кристалізації скла також можуть бути колоїдні частинки металів - міді, срібла, золота та ін., які виділяються з відповідних оксидів, що входять до складу скла, під впливом ультрафіолетового опромінення і наступної термообробки (про-

цес проявлення) і є центрами кристалізації скла. Отримані таким способом склокристалічні матеріали називаються *фотоситалами*. Ситали, за технічним призначенням, поділяють на *>установчі* і *>конденсаторні*. Перші широко застосовуються для підкладок в гібридних та інтегральних мікросхемах, деталей СВЧ-приладів і деяких типів електронних ламп. Ситалові конденсатори характеризуються підвищеною (порівняно з керамічними) електричною міцністю. Із ситалів виготовляють різні трубки, електроізолятори та ін. вироби методами керамічної або скляної технології. Застосовуються ситали також для герметизації електровакуумних приладів, в оптиці і т. д.

6.11. Керамічні матеріали

****Кераміка** (від грец. Keramos - глина) - вироби, які отримують високотемпературним спіканням глин і їх сумішей з мінеральними добавками, а також: оксидів та інших неорганічних сполук.*

Перші вироби з кераміки з'явилися в епоху неоліту. Будь-яка технологія виготовлення кераміки включає наступні операції:

► *тонке подрібнення і старанне змішування вихідних компонентів. Подрібнення проводять у вібраційних і кульових млинах. В останніх мелючими тілами є керамічні (для радіокераміки) або сталеві чи чавунні кулі. У результаті подрібнення та перемішування утворюється шихта;*

► *пластифікація шихти введенням у шихту розплавленого парафіну (8 - 16 %) і олеїнової кислоти (0,6 - 0,8 %). Тонкий помол керамічного порошку і змішування його з розплавленим парафіном здійснюють у нагрітому до 90 °C кульовому млині і отримують шлікер, який вакуумують для видалення розчинених у ньому газів;*

формування із шлікерної маси деталей методом пресування, витискання через мундштук. Формування великогабаритних виробів з водного шлікеру здійснюють заповненням рідким шліке-ром гіпсових форм, які розбивають в процесі витягання сформованих виробів. Найчастіше малогабаритні електротехнічні ке-

рамічні вироби виготовляють методом гарячого лиття під тиском розплавленого парафінового шлікеру в стальні форми.

Лиття під тиском розплавленого парафінового шлікеру - найбільш ефективний метод виготовлення дрібних високоточних складної форми керамічних виробів на ливарних апаратах. Ливарну масу (шлікер) заливають у бак ливарної машини, в якій шлікер за температури 80 - 90 °С періодично або постійно перемішується для збереження однорідності ливарної маси. Без перемішування розплавлена маса стає неоднорідною внаслідок осідання керамічних частинок, які мають в кілька разів більшу питому масу порівняно з парафіном. Вироби, отримані з неоднорідної ливарної маси, після видалення парафіну і спікання мають різні розміри. З однорідної ливарної маси за дотримання точних розмірів пресформи і температурного режиму можна отримати високоточні вироби з відхиленням розмірів у межах кількох сотих міліметра. Такі вироби формують в багатомісних пресформах, і вони придатні для використання без кінцевої механічної обробки.

Видалення з відлитих виробів парафіну можна здійснити шляхом дуже повільного їх нагріву у спеціальних вакуумних установках, та найчастіше для видалення парафіну відлиті деталі вміщують у вогнетривкі керамічні коробки (капселі). Простір між деталями заповнюють дрібнодисперсним порошком глинозему, який абсорбує парафін, що виділяється з виробів за нагріву. Капселі з виробами плавно нагрівають до температури 1000 - 1100 °С, за якої вироби набувають достатньої механічної міцності. Після охолодження капселів вироби виймають, очищають від порошку і поміщають у високотемпературну піч для кінцевого спікання. Кінцева температура випалювання фарфорових виробів становить 1280 - 1370 °С, а виробів з корундової кераміки - 1600 у 1750 °С.

Керамічні матеріали за призначенням підрозділяють на →установчі і →конденсаторні. Установчу кераміку застосовують для виготовлення різних ізоляторів, підкладок інтегральних мікросхем, лампових панелей, каркасів індукційних котушок тощо.

Залежно від електричних властивостей установчу і конденсаторну кераміку підрозділяють на =>низько- і =>високочастотну. Найбільш поширеним з низькочастотних установчих матеріалів є ізоляторний електротехнічний фарфор, з якого виготовляють різні ізолятори високої і низької напруги.

Електротехнічний фарфор виготовляють зі спеціальних сортів пластичної вогнетривкої глини (40 - 50 %), кварцового піску (20 - 25 %) та калієвого польового шпату. Компоненти подрібнюють, додають приблизно 20 % води і перемішуванням отримують тістоподібну масу, з якої вакуумуванням видаляють бульбашки повітря. Масу витискають через мундштук у вигляді циліндра, розрізають на необхідної довжини заготовки, з яких пресуванням у гіпсових (стальних) пресформах формують ізолятори. Кінцевої форми та розмірів ізолятори набувають після обробки на токарних верстатах. З ізоляторів у сушарках видаляють вологу до 0,1 - 2 % і покривають їх глаз урною суспензією. У процесі випалювання електрофарфорових виробів глазур плавиться і створює на поверхні виробів скляне покриття. Глазур надає фарфору стійкості проти вологи та атмосферних забруднень і підвищує механічну міцність виробів.

Випалювання ізоляторів проводять в тунельних печах безперервної дії. Ізолятори вміщують у вогнетривкі коробки (капселі), які захищають поверхню виробів від безпосередньої дії полум'я та газів. Капселі з ізоляторами кладуть на спеціальні вагонетки, які послідовно проходять через зони підігрівання, випалювання й охолодження із заданими температурами.

У структуру фарфору входять голкоподібні кристали муліту $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$, проміжки між якими заповнені склом. Таке поєднання кристалічної і аморфної фаз надає фарфору високу механічну та електричну міцність і запобігає водопоглинанню. Недолік фарфору - великі діелектричні втрати ($\text{tg}\delta \approx 10^{-2}$), які обмежують його застосування при високих частотах. Спостерігається також різке погіршення його електричних властивостей при температурах вище 100 °С.

Радіофарфор займає проміжне положення між низько-частотними і високочастотними діелектриками. Покращання його електричних властивостей порівняно з ізоляційним фарфором досягається введенням у шихту оксиду барію.

Ультрафарфор вміщає до 80 % глинозему, є високочастотним діелектриком з високою механічною міцністю та низькими діелектричними втратами. Таке поєднання цінних властивостей пояс-

нюється наявністю в ньому барієвого скла, яке одночасно пришвидшує спікання, утворюючи при випіканні рідку фазу. У результаті отримують при досить низьких температурах спікання (-1360 °C) компакту кераміку.

Стеатитова кераміка вигідно відрізняється від електрофарфору крайніми електричними властивостями, які істотно не погіршуються до температури 250 °C і підвищеною механічною міцністю. Її отримують із суміші тальку $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ і вуглекислого барію BaCO_3 або вуглекислого кальцію CaCO_3 . Для поліпшення пластичності в стеатитову масу вводять 15-20 % бентонітових та інших глин.

Стеатитові вироби великих розмірів виготовляють методом пресування в гіпсових формах, а дрібних розмірів - литтям під тиском парафінового шлікеру. Основу структури стеатиту становлять кристали $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (~70 %), решта скло.

Керамічні конденсаторні матеріали з підвищеним ($\epsilon=10 - 250$) значенням діелектричної проникності (при 1 МГц $\text{tg} \delta$ менше 0,006) застосовуються для виготовлення високочастотних конденсаторів, а кераміка з високим ($\epsilon > 900$) - для низькочастотних конденсаторів. Конденсаторні матеріали повинні мати якомога менші значення температурного коефіцієнта діелектричної проникності і високий рівень інших електричних характеристик: $\rho_v = 10^{12} - 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\text{tg} \delta$ менше 0,0005; $E_{\text{міц}} = 20 - 25 \text{ МВ/м}$.

Ці вимоги задовольняють матеріали на основі діоксиду титану (титанати), діоксиду олова (станати) і діоксиду цирконію (цирканати). Основні характеристики деяких конденсаторних матеріалів приведені в табл. 6.3.

Підвищене значення діелектричної проникності конденсаторної кераміки дає змогу виготовляти керамічні конденсатори великої ємності при порівняно малих габаритних розмірах. Вони не гігроскопічні, а технологія їх виготовлення простіша порівняно з технологією виготовлення паперових і слюдяних конденсаторів, на які необхідно наносити водонепроникні оболонки. На поверхні керамічних конденсаторів впирають суцільні срібні електроди, до яких припадають мідні провідники. Всю поверхню конденсаторів покривають суцільним шаром вологостійкої емалі для захисту електродів від корозії і для запобігання замиканню.

Таблиця 6.3

Основні характеристики конденсаторних керамічних матеріалів

Кристалічна основа кераміки	Хімічна формула кристалічної основи	Діелектрична проникність	Температурний коефіцієнт діелектричної проникності, $1/^\circ\text{C}$	Руйнівне напруження при статичному вигині, Н/м^2
Титанат магнію	MgTiO_3	14	$+70 \cdot 10^{-6}$	$1200 \cdot 10^5$
Титанат кальцію	CaTiO_3	150	$-1500 \cdot 10^{-6}$	$1500 \cdot 10^5$
Станат кальцію	CaSnO_3	16	$+110 \cdot 10^{-6}$	$900 \cdot 10^5$
Цирконат барію	BaZrO_3	38	$-350 \cdot 10^{-6}$	$800 \cdot 10^5$

У ряді випадків як конденсаторні матеріали використовують деякі види установчої кераміки (ультрафарфор, стеатит та ін.)

Корундова кераміка з вмістом Al_2O_3 95 - 99 % характеризується низькими діелектричними втратами в діапазоні радіочастот і при підвищених температурах. Відрізняється від розглянутих вище керамічних матеріалів високою нагрівостійкістю (до 1600 °C), механічною міцністю і питомою теплопровідністю (у 10-20 разів вищою, ніж в ізоляторного фарфору). Використовується корундова кераміка для виготовлення вакуумнощільних ізоляторів в корпусах напівпровідникових приладів і підкладок інтегральних мікросхем.

Найбільш високою теплопровідністю серед неметалевих матеріалів вирізняється окис берилію. Кераміка на його основі (95 -99 % BeO) має в 200 - 250 разів вищу теплопровідність порівняно зі скляними матеріалами.

6.12. Нелінійні діелектрики

***Піроелектрики** (від грецького *pyr* - вогонь) - кристалічні діелектрики, яким притаманна спонтанна поляризація, тобто поляризація за відсутності впливу зовнішніх чинників.

***За зміни температури величина спонтанної поляризації змінюється і спричинює появу електричного поля. Це явище називається піроелектричним ефектом (піроелектрикою).**

Зміна спонтанної поляризованості з температурою зумовлена двома причинами. Підвищення температури порушує впорядкованість у розміщенні елементарних дипольних моментів (*первинний піроелектричний ефект*), з одного боку, а з іншого - нагрівання викликає зміну лінійних розмірів діелектрика і п'єзоелектричну поляризацію внаслідок деформації (*вторинний піроелектричний ефект*).

Піроелектричні властивості має низка лінійних діелектриків: сульфат літію, турмалін та ін. У турмаліні при зміні температури на 1°C виникає поле $E \approx 400 \text{ в/см}$. Зміна спонтанної поляризації і виникнення електричного поля в піроелектриках може відбуватися не тільки за зміни температури, але й при деформації. Тому всі піроелектрики є і п'єзоелектриками, але не навпаки.

До окремої групи піроелектриків належать сегнетоелектрики. За нагрівання сегнетоелектрика до певної температури в ньому зникає спонтанна поляризація і кристал переходить в непіроелектричний стан.

Існує також ефект протилежний піроелектричному: в електричному полі змінюється поляризація піроелектрика і нагрівання або охолодження кристала прямо пропорційне напруженості електричного поля: $\Delta T \sim E$. Це явище названо **електрокалоричним ефектом**. Існує також і **квадратичний електрокалоричний ефект**.

Піроелектрики широко застосовують у піроелектричних приймачах, які належать до класу теплових приймачів випромінювання, дія яких ґрунтується на температурній залежності спонтанної поляризації піроелектриків. Піроелектричні приймачі використовуються для вивчення швидкоплинних теплових процесів, у дистанційних датчиках температури, приладах теплобачення тощо.

* **П'єзоелектрика** (від грецького *piezo* - тисну і *електрика*) - виникнення поляризації діелектрика (рис. 6.7, а, б) під дією механічних напружень (*прямий п'єзоелектричний ефект*) і виникнення механічної деформації (рис. 6.7, б) під дією електричного поля (*зворотний п'єзоелектричний ефект*).

Як прямий, так і зворотний п'єзоелектричний ефекти спостерігаються в одних і тих же кристалах п'єзоелектрика.

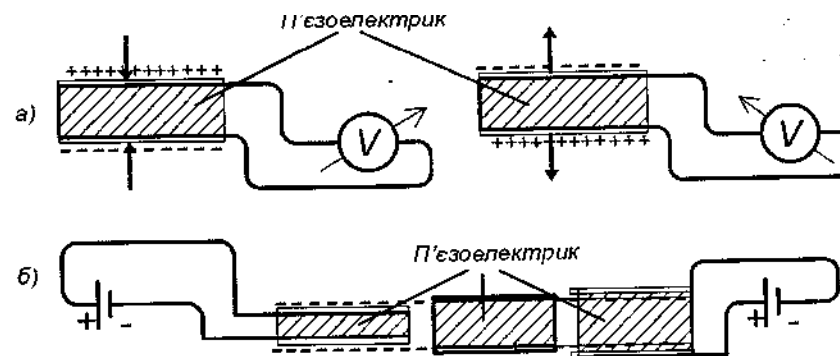


Рис. 6.7. а – прямий п'єзоелектричний ефект; стиск або розтяг п'єзоелектричної пластинки викликає виникнення різниці потенціалів; б – зворотний п'єзоелектричний ефект; залежно від знака різниці потенціалів, прикладеної до п'єзоелектричної пластинки, вона стискається або розтягується

П'єзоелектричні властивості мають всі піроелектрики (спонтанно поляризовані діелектрики), в яких під дією механічної деформації змінюється величина їх спонтанної поляризації (прямий п'єзоелектричний ефект).

П'єзоелектричні матеріали - кристалічні речовини з добре вираженими п'єзоелектричними властивостями. П'єзоелектрики широко використовують у техніці, акустиці, радіофізиці для перетворення електричних сигналів у механічні і навпаки. З них виготовляють резонатори, випромінювачі і приймачі звуку, фільтри, п'єзоелектричні датчики та ін. П'єзоелектричні датчики застосовуються для вимірювання швидкозмінного тиску. Датчик здатний сприймати коливання тиску з частотою від десятків Гц до десятків МГц і застосовується за тензометричних вимірювань у вагових і сортувальних (за вагою) пристроях, за вимірювання вібрацій, деформацій тощо. П'єзоелектричні матеріали поділяють на > природні і > штучно вирошені монокристали (кварц, сегнетова сіль, ніобат літію та ін.) і > полікристалічні сегнетоелектричні тверді розчини, які після синтезу поляризують в електрич-

ному полі (п'єзокераміка). Із п'єзоелектричних матеріалів першої групи застосовується тільки кварц (має високотемпературну стабільність, механічну міцність, малі діелектричні втрати, високу вологостійкість). Його недолік - порівняно слабкий п'єзоэффект, складність обробки та ін. Використовується головним чином в п'єзоелектричних фільтрах і стабілізаторах частоти.

Найбільш вживаним п'єзоелектричним промисловим матеріалом є п'єзоелектрична кераміка, яку отримують методами керамічної технології із сегнетоелектричних з'єднань. У процесі виготовлення п'єзоелектричної кераміки на неї діють зовнішнім електричним полем, яке викликає орієнтацію сегнетоелектричних доменів і залишкову поляризацію. Вироби з п'єзоелектричної кераміки відливають під тиском з шлікерної маси або пресують з порошків і відпалюють при 1200 - 1350 °С. П'єзоелектрична кераміка застосовується для виготовлення випромінювачів та приймачів ультразвуку, генераторів високої напруги тощо.

* **Сегнетоелектрики** ~ кристалічні діелектрики, які в певному інтервалі температур мають спонтанну (самовільну) поляризацію, яка суттєво змінюється за зовнішніх впливів.

Сегнетоелектрики по суті є різновидністю піроелектриків. Найкраще досліджені і найбільш широко використовуються на практиці титанат барію, сегнетова сіль та ін. (табл. 6.4). Відомо кілька сотень сегнетоелектриків.

Таблиця 6.4

Основні сегнето електричні матеріали

Кристал	Формула	Точка Кюрі T, °C
Титанат барію	BaTiO ₃	133
Сегнетова сіль	KNaC ₄ H ₄ O ₆ · 4H ₂ O	-18; 24
Тригліцинсульфат	(NH ₂ CH ₂ COOH) ₃ · H ₂ SO ₄	49
Молібдат гадолінію	Cd ₂ (MoO ₄) ₂	159
Ніобат літію	Li NbO ₃	1210
Титанат вісмуту	Bi ₄ Ti ₃ O ₁₂	675

Кристали сегнетової солі мають високі значення характеристик, які визначають чутливість приймача звуку. Однак низька

вологостійкість, мала механічна міцність, а також сильна залежність властивостей від температури (через низьке значення температури Кюрі і $T = 55$ °C) і напруженості електричного поля обмежують застосування сегнетової солі. Ніобат літію, силікоселеніт і германоселеніт поряд з дуже вираженим п'єзоэффектом, високою механічною міцністю мають високу акустичну добротність і застосовуються в області гіперзвукових частот.

В сегнетоелектриках спостерігається велика різноманітність специфічних ефектів. Для інших піроелектриків зміна напругу поляризації утруднена, оскільки потребується корінна перебудова структури кристала. Електричне поле, за якого можлива така перебудова в піроелектриках, набагато більше пробивної напруги. На відміну від інших піроелектриків, спонтанна поляризація сегнетоелектриків зв'язана з незначним зміщенням іонів стосовно їх положень у неполяризованому кристалі.

* Звичайно сегнетоелектрики, поляризовані неоднорідно, складаються з **доменів** - областей з різним напрямом спонтанної поляризації, тому за відсутності дії зовнішніх чинників їх сумарний дипольний момент практично дорівнює нулеві.

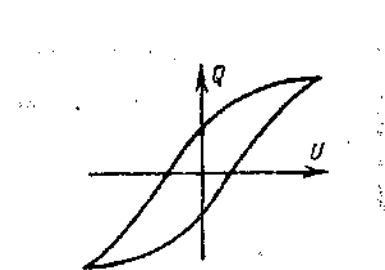


Рис. 6.8. Цикл гістерезису сегнетоелектрика (схематично)

Доменів суттєво впливають на властивості сегнетоелектриків. В електричному полі границі доменів зміщуються таким чином, що об'єми поляризованих в полі доменів зростають за рахунок об'ємів доменів, поляризованих проти поля. Межі доменів закріплені на дефектах і неоднорідностях кристалів і для їх переміщення необхідна дія сильного електричного поля, в якому матеріал може повністю поляризуватися та стати однодоменим. Відповідний зразок тривалий час після виключення поля зберігає поляризованість і необхідне достатньо сильне електричне поле протилежного напрямку, достатнє щоб сумарні об'єми доменів протилежного знака

зрівнялись. Залежність поляризації зразка від напруженості електричного поля нелінійна і має вигляд петлі гістерезису (рис. 6.8).

Діелектрична проникність ϵ багатодоменого зразка більша від однодоменого, тому що за дії електричного поля відбувається зміщення доменних меж і сильна зміна поляризації. Значення ϵ тим більше, чим слабше закріплені доменні межі на дефектах і поверхні кристала. Величина ϵ суттєво залежить від напруженості електричного поля, тобто сегнетоелектрикам притаманні нелінійні властивості.

Спонтанна поляризація сегнетоелектриків за нагріву, як правило, зникає при температурі T_c , названій **точкою Кюрі**, тобто відбувається фазовий перехід сегнетоелектрика зі спонтанно поляризованого стану (полярна фаза) в неполяризований стан, в якому спонтанна поляризація відсутня (неполярна фаза). Фазовий перехід сегнетоелектрика зводиться до перебудови структури кристала.

Сегнетоелектричні матеріали (монокристали, кераміка, плівки) широко використовуються в техніці. Завдячуючи великим значенням ϵ , їх використовують як матеріали для конденсаторів високої питомої ємності. Сегнетоелектрикам притаманні високі значення p' єзоелектричних констант. Тому вони застосовуються як p' єзоелектричні матеріали в приймачах і випромінювачах ультразвуку, у перетворювачах звукових сигналів в електричні і навпаки, у датчиках тиску. Різка зміна опору поблизу температури фазового переходу в деяких сегнетоелектриках використовується в позисторах - приладах для контролю і вимірювання температури. Сильну залежність ϵ від температури сегнетоелектрика використовують у нелінійних конденсаторах (варисторах).

** Електрети - діелектрики, які тривалий час (роками) зберігають поляризований стан після набуття його під дією сильного постійного електричного поля і відключення цього поля.*

Електрети створюють у навколишньому просторі електричне поле і формально є аналогами постійних магнітів. Електрети отримують шляхом розплавлення речовин, молекули яких мають постійний дипольний момент. Під дією поля ці молекули частково

орієнтуються (рис 6.9, а) за полем. При охолодженні розплаву до затвердіння і виключення електричного поля поворот дипольних молекул утруднений і вони тривалий час зберігають набуту під дією поля орієнтацію (рис. 6.9, б).

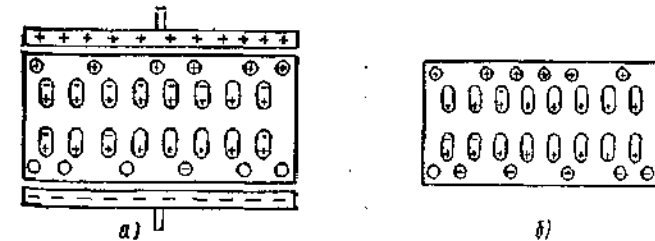


Рис. 6.9. Стан зарядів електрета

Майже всі відомі діелектрики можна перевести в електретний стан. Стабільні електрети отримують з воску і смол, полімерів (поліметилметакрилату, полівінілхлориду, політетрафторетилену та ін.), неорганічних полікристалічних діелектриків (стеатиту, фарфору та ін.), склів, ситалів. Застосовуються електрети як джерела постійного електричного поля.

6.13. Фізико-хімічні механічні властивості діелектриків

Гідрофільні матеріали. Електроізоляційні матеріали за здатністю до фізико-хімічної взаємодії з водою і змочування та гідратації поділяють на *>гідрофільні* і *>гідрофобні*. Гідрофільні матеріали за одночасного контакту з водою і неполярною, нерозчинною у воді речовиною (вуглеводнем), вибірково змочуються водою, а гідрофобні матеріали, навпаки, - вибірково вуглеводнем.

До гідрофільних належать матеріали з іонними кристалічними ґратками (оксиди, силікати, глини та ін.) скла, а до гідрофобних - неполярні матеріали (сірка, графіт, парафін, воски, бітуми, полімери та ін.).

Здатність матеріалів змочуватися водою чи іншою рідиною, характеризується **крайовим кутом змочування θ .*

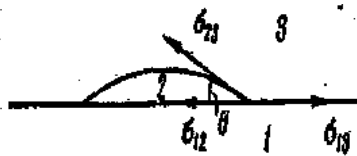


Рис. 6.10. Крапля змочувальної рідини на поверхні твердого тіла

Якщо на поверхню твердого гідрофільного тіла помістити краплю води, то сила поверхневого натягу σ_{13} (рис. 6.10) на межі тверде тіло - повітря більша суми сил: поверхневого натягу σ_{12} на межі тверде тіло - рідина і проекції на горизонтальну площину сили поверхневого натягу $\sigma_{23} \cdot \cos\theta$. Крапля буде розтікатись по поверхні тіла, поки не настане рівність $\sigma_{13} = \sigma_{12} + \sigma_{23} \cdot \cos\theta$. Якщо ж ($\sigma_{13} > \sigma_{12} + \sigma_{23} \cdot \cos\theta$) рівновага не настає і рідина розтікається по поверхні твердого тіла аж до утворення мономолекулярного шару, тобто має місце абсолютне змочування твердого тіла. Тоді крайовий кут в дорівнює нулю. За неповного змочування кут в гострий. За наявності в гідрофільному матеріалі капіляра (рис. 6.11), рідина у капілярі ввігнута і вертикальні складові сил молекулярного притягання спрямовані вгору. Тиск з боку поверхні рідини назовні (вгору) перевищує атмосферний тиск на величину $p = \frac{2\sigma}{R}$, де R - радіус кривизни меніска.

З рис. 6.11 видно, що радіус кривизни меніска $R = \frac{r}{\cos\theta}$, де r - радіус капіляра.

Тиск з боку поверхні рідини на зовні перевищує атмосферний тиск на величину $\frac{2\sigma}{R} = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r}$

Цей додатковий тиск спричинює підняття рідини в капілярі до врівноваження тиску ввігнутої поверхні з гідростатичним тиском піднятого стовпчика рідини.

Умова рівноваги

$$\rho g h = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r}$$

де ρ - питома вага рідини, h - висота підняття рідини.

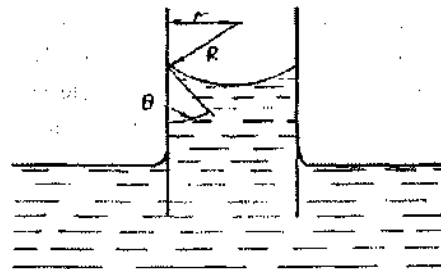


Рис. 6.11. Підняття змочувальної рідини в капілярі

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r\rho g} \text{ (закон Жюрена).}$$

Чим менший радіус капіляра, тим вище піднімається рідина.

Очевидно, що при нанесенні на тіло шару рідини зверху, проникнення рідини в капіляр полегшується. За змочування рідиною матеріалу поверхня рідини в ньому увігнута.

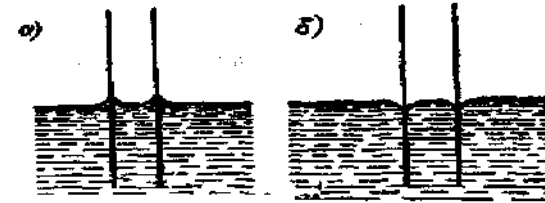


Рис. 6.12. Увігнутий (а) і випуклий (б) меніски

Гідрофобні матеріали не змочуються водою. Нанесена на поверхню крапля рідини створює з поверхнею тупий кут θ (рис. 6.13)



Рис. 6.13. Крапля незмочувальної рідини на поверхні твердого тіла

Тоді сила поверхневого натягу $\sigma_{23} \cdot \cos\theta$ разом із силою σ_{12} намагаються стягнути краплю і надати їй сферичної форми, але під дією сили тяжіння крапля дещо сплющується. Оскільки кут θ тупий, то складова $\sigma_{23} \cdot \cos\theta$ - від'ємна і умова рівноваги

$$\sigma_{13} < \sigma_{12} - \sigma_{23} \cdot \cos\theta$$

У гідрофобних матеріалах стінки капілярів не змочуються водою і за незначного гідростатичного тиску вода не проникає в капіляр.

*** Гігроскопічність** - здатність матеріалу поглинати (сорбувати) вологу з довкілля.

Поглинання вологи зростає при капілярно пористій структурі матеріалу внаслідок капілярної конденсації вологи в достатньо тонких капілярах. Тиск насиченої пари над ввігнутим меніском

води в капілярах (порах) менший, ніж над плоскою чи випуклою поверхнею. Тому конденсація може проходити за тисків, менших від тиску насичення, після покриття стінок капіляра шаром **адсорбованих** молекул **пари**. Поглинання матеріалом води припинюється із зростанням вологості повітря.

Вологість повітря найчастіше оцінюють наступними характеристиками:

→ **абсолютною вологістю**, яка оцінюється кількістю грамів пари в 1 м^3 повітря, або тиском водяної пари;

→ **відносною вологістю φ** - відношенням маси m або тиску p водяної пари, що міститься у повітрі, до маси $m_{\text{нас}}$, чи тиску $p_{\text{нас}}$, вираженим у %:

$$\varphi = \frac{m}{m_{\text{нас}}} \cdot 100\% = \frac{p}{p_{\text{нас}}} \cdot 100\%$$

де $m_{\text{нас}}$ і $p_{\text{нас}}$ - відповідно маса і тиск пари, яка насичує при даній температурі повітря.

За температури 20°C і атмосферного тиску $0,1 \text{ МПа}$ становить $17,3 \text{ г/м}^3$. За нормальну вологість повітря в Україні приймають відносну вологість $\varphi = 65\%$. За такої вологості і 20°C маса водяної пари у повітрі $m = 17,3 \cdot 0,65 = 11,25 \text{ г/м}^3$;

→ **точкою роси** - температурою, за якої настає конденсація пари з повітря за його стикання зі сухою холодною поверхнею.

Сухий електроізоляційний матеріал у вологому повітрі з відносною вологістю φ поступово поглинає з повітря вологу. Вологість матеріалу ψ , тобто вміст води в одиниці маси матеріалу, підвищується, асимптотично наближаючись до рівноважної вологості ψ_p (рис. 6.14, крива а).

Якщо ж початкова вологість матеріалу була більша ψ_p , то вологість матеріалу у тому ж повітрі буде зменшуватись, асимптотично наближаючись до рівноважної вологості повітря ψ_p (рис. 6.14, крива б). **Гігроскопічність** всякого матеріалу за наявності в ньому капілярів і пор, в які проникає вода, більша, ніж такого ж щільного матеріалу. Орієнтовні розміри (в нанометрах) пор у кераміці $10^2 - 10^5$, у волокнах целюлози 100, у стінках волокна 1-10, міжмолекулярні пори 1 - 5, внутрімолекулярні пори < 1 . Малі за розмірами молекули води з ефективним діаметром приблизно $0,27 \text{ нм}$ можуть вільно проникати в такі пори.

Гігроскопічність матеріалу можна оцінити за збільшенням маси зволоженого зразка. Для текстильних матеріалів визначається

кондиційна вологість - рівноважна вологість матеріалу за його зберігання в повітрі в нормальних умовах. Вона різна для різних матеріалів. Наприклад, для кабельного паперу кондиційна вологість становить 8% .

Зниження електричних властивостей електроізоляційних матеріалів визначається не лише їх здатністю поглинати воду, але й тим, як вода залягає. Якщо вода зосереджена у матеріалі у вигляді малих ізольованих включень, то негативний вплив води мінімальний. Якщо ж вода концентрується у вигляді ниток чи плівок, що пронизують весь проміжок між електродами, то електричні властивості ізоляції різко погіршуються. Особливо сильно знижується поверхневий опір діелектриків за утворення на їх поверхні суцільної водяної плівки з низьким питомим опором ($10^3 - 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Цей опір зменшується ще на кілька порядків за дисоціації у водяній плівці молекул кислот, лугів, солей, які потрапляють у плівку із забрудненого промисловістю довкілля.

За змінної напруги зволоження електроізоляційних матеріалів спричинює значне зростання діелектричних втрат ($\text{tg}\delta$). Зволоження спричинює збільшення електроізоляційних матеріалів, оскільки діелектрична проникність води ($\epsilon \approx 81$) в багато разів більша за ϵ більшості цих матеріалів. У ряді випадків гігроскопічність матеріалів оцінюють за зростанням ємності зразка.

* **Вологопроникність** - здатність електроізоляційних матеріалів пропускати воду наскрізь.

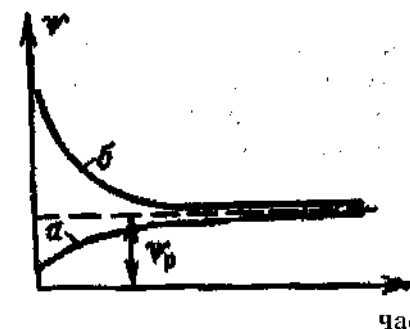


Рис. 6.14. Зміна вологості ш зразка при зволоженні (крива а) і при сушінні (крива б) при постійному значенні відносної вологості навколишнього повітря і температури

Водопроникність є дуже важливою характеристикою якості матеріалів для захисних покриттів, зокрема лакових. Не пропускають вологу метали, скло, добре спечена електрокераміка та ін. У системі СИ водопроникність вимірюється у секундах і для різних матеріалів змінюється у широких межах, наприклад, у полістиролі $6,2 \cdot 10^{-15}$, триацетаті целюлози $2,1 \cdot 10^{-13}$ с. Для зменшення гігроскопічності і вологопроникності пористих і полярних твердих діелектриків їх покривають незмочуваними водою лаками і просочують. Просочування целюлозних волокнистих матеріалів та інших органічних діелектриків тільки сповільнює їх зволоження, тому що просочувальна речовина не проникає у дрібні пори (капіляри) матеріалу. Крім цього, під час довготривалої дії вологи в пори між великими молекулами просочуваних речовин проникає волога.

Особливо шкідливий вплив ВОЛОГІ на діелектричні матеріали спостерігається в тропіках за підвищених температур ($30 - 50^\circ\text{C}$) і високої вологості ($\phi = 98 - 100\%$). На їх поверхні з'являється пліснява, яка знижує поверхневий опір, механічну міцність матеріалів і викликає корозію контактуючих металічних елементів апаратури.

Пліснява найчастіше виникає в [^]каніфолі, коливних лаках, [^]целюлозних матеріалах. **Стійкі** до утворення плісняви: >кераміка, У скло, У слюда, > кремнійорганічні матеріали та низка органічних -> епоксидні смоли, •Ѕ поліетилен, [^]полістирол, -Бфто-ропласт-4 та ін.

Для захисту від появи плісняви в органічну електричну ізоляцію вводять добавки отруйних для пліснявих грибків речовин - **фунгіцидів**. Ефективними фунгіцидами є деякі органічні сполуки, які містять азот, хлор та ртуть.

Теплові характеристики діелектриків. Більшість електроізоляційних матеріалів в електричних машинах та апаратах працюють за підвищених температур і змінюють свої теплові характеристики. До найважливіших теплових властивостей діелектриків належать температура розм'якшення, теплостійкість, нагрівостійкість, холодостійкість, і теплове розширення.

*** Температура розм'якшення** - температура, за якої аморфні матеріали (смоли, бітуми та ін.) розм'якуються і набувають в'язкотекучого стану.

На відміну від матеріалів, кристалічна структура яких переходить з твердого стану в рідкий за певної температури, аморфні матеріали переходять з твердого стану у рідкий в досить широкому інтервалі температур, тобто у них немає точки плавлення. За температур, близьких до температури розм'якшення, матеріал тече і його застосовувати, окрім окремих випадків, не можливо.

Температуру розм'якшення електроізоляційних матеріалів можна визначити різними методами, зокрема, методом ► кільця і ► кульки. Пластичні легкоплавкі речовини (бітум та ін.) заливають в металічне кільце висотою 6,35 мм і внутрішнім діаметром 15,7 мм. Після застигання речовини на її поверхню кладуть сталеву кульку діаметром 9,5 мм і визначають температуру, за якої досліджувана речовина розм'ягчується, кулька протискує її і проходить через отвір кільця. Цей метод визначення температури розм'якшення умовний, тому що розміри кільця і кульки та швидкість зростання температури вибрані довільно.

Теплостійкість характеризує стійкість діелектрика до деформації при короточасному нагріванні. Визначають теплостійкість за допомогою апарату Мартенса (рис. 6.15) в якому одночасно три бруски матеріалу перерізом 10×15 мм і довжиною 120 мм навантажують консольним згином до $50 \cdot 10^5$ Н/м² і нагрівають зі швидкістю 50°C за годину.

За **теплостійкість** приймають температуру, за якої деформація зразка досягає певної межі, коли покажчик 2 опуститься на 6 мм. **Визначена** цим методом теплостійкість для полістиролу дорівнює $75 - 80^\circ\text{C}$, гетинаксу - $150 - 170^\circ\text{C}$. Метод визначення теплостійкості, як і температури розм'якшення, умовний, тому що напруження та швидкість зростання температури взяті довільно.

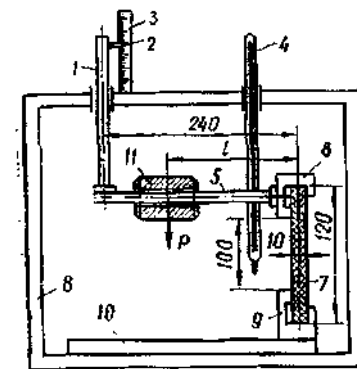


Рис. 6.15. Апарат Мартенса для визначення теплостійкості пластмас

***Нагрівостійкість** - здатність електроізоляційного матеріалу тривалий час, який відповідає терміну нормальної експлуатації, витримувати гранично допустиму температуру без недопустимого погіршення його механічних і електроізоляційних властивостей.

Старіння викликає зміну механічних (твердість тощо) та електроізоляційних (питомий опір) властивостей матеріалів. Старіння матеріалів пришвидшується ультрафіолетовим опроміненням, електричним полем, механічними навантаженнями.

Найвищі допустимі температури для електроізоляційних матеріалів, які використовуються в електротехнічних машинах та апаратах за їх довготривалої експлуатації, регламентовані ГОСТ 8865-70 і наведені в табл. 6.5.

Таблиця 6.5

Клас нагрівостійкості	Y	A	E	B	F	H	C
Найвища допустима робоча температура, °C	90	105	120	130	155	180	>180

В окремих випадках, за дуже короткочасного терміну служби електрообладнання, допускається незначне підвищення робочої температури електроізоляційних матеріалів.

До класу Y належать непросочені волокнисті органічні діелектрики на основі целюлози і шовку (тканина, папір, пряжа та ін.), а також поліетилен, полістирол.

До класу A належать бавовняні й шовкові тканини, просочені лаками і компаундами або занурені в електроізоляційну рідину, поліамідні плівки та ін.

До класу E належать пластмаси з органічним наповнювачем і термореактивними зв'язуючими типу фенолформальдегідних смол (гетинакс, текстоліт та ін.), епоксидні, поліефірні, поліуретанові смоли та компаунди.

До класу B належать матеріали на основі слюди (більшість міканітів), скловолокно, склотекстоліти на фенолформальдегідних термореактивних смолах, епоксидні компаунди з неорганічними наповнювачами та ін.

До класу F належать матеріали на основі скловолокна, слюди й азбесту, які склеєні або просочені лаками підвищеної нагрівостійкості - епоксидними, термореактивними поліефірними, кремнійорганічними та ін.

До класу H належать композиційні матеріали із слюди, скляних волокон, скляних кремнійорганічними смолами та кремнійорганічні лаки.

До класу C належать переважно неорганічні діелектрики (слюда, скло і скловолокнисті матеріали, кварц, азбест) з неорганічними зв'язуючими сполуками. З органічних матеріалів до цього класу належать тільки фторопласт-4 та матеріали на основі поліімідів (плівки, волокно та ін.).

*** Холодостійкість** - здатність матеріалів витримувати низькі температури (до -70 °C) без значного погіршення механічних характеристик.

За низьких температур покращуються електричні властивості електроізоляційних матеріалів (гуми, пластмаси, лакові плівки та ін.), але вони втрачають ►гнучкість, ►ударну в'язкість, ►легко розтріскуються і в багатьох випадках ►стають непридатними для ізоляції. Холодостійкість рідких діелектриків визначають **температурою застигання (тверднення)**.

*** Теплопровідність** - перенесення енергії від більш нагрітих ділянок тіла до менш нагрітих внаслідок теплового руху і взаємодії мікрочастинок (атомів, молекул), які приводять до вирівнювання температури тіла.

Чим вища теплопровідність матеріалу, тим краще відводиться тепло, що виділяється в провідниках, магнітопроводах внаслідок втрати потужності, а також діелектричних втрат в ізоляції та покращуються умови її роботи. За звичай **кількість перенесеної енергії** визначається як щільність теплового потоку, пропорційного градієнту температури (закон Фур'є).

Найменше значення теплопровідності мають пористі електроізоляційні матеріали. Просочування або механічне ущільнення підвищує теплопровідність. Її значення для деяких матеріалів наведено у таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

Значення коефіцієнтів теплопровідності деяких діелектриків

Матеріал	γ_t , Вт/(К м)	Матеріал	γ_t , Вт/(К м)
Повітря (у невеликих щілинах)	0,05	Плавлений кварц	1,25
Бітуми	0,07	Фарфор	1,6
Папір	0,10	Стеатит	2,2
Лакотканина	0,13	Діоксид титану	6,5
Текстоліт	0,25	Кристалічний кварц	12,5
Гетинакс	0,35	Алюмооксид	30,0
Вода	0,58	Оксид магнію	36,0
		Оксид берилію	218,0

* **Теплове розширення** - зміна розмірів і форми тіла із зміною його температури, яка характеризується

→ коефіцієнтом об'ємного розширення $\alpha_v = \frac{1}{V} \left(\frac{\Delta V}{\Delta T} \right)$, а для

→ твердих тіл коефіцієнтом лінійного розширення $\alpha_e = \frac{1}{l} \left(\frac{\Delta l}{\Delta T} \right)$,

де Δl - зміна лінійного розміру, ΔV - зміна об'єму, ΔT - зміна температури тіла. Значення α_e для деяких електроізоляційних матеріалів за температури 20 - 100 °С наведено в табл. 6.7, згідно з якою, органічні діелектрики мають набагато вищі α_e порівняно з неорганічними. Тому деталі з неорганічних матеріалів мають кращу стабільність розмірів за зміни температури.

Таблиця 6. 7

Коефіцієнти лінійного розширення деяких діелектриків

Матеріал	$\alpha_e \cdot 10^{-6}, K^{-1}$	Матеріал	$\alpha_e \cdot 10^{-6}, K^{-1}$
Полівінілацетат	265	Полівінілформаль	64,0
Полівінілхлорид (платинат)	160	Епоксидні смоли	55,0
Поліетилен	145	Слюда	37,0
Ацетат целюлози	120	Силікатне скло	9,2
Нейлон	115	Глиноземиста кераміка	7,0
Політетрафторетилен	100	Стеатит	6,6
Поліметилметакрилат	70	Фарфор	3,5
		Плавлений кварц	0,55



ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОТРОЛЮ

1. Що таке полімеризація і поліконденсація?
2. Яка відмінність між електронною, іонною і дипольною поляризацією діелектриків?
3. Які основні властивості полівінілхлориду, полівінілхлоридного пластикату? Де застосовуються ці матеріали?
4. Який склад нафтових електроізоляційних олив?
5. Які вимоги ставлять до електроізоляційних олив, що застосовуються в трансформаторах?
6. Від яких факторів залежить електрична міцність рідких діелектриків?
7. Які основні властивості нагрівостійких органічних діелектриків?
8. Охарактеризуйте основні нелінійні діелектрики.
9. Що являють собою електроізоляційні лаки і компаунди, на які групи вони поділяються?
10. Що являють собою пластмаси і з яких основних частин вони складаються?
11. Що являють собою електрокерамічні матеріали і на які групи вони поділяються?
12. Які види пробою можуть бути в твердих діелектриках?



7.1. Фізичні основи

У будь-якій речовині внаслідок руху електронів по орбітах атомів і обертання електронів навколо своїх осей існують елементарні струми і їх елементарні магнітні моменти. Вказані магнітні моменти визначають магнітний момент атома. Деякий (дуже незначний) вклад у магнітний момент атома вносить також магнітний момент ядра.

Електрон, який рухається по круговій орбіті, еквівалентний круговому струму, сила якого дорівнює добутку заряду електрона e на частоту n обертання електрона по орбіті, тобто $i_0 = e \cdot n$. Якщо радіус орбіти дорівнює r , швидкість електрона - V , то $n = V/2\pi r$, отже, $i_0 = eV/2\pi r$. Елементарний магнітний моменту цього струму дорівнює добутку величини i_0 на площу $S_0 = \pi r^2$, що охоплюється цим струмом. Тому

$$p_m = \frac{eV}{2\pi r} \cdot \pi r^2 = \frac{eVr}{2}$$

Магнітний момент спрямований за нормаллю до контуру в напрямі, який визначається **правилом правого гвинта** (рис. 7.1).



Рис. 7.1. Обертання головки гвинта в напрямку струму I зумовлює переміщення гвинта в напрямку вектора p_m

Обертання гвинта з правою нарізкою у напрямі струму в контурі зумовлює поздовжнє переміщення гвинта, яке вказує на **напрямок вектора p_m** .

Орбітальні і спінові магнітні моменти можуть бути спрямовані в один або в різні боки (рис. 7.2). В останньому випадку сума орбітальних і спінових моментів електронів може дорівнювати нулеві і власний магнітний момент атома також становитиме нуль.

Речовина з такими атомами не створює магнітного поля. Якщо атоми речовини мають власні магнітні моменти, але вони орієнтовані хаотично і взаємно компенсуються, то також не створюють магнітного поля.

Під дією зовнішнього магнітного поля магнітні моменти молекулярних струмів більшою або меншою мірою орієнтуються в напрямі поля (у випадку феро- і парамагнетиків), або виникають індуковані молекулярні струми, магнітні моменти яких зорієнтовані проти поля (у діамagnetиків). Внаслідок цього сумарний магнітний момент молекулярних струмів стає відмінним від нуля і тіло намагнічується.

Намагніченість речовини J зв'язана з магнітною індукцією B і напруженістю магнітного поля H співвідношенням $J = \frac{B}{\mu_0}$, де

B - середнє результуюче магнітне поле в речовині; H - напруженість магнітного поля, яка не залежить від властивостей речовини; μ_0 - магнітна стала, числове значення якої: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м.

У випадку поля у вакуумі ($J = 0$) величини B і H пропорційні між собою:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (7.1)$$

За внесення будь-якої речовини в зовнішнє магнітне поле ($\vec{H}$) з врахування намагніченості (J) співвідношення (7.1) матиме вигляд

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0 \vec{H} (1 + \vec{J}/H) = \mu_0 \vec{H} (1 + k) \quad (7.2)$$

де $k = J/H$ - магнітна сприйнятність речовини.

Магнітна сприйнятність речовини або середовища характеризує зв'язок між намагніченістю (магнітним моментом) речовини J і напруженістю магнітного поля H в цій речовині.

Величина $(1 + k)$ у виразі (7.2) є відносною магнітною проникністю, або просто - магнітною проникністю μ_r :

$$\mu_r = 1 + k \quad (7.3)$$

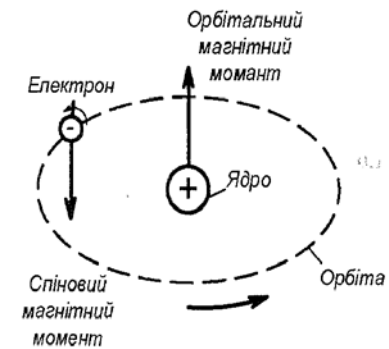


Рис. 7.2. Орбітальний і спіновий магнітні моменти атома

Це величина безрозмірна, вона характеризує зв'язок між магнітною індукцією B і напруженістю магнітного поля

$$\mu_r = \bar{B} / \mu_0 \bar{H} \quad (7.4)$$

Згідно (7.2) $\bar{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \bar{H} = \mu_\alpha \bar{H}$, де $\mu_\alpha = \mu_0 \cdot \mu_r$ - абсолютна магнітна проникність речовини. Для вакууму і повітря $\mu_\alpha \approx \mu_0$, а значить $k = 0$. Власні магнітні моменти атомів деяких речовин дорівнюють нулеві і набувають магнітного моменту тільки у зовнішньому магнітному полі. За розміщення таких речовин у зовнішньому магнітному полі наведені індуковані моменти напрямлені проти поля ($\bar{J}$ і $\bar{H}$ антипаралельні) і послаблюють його, тобто $\mu_\alpha < \mu_0$ або $k < 0$ (рис. 7.3, лінія 1). Такі речовини називають **діамагнетиками**, їх μ_r дещо менше за 1 (табл. 7.1). До діамагнетиків належать $\rightarrow$ мідь, $\rightarrow$ срібло, $\rightarrow$ золото, $\rightarrow$ свинець, $\rightarrow$ вуглець, $\rightarrow$ вісмут, $\rightarrow$ інертні гази тощо.

Фізична природа діамагнетизму полягає у виникненні у всьому об'ємі діамагнітного тіла намагніченості, спрямованої на зустріч намагнічуючому полю. Діамагнетики з наближенням до постійного магніту дещо відштовхуються від нього.

Якщо атоми речовини мають власні магнітні моменти, але за відсутності зовнішнього магнітного поля ці моменти через тепловий рух спрямовані в різних напрямках хаотично, то намагніченість цих $\bar{J} = 0$. Зовнішнє магнітне поле напруженістю $\bar{H}$ намагається повернути власні магнітні моменти атомів у напрям цього поля і тим більше, чим більша $\bar{H}$.

Виникає орієнтація власних магнітних моментів і намагніченість J стає більшою від нуля, речовина намагнічується в напря-

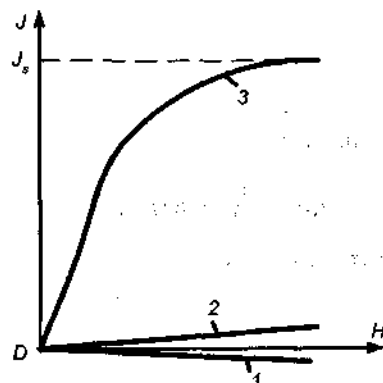


Рис. 7.3. Залежності намагнічуваності речовини від напруженості магнітного поля для: 1 - діамагнетиків; 2 - парамагнетиків; 3 - феромагнетиків

мі зовнішнього поля (вектори $\bar{J}$ і $\bar{H}$ паралельні) і підсилює зовнішнє поле (див. рис. 7.3, лінія 2). У місці знаходження речовини магнітна проникність зростає, тобто $\mu_\alpha > \mu_0$ і $k > 0$. Такі речовини, відносна магнітна проникність яких трохи більша від одиниці, названо **парамагнетиками** (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Магнітна проникність для деяких парамагнітних і діамагнітних речовин

Парамагнітні речовини		Діамагнітні речовини	
Азот (газоподібний)	1,000013	Водень (газоподібний)	0,999937
Повітря (газоподібне)	1,000038	Вода	0,999991
Кисень (газоподібний)	1,000017	Скло	0,999987
Кисень (рідкий)	1,0034	Цинк	0,999991
Ебоніт	1,000014	Срібло	0,999981
Алюміній	1,000023	Золото	0,999963
Вольфрам	1,000176	Мідь	0,999912
Платина	1,000253	Вісмут	0,999824

Крім наведених у таблиці, до парамагнетиків належать Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Ba, водні розчини солей, які містять іони перехідних елементів, вільні радикали, комплексні сполуки перехідних елементів з внутрішніми недобудованими електронними оболонками, метан тощо.

Для парамагнетиків характерна відсутність сильної орієнтуючої взаємодії між магнітними моментами атомів чи молекул речовини. При $H = 0$ макроскопічний момент парамагнітних тіл дорівнює нулю.

Необхідно зазначити, що для діамагнітних і парамагнітних матеріалів магнітна проникність не залежить від величини магнітної індукції зовнішнього намагнічувального поля, тобто являє собою сталу величину для кожного матеріалу. Залежність лінійна $J = f(H)$ (див. рис. 7.3, крива 1,2) і незначна, оскільки коефіцієнт магнітної сприйнятності малий ($k = 10^{-4} - 10^{-6}$). У парамагнетиків і діамагнетиків відсутній магнітний гістерезис.

В електротехнічних розрахунках електричних машин, трансформаторів, різних апаратів та приладів відносну магнітну про-

никність діамагнітних і парамагнітних матеріалів приймають рівною одиниці.

Відмінності між діамагнетиками і парамагнетиками наглядно проявляються при розміщенні їх в середину котушки (соленоїда), по якій проходить струм. Відомо, що в соленоїді, навитому на осердя з різних матеріалів, магнітний потік Φ збільшується або зменшується порівняно з магнітним потоком Φ_0 такого ж соленоїда, але без осердя, тобто $\Phi = \mu\Phi_0$. Таким чином, магнітна проникність μ виражається відношенням магнітних потоків у даній речовині чи у вакуумі $\mu = \Phi/\Phi_0$. Якщо $\Phi = \Phi_0$, то $\mu = 1$, тобто *магнітна проникність вакууму дорівнює одиниці*.

Вимірюваннями встановлено, що заповнення соленоїда одними речовинами (парамагнетиками) викликає незначне збільшення магнітного потоку соленоїда ($\mu > 1$), а діамагнетиками - деяке зменшення ($\mu < 1$). Згідно з табл. 7.1, відмінність проникності від одиниці у парамагнетиків і діамагнетиків незначна.

Вплив феромагнітних, парамагнітних і діамагнітних речовин на магнітний потік соленоїда пояснюється тим, що до магнітного потоку, створюваного струмом в обмотці соленоїда додається або віднімається магнітний потік, створений елементарними струмами атомів речовини.

Феромагнітні речовини (наприклад, залізо) суттєво (інколи в

тисячі разів) збільшують магнітний потік в соленоїді. Під впливом магнітного поля соленоїда амперові струми у феромагнетику орієнтуються і стають паралельними струмам обмотки соленоїда (рис. 7.4).

Парамагнітні речовини дещо збільшують магнітний потік соленоїда. Це вказує на те, що в них під дією зовнішнього магнітного поля елементарні струми

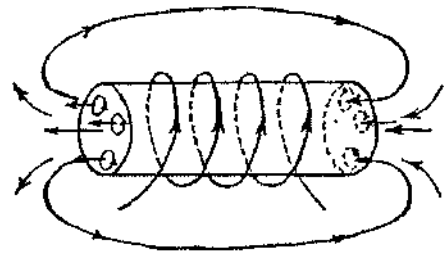


Рис. 7.4. Під впливом магнітного поля соленоїда амперові струми в феромагнітному і парамагнітному сердечниках орієнтуються так, що напрямок їх співпадає із струмами в витках соленоїда

орієнтовані так, що їх напрям співпадає з напрямом струму в обмотці (див. рис. 7.4). Створений елементарними струмами додатковий магнітний потік незначний, тобто відсутня сильна орієнтуюча взаємодія між магнітними моментами атомів (молекул) і напрямом зовнішнього поля. Тому парамагнітна речовина намагнічується дуже слабо. У діамагнітних речовинах під дією зовнішнього магнітного поля виникають елементарні струми, спрямовані протилежно до напрямку струмів в обмотці (рис. 7.5) і магнітний потік в соленоїді дещо зменшується. Але додатковий магнітний потік від елементарних струмів дуже малий і тому ненабагато менше одиниці.

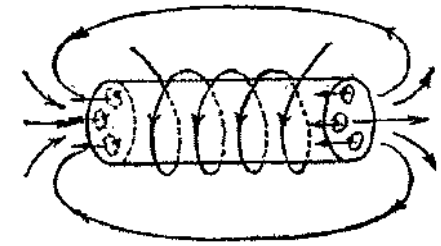


Рис. 7.5. Діамагнітні речовини всередині котушки послаблюють магнітне поле соленоїда. Елементарні струми в них спрямовані протилежно струмам у витках соленоїда

7.2. Феромагнетики, антиферомагнетики і ферімагнетики

Феромагнетики. Найширше застосування в різних галузях техніки і науки мають феромагнетики і магнітні сплави. Для них відносна магнітна проникність набагато більша від одиниці ($\mu \gg 1$), а для деяких досягає десятків і сотень тисяч одиниць. До них належать $\rightarrow$ залізо, $\rightarrow$ нікель, $\rightarrow$ кобальт, $\rightarrow$ гадоліній, $\rightarrow$ диспрозій і $\rightarrow$ сплави цих елементів.

* **Феромагнетики** - група речовин у твердому кристалічному стані, в яких має місце спонтанна паралельна орієнтація моментів атомних носіїв магнетизму внаслідок позитивної міжелектронної обмінної взаємодії.

Обмінна взаємодія

Поряд з кулонівською електростатичною енергією E існує додаткова, чисто квантова електростатична енергія силової

взаємодії, або обмінна енергія $E_{об}$, яка залежить від взаємної орієнтації магнітних моментів електронів. Ця енергія не має ніякого аналога в класичній фізиці. За $E_{об} > 0$ виникає тенденція до паралельної орієнтації сусідніх атомних магнітних моментів речовини і спричинює самовільну (спонтанну) намагніченість тіла. За $E_{об} < 0$, навпаки, проявляється тенденція до антипаралельної орієнтації сусідніх атомних магнітних моментів. Обмінна взаємодія перешкоджає зближенню частинок з однаковим напрямком спіна і проявляється у взаємному відштовхуванні тотожних частинок на відстанях порядку або менше довжини хвилі де-Бройля. Величина обмінної взаємодії визначається, головним чином, ступенем перекриття хвильових функцій частинок, тобто часткою часу знаходження частинок в спільній частині простору. Обмінна взаємодія збільшує середню відстань між: частинками і тому зменшує роль силової взаємодії, тобто роль кулонівського відштовхування електронів в атомі зменшується.

Ефективне зменшення енергії відштовхування електронів з паралельними спінами забезпечує можливість феромагнетизму. Електронам у сусідніх атомах енергетично вигідно мати паралельні спіни, якщо відповідні електронні оболонки незаповнені, що має місце у феромагнетиків. Найбільший вплив обмінна взаємодія має на зовнішні електронні оболонки атома.

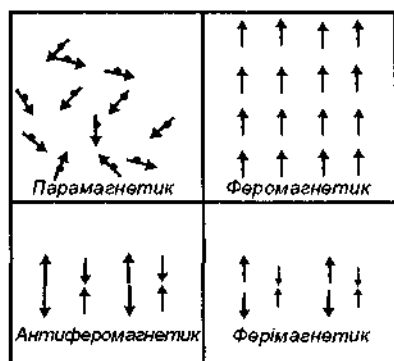


Рис. 7.6. Схема орієнтації магнітних моментів атомів різних матеріалів

Феромагнітна структура паралельних магнітних моментів (рис. 7.6) встановлюється у феромагнетиках за відсутності зовнішнього магнітного поля H за температур нижчих критичної (точки Кюрі). У точці Кюрі і вище інтенсивність теплового руху атомів феромагнетика виявляється достатньою для руйнування його спонтанної намагнічуваності і впорядкованого розташування елементарних струмів. Залежність магнітної проникності феромагнітних ма-

теріалів від температури наведена на рис. 3.18. Вище точки Кюрі феромагнетик набуває властивостей парамагнетика, а його відносна магнітна проникність децю більша від одиниці. Для чистого заліза точка Кюрі становить 768 °С, для нікелю 350 °С, а для кобальту 1150 °С.

* **Антиферомагнетики** - група речовин у твердому (кристалічному) стані, в яких наявні такі міжатомні сили, що викликають протилежну (антипаралельну) орієнтацію сусідніх елементарних (атомних) магнітиків.

За відсутності зовнішнього магнітного поля і невисоких температур в антиферомагнетиках встановлюється впорядкована магнітна структура (рис. 7.6), за якої елементарні магнітики орієнтуються назустріч один одному, тобто антипаралельно.

Тому, на відміну від феромагнетиків, за відсутності зовнішнього магнітного поля $H_{зов}$, антиферомагнетики не мають результируючої намагніченості. Остання появляється тільки під дією $H_{зов}$. Намагніченість зростає при підвищенні температури від абсолютного нуля до **точки Нееля (антиферомагнітна точка Кюрі)**.

Антиферомагнетизм, як і феромагнетизм, зумовлений електронним спіновим магнетизмом атомів (іонів) з недобудованими електронними 3d і 4f оболонками і некомпенсованим спіновим моментом. Магнітна впорядкована структура, тобто впорядкована орієнтація спінів магнітно-активних іонів антиферомагнетика, як і феромагнетика, створюється сильною електростатичною (обмінною) взаємодією електронів у кристалі. За енергії обмінної взаємодії $E > 0$ усі спіни в кристалі орієнтуються паралельно і проявляється феромагнетизм; якщо ж $E_{об} < 0$, то спіни сусідніх вузлів кристалічної ґратки орієнтуються антипаралельно і кристал є **антиферомагнетиком**. Таким чином, у випадках як антиферомагнетизму, так і феромагнетизму, кристал має не тільки кристалічну атомну ґратку, але й певну впорядковану атомну магнітну структуру. **Це є основною фізичною ознакою двох вза-**

заних магнітних станів. До антиферомагнетиків належать >хром, >марганець (в модифікації), >низка рідкоземельних металів, >численні з'єднання, до складу яких входять один або більше елементів з групи пере-

хідших металів, а також >оксиди, >сульфіди, >галогеніди і >деякі ферити. Широкого практичного застосування антиферомаї нети-ки не знайшли.

* **Ферімагнетики** - речовини у твердому (кристалічному) стані, в яких міжелектронна обмінна взаємодія викликає ан-типаралельну орієнтацію сусідніх атомних магнітних моментів.

Але, на відміну від антиферомагнетиків, у ферімагнетиках наявний некомпенсований антиферомagnetизм, зумовлений електронним магнетизмом атомів (іонів) з недобудованими *d*- або *f*-шарами їх електронної оболонки, які мають некомпенсований (спіновий, орбітальний) момент.

За своїми електричними властивостями ферімагнетики є діелектриками або напівпровідниками. До ферімагнетиків належать, головним чином, іонні сполуки перехідних хімічних елементів, атоми яких мають недобудовані *d*- або *f*-орбіталі електронної оболонки. Це **різні** оксиди: ► *ферити* із структурою шпінелі, ► *граната*, ► *перовскіту*, ► *хроміти*, ► *сульфіди*, ► *селеніди* і ► *тільки один чистий метал титан*.

Ферімагнетики широко використовуються у техніці, особливо в електро- і радіотехніці, електроніці в області СВЧ. Високі значення питомого електроопору ферімагнетиків приводить до незрівнянно менших втрат на вихрові струми порівняно з металічними магнітними матеріалами.

Доменна структура феромагнетиків. Згідно з квантовою теорією основні властивості феромагнетиків зумовлені доменною структурою кристалів.

***Домени** - області кристала розміром 10^{-4} - 10^{-6} м з однорідною самовільною намагніченістю J_s (до насичення), на якій розбивається кристал при температурах нижче, точки Кюрі і відсутності зовнішнього магнітного поля.

Магнітні моменти окремих доменів спрямовані в різні напрямки, і повний магнітний момент феромагнетика може дорівнювати нулеві.

Процес розбиття феромагнетика за відсутності зовнішнього поля на окремі намагнічені домени зумовлений дією двох різних

за природою сил: магнітних і обмінних. Магнітні сили між двома сусідніми доменами намагаються орієнтувати їх взаємно антипаралельно (взаємна розмагнічувальна дія), а обмінні сили між доменами, навпаки, орієнтують намагніченість сусідніх доменів паралельно один одному і викликають взаємну намагнічувальну дію. У кожному феромагнетикі встановлюється таке розбиття на домени, яке відповідає рівновазі цих двох протилежних взаємодій і мінімуму вільної енергії зразка.

Феромагнітні домени можна виявляти різними методами, зокрема **методом порошкових фігур**. Для цього на старанно відполіровану поверхню кристала наносять суспензію феромагнітного порошку. За осідання порошок скупчується на межах доменів і виявляється за допомогою оптичного мікроскопа.

Між сусідніми доменами є перехідні шари шириною $\delta = 10^{-7}$ - 10^{-8} м, які названо стінками, або межами доменів. Всередині перехідних шарів вектор намагніченості поступово повертається (рис. 7.7).

Криві намагнічення. Основні відомості про магнітні властивості речовин дають криві намагнічення. Якщо ненамагнічене феромагнітне тіло (з хаотичним розташуванням доменів) помістити в магнітне поле, то під його дією відбувається намагнічення феромагнетика в напрямку поля. Намагнічення викликається трьома **різними** процесами: >зміщенням меж доменів, >обертанням вектора спонтанної намагніченості і >паранпроцесом.

Процес зміщення границь доменів в багатодоменному феромагнетикі спричинюється збільшенням об'єму доменів, вектори J_s намагніченості яких складають найменший кут з напрямком зовнішнього магнітного поля H (рис. 7.8) внаслідок поглинання ними сусідніх доменів з енергетично менш вигідною орієнтацією відносно поля H .

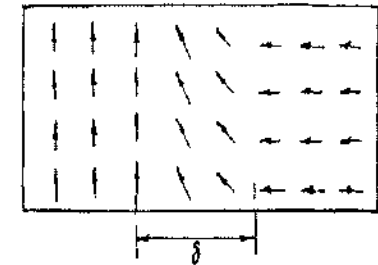


Рис. 7.7. На межі розподілу двох доменів має місце поступове повернення вектора намагніченості

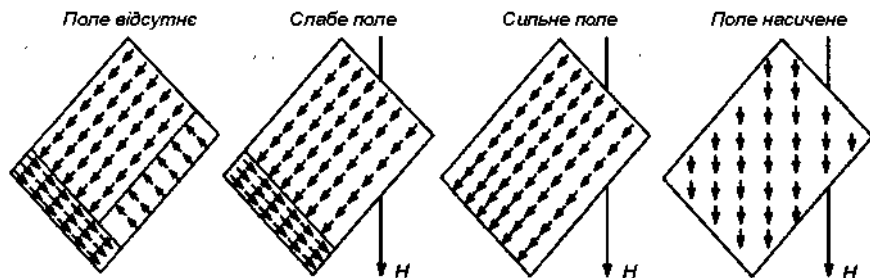


Рис. 7.8. Схема орієнтації спінів при намагнічуванні феромагнетиків

Межі між цими доменами зникають. Процес поглинання наростає із збільшенням напруженості поля H аж до зникнення меж між усіма доменами.

Процес обертання вектора спонтанної намагніченості полягає в повороті векторів в напрямку поля H . За повного співпадання з H досягається технічне магнітне насичення.

* *Парапроцес* - це шуквання вздовж: поля елементарних магнітних моментів, які внаслідок дезорієнтуючої дії теплового руху децю відхилені від напрямку.

У більшості випадків *парапроцес* спричинює лише незначний приріст намагніченості феромагнетиків. Процеси зміщення меж, як правило, проходять за менших значень H , ніж процеси обертання. Парапроцес відбувається тільки в сильних магнітних полях.

За поступового збільшення напруженості зовнішнього магнітного поля від нуля до деякого найбільшого значення H магнітна індукція (намагніченість) феромагнітного матеріалу зростає (крива 2, рис. 7.9) і досягає відповідного максимального значення B_s . Якщо після насичення магнетика зменшувати поле H , то й магнітна індукція почне зменшуватись. Крива 1 показує зміну магнітної індукції залежно від напруженості поля при розмагнічуванні і наступному намагнічуванні. Після достатньої кількості повних перемагнічувань встановлюється однозначна симетрична петля гістерезису. Площа, обмежена цією кривою, зображає втрати на гістерезис, тобто енергію, затрачену на намагнічування і перемагнічування (рис. 7.9).

З падінням напруженості H магнітна індукція також зменшується і коли напруженість магнітного поля дорівнює нулю, в магнітному матеріалі зберігається залишкова магнітна індукція B_r . Для повного розмагнічення матеріалу необхідно змінити напрям напруженості магнітного поля на зворотний ($-H$). Напруженість поля H_c , за якої індукція дорівнює нулю, називається коерцитивною силою.

Всі магнітні матеріали поділяють на дві основні групи: >магнітно-м'які і >магнітно-тверді. Ці групи різко відрізняються формою (рис. 7.10) гістерезисної кривої і значенням основних магнітних характеристик B_r і H_c .

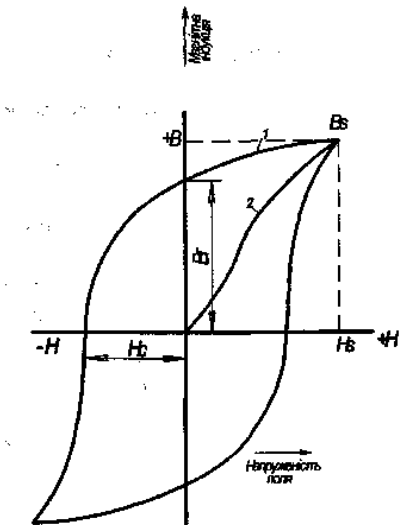


Рис. 7.9. Криві намагнічування: 1 - гістерезисна; 2 - первинна

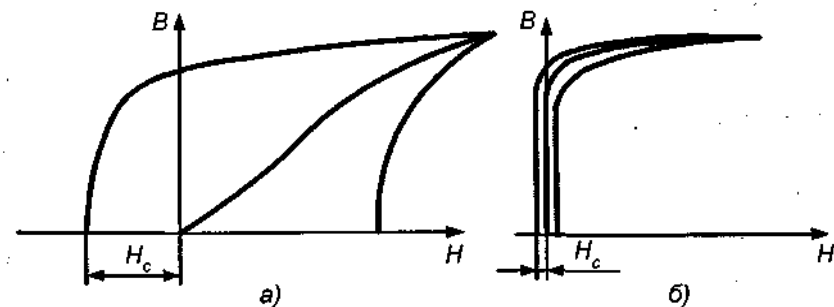


Рис. 7.10. Гістерезисні криві для магнітно-твердого (а) і магнітно-м'якого (б) сплавів

У магнітно-твердих матеріалах коерцитивна сила H_c може досягати багатьох сотень і навіть тисяч ерстедів, тоді як в деяких спе-

ціальних магнітно-м'яких матеріалах H_c не перевищує сотих і навіть тисячних ерстедів.

7.3. Магнітно-м'які матеріали

Феромагнітні матеріали, які намагнічуються і перемагнічуються у відносно слабких магнітних полях, відрізняються високими значеннями початкової μ_n (визначають при дуже слабких полях $\sim 0,1$ А/м) і максимальної магнітної проникності, малим значенням коерцитивної сили і магнітними втратами на гістерезис (табл. 7.2). Їм відповідає вузька гістерезисна петля (рис. 7.10, б). Магнітно-м'які матеріали використовують для виготовлення осердь котушок, трансформаторів, електромагнітів, динамомашин, у вимірювальних приладах та ін., коли необхідно при найменших затратах енергії досягти максимальної індукції.

За перемагнічування феромагнетиків у магнітному полі виникають втрати енергії. Енергія, втрачена на перемагнічування, переходить в тепло, внаслідок чого феромагнетик нагрівається. *Втрати на гістерезис (перемагнічування) можна визначити за площею статичної петлі гістерезису. Ця площа для магнітно-м'яких матеріалів невелика, і втрати енергії незначні.*

Набагато більші втрати виникають за рахунок роботи вихрових струмів Фуко, які можна визначити за формулою:

$$P = AB_m^2 f^2 d^2 / \rho,$$

з якої випливає, що при заданій напруженості магнітного поля H теплові втрати зростають пропорційно квадратам амплітуди магнітної індукції B_m , частоти поля f , товщини осердя d і обернено пропорційні питомому електричному опору ρ . Для зниження вказаних втрат збільшують питомий електроопір матеріалу осердь, зменшують товщину листів з прошарком полімерної чи оксидної ізоляції. Магнітно-м'які матеріали з малим питомим електроопором ($\rho < 0,1$ мкОмм) використовують, як правило, для виготовлення магнітопровідників електромагнітних пристроїв постійного струму (електромагнітів, деталей реле, полюсних наконечників і т. д.).

Технічно чисте залізо і маловуглецеві сталі. До магнітно-м'яких матеріалів належать технічно чисте залізо і його замітники-

Таблиця 7.2

Основні характеристики важливих магнітно-м'яких матеріалів

Найменування	Склад, %	Магнітна проникність		Коерцитивна сила	Питомий електричний опір, мк Ом·м	Термічна обробка
		початкова	максимальна			
Залізо технічне	0,2 (домішки), решта Fe	150	5 000	1,0	10	Відпал при 950 °С
Кремністе залізо	4Si, решта Fe	500	7000	0,5	60	Відпал при 800 °С після гарячого прокатування
Кремністе залізо текстуроване (гайперсил)	3Si, решта Fe	1 500	40000	0,1	47	Відпал при 800 °С після холодного прокатування
45-пермалой	45Ni, решта Fe	2500	25000	0,3	45	Відпал при 1050 °С
68-пермалой	68Ni, решта Fe	1200	250000	0,03	20	Термомагнітна обробка
78-пермалой	78,5 Ni, решта Fe	8000	100000	0,05	16	Відпал при 1050 °С і гартування від 600 °С
Суперпермалой	5Mo, 79 Ni, решта Fe	100000	1000000	0,002	60	Відпал при 1300 °С в H ₂ охолодження з контролююною швидкістю

маловуглецеві сталі з вмістом вуглецю до 0,04 % і до 0,06 % інших домішок. Технічно чисте залізо (армко-залізо) має достатньо високі магнітні властивості (табл. 7.3), які значно покращуються очищенням заліза від домішок. До особливо чистого відносять електротехнічне і карбонільне залізо.

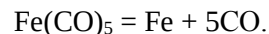
Таблиця 7.3

Склад і магнетні властивості заліза після різних видів обробки

Матеріал	Вміст домішок, %		Магнітні властивості		
	вуг- лець	кя- сень	магнітна проникність		коерци- тивна сила, H_c А/м
			початко- ва, μ_0	максималь- на, $\mu_{\max}$	
Технічно чисте залізо	0,020	0,060	250	7 000	64,0
Електролітичне залізо	0,020	0,010	600	15 000	28,0
Карбонільне залізо	0,005	0,005	3 300	21 000	6,4
Переплавлене у вакуумі електротехнічне залізо	0,010	—	—	61 000	7,2
Залізо, оброблене у водні	0,005	0,003	6 000	200 000	3,2
Монокристал чистого заліза, відпалений у водні	—	—	—	143 000	0,8

Електротехнічне залізо отримують електролізом сірчаного або хлористого заліза. Після осадження на катоді (пластині з м'якої сталі) шару заліза товщиною 4 - 6 мм його старанно промивають, знімають з катода, здрібнюють у кульових млинах і переплавляють у вакуумі.

Карбонільне залізо виготовляють термічним розкладом карбонілу заліза згідно із рівнянням:



З отриманого дисперсного порошку карбонільного заліза пресують заготовки, після спікання яких отримують готові деталі.

Електротехнічне і карбонільне залізо внаслідок складності технології їх отримання використовують тільки для виготовлення невеликих виробів.

Маловуглецеві електротехнічні сталі випускають у вигляді листів товщиною 0,2 - 4 мм з гарантованими магнітними властивостями. Максимальне значення магнітної проникності не менше 3500- 4500, коерцитивної сили не більше 48 - 95 А/м.

Кремністі електротехнічні сталі. Для зниження загальних втрат при перемагнічуванні електротехнічні сталі легують кремнієм, який значно підвищує електричний опір сталі (один відсоток кремнію підвищує електричний опір на 0,12 мкОм·м) і знижує втрати на струми Фуко. Отриманий залізокремністий твердий розчин має більш високу коерцитивну силу, ніж чисте залізо. Однак у цьому сплаві за нагріву можна отримати більш грубозернисту структуру, яка за охолодження не здрібнюється (не має $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення), і дещо зменшити значення коерцитивної сили. Зменшення коерцитивної сили відбувається також внаслідок того, що кремній сприяє виділенню вуглецю у вигляді графіту та майже повному розкисленню сталі. Значення коерцитивної сили в кремністій електротехнічній сталі приблизно таке саме, як і у звичайному залізі. Електричний опір зростає зі збільшенням у сталі вмісту кремнію, але при цьому одночасно різко знижується пластичність сталі і можливість отримання тонколистового прокату. Тому вміст кремнію в сталі не перевищує 4,5 %.

Шляхом спеціалізованого прокатування і певної термічної обробки вдається виготовляти *текстуровану сталь (гайперсил)* крупнокристалічної будови з орієнтацією осей найлегшого намагнічування паралельно напрямку прокату і поліпшеними в цьому ж напрямку магнітними властивостями.

Магнітні властивості легованих кремнієм сталей наведені в табл. 7.4.

Перша цифра в марці визначає ► вид прокату і ► текстуру:

> гарячекатана ізотропна (1); > холоднокатана ізотропна (2);

> холоднокатана анізотропна з кристалографічною текстурою (3).

Друга цифра в марці вказує на вміст Si, %: 0 - вміст < 0,4%;

1 - (0,4-0,8 %); 2 - (0,8 - 1,8 %); 3 - (1,8 - 2,8 %); 4 - (2,8 - 3,8 %); 5 - (3,8 - 4,8 %).

Третя цифра визначає втрати на гістерезис і теплові втрати при певному значенні B і f . Наприклад, 1 - питомі втрати при $B = 1,5$ Тл $f \leq 50$ Гц ($P_{1,5/50}$). *Четверта цифра* - код числового значення нормованого параметра.

Сталі виготовляються у вигляді листів товщиною 0,1-1 мм, рулонів і різаної стрічки з електроізоляційним покриттям або без нього. Текстурована сталь використовується для осердь трансформаторів, що виготовляються навивкою з рулонного матеріа-

Таблиця 7.4

**Магнітні властивості легованої електротехнічної
тонколистової сталі**

Сталь	Товщина листа, мм	R _{1,5/50} , Вт/кг	B(Тл) при H(кА/м), не менше	
			2,5	30
Гарячекатана ізотропна				
1311	0,50	6,1	1,48	1,95
1411	0,50	4,4	1,46	1,94
1511	0,050	3,5	1,46	1,90
Холоднокатана ізотропна				
2011	0,65	9,0	1,60	2,02
2111	0,65	10,0	1,58	2,0
2211	0,65	7,0	1,56	1,96
2311	0,65	5,8	1,52	1,96
2411	0,50	3,6	1,49	1,96
Холоднокатана анізотропна				
3411	0,50	2,45	1,75	-
3416	0,28	0,89	0,9	-

лу. Це дозволяє зменшити масу і габаритні розміри силових трансформаторів на 20 - 25 %, а радіотрансформаторів на 40 %.

У процесі виготовлення прокату, а також після технологічних операцій його різання, штампування тощо в матеріалі виникає велика кількість дислокацій та значні внутрішні напруження, які погіршують магнітні властивості внаслідок збільшення коерцитивної сили і втрат на гістерезис. Відпал у вакуумі або водні усуває дефекти та напруження і покращує магнітні властивості. За відпалу у водні відбувається також очищення сталі від шкідливих домішок.

***Пермалої** - залізонікелеві сплави з вмістом нікелю 45 - 83 % і дуже високою початковою магнітною проникністю у слабких магнітних полях (рис. 7.11).

Підвищений питомий електроопір пермалоїв дозволяє використовувати їх при частотах до 25 кГц. Розрізняють > низьконікелеві (35 - 50 % Ni), або гайперники, і > високонікелеві (60 - 80 % Ni) пермалої. Найбільше значення максимальної магнітної проник-

ності має сплав з 78,5 % Ni після термообробки для видалення шкідливих домішок, зняття залишкових напружень і укрупнення зерна. Сплави повільно нагрівають до 1100 - 1150 °С у вакуумі або водні, витримують при цій температурі 3-6 годин, повільно охолоджують до 600 °С, потім швидко охолоджують до кімнатної температури.

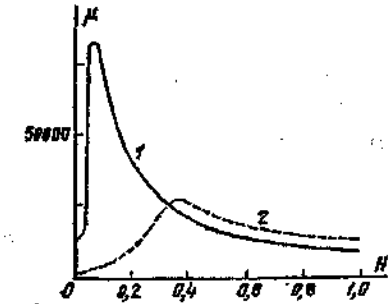


Рис. 7.11. Залежність μ від H :
1- у магнітному сплаві
(пермалої), 2- у м'якому залізі

Таблиця 7.5

Основні характеристики нелегованих пермалоїв

Вміст нікелю, %	μ	μ_{max}	H , А/м	ρ , мкОм м
78,5	10000-14000	130000-220000	1-3	0,25
66	3000-4000	120000-200000	3-5	0,32
50	2000-3000	50000-70000	6-9	0,45

Таблиця 7.6

Основні характеристики легованих пермалоїв

Вміст нікелю, %	Вміст легуючих елементів, %	μ	μ_{max}	H , А/м	ρ , мкОм м
78,5	3,8 Мо	25000	150000	1	0,55
66	2 Мо	7000	120000	0,7	0,8
50	4 Cr	3000	30000	8	0,95

Значною перевагою пермалоїв є їх висока пластичність, яка полегшує технологію виготовлення з них дуже тонких листів, стрічок і дроту. Як недолік - зниження магнітних властивостей навіть під дією незначних напружень. Так, напруження стиску 5 МПа зменшують магнітну проникність у 5 разів і підвищують коерцитивну силу у 2 рази. Тому готові деталі нагрівають для зняття напружень, а їх монтаж здійснюють без сильного натягу.

Для поліпшення електромагнітних і технологічних властивостей залізонікелеві сплави додатково легують хромом, кремнієм, молібденом, марганцем, міддю. Хром і молібден підвищують питомий електроопір і магнітну проникність і одночасно зменшують чутливість до залишкових напружень, наклепу. Мідь покращує механічну оброблюваність, підвищує стабільність властивостей та питомий електроопір. Зростання електроопору в легованих пермалоях дозволяє застосовувати їх при підвищених і високих частотах. Усі легуючі елементи збільшують магнітну проникність μ_n і μ_{max} .

У марках пермалоїв **перші дві цифри** вказують на $\%$ вміст нікелю у відсотках. Літера після H - $\rightarrow$ додаткове легування (X - хромом, C - кремнієм, M - молібденом, D - міддю).

До окремої групи можна віднести пермалої з прямокутною петлею гістерезису. У кінці марки сплаву ставиться літера П. У сплаві 50 НП прямокутність петлі досягається прокатуванням, а в сплавах 65 НП і 79 НМП - охолодженням металу при гартуванні у магнітному полі (термомагнітна обробка). Осердя, виготовлені зі стрічок сплаву 79 НМП товщиною 3 мкм, можуть працювати при частотах 700 кГц, а при товщині 1,5 мкм - до 1 МГц.

Пермалої поставляють у вигляді стрічок завтошки 0,02 - 0,5 мм, листів (1 - 2 мм), а також дротин. Магнітні характеристики пермалоїв стабільні при температурах від -60 до +60 °С.

Альсифери - сплави Fe-Al-Si. Оптимальний склад альсиферу: 9,4 % Si; 5,6 % Al, решта Fe. Промислові марки альсиферів мають характеристики: $\mu_n = 35\ 000$; $\mu_{max} = 120\ 000$; $H_c = 2,2$ А/м; $\rho = 0,8$ мкОм·м. Альсифери можна застосувати в деяких випадках взамін більш дорогих високонікелевих пермалоїв. Внаслідок високої крихкості вироби з альсиферу (магнітні екрани, корпуси приладів та ін.) виготовляють у вигляді відливок з товщиною стінки не менше 2-3 мм. Альсифер легко подрібнюється у порошок і може використовуватись для виготовлення височастотних пресованих осердь, а також магнітодіелектриків.

7.4. Спеціальні феромагнетики

1. Сплави з незначною зміною магнітної проникності при зміні напруженості поля.

2. Сплави із сильною залежністю магнітної проникності від температури.

3. Сплави з високою магнітострикцією.

4. Сплави з дуже високою індукцією насичення.

До першої групи відносяться **перлінвари** - сплави з **постійною** проникністю при зміні поля від 0 до 80 - 160 А/м. До них належать сплави: $\blacktriangleright$ 045НК (45 % Ni, 25 % Co, решта Fe); $\blacktriangleright$ 45НKM (45 % Ni, 25 % Co, 7,5 % Mo, решта Fe); $\blacktriangleright$ 70НК (70 % Ni, 7 % Co, решта залізо). Пермінвари чутливі до дії температури і механічних напружень і під їх впливом змінюють магнітні властивості. Більшою стабільністю магнітної проникності відрізняється сплав ізоперм, до складу якого входять залізо, нікель і алюміній або мідь.

До другої групи належать термомагнітні сплави на основі Ni-Cu, Fe-Ni або Fe-Ni-Cr, які використовуються в установках і приладах для компенсації температурних похибок. Практичне застосування отримали сплави 30 % Ni, решта залізо (термалой) і з 30 % Cu, решта заліза (кальмалой), а також сплави Fe-Ni-Co (компенсатори).

До третьої групи належать сплави з високою магнітострикцією (системи Fe-Pt, Fe-Co, Fe-Al). Зміна лінійних розмірів $\Delta l/l$ додатня і знаходиться в межах (40 - 120)·10⁻⁶ (табл. 7.7). Чистий нікель має велику від'ємну магнітострикцію. Явище магнітострикції використовують в генераторах звукових і ультразвукових коливань, у пристроях для перетворення механічних коливань в -електричні тощо.

До четвертої групи належать залізокобальтові сплави з високою індукцією насичення (до 2,5 Тл). Сплави з вмістом 50-70 % Co і до 2% V отримали назву **пермендюрів**. Застосовуються для виготовлення приладів за необхідності сконцентрувати у невеликому просторі потужний потік силових ліній.

Таблиця 7. 7

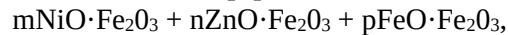
Магнітострикційна деформація деяких матеріалів

Матеріал	Склад	$\frac{\Delta l}{l} \cdot 10^{-6}$
Ферит заліза (магнетит)	FeO · Fe ₂ O ₃	+40
Пермалой	45Ni · 55Fe	+27
Марганцевий ферит	MnO · Fe ₂ O ₃	-2
Кобальтовий ферит	Co ²⁺ Fe ³⁺ O ₄	приблизно -200

* **Ферити** - магнітна кераміка з незначною електронною електропровідністю.

Високий питомий опір (ρ в $10^6 - 10^{11}$ разів більший, ніж у заліза) і, як наслідок, відносно невеликі втрати енергії в області високих частот, поряд з досить високими магнітними властивостями, забезпечують широке застосування феритів при підвищених і високих частотах.

Технічні ферити є твердими розчинами декількох простих сполук, у тому числі й немагнітних. Наприклад, загальна формула дуже поширених нікель-цинкових феритів має такий вигляд:



де коефіцієнти m , n , p визначають кількісне співвідношення між компонентами. *Технічні ферити називають оксиферами.*

Феритові деталі виготовляють з феритового порошку, до складу якого входять старанно подрібнені і перемішані оксиди відповідних металів з добавками пластифікаторів - найчастіше розчину полівінілового спирту. З отриманої маси під високим тиском пресують деталі, які відпалюють при температурі 1100 - 1400 °С в окислювальному середовищі, найчастіше в повітрі. У процесі відпалу відбувається спікання й утворення твердих розчинів феритів з усадкою до 20 %. *Ферити - тверді, крихкі матеріали і обробляються тільки шліфуванням та поліруванням.*

Магнітно-м'які ферити з високою магнітною проникністю мають максимальну індукцію близько 0,3 Тл і малу коерцитивну силу (16 А/м). Магнітна проникність нікель-цинкових феритів зростає з підвищенням температури до точки Кюрі, після чого різко спадає.

Ферити для звукових, ультразвукових і низьких радіочастот позначають літерою Н (низькочастотні). Гранична частота для різних марок таких феритів змінюється від 0,1 до 50 МГц. У марках високочастотних феритів є літери ВЧ, гранична частота для них - від 50 до 600 МГц.

Ферити з прямокутною петлею гістерезису (ППГ), основним параметром яких є коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису α_n , що визначається за формулою

$$\alpha_n = B_r / B_{\max}$$

їх застосовують для запам'ятовуючих пристроїв електронних обчислювальних машин ($\alpha_n \approx 0,98$).

Магнітострикційні ферити використовуються за підвищених і високих частот.

**Магнітодіелектрики - різновидність магнітних матеріалів, які отримують пресуванням порошку феромагнетики (карбонільного заліза, альсифера) з ізолюючою одне від одного зерна органічною (фенолформальдегідні смоли) або неорганічною (скло) зв'язкою.*

Магнітодіелектрики поступаються за технічними характеристиками феритам і витісняються останніми.

7.5. Магнітно-тверді матеріали

Магнітно-тверді матеріали використовують для виготовлення постійних магнітів. Матеріали намагнічуються в сильних полях $H > 1000 \text{ кА/м}$ і характеризуються великим значенням коерцитивної сили ($H_c \leq 560 \text{ кА/м}$), залишкової індукції ($B_m = 0,5-1 \text{ Тл}$) і втратами при перемагнічуванні. Їх максимальна магнітна потужність досягає 70 кДж/м^3 . Магнітна проникність матеріалів тим менша, чим більша коерцитивна сила. Деякі характеристики найважливіших магнітно-твердих матеріалів наведені в табл. 7.8

Висока магнітна твердість досягається *>наклепом, >фазовими перетвореннями, >подрібненням зерна, >напруженнями та іншими відхиленнями від рівноважного стану.* Магнітно-твердим матеріалам відповідає широка гістерезисна петля (рис. 7.10, а). Матеріали погано намагнічуються, але після намагнічення довготривало зберігають магнітну енергію. Стабільність енергії дозволяє створювати у повітряному просторі між полюсами постійного магніту магнітне поле із сталими значеннями напруженості і магнітної індукції.

В умовах довготривалої експлуатації постійних магнітів відбувається зменшення магнітного потоку і магнітної індукції внаслідок старіння магніту. Старіння спричинюється вібраціями, ударами та різкою зміною температури магніту (магнітне старіння). Попередні магнітні властивості після магнітного старіння легко

Таблиця 7.8

Основні характеристики найважливіших
магнітотвердих матеріалів

Найменування матеріалу	Склад (%)	Коефін- тивна сила H_c , е	Залишкова індукція B_r , Гс
Сталі			
ЕХ3	1С; 3Сг	60	9 500
ЕВ6	0,7С; 0,4 Сг; 5,5 W	60	10 000
ЕХ5К5	1С; 6Сг; 6Со	90	8 500
ЕХ9К15М2	1С; 9Сг; 15Со; 2Мо	150	8 000
Литі сплави			
Алні (АНЗ, ЮНД-4)	23Ni; 15Al; 4Cu решта Fe	500	6 800
Алніко (ЮНД К12)	18 Ni; 10Al; 12Со; 6Cu	500	6 800
Алніко 15 (ЮНДК 15)	20 Ni; 9Al; 15Со; 4Cu	600	7 500
Алніко 18 (ЮНДК 18)	19Ni; 10Al; 18Со; 3Cu	650	9 000
Магніко (ЮНДК 24)	13Ni; 9Al; 24Со; 3Cu	500	12 300
Стрічка, прут			
Куніфе I	60Cu; 20Ni решта Fe	350-590	5 400-6 000
Куніко II	35 Cu; 24 Ni; 41Со	450	5 300
Вікалой	57Со; 13,5V решта Fe	550	8 000
Pt-Fe	78Pt; 22Fe	1 500-1800	4 000-6 400
Pt-Со	77Pt; 23Со	2 600-4 000	3 000-5 000
Пресовані магніти			
Магніти з мікропо- рошку Fe	BaO 6Fe ₂ O ₃	350-600	4 000-5 000
Барієві ферити: ізо- тропні анізотропні		1 600-1 800 1 200	2 000-2 200 37 00

відновлюються повторним намагнічуванням. Старіння, викликане зміною структури магнітно-твердого матеріалу, є незворотним.

Магнітно-тверді матеріали для постійних магнітів поділяють на:

→ високовуглецеві мартенситні сталі;

→ литі сплави;

→ деформівні сплави;

→ металокерамічні матеріали.

Високовуглецеві мартенситні сталі є найбільш простими і доступними матеріалами для постійних магнітів. Виготовлені магніти гартують на мартенсит. Нелеговані сталі У10-У12 внаслідок низької прогартуваності використовують для виготовлення тільки невеликих за розмірами магнітів. Для збільшення прогартуваності високовуглецеві сталі легують хромом. З них можна виготовляти магніти великих розмірів. Додаткове легування хромистих сталей кобальтом (сталі ЕХ5К5, ЕХ9К15Н2), вольфрамом (5,5 - 6,5 %), молібденом (< 2 %) значно покращує їх магнітні властивості. Кращими матеріалами є кобальтові сталі, але вони значно дорожчі. Усі сталі через порівняно невисокий рівень їх магнітних властивостей витісняються менш дефіцитними литими Fe-Ni-Al сплавами з більш високими магнітними властивостями.

Литі сплави Fe-Ni-Al містять 12-35 % Ni, 6,5 - 15 % Al. Для поліпшення магнітних властивостей сплави додатково легують міддю, кобальтом, титаном та ніобієм. Маркують ці сплави так, як і сталі. Висока магнітна твердість магнітів із таких сплавів досягається спеціальною термообробкою - нагрівом до температури 1200 - 1280 °С з наступним охолодженням на повітрі або у воді. У процесі нагріву всі складові сплаву розчиняються в залізі і утворюють перенасичені тверді розчини, з яких в подальшому випадають дрібнодисперсні частинки компонентів сплаву. Для пришвидшення процесу випадання загартовані магніти нагрівають до температури 500 - 650 °С, при якій відбувається дисперсійне твердіння сплаву. Випадання дрібнодисперсних частинок сприяє виникненню в сплаві внутрішніх напружень і високого рівня магнітної твердості.

Магнітні властивості сплавів з підвищеним вмістом кобальту (більше 15 %) можна значно покращити охолодженням нагрітих до 1300 °С магнітів у сильному магнітному полі. Магнітні моменти доменів орієнтуються в напрямі дії зовнішнього магнітного поля, і утворюється магнітна текстура, при цьому магнітна енергія зростає на 60 - 80 % внаслідок різкого збільшення залишкової магнітної індукції.

Магніти з литих сплавів значно стійкіші проти старіння порівняно з мартенситними сталями. До недоліків цих сплавів належать їх підвищена крихкість і велика твердість, через що магніти з цих сплавів можна обробляти тільки шліфуванням.

Деформівні сплави виготовляють на основі пластичних металів Fe, Co, Cu, Ni та Pt. Вони піддаються пластичній деформації, що дозволяє отримувати з них тонкі стрічки і дротинки із сформованою кристалічною текстурою, яка додатково покращує магнітні властивості. Найкращі магнітні властивості має сплав кобальту з платиною, але велика вартість платини обмежує практичне використання цих сплавів.

7.6. Металокерамічні матеріали

Металокерамічні матеріали використовують для виготовлення дуже малих і точних за розміром магнітів у масовому виробництві. Ці матеріали отримують з порошків чистих металів, сплавів залізо-нікель-алюмній або залізо-нікель-алюміній-кобальт. Порошки змішують у необхідних співвідношеннях, пресують і спікають у захисній атмосфері або вакуумі при 1100 - 1300 °C. Магнітні властивості спечених сплавів досягають такими ж видами термічної чи термомагнітної обробки, які застосовують для литих сплавів. Внаслідок невеликої пористості (2-5 %) металокерамічні магніти мають нижчі магнітні характеристики, ніж литі сплави такого ж складу. Виготовлені з металокерамічних матеріалів магніти можна обробляти тільки шліфуванням.

Магнітно-тверді ферити отримують спіканням порошків оксидів Fe, Ba і Co. Значення H_c для феритів значно вище, ніж у литих сплавів. Кобальтові ферити характеризуються високою температурною стабільністю. Промислові анізотропні кобальтові ферити за магнітними властивостями поступаються барієвим феритам складу $BaO \cdot 6Fe_2O_3$. Магніти, виготовлені з барієвих феритів, мають більш високий питомий опір ($10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), що дозволяє застосувати їх за високих частот. Магніти з рідкоземельних металів (РЗМ) і кобальту мають найвище значення магнітної потужності поміж усіх магнітно-твердих матеріалів. Значення коерцитивної сили у них у 4 - 5 разів вище, ніж у барієвих і кобальтових феритів.

Ферити є магнітними напівпровідниками, тому за зростання температури їхній питомий опір зменшується та збільшуються втрати на вихрові струми.



ЗАПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОТРОЛЮ

1. Чим різняться між собою діамagnetики, парамагнетики і феромагнетики?
2. Назвіть магнітні характеристики, за якими оцінюються магнітні властивості матеріалів.
3. На які основні групи поділяються магнітні матеріали і які характерні особливості має кожна група?
4. Що являють собою магнітні домени? Як змінюється орієнтація доменів при намагніченні?
5. Які вимоги ставлять до магнітно-м'яких і магнітно-твердих матеріалів?
6. Що являють собою пермалої і які їхні магнітні характеристики?
7. Охарактеризуйте електротехнічні сталі. Де їх застосовують?
8. Що являють собою текстуровані електротехнічні сталі і які їхні характерні властивості?
9. Назвіть магнітно-тверді металеві матеріали і наведіть їх приблизний склад.
10. Що являють собою металокерамічні матеріали і де вони застосовуються?
11. Назвіть характерні властивості феритів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ТА РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Арзтасов. Б. Н., Косалапов Г. Ф., Сидорин 77. 77. и др. Материаловедение. -- М.: Машиностроение, 1986. - 384 с.
2. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М. Электрические материалы. - Л.: Энергия, 1977. - 352 с.
3. БСЭ. - М.: Сов. энциклопедия, 1975. - Т. 21. - С. 274 - 276.
4. Голубец В. М. Електротехнічні матеріали. - К.: 13МН, 1977. -132 с.
5. Гуляев А. П. Металловедение. - М.: Металлургия, 1986. -542 с.
6. Роут. Док. Химия XX века. - М.: Мир, 1996. - 423 с.
7. Довгий Я. Чарівне явище надпровідності. - К.: Наук, думка, 2000. - 450 с.
8. Киреев В. А. Краткий курс физической химии. - М.: Госхимиздат, 1963. - 647 с.
9. Ко руд В. Л, Гамола О. С, Малинівський С. М. Електротехніка: Підручник - Львів: Магнолія плюс, 2005. - 447 с.
10. Мелехов Р. К, Похмурський В. І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. - К.: Наук, думка, 2003. - 182 с.
11. Нікулін М. В. Електроматеріалознавство. - К.: Вища шк., 1990. - 176 с
12. Пасынков В. В., Сорокин В. С. Материалы электронной техники. - М.: Выш. шк., 1986. - 367 с.
13. Рэмсен Э. Н. Начала современной химии. - Л.: Химия, 1989.- 784 с.
14. Сучков О. К. Технология конструкционных материалов. -М.: Колос, 1978. - 287 с.
15. Телеснин Р. В. Молекулярная физика. - М.: Выш.шк., 1973. -360 с.
16. Физический энциклопедический словарь. - М.: Сов. энциклопедия, 1960. - Т. 1-6.
17. Химия: Справочные материалы / Под ред. Ю. Д. Третьякова. - М.: Просвещение, 1989. - 223 с.
18. Элементарный учебник физики / Под ред. Г. С. Ландсберга. - М.: АОЗТ "Шрайк", 1995. - Т. 2. - 479 с.
19. Энциклопедия неорганических материалов / Отв. ред. И. М. Федорченко. - К.: Главная редакция украинской советской энциклопедии, 1977. -Т. 1.
20. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Навч. посібник для ВНЗ. - Львів: Львівська політехніка, 2000. - 264 с
21. Рисгич М. М. Основы науки о материалах. - К.: Наук, думка, 1984. - 152 с.
22. Сучасне матеріалознавство. XXI сторіччя: 36. наук, праць.-К.: Наук, думка, 1998. - 658 с
23. Маляр В. С, Шегедин О. І. Теоретичні основи електротехніки: Навч. посіб. - Львів: Магнолія плюс, 2004. - 172 с
24. Мазепа С С, Марущак Я. Ю., Куцик А. С Електрообладнання промислових підприємств. - Львів: Магнолія плюс, 2004. -260 с
25. Цветкова Л. Б. Загальна хімія: теорія і задачі. Частина І: Навч. посіб. - Львів: Новий світ-2000, 2007. - 398 с
26. Цветкова Л. Б., Романюк Л. 77. Органічна та неорганічна хімія. Частина ІІ: Навч. посіб. - Львів: Новий світ-2000, 2007. -358 с

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

Алмаз	35	Гайперник	226	Електроугільні вироби ..	97-98	Компаунди	172
Алніко	232	Гайперсил	223, 225	Електроізоляційні гуми	165	Конденсаторні матеріали ...	192
Алотропія	34-35	Гексагональна ґратка	34	Електропровідність газів ...	135	Константан	81
Алюміній	79	Германій	116	Електротехнічний фарфор ..	191	Конструктивні матеріали	
Альсифери	228	Гетинакс	164	Епоксидні смоли	175	газових турбін і парогазових	
Амінопласти	163-164	Гігроскопічність	201	Залізо	89	установок	54-58
Аморфні тіла	38-39	Гідрофільність	199	Зв'язки		гідроенергетики	58-59
Анізотропія	36	Гідрофобність	199	диполь – дипольний	25	теплової енергетики	50-54
Аніони	140	Гістерезис	221	металічний	24	ядерної енергетики	45-49
Антиферомагнетики	217	Гліфталеві смоли	176	міжмолекулярний	25	Копали	173
Атом(и)		Гліфталеві смоли	176	сили Ван-дер-Вальса	26	Корундова кераміка	193
атом Бора – Зоммерфельда ..	9	Гранецентрована ґратка	35	Золото	85	Кремній	117
квантові числа	10	Графіт	35	Зони енергетичні		Кремнійорганічні каучуки ..	165
модель атома Резерфорда ..	8	Гуми	165	валентна	29	Лаки	170-172
хвильова теорія	11	Дефекти кристалічних тіл		вільна	29	Магніко	232
Бакелітова смола	174	вакансії	37	заборонена	29	Магнітний момент	210
Біметали	91	дислокації	37	Зонна плавка	28	Магнітном'які матеріали ...	222
Бітуми	169	домішкові атоми втілення ..	36	Зонна теорія	27-30	Магнітнотверді	
Вакансія	37	Діамагнетики	212	Іонна лавина	134	матеріали	231-234
Ванадій	89	Діелектрики	30,120,133	Іонізація газів	135	Магнітодіелектрики	231
Ван-дер-Ваальсові сили	26	Діелектрична проникність ..	125	Іони	18	Манганін	81
Випрямлення змінного		Діелектричні втрати	129	Іонний зв'язок	18-19	Металічні матеріали	39
струму	111-112	Диполь	26	Іонний зв'язок	18-19	Металокерамічні	
Високотемпературна		Дипольний момент	121	Каніфоль	173	матеріали	99, 234
міцність	42-43	Дислокації	37	Капрон	157	Мідь	77-79
Витривалість	42	Доменна структура	218-219	Карбід кремнію	118	Міканіти	182
Вологість повітря	202	Домішки		Картон	167	Мікастрічка	184
Вологопроникність	203	акцепторні	108	Каучуки	165-167	Мікафолій	184
Волокнисті матеріали	167	втілення	37	Квант	9, 69	Міпора	164
Вольфрам	86	донорні	108	Квантові числа	10-14	Міцність	40-43
Вулканізація	165-166	заміщення	37	Кварцове скло	187	Молібден	87
В'язкість ударна	41	Електрети	198	Кераміка	189	Монокристали	33
		Електрична міцність	134	Ковалентні зв'язки	21	Мономери	119
				Коерцетивна сила	221, 231	Мусковіт	181-182

Нагрівостійкість	206	Піроелектрики	193	Світловоди	187	Температура розмягчення ...	204
Надпровідність		Пластичність	40-41	Свинець	91	Теплове розширення	208
високотемпературна	72	Пластмаси	161	Сегнетоелектрики	196	Теплопровідність	207
природа надпровід-		Платина	85-86	Селен	118	Теплостійкість	205
ності	67-71	Полівініловий спирт	157	Ситал	188	Ультрафарфор	191
Напівпровідники		Полівінілхлорид	155	Скло	185	Фарфор	191
з власною провідністю	103	Полівінілхлоридний		Склотекстоліт	164	Фенопласт	163
п -- типу	106	пластикат	156	Слюди	181	Ферімагнетики	218
р -- типу	108	Поліетилен	152	Смоли	173-176	Ферити	230
Напівпровідникові		Поліізобутилен	157	Совол	180	Феромагнетики	215
випростувачі	109	Поліімідн	160	Сплави для термопар	83-84	Флогопіт	182
Наповнювачі	157	Поліпропілен	155	Срібло	84-85	Флюси	94-97
Неметалічні провідникові		Полістирол	154	Сталі	43-44	Фторлон-3	158
матеріали	97	Поліформальдегід	158	Стеатитова кераміка	192	Фторпласт-4	158
Нікель	90	Полярні діелектрики	122-125	Тангенс кута діелектричних		Хром	89
Ніобій	88	Поляризація діелектриків		втрат	130-131	Церезин	170
Ніхром	82	дипольна	124	Тантал	88	Чавунн	44
Новолаки	174	електронна	123	Твердість	41		
Оливи		іонна	123	Текстоліт	164		
кабельні	180	Постійна Планка	9	Тектури	167		
конденсаторні	180	Принцип Паулі	14, 69	Температурний коефіцієнт			
льна	172	Припої	92	питомого опору	65		
нафтові	176	Пробій діелектриків					
тунгова	172	електричний	133, 147				
Олово	91	електротепловий	134, 147				
Органічне скло	157	Пробивна напруга	107-108				
		Провідність напівпровідників					
		власна	103				
		діркова	104-105				
Паладій	86	електронна	104-105				
Папери	167-169	Провідники	32				
Парамагнетики	213	Радіофарфор	191				
Парафін	170	Реній	88				
Періодична система	14-17	Ртуть	90				
Пермалої	226						
Пермінвар	229						
П'єзоелектрики	194						