

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

А.П. БОВСУНОВСЬКИЙ
“ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ”
КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
для студентів спеціальності 6.090600
“Електротехнічні системи електроспоживання”
денної та заочної форм навчання

СХВАЛЕНО
на засіданні кафедри
матеріалознавства і технології
машинобудування.
Протокол №5 від 14.11.2006

КИЇВ НУХТ 2007

Бовсуновський А.П. Електротехнічні системи електроспоживання: Конспект лекції з дисципліни “Електротехнічні матеріали” для студ. усіх спец. ден. а заоч. форм навч. – К. НУХТ, 2007. – 103 с.

Рецензент С.В. Штефан, канд. техн. наук.

А.П. Бовсуновський, д-р техн. наук

© А.П. Бовсуновський, 2007
© НУХТ, 2007

ЛЕКЦІЯ 1

ПРЕДМЕТ КУРСУ “ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ”

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ

Предметом курсу “Електротехнічні матеріали” є вивчення основних фізичних, хімічних і механічних властивостей матеріалів, які застосовуються в електротехніці (тобто при генеруванні, передачі і використанні електричної енергії), закономірностей впливу експлуатаційних факторів (стан зовнішнього середовища і параметри електричного поля), складу і структури матеріалів на ці властивості, а також технологій одержання електротехнічних матеріалів і областей їх застосування.

Основна проблематика сучасного електротехнічного матеріалознавства:

- 1). забезпечення зростаючих потужностей і бистродії сучасних електротехнічних пристроїв;
- 2). зменшення втрат електроенергії при її передачі на великі відстані;
- 3). підвищення ефективності електротехнічних матеріалів;
- 4). забезпечення безпеки при роботі.

Електротехнічні матеріали поділяють на три великі групи, які розрізняються за своїми електричними властивостями: провідники, діелектрики (або електроізоляційні матеріали) і напівпровідники (рис. 1.1).

Провідники – це матеріали, що проводять електричний струм. Характеризуються порівняно низьким електричним опором (питомий електричний опір провідників лежить в межах $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \dots 1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м). Провідниками є всі метали і металеві сплави, а також деякі інші матеріали.

Діелектрики (електроізоляційні матеріали) – це матеріали, які в звичайних умовах не проводять електричний струм (питомий об’ємний електричний опір діелектриків лежить в межах $\rho_v = 10^6 \dots 10^{12}$ Ом·м).

Напівпровідники – матеріали, які за певних зовнішніх енергетичних впливів стають провідниками.

Магнітні матеріали – це матеріали, що є носіями магнітного поля, або здатні підсилювати зовнішнє електромагнітне поле. Виготовляються як з провідникових, так і з напівпровідникових матеріалів (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Класифікація електромагнітних матеріалів

Отже, з точки зору здатності проводити електричний струм існує три принципово різних типи матеріалів. Фізична природа цих властивостей матеріалів криється у їхній елементарній будові.

ЕЛЕМЕНТАРНА БУДОВА РЕЧОВИНИ

Основними елементарними частинками, з яких складаються всі відомі нам речовини, є протони, нейтрони і електрони. Атомне ядро складається з протонів (позитивно заряджені частинки) і нейтронів (частинки, що не мають заряду).

У найпростішій, **планетарній моделі** атома електрон обертається по орбіті навколо ядра атома, компенсуючи його позитивний заряд. Будова атомів є основою періодичної системи елементів Д.І.Менделєєва.

Наприклад, атом водню складається з одного протона й одного електрона, атом гелію – із двох і т.д.

У квантовій механіці крім корпускулярних враховуються також і хвильові властивості елементарних часток (корпускулярно-хвильовий дуалізм).

Гази, рідкі і тверді речовини складаються з атомів, молекул або іонів. Розміри атомів — порядку ангстремів ($1\text{Å}=10^{-10}\text{м}=0,1\text{нм}$).

Молекула – мікрочастинка, що утворюється з декількох атомів і має постійний атомарний склад для певної речовини.

Іони – електрично заряджені частинки, що утворюються з атома або молекули в результаті втрати або приєднання одного або декількох електронів. Позитивно заряджені іони називаються **катіонами**, негативно – **аніонами** (ці терміни у 1834 році запропонував англійський фізик Майкл Фарадей).

Розміри позитивних іонів-атомів, позбавлених частини електронів, менше, ніж атомів; розміри негативних іонів-атомів, що приєднали додаткові електрони, більше, ніж розміри відповідних атомів.

ВИДИ ЗВ'ЯЗКУ АТОМІВ У МОЛЕКУЛАХ

І. Ковалентний зв'язок – це вид хімічного зв'язку, що здійснюється парою електронів, спільних для атомів, що утворюють молекулу. Атоми в молекулі можуть з'єднуватись одинарним, подвійним або потрійним ковалентним зв'язком.

Ковалентний зв'язок спостерігається у твердих кристалічних речовин неорганічного походження, кристалічні ґратки яких побудовані з атомів. Прикладом такого кристала є алмаз.

Кристали – тверді тіла, атоми і молекули яких утворюють впорядковану періодичну структуру (кристалічну ґратку). Характеризуються анізотропією фізичних властивостей. Більшість природних твердих матеріалів є полікристалами (тобто складаються з багатьох кристалів). Одиночні кристали називають монокристалами.

Анізотропія – неоднаковість (неоднорідність) фізичних властивостей речовини або тіла в різних напрямках. **Ізотропія** – однаковість (однорідність) фізичних властивостей речовини або тіла в різних напрямках. Відповідно

матеріали можуть бути або ізотропними, або анізотропними.

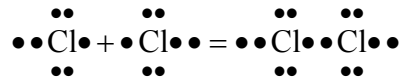
Основні типи кристалічних ґраток: кубічна (К), об'ємноцентрована кубічна (ОЦК), гранецентрована кубічна (ГЦК), гексагональна щільноупакована та ін. Кристалічні, мікро- і макроструктури матеріалів можуть мати дефекти (вакансії, дислокації, мікротріщини, тріщини, пори, включення інших матеріалів), які суттєво впливають на фізичні характеристики матеріалів, зокрема і на електричні.

Аморфна структура – стан речовини, що характеризується ізотропією фізичних властивостей, зумовленою невпорядкованим розташуванням атомів і молекул (наприклад, скло).

Ковалентний зв'язок спостерігається також у молекулах газів.

Молекули газів містять різне число атомів. Наприклад, гази з однотомними молекулами – He, Ar, Ne; з двоатомними молекулами – H₂, N₂, O₂, Cl₂; з триатомними молекулами – CO₂, H₂O і т.п.

Об'єднання декількох атомів у молекулу досягається за рахунок електронів, що стають загальними для всіх атомів. Скажімо, у молекулі Cl₂ два атоми хлору, що мають на зовнішньому шарі по сім електронів, приймають стійку конфігурацію шляхом об'єднання двох загальних електронів:



Молекули з ковалентним зв'язком можуть бути нейтральними або полярними (дипольними).

Молекули, у яких центри позитивних і негативних зарядів збігаються, є **н е й т р а л ь н и м и**.

Молекули називають **полярними або дипольними**, якщо центри протилежних за знаком зарядів не збігаються і знаходяться на деякій відстані один від одного.

Полярна молекула характеризується величиною **дипольного моменту**, що визначається добутком заряду на відстань між центрами позитивного і негативного зарядів.

II. Іонний зв'язок — визначається силами притягання між позитивними і негативними іонами (тобто між катіонами і аніонами).

Тверді тіла іонної структури характеризуються підвищеною механічною міцністю і високою температурою плавлення. Типовими прикладами іонних кристалів є галоїдні солі лужних металів.

III. Металевий зв'язок визначається взаємодією (притяганням) між позитивними іонами і вільними електронами і є причиною монолітності металу. Така взаємодія приводить до утворення твердих кристалічних тіл.

Наявність вільних електронів є причиною високої електропровідності і теплопровідності металу.

IV. Залишковий зв'язок, або зв'язок Ван-дер-Ваальса, спостерігається

між молекулами деяких речовин що мають низьку температуру плавлення і неміцну кристалічну молекулярну ґратку (наприклад, парафін).

ТИПИ ПРОВІДНОСТІ

Провідність буває **електронною** (метали, напівпровідники), **іонною** (електроліти) і **змішаною**, коли має місце як електронна, так і іонна провідність.

Для пояснення властивостей різних матеріалів проводити або не проводити електричний струм існує так звана зонна теорія твердих тіл (рис. 1.2). Згідно з цією теорією електрони в атомі можуть перебувати у строго визначених енергетичних станах (рівнях). Якщо до тіла певним чином підвести енергію (наприклад, напругу), то частина електронів, сприймаючи цю енергію, збуджуються і переходять з

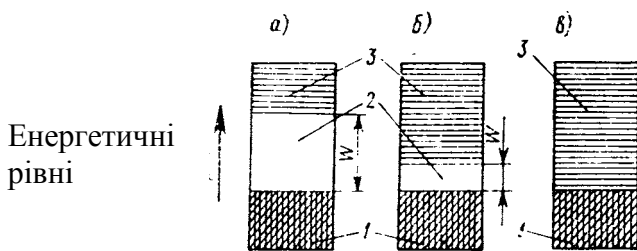


Рис. 1.2. Енергетичні діаграми діелектриків (а), напівпровідників (б) і провідників (в)

з звичайного енергетичного рівня (1) на більш високий енергетичний рівень (3). Прагнучи прийти до стійкого стану, атом випромінює надлишок енергії в момент переходу електронів зі збуджених рівнів на рівні, при яких його енергія мінімальна.

Проміжні зони (2) між енергетичними рівнями електронів називають **забороненими зонами** (на рис. 1.2 ширина забороненої зони позначена буквою W). Електрон не може мати енергію, що дорівнює ширині забороненої зони. Його енергія має бути або вищою, або нижчою цієї зони.

У металевих провідників ширина забороненої зони дуже мала. Внаслідок цього достатньо слабкої напруги, прикладеної до провідника, щоб електрони в металі легко проходили через заборонену зону.

У діелектриках заборонена зона настільки велика, що потрібний значний електричний потенціал, щоб електрони змогли подолати заборонену зону. Тому в діелектриках в звичайних умовах електронної провідності не спостерігається.

Розмір забороненої зони напівпровідників значно більший, ніж у металів, але менший, ніж у діелектриків. Електронна провідність у напівпровідниках може бути викликана за рахунок зовнішніх енергетичних впливів (температура, енергія світла, енергія потоку електронів і ядерних часток, енергія електричних і магнітних полів, механічна енергія і т.д.).

Запитання для самоперевірки:

1. Яким чином класифікують матеріали, що використовуються в електротехніці?
2. Які бувають види зв'язку атомів у молекулах?
3. Які види провідності ви знаєте?
4. Як ширина забороненої зони впливає на провідність матеріалів?

ЛЕКЦІЯ 2

ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ ТА ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ

Поляризація діелектрика – це обмежений рух зв'язаних зарядів або певна орієнтація дипольних молекул під дією зовнішнього електричного поля.

Під впливом електричного поля зв'язані електричні заряди діелектрика зміщуються в напрямку діючих на них сил. Це зміщення прямопропорційне напруженості поля. При зникненні електричного поля заряди знову повертаються в попередній стан.

У дипольних діелектриках вплив електричного поля викликає орієнтацію дипольних молекул у напрямку поля. При зникненні поля диполі орієнтуються довільно внаслідок теплового руху.

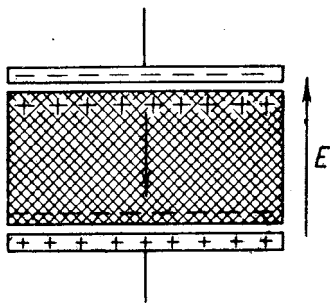


Рис. 2.1. Розподіл зарядів у діелектрику під дією зовнішнього електричного поля

При поляризації на поверхнях діелектрика виникають заряди різних знаків. На стороні, зверненій до позитивного електрода, виникає негативний заряд. На стороні, зверненій до негативного електрода – позитивний (рис. 2.1).

Більшість діелектриків характеризується лінійною залежністю електричного зміщення від величини напруженості електричного поля. Особливу групу складають діелектрики, у яких зі зміною напруженості поля величина зміщення змінюється нелінійно, насичуючись при певному значенні напруженості поля. Такі діелектрики називають сегнетоелектриками.

Сегнетоелектрики – речовини, що мають самовільну (у відсутності електричного поля) електричну поляризацію, яка суттєво залежить від зовнішніх умов (наприклад, температури). Перший сегнетоелектрик (подвійна калієво-натрієва сіль винної кислоти) був створений французьким аптекарем Сен'єтом у 1655 р. Але лише в 1918 р. американський фізик Андерсон звернув увагу на те, що при температурі від -15 до $+22^{\circ}\text{C}$ ця сіль має надзвичайно велику діелектричну проникність. Тоді і народилося поняття про новий клас речовин – сегнетоелектрики.

Будь-який діелектрик, оточений електродними пластинками, до яких підводиться електричний потенціал, може розглядатися як конденсатор, заряд якого визначається за формулою

$$Q=C \cdot U,$$

де C – ємність конденсатора; U – прикладена до нього напруга. Заряд Q має дві складові:

$$Q=Q_0+Q_d,$$

де Q_0 – заряд на електродах, якби їх розділяв вакуум; Q_d – заряд, зумовлений поляризацією діелектрика.

Однієї з найважливіших характеристик діелектрика є його діелектрична проникність, яку звичайно виражають відносно абсолютного значення діелектричної проникності вакууму, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Відносна діелектрична проникність діелектрика – це відношенню заряду конденсатора, виготовленого з даного діелектрика, до заряду конденсатора, електроди якого розділяє вакуум:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}.$$

З цього виразу випливає, що відносна діелектрична проникність будь-якої речовини більше одиниці і дорівнює одиниці тільки для вакуума.

Таким чином, відносна діелектрична проникність (далі будемо говорити просто діелектрична проникність) – це величина, що показує, у скільки разів сила взаємодії двох електричних зарядів у даному середовищі менше, ніж у вакуумі. Характеризує здатність діелектрика до поляризації і не залежить від вибору системи одиниць.

Ємність плоского конденсатора залежить від діелектричної проникності

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d},$$

де S – площа пластини конденсатора; d – відстань між пластинами.

ОСНОВНІ ВИДИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Розрізняють два основних види поляризації.

I. Перший вид поляризації – пружна – відбувається в діелектрику під впливом електричного поля практично миттєво без розсіювання енергії, тобто без виділення тепла. До цього виду поляризації відносяться електронна й іонна поляризація.

Електронна поляризація являє собою пружний зсув і деформацію електронних оболонок атомів і іонів.

Час встановлення електронної поляризації мізерно малий (близько 10^{-15} с). Тому електронну поляризацію умовно називають миттєвою.

Електронна поляризація речовини зменшується з підвищенням температури в зв'язку з тепловим розширенням діелектрика і зменшенням числа часток в одиниці об'єму. Електронна поляризація спостерігається в усіх видах діелектриків.

Іонна поляризація характерна для твердих тіл з іонною будовою й обумовлюється зміщенням пружно зв'язаних іонів.

З підвищенням температури вона підсилюється в результаті ослаблення пружних сил, що діють між іонами, через збільшення відстані між ними при

тепловому розширенні. Час встановлення іонної поляризації – біля 10^{-13} сек.

II. Другий вид поляризації – релаксаційна – наростає й убуває повільніше, ніж пружна, і супроводжується розсіюванням енергії в діелектрику, тобто його нагріванням.

Розрізняють наступні види релаксаційної поляризації.

Дипольно-релаксаційна поляризація зумовлена тепловим рухом дипольних молекул, що знаходяться в хаотичному тепловому русі, і частково орієнтуються під дією поля.

Дипольно-релаксаційна поляризація можлива, якщо молекулярні сили не заважають диполям орієнтуватися вздовж поля. Поворот диполів у напрямку поля вимагає подолання деякого опору, а тому дипольно-релаксаційна поляризація супроводжується втратами енергії. Властива полярним газам і рідинам. Цей вид поляризації може спостерігатися також і у твердих полярних органічних речовинах.

Йонно-релаксаційна поляризація має місце під впливом зовнішнього електричного поля, коли слабо зв'язані іони речовини одержують надлишкову енергію і можуть рухатися в напрямку поля.

Спостерігається в неорганічному склі і в деяких іонних кристалічних неорганічних речовинах з нещільним упакуванням іонів. Зростає з температурою.

Електронно-релаксаційна поляризація виникає за рахунок збуджених тепловою енергією надлишкових «дефектних» електронів або «дірок».

Електронно-релаксаційна поляризація характерна головним чином для діелектриків з високим показником переломлення, великим внутрішнім полем і електронною електропровідністю: двоокису титана, забрудненої домішками, ряду з'єднань на основі окислів металів перемінної валентності – титана, ніобію, вісмуту.

Структурна поляризація проявляється у твердих тілах неоднорідної структури при макроскопічних неоднорідностях і наявності домішок. Причинами такої поляризації є провідні і напівпровідні включення в технічних діелектриках, наявність шарів з різною провідністю і т.д.

Цей вид поляризації проявляється при низьких частотах і зв'язана зі значним розсіюванням електричної енергії.

Мимовільна (спонтанна) поляризація існує в сегнетоелектриках.

Діелектрична проникність при спонтанній поляризації нелінійно залежить від величини напруженості електричного поля і характеризується явно вираженим максимумом при певній температурі. Мимовільна поляризація супроводжується значним розсіюванням енергії.

Речовини з спонтанною поляризацією складаються з окремих областей (доменів), що мають власний електричний момент. У відсутності зовнішнього електричного поля орієнтація електричних моментів різних доменів є

довільною. Накладення зовнішнього поля сприяє переважній орієнтації електричних моментів доменів у напрямку поля, що спричиняє ефект сильної поляризації. При деякому значенні напруженості зовнішнього поля настає так зване насичення, тобто подальше посилення поля вже не викликає зростання інтенсивності поляризації.

КЛАСИФІКАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ ЗА ВИДОМ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

Всі діелектрики за видом поляризації умовно поділяють на чотири групи.

Перша група – діелектрики, що мають в основному електронну поляризацію. Наприклад, це нейтральні і слабополярні тверді речовини в кристалічному й аморфному станах (парафін, сірка, полістирол), а також нейтральні і слабополярні рідини і гази (бензол, водень і ін.).

Друга група – діелектрики, що мають одночасно електронну і дипольно-релаксаційну поляризацію. Сюди належать дипольні (полярні) органічні рідкі, напіврідкі і тверді речовини (масляно-каніфольні компаунди, епоксидні смоли, целюлоза і т.п.).

Третя група – тверді неорганічні діелектрики з електронною, іонною і йонно-електронно-релаксаційною поляризаціями. У цій групі виділяють дві підгрупи матеріалів (через істотне розходження їхніх електричних характеристик):

- діелектрики з електронною й іонною поляризаціями; це кристалічні речовини з щільним упакуванням іонів (кварц, слюда, кам'яна сіль, корунд);
- діелектрики з електронною, іонною і релаксаційною поляризаціями (неорганічне скло, матеріали, що містять склоподібну фазу (порцеляна, мікалекс), кристалічні діелектрики з нещільним упакуванням часток у ґратках).

Четверту групу складають сегнетоелектрики, що характеризуються спонтанною, електронною, іонною і електронно-йонно-релаксаційною поляризаціями (сегнетова сіль, метатитанат барія).

ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ ГАЗІВ

Газоподібні речовини характеризуються малою густиною внаслідок великих відстаней між молекулами. Завдяки цьому поляризація газів незначна і діелектрична проникність усіх газів близька до одиниці ($\epsilon \approx 1$).

У газах основний вид поляризації – електронний або дипольний (якщо молекули газу полярні).

Діелектрична проникність газу тим вище, чим більше радіус молекули. Однак ця залежність слабка. Наприклад, діаметр молекули вуглекислого газу вдвічі перевищує діаметр молекули гелію ($D_{CO}/D_{HE}=2,3\text{Å}/1,12\text{Å}=2,05$), в той же час значення їх діелектричних проникностей майже не відрізняються ($\epsilon_{CO}/\epsilon_{HE}=1,001/1,000072=1,0009$).

Діелектрична проникність газів прямопропорційна тискові і вологості і оберненопропорційна температурі. Це пояснюється зміною числа молекул в

одиниці об'єму газу з зміною температури і тиску. Залежність діелектричної проникності газів від тиску, вологості і температури незначна з практичної точки зору.

Наприклад, при збільшенні тиску повітря в 40 разів його діелектрична проникність збільшується лише на 2%. При зниженні температури від +60 до –60°C діелектрична проникність збільшується на 0,03%. При збільшенні вологості повітря від 0 до 100% діелектрична проникність збільшується на 0,006%.

ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Рідкі діелектрики можуть складатися з нейтральних (неполярних) молекул або з дипольних (полярних) молекул.

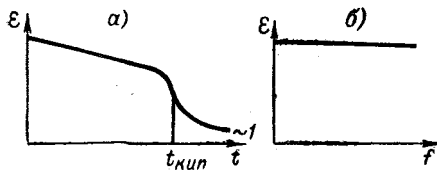


Рис. 2.2. Залежності діелектричної проникності нейтральної рідини від температури (а) і частоти струму (б) ($t_{кип}$ – температура кипіння рідини)

Нейтральні молекули утворюють **неполярні рідини**. Величина діелектричної проникності неполярних рідин невелика (приблизно у 2,5 рази вище, ніж у газів) і близька до значення квадрата показника переломлення світла в рідині $\epsilon \approx n^2$.

Діелектрична проникність нейтральної рідини залежить від температури і практично не залежить від частоти електричного струму (рис. 2.2). Залежність діелектричної проникності від температури пов'язана зі зменшенням числа молекул в одиниці її об'єму, тобто зі зменшенням густини рідини.

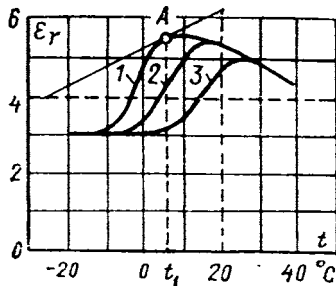


Рис. 2.3. Залежність діелектричної проникності від температури для совола (полярна рідина):
1 – $f=50$ Гц; 2 – $f=400$ Гц; 3 – $f=1000$ Гц

Дипольні молекули утворюють **полярні рідини**. Поляризація рідин, що містять дипольні молекули, визначається одночасно електронним і дипольно-релаксаційним механізми поляризації. Діелектрична проникність полярних рідин прямо пропорційна величині електричного моменту диполів і кількості молекул в одиниці об'єму. Діелектрична проникність полярних рідин у кілька разів вище, ніж діелектрична проникність нейтральних рідин (наприклад, діелектрична проникність совола $\epsilon=5,0$).

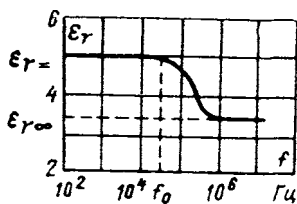


Рис. 2.4. Залежність діелектричної проникності від частоти струму для совола

Сильнополярні рідини (характеризуються дуже високим значенням діелектричної проникності, наприклад вода, етиловий спирт), не можуть знайти практичного застосування

як діелектрики внаслідок їхньої великої провідності.

Температурна залежність діелектричної проникності у випадку дипольних рідин має більш складний характер, ніж у випадку нейтральних (рис. 2.3). Температура, при якій відбувається швидке зростання діелектричної проникності, відповідає температурі різкого зменшення в'язкості рідини. При зниженні в'язкості дипольні молекули мають можливість орієнтуватися, створюючи додаткову поляризацію діелектрика. При подальшому зростанні температури діелектрична проникність зменшується внаслідок посилення теплового руху молекул, що перешкоджає їхній орієнтації в напрямку поля.

Значний вплив на величину діелектричної проникності дипольної рідини має частота (рис. 2.4). Поки частота мала, диполі встигають змінювати орієнтацію разом з полем, діелектрична проникність є великою і близькою до її значення при постійній напрузі. Коли ж частота стає настільки високою, що молекули вже не встигають слідкувати за змінами поля, діелектрична проникність різко зменшується.

ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

У твердих тілах можливі усі види поляризації, зазначені вище. Тому діелектрична проникність твердих тіл має широкий діапазон значень.

Нейтральні тверді діелектрики складаються з нейтральних молекул і характеризуються найменшими значеннями діелектричної проникності. Домінуючою в них є електронна поляризація. Діелектрична проникність нейтральних твердих діелектриків приблизно дорівнює квадратові показника переломлення світла: $\epsilon \approx n^2$ (парафін - $\epsilon=1,9-2,2$; полістирол - $\epsilon=2,4-2,6$; сірка - $\epsilon=3,6-4,0$; алмаз - $\epsilon=5,6-5,8$).

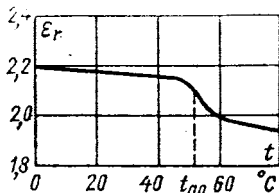


Рис. 2.5. Залежність діелектричної проникності парафіна (неполярний діелектрик) від температури

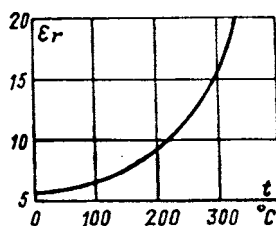


Рис. 2.6. Температурна залежність діелектричної проникності електротехнічного фарфора

Температурна залежність діелектричної проникності нейтральних твердих діелектриків визначається їхньою густиною або числом молекул в одиниці об'єму (рис. 2.5). При переході парафіну з твердого стану в рідке (температура плавлення близько 55°C) відбувається різке зменшення

величини діелектричної проникності внаслідок різкого зниження густини речовини.

Тверді діелектрики, що представляють собою іонні кристали з щільним упакуванням атомів, мають електронну й іонну поляризації і тому характеризуються величинами діелектричної проникності, що лежить у широких межах.

Тверді діелектрики, що представляють собою іонні кристали з нещільним упакуванням часток, у яких спостерігається, крім електронної й іонної поляризацій, також і йонно-релаксаційну поляризацію, характеризуються в більшості випадків порівняно невисоким значенням діелектричної проникності. Прикладом може служити високовольтний фарфор ($\epsilon=5$), діелектрична проникність якого суттєво залежить від температури (рис. 2.6).

Діелектрична проникність **неорганічного скла**, що наближаються до аморфних діелектриків, лежить у порівняно вузьких межах $\epsilon=4\dots 20$.

Тверді полярні **органічні діелектрики** мають дипольно-релаксаційну поляризацію у твердому стані. До таких діелектриків відносяться целюлоза і полярні полімери. Дипольно-релаксаційна поляризація спостерігається також у льоду. Діелектрична проникність зазначених вище матеріалів великою мірою залежить від температури і від частоти прикладеної напруги таким же чином, як і для дипольних рідин.

Діелектрична проникність **сегнетоелектриків** велика і має різко виражену залежність від напруженості поля і від температури. Характерною рисою сегнетоелектриків є наявність у них діелектричного гістерезиса (відставання змін електричної індукції від змін напруженості електричного поля). До сегнетоелектриків відносяться: сегнетова сіль ($\epsilon=500-600$), метатитанат барію ($\epsilon=1000-1500$), кислий фосфорнокислий калій ($\epsilon=7000-9000$) і ін.

Температура, при якій діелектрична проникність досягає максимуму, називається точкою Кюрі. В області температур вище точки Кюрі втрачаються сегнетоелектричні властивості матеріалу, зокрема зникає залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля.

Діелектрична проникність **твердих складних діелектриків**, що представляють собою суміш компонентів з різними діелектричними проникностями, може бути в першому наближенні (при не занадто великому розходженні діелектричної проникності компонентів) визначена на **підставі рівняння Ліхтенеккера**, що у загальному випадку враховує різні фізичні властивості компонентів (наприклад теплопровідність, показник переломлення та ін.).

Запитання для самоперевірки:

1. Що таке поляризація діелектриків?
2. Які види поляризації ви знаєте?
3. Що таке діелектрична проникність діелектриків?
4. Яким чином температура, вологість, частота та напруженість струму впливають на діелектричну проникність газоподібних, рідких та твердих діелектриків?

ЛЕКЦІЯ 3

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Електропровідність діелектриків зумовлена:

- поляризаційними струмами (струми зміщення, абсорбційні струми);
- струмами наскрізної провідності (струми витоку).

Поляризаційні струми викликані поляризаційними процесами зміщення зв'язаних зарядів у речовині. Ці струми при електронній і іонній поляризаціях настільки короткочасні, що їх звичайно не вдається зафіксувати приладом. Спостерігаються у великого числа технічних діелектриків. При постійній напрузі протікають тільки в моменти включення і вимикання напруги. При перемінній напрузі мають місце протягом усього часу перебування матеріалу в перемінному електричному полі.

Струми наскрізної провідності є надзвичайно малими, окрім випадку пробою, і зумовлені наявністю в технічних діелектриках невеликого числа вільних зарядів (аналогія зі струмом в металах).

Таким чином, струм в діелектрику представляє собою суму струмів зміщення ($i_{зм}$) і наскрізної провідності ($i_{нп}$):

$$i = i_{зм} + i_{нп}.$$

На рис. 3.1 показаний характер залежності сили струму через діелектрик від часу (τ) при наявності двох типів електропровідності. Після того, як процеси поляризації завершаються, струм зміщення швидко зникає і через діелектрик протікає тільки струм наскрізної електропровідності.

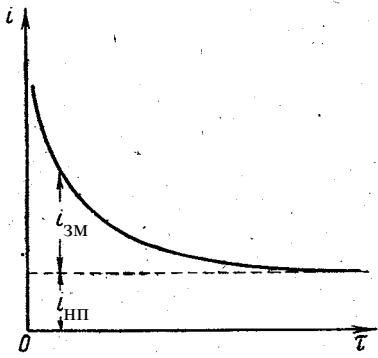


Рис. 3.1. Залежність сили струму через діелектрик від часу

Провідність діелектрика при **постійній напрузі** визначається наскрізним струмом. При **перемінній напрузі** активна провідність визначається як наскрізним струмом, так і активними складовими поляризаційних струмів.

Особливістю електропровідності переважної більшості діелектриків є її неелектронний (іонний) характер. Дійсний опір діелектрика, що визначає величину наскрізного струму, обчислюється за формулою:

$$R_d = \frac{U}{i},$$

де i - струм; U - прикладена напруга.

Для твердих ізоляційних матеріалів розрізняють **об'ємний і поверхневий**

опір (провідність).

Чисельно **питомий об'ємний опір** дорівнює опорю куба з ребром у 1 м, якщо струм проходить через дві протилежні грані цього куба. У випадку плоского зразка в однорідному полі питомий об'ємний опір розраховується за формулою

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h},$$

де R – об'ємний опір зразка, S - площа електрода, h - товщина зразка. Вимірюється в Ом·м.

Питома об'ємна провідність – величина, обернена питомому об'ємному опорю ($\gamma_v=1/\rho_v$). Питома об'ємна провідність вимірюється в Ом⁻¹·м⁻¹.

Питомий поверхневий опір розраховується за формулою

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l},$$

де R_s - поверхневий опір зразка між паралельно розташованими електродами шириною d на відстані l . Вимірюється в Ом.

Питома поверхнева провідність $\gamma_s=1/\rho_s$ вимірюється в Ом⁻¹.

Повна провідність твердого діелектрика складається з об'ємної і поверхневої провідностей

$$\gamma_\Sigma = \gamma_v + \gamma_s.$$

Електропровідність ізоляційних матеріалів в загальному випадку залежить від стану речовини (газоподібний, рідкий або твердий), від вологості, температури, атмосферного тиску (гази), напруженості електричного поля, деградації фізичних властивостей діелектрика (старіння).

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ГАЗІВ

Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля мають незначну провідність. Струм у газах може виникнути тільки при наявності в них іонів або вільних електронів. Іонізація нейтральних молекул газу виникає або під дією зовнішніх факторів, або внаслідок зіткнень заряджених часток з молекулами.

Зовнішніми факторами, що викликають іонізацію газу, є рентгенівські, ультрафіолетові, космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічний вплив (сильне нагрівання газу).

Електропровідність газу, зумовлена дією зовнішніх іонізаторів, називається **несамостійною**.

Ударна іонізація – виникає в газі в тих випадках, коли кінетична енергія заряджених часток, яку вони отримують під дією потужного електричного поля, досягає великих значень. Електропровідність газу, обумовлена ударною

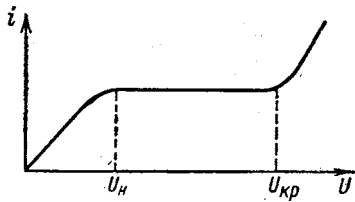


Рис. 3.2. Залежність сили струму від напруги для газів

іонізацією, зветься **самостійною**. В слабких полях ударна іонізація відсутня.

Початкова ділянка залежності сили струму від напруги для газу відповідає області виконання закону Ома до напруги насичення (U_n), коли число позитивних і негативних іонів можна вважати постійним (рис. 3.2). Частина негативних іонів з'єднується з негативними часточками,

утворюючи нейтральні молекули (процес рекомбінації).

При зростанні величини прикладеної напруги іони досягають електродів, не встигаючи рекомбінуватися, і при деякій напрузі всі іони, утворені в газовому проміжку, розряджаються на електродах. Подальше збільшення напруги вже не буде викликати зростання струму, що відповідає горизонтальній ділянці кривої рис. 3.2 (для повітря струм насичення досягається в нормальних умовах при відстані між електродами 10 мм при напруженості поля близько 0,0006 В/мм).

При деякій критичній напрузі ($U_{кр}$) виникає ударна іонізація, що зумовлює самостійну електропровідність. Сила струму знову починає збільшуватися зі зростанням напруги.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ РІДИН

Електропровідність рідких діелектриків залежить від їхньої структури, яка визначає, чи є рідина нейтральна, полярна або сильнополярна.

Електропровідність чистих нейтральних рідин є низькою. Тому вони широко використовуються в якості діелектриків. Струм у нейтральній рідині пояснюється переміщенням іонів, а також переміщенням відносно великих заряджених колоїдних частинок.

Електропровідність нейтральних рідин суттєво залежить від наявності дисоційованих домішок, у тому числі вологи. Очищення рідких діелектриків від домішок підвищує їх питомий опір. При тривалому пропусканні електричного струму через нейтральний рідкий діелектрик відбувається зростання опору за рахунок переносу вільних іонів до електродів (електричне очищення).

У **полярних рідинах** електропровідність визначається не тільки домішками, але і дисоціацією (розпадом молекули або іона на більш прості складові) молекул самої рідини. Полярні рідини завжди мають підвищену провідність у порівнянні з неполярними і за своїми діелектричними властивостями займають проміжне місце між нейтральними і сильнополярними рідинами.

Сильнополярні рідини відрізняються настільки високою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонною електропровідністю.

Питома провідність будь-якої рідини сильно залежить від температури. Зі

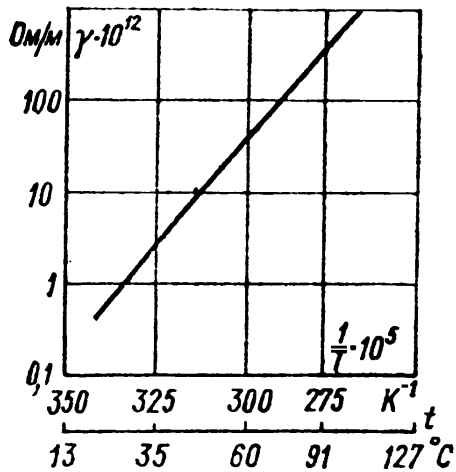


Рис. 3.3. Залежність питомої провідності масляно-каніфольного компаунда від температури

збільшенням температури зменшується в'язкість, отже, зростає рухливість іонів і провідність. В інтервалі температур від 0 до 100°C залежність питомої провідності рідких діелектриків від температури є дуже суттєвою і тому виражається експоненційною формулою:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\alpha t},$$

де γ_0 і α - постійні для даної рідини; t - температура, °C. На рис. 3.3 представлена така залежність для рідкого масляно-каніфольного компаунда (суміш на основі певної речовини) при $\alpha=9100$.

Провідність рідин прямо пропорційна також і напруженості електричного поля.

Орієнтовні значення питомих опорів різних рідин при 20°C: трансформаторне масло (нейтральна рідина) – $\rho=10^{10}-10^{13}$ Ом·м; совол, касторове масло (полярні рідини) – $\rho=10^8-10^{10}$ Ом·м; дистильована вода (сильнополярна рідина) – $\rho=10^3-10^4$ Ом·м.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Електропровідність твердих діелектриків зумовлюється:

- 1). переміщенням іонів самого діелектрика;
- 2). переміщенням іонів випадкових домішок;
- 3). наявністю вільних електронів (електронна провідність).

Вид електропровідності встановлюють експериментально. Наприклад, іонна електропровідність супроводжується переносом речовини на електроди. При електронній електропровідності це явище не спостерігається, але вона стає помітною при сильних електричних полях.

У процесі проходження електричного струму через твердий діелектрик іони домішок, що утримуються в ньому, можуть частково видалятися, виділяючись на електродах; останнє приводить до зменшення провідності з часом і до відповідного спадання струму.

У твердих діелектриках **іонної структури** електропровідність зумовлюється головним чином переміщенням іонів, що вивільняються під впливом підвищеної температури. При низьких температурах пересуваються слабо закріплені іони, зокрема іони домішок.

У кожному окремому випадку питання про механізм електропровідності вирішується на підставі даних про енергію активації носія заряду. Відомо, наприклад, що для кам'яної солі енергія активації іонів натрію при нормальній температурі складає близько 0,85 еВ. Енергія активації іонів хлору в три рази більше, а енергія активації електронів дорівнює 6 еВ, тоді як середня енергія

теплового руху при кімнатній температурі складає усього лише 0,025 эВ.

Електронвольт – позасистемна одиниця енергії, що застосовується для виміру енергії і маси мікрочастинок: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$.

Залежність питомого об'ємного опору твердих діелектриків від температури є експоненційною:

$$\rho_v = V e^{\frac{b}{T}},$$

де b і V – постійні для даного матеріалу. На практиці при розгляді залежності ρ_v від температури використовують наближену формулу, у якій замість абсолютної температури T використовують температуру за шкалою Цельсія:

$$\rho = \rho_0 e^{-\alpha t},$$

де ρ_v - питомий об'ємний опір при $t=0^\circ\text{C}$; α - температурний коефіцієнт. Таким чином, опір твердих діелектриків різко падає з підвищенням температури.

Власна електропровідність твердих тіл, а також її залежність від температури визначаються структурою речовини і його складом.

У тілах кристалічної будови з **іонними ґратами** електропровідність пов'язані з валентністю іонів. Кристали з одновалентними іонами мають більшу провідність, ніж кристали з багатовалентними іонами. Так, для кристала NaCl провідність значно вище, ніж для кристалів MgO або Al₂O₃.

У деяких кристалах провідність не однакова по різних осях кристала (анізотропія властивостей). Так, у кварці провідність у напрямку головної осі приблизно в 1000 разів більше, ніж у напрямку, перпендикулярному цієї осі. Для більшості іонних кристалів $b \approx 10\ 000$.

У кристалічних тілах з **молекулярними ґратками** (сірка, поліетилен, парафін) питома провідність мала і визначається тільки домішками.

Електропровідність **аморфних тіл** пов'язана насамперед з їхнім складом. Високомолекулярні органічні полімери мають питому провідність, що залежить значною мірою від ряду факторів: хімічного складу і наявності домішок, ступеня полімеризації (наприклад, для фенолформальдегідної смоли), ступеня вулканізації (для ебоніту). Органічні нейтральні аморфні діелектрики, як, наприклад, полістирол, відрізняються дуже малою питомою провідністю.

Кварцове скло має малу питому провідність, яка сильно залежить від температури ($b \approx 22000$), що вказує на велику енергію звільнення іонів. Введення до складу скла окислів важких металів (барію або свинцю) приводить до значного зниження питомої провідності стекл. При розгляді

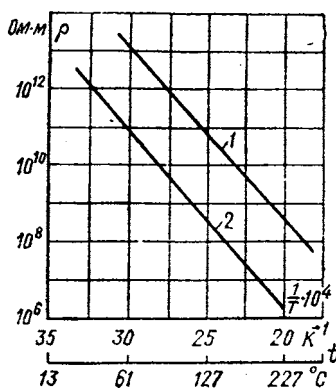


Рис. 3.4. Залежності питомого об'ємного опору радіофарфора (1) і фарфора (2) від температури

ізоляторного фарфору як системи, що містить скло, виявилось можливим понизити питому провідність цього діелектрика введенням у його склад окису барію.

Рис. 3.4 ілюструє залежність питомого об'ємного опору ізоляторної порцеляни і радіофарфора, що містить окис барію, від температури.

Тверді пористі діелектрики при наявності в них вологи навіть у незначних кількостях різко збільшують свою питому провідність. Висушування матеріалів підвищує питомий опір, але при перебуванні висушених матеріалів у вологому середовищі величина питомого опору знову зменшується.

Дерево: $\rho=10^{11}-10^{12}$ Ом·м (20°C; відн. вологість 0%); $\rho=10^6-10^7$ Ом·м (20°C; відн. вологість 70%); $\rho=10^{11}-10^{13}$ Ом·м (100°C; відн. вологість 0%).

При великих напруженостях поля в кристалічних діелектриках виникає електронний струм, що швидко зростає зі збільшенням напруженості. При напруженостях поля, що перевищують 10-100 кВ/мм, залежність електронної електропровідності від сили поля виражається емпіричною формулою:

$$\gamma = \gamma_0 e^{\beta E},$$

де E - напруженість поля; γ_0 - питома провідність в області незалежності від E ; β - коефіцієнт, що характеризує матеріал.

Застосування керамічних діелектриків при підвищених температурах викликало необхідність вивчення їхньої електропровідності в залежності від тривалості експлуатації в умовах різних температур і напруженостей електричного поля. Питомий об'ємний опір титанової кераміки зменшується з часом. Керамічні матеріали, на відміну від органічної ізоляції, при відсутності електричного поля не старіють, тобто не зазнають необоротних змін властивостей при дії високих температур у звичайних атмосферних умовах. Однак в електричному полі спостерігається електрохімічне старіння кераміки, раптова втрата електричної міцності діелектрика.

Необоротні зміни в кераміці пов'язані з виходом кисню з кристалічних ґраток. Найбільш ймовірний вихід кисню з поверхні зразка і поблизу всякого роду дефектів - тріщин, пор і ін. Обов'язковою умовою для електрохімічного старіння кераміки є участь в електропровідності хоча б одного виду іонів діелектрика. Якщо електропровідність чисто електронна, електрохімічне старіння не відбувається.

ПОВЕРХНЕВА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Поверхнева електропровідність зумовлена присутністю вологи або бруду на поверхні діелектрика.

Вода має значну провідність. Досить найтоншого шару вологи на поверхні діелектрика, щоб була виявлена помітна провідність, зумовлена в основному товщиною цього шару. Однак, оскільки опір адсорбованої плівки вологи пов'язаний з природою матеріалу, на поверхні якого вона знаходиться,

поверхневу електропровідність звичайно розглядають як властивість самого діелектрика.

Адсорбція вологи на поверхні діелектрика знаходиться в тісній залежності від відносної вологості навколишнього середовища. Тому величина відносної вологості є вирішальним чинником, що визначає значення питомої

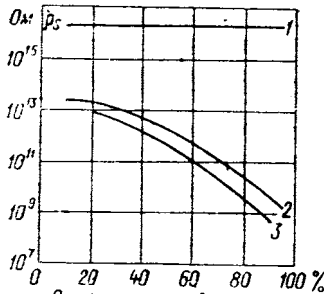


Рис. 3.5. Залежності питомого поверхневого опору від відносної вологості: 1 – церезин; 2 – лужне скло; 3 – фенопласт

поверхневої провідності діелектрика. Особливо різке зменшення питомого поверхневого опору звичайно спостерігається при значеннях відносної вологості, що перевищують 60-80%.

Питомий поверхневий опір тим вищий, чим менша полярність речовини, чим чистіша поверхня діелектрика і чим краще вона відполірована.

За ступенем поверхневої провідності всі матеріали можна підрозділити на кілька груп (рис. 3.5):

1). Нерозчинні у воді діелектрики.

а) Нейтральні і слабополярні - не змочуються водою (парафін, церезин, полістирол, янтар, сірка).

б) Полярні – деякі види діелектриків, що змочуються (деякі види кераміки).

Усі матеріали цієї групи характеризуються високим питомим поверхневим опором, що мало залежить від вологості навколишнього середовища. До поверхні полярних діелектриків легко прилипають різні забруднення, які знижують поверхневий опір на декілька порядків (табл. 3.1). Тому високий питомий поверхневий опір у вологому середовищі для полярних діелектриків можна одержати тільки при повній відсутності забруднень на їхній поверхні.

Таблиця 3.1. Питомі поверхневі опори діелектриків при відносній вологості 70%

Діелектрик	ρ_s забрудненої поверхні (Ом)	ρ_s очищеної поверхні (Ом)
лужне скло	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{11}$
плавлений кварц	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{13}$
мікалекс	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$

Для підвищення питомого поверхневого опору, застосовують різноманітні прийоми очищення поверхні - промивання водою, розчинниками, прожарювання при температурі 600-700°C. Найбільш ефективною є очищення поверхні виробу, що не всмоктує воду, тривалим кип'ятінням у дистильованій воді.

2). Частково розчинні у воді діелектрики.

Більшість видів технічного скла, на поверхні якого в результаті часткового розчинення скла утворюється плівка електроліта. Таким матеріалам властиво більш низький питомий поверхневий опір, значною мірою залежний від

вологості.

3) Діелектрики, що мають пористу структуру.

До таких діелектриків відносяться волокнисті матеріали (органічний і неорганічні), мармур, талькохлорит і більшість пластичних мас. Завдяки пористій структурі у вологому середовищі ці матеріали виявляють велику питому поверхневу провідність.

Просочення поверхневих шарів деталі парафіном або церезином підвищує поверхневий опір, але не забезпечує достатню стійкість значень питомого опору при високій вологості через можливість проникнення вологи в мікропори поверхні виробу через захисні покриття.

Покриття кераміки і скла кремнійорганічними лаками значно підвищує величину питомого поверхневого опору виробів з цих матеріалів у вологому середовищі.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть причини і характер провідності діелектриків.
2. Якими величинами характеризуються електричний опір і провідність діелектриків?
3. Назвіть особливості електропровідності газоподібних, рідких та твердих діелектриків.
4. Яким чином температура впливає на електричний опір газоподібних та рідких діелектриків?
5. Охарактеризуйте поверхневу електропровідність твердих діелектриків та її зв'язок з станом поверхні діелектрика і вологістю зовнішнього середовища.

ЛЕКЦІЯ 4

ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ

Діелектричними втратами називають енергію, що розсіюється за одиницю часу в діелектрику під впливом електричного поля і спричиняє нагрівання діелектрика. При перемінній напрузі втрати енергії в діелектриках мають місце внаслідок поляризації, а при постійній напрузі – внаслідок виникнення наскрізного струму.

Діелектричні втрати характеризуються кутом діелектричних втрат або тангенсом цього кута.

Кутом діелектричних втрат називається кут, що доповнює до 90° кут зсуву фаз φ між струмом і напругою в конденсаторному ланцюзі.

У випадку ідеального діелектрика між обкладками конденсатора вектор струму випереджає вектор напруги на кут 90° . При цьому кут $\delta=0$, а це означає, що в ідеальному діелектрику втрат енергії немає. Чим більші діелектричні втрати в діелектрику (тобто енергія, що розсіюється у вигляді тепла), тим меншим є кут зсуву фаз φ і тим більшим є кут діелектричних втрат δ і $\text{tg}\delta$ (рис. 4.1).

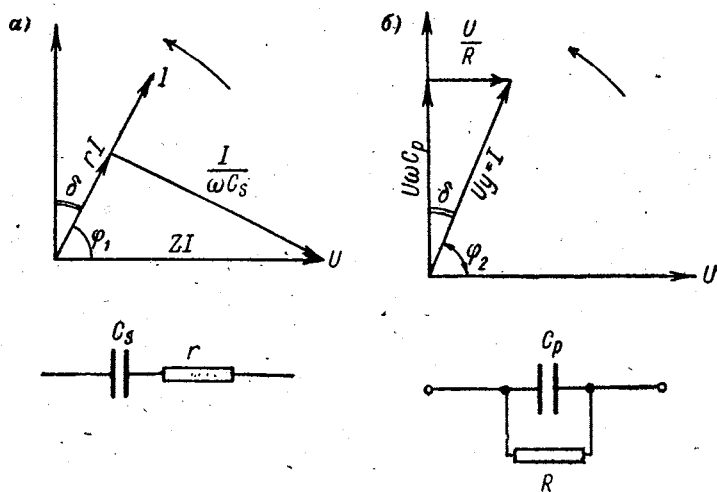


Рис. 4.1. Векторні діаграми і еквівалентні схеми діелектрика з втратами: (а) – послідовна; (б) – паралельна

випадку великі діелектричні втрати можуть принести істотної шкоди, збільшуючи, наприклад, активний опір коливального контуру, а також передчасне старіння матеріалу.

Діелектричні втрати, пов'язані з поляризацією діелектрика, зумовлюють специфічні залежності електричного заряду на обкладках конденсатора з даним діелектриком від прикладеної до конденсатора напруги (рис. 4.2). При відсутності втрат, викликаних явищем поляризації, заряд лінійно залежить від напруги. Якщо в діелектрику має місце поляризація, то крива залежності заряду

Великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильне нагрівання виготовленого з нього виробу і можуть привести до його теплового руйнування.

Якщо напруга, прикладена до діелектрика, недостатньо велика для того, щоб за рахунок діелектричних втрат міг би створитися неприпустимий перегрів, то й у цьому

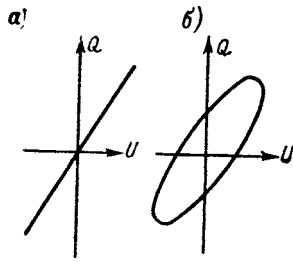


Рис. 4.2. Залежності заряду конденсатора від напруги для ідеального діелектрика (а) і для діелектрика з втратами енергії (б)

від напруги має вигляд петлі гістерезиса. Її площа пропорційна кількості енергії, що поглинається діелектриком за один період зміни напруги.

Питомі діелектричні втрати (потужність, що розсіюється в одиниці об'єму діелектрика, вимірюється в Вт/м³) визначається формулою:

$$p = \omega \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2 = \frac{1}{1,8 \cdot 10^{10}} \varepsilon f \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2,$$

де ε_0 – діелектрична постійна ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); $\omega = 2\pi f$ - кутова частота (рад/с); E - напруженість електричного поля (В/м).

З формули випливає, що розрахунок діелектричних втрат важливий для матеріалів, що експлуатуються в умовах високої напруги, у високочастотній апаратурі й особливо у високовольтних високочастотних пристроях, оскільки величина діелектричних втрат пропорційна частоті струму і квадрату прикладеної до діелектрика напруги.

ВИДИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ВТРАТ

Діелектричні втрати за їх фізичною природою можна розділити на чотири основних види:

- 1) діелектричні втрати, зумовлені поляризацією;
- 2) діелектричні втрати наскрізної електропровідності;
- 3) іонізаційні діелектричні втрати;
- 4) діелектричні втрати, зумовлені неоднорідністю структури.

Діелектричні втрати, зумовлені поляризацією, спостерігаються у діелектриках дипольної структури і у діелектриках іонної структури з нещільним упакуванням іонів (релаксаційні діелектричні втрати). Релаксаційні втрати зростають з частотою струму і тому спостерігаються при радіочастотах і надвисоких частотах.

Температурна залежність тангенса кута релаксаційних діелектричних втрат має максимум при деякій температурі, що характерна для даної речовини. При цій температурі час релаксації часток діелектрика близький до періоду зміни прикладеного перемінного електричного поля.

Діелектричні втрати, зумовлені наскрізною електропровідністю, виявляються в діелектриках, що мають помітну електропровідність, об'ємну або поверхневу. Діелектричні втрати цього виду не залежать від частоти поля і зростають з температурою експоненційно:

$$p_t = A e^{-\frac{b}{T}},$$

де A і b – постійні матеріалу.

Іонізаційні діелектричні втрати властиві діелектрикам у газоподібному стані. Іонізаційні втрати мають місце в неоднорідних електричних полях при напруженостях, що перевищують значення початкової іонізації даного газу.

Іонізаційні втрати можуть бути обчислені за формулою

$$p_i = A_i f(U - U_0),$$

де A_i - постійний коефіцієнт; f - частота поля; U - прикладена напруга; U_0 - напруга, що відповідає початку іонізації.

Діелектричні втрати, зумовлені неоднорідністю структури. Неоднорідність структури діелектрика має місце через випадкові домішки (вологи, окислів заліза, вуглецю) або через компоненти, що навмисно додають до діелектрика для бажаної зміни його властивостей. До числа неоднорідних діелектриків відносять просочений папір, пластичні маси з наповнювачем, пористу ізоляцію, що містить повітря і домішки вологи, пористу кераміку.

ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ В ГАЗАХ

Діелектричні втрати в газах при напруженостях поля, нижчих значення ударної іонізації молекул газу, дуже малі і тому газ можна розглядати як ідеальний діелектрик. Джерелом діелектричних втрат в газах в основному є наскрізна провідність, оскільки орієнтація дипольних молекул газів при їхній поляризації не супроводжується діелектричними втратами.

При високих напруженості і неоднорідності поля, коли напруженість в окремих місцях перевищує деяке критичне значення, молекули газу іонізуються, наслідок чого в газі виникають втрати на іонізацію. При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що це явище може привести до розігріву і руйнування виробів з газовою ізоляцією.

Виникнення іонізації газу, що заповнює закриті пори у твердій ізоляції, приводить до такого ж руйнування. Іонізація повітря супроводжується утворенням озону й окислів азоту, що викликає хімічне розкладання органічної ізоляції, що містить газові включення.

На високовольтних лініях електропередач втрати на іонізацію повітря біля поверхні дротів (**явище корони**) знижують коефіцієнт корисної дії лінії.

ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ В РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ

У чистих нейтральних рідинах діелектричні втрати зумовлені тільки електропровідністю. Оскільки їх питома провідність надзвичайно мала, то малі і діелектричні втрати.

Полярні рідини в залежності від умов (температури, частоти) можуть мати помітні втрати, пов'язаними з дипольно-релаксаційною поляризацією.

Застосовувані в техніці рідкі діелектрики є сумішами нейтральних і дипольних речовин (наприклад масляно-каніфольні компаунди), або є полярними рідинами (касторова олія, совол).

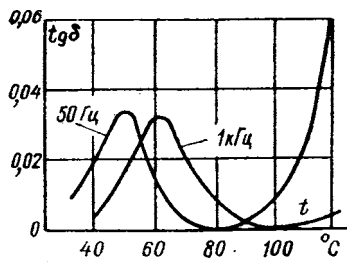


Рис. 4.3. Залежність діелектричних втрат від температури для масляно-каніфольного компаунда

Діелектричні втрати в рідких діелектриках з полярними молекулами суттєво залежать від величини в'язкості. Дипольні молекули під впливом електричного поля розвертаються у в'язкому середовищі і викликають втрати енергії на тертя з виділенням тепла. Якщо в'язкість рідини велика, молекули не встигають слідкувати за зміною поля і дипольна поляризація практично зникає; діелектричні втрати при цьому будуть малі. Дипольні втрати будуть також малі, якщо в'язкість рідини досить мала й орієнтація молекул відбувається без тертя. При середніх значеннях в'язкості дипольні втрати можуть є значними і при деякій в'язкості мають максимум (рис. 4.3). Подальше зростання $\text{tg}\delta$ з підвищенням температури пояснюється ростом електропровідності.

ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ У ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКАХ

За структурою тверді діелектрики розділяють на чотири групи:

- 1). діелектрики молекулярної структури;
- 2). іонної структури;
- 3). сегнетоелектрики;
- 4). діелектрики неоднорідної структури.

Діелектричні втрати в **діелектриках молекулярної структури**, залежать від полярності (неполярності) молекул. У **твердих діелектриках з неполярних молекул** (без домішок), діелектричні втрати мізерно малі (сірка, парафін, неполярні полімери - поліетилен, політетрафторетилен (фторопласт-4), полістирол і ін.). В зв'язку з малими втратами знаходять застосування як високочастотні діелектрики.

Діелектрики з полярних молекул – це головним чином органічні речовини, що широко використовуються в техніці (матеріали на основі целюлози - папір, картон і ін., полярні полімери - поліметилметакрилат (органічне скло), поліаміди (капрон і ін.) і поліуретани, каучукові матеріали (ебоніт), фенолформальдегідні смоли (бакеліт і ін.), ефіри целюлози (ацетилцеллюлоза й ін.). Діелектричні втрати в цих діелектриках залежать від температури (рис. 4.4). Максимум втрат пояснюється збільшенням втрат від електропровідності.

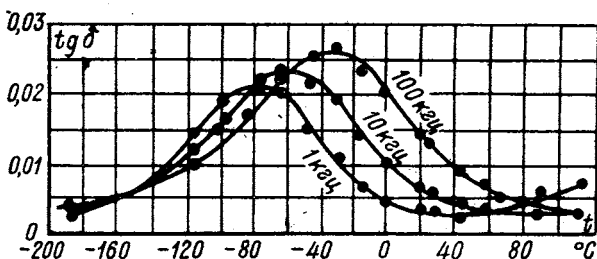


Рис. 4.4. Залежність діелектричних втрат від температури для сухого паперу

Діелектричні втрати твердих речовин іонної структури пов'язані з особливостями упакування іонів у ґратах. У речовинах кристалічної структури з щільним упакуванням іонів при відсутності домішок, що спотворюють кристалічні ґратки, діелектричні втрати досить малі. При

підвищених температурах в таких речовинах з'являються втрати від електропровідності (кристалічні неорганічні з'єднання, наприклад, корунд, що входить до складу ультрафарфору, кам'яна сіль, чисті кристали якої мають незначні діелектричні втрати). Домішки, що спотворюють ґратки, збільшують діелектричні втрати.

До діелектриків кристалічної структури з нещільним упакуванням іонів відноситься кристалічні речовини, які характеризуються релаксаційною поляризацією, що викликає підвищені діелектричні втрати (муліт, що входить до складу ізоляторного фарфору; кордієрит - компонент кераміки з малим температурним коефіцієнтом розширення; мінерал циркон, що входить до складу вогнетривкої кераміки). Для більшості видів електрокераміки кількості іонів, що беруть участь у релаксаційній поляризації, суттєво зростає з температурою, тому температурна залежність втрат має експоненційний характер (рис. 4.5).

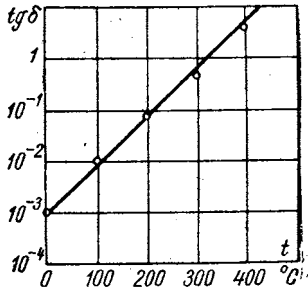


Рис. 4.5. Температурна залежність діелектричних втрат кераміки, що містить титан ($f=50$ Гц)

Діелектричні втрати в аморфних речовинах іонної структури пов'язані з явищем поляризації і наявністю електропровідності (технічне скло, кварцове скло).

Чисте кварцове скло має малі втрати. Введення в плавленій кварц невеликої кількості окислів викликає помітне, зростання діелектричних втрат через порушення внутрішньої структури скла. Термічна обробка (відпал, гартування) суттєво впливає на величину кута діелектричних втрат скла в зв'язку зі зміною його структури.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках є відносно значними. Особливістю сегнетоелектриків є наявність в них власної поляризації, що характеризується різко вираженою залежністю від температури і має максимум при визначеній температурі (точка Кюрі). При температурах вище точки Кюрі сегнетоелектричні властивості втрачаються.

Тверді матеріали неоднорідної структури – це матеріали, до складу яких входить не менш двох компонентів, механічно змішаних між собою. Насамперед це кераміка і слюда. У складі кераміки розрізняють кристалічну фазу, склоподібну фазу і газову фазу (гази в закритих порах). Діелектричні втрати в кераміці як правило високі і залежать від характеру і кількісного співвідношення кристалічної і склоподібної фаз. Газова фаза в кераміці, а також адсорбована волога (при наявності відкритої пористості) викликають підвищення втрат при високих напруженостях електричного поля.

Запитання для самоперевірки:

1. Що таке діелектричні втрати в діелектриках?
2. Якими величинами характеризуються діелектричні втрати в діелектриках?
3. Які види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах ви знаєте?
4. Яким чином температура і частота електричного струму впливає на діелектричні втрати в рідких і твердих діелектриках?

ЛЕКЦІЯ 5

ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Кожен діелектрик здатен витримати певну напругу, яка залежить від його фізичних властивостей. Після досягнення певного критичного для даного діелектрика значення напруженості поля він втрачає свої властивості електроізоляційного матеріалу і на деякий час стає провідником.

Втрата діелектриком електроізоляційних властивостей під дією електричного поля називається **пробоєм діелектрика** (або втратою його електричної міцності). Напруга, при якій відбувається пробій діелектрика, називається **напругою пробою**.

Напруженість пробою (електрична міцність діелектрика) – це значення напруженості поля, що відповідає напрузі пробою. Напруженість пробою визначається величиною напруги пробою $U_{пр}$, віднесеної до товщини діелектрика в місці пробою h :

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}.$$

Електричну міцність діелектриків зручно виражати в кВ/мм. У системі СІ $1\text{кВ/мм}=10^6\text{ В/м}$.

ПРОБІЙ ГАЗІВ

У багатьох видах електротехнічних конструкцій (у трансформаторах, конденсаторах, на лініях електропередач) ізоляцією є повітря. Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з більшістю рідких і твердих діелектриків. Пробій повітря, як і інших газів, варто розглядати, як наслідок розвитку процесів ударної і фотоіонізації.

Звичайно пробій газу відбувається практично миттєво: тривалість підготовки пробою газу при відстані між електродами 1 см складає 10^{-7} - 10^{-8} сек.

Явище пробою газу залежить від ступеня однорідності електричного поля, у якому здійснюється пробій.

Однорідне поле. Однорідне поле має місце між плоскими електродами з закругленими краями, а також між сферами великого діаметра при малій відстані між ними. У такому полі пробій настає практично миттєво при досягненні напруги строго визначеної величини, що залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, що потім переходить у дугу, якщо джерело напруги має достатню потужність.

При малих відстанях між електродами спостерігається значне збільшення електричної міцності через складність досягнення електронами швидкостей, необхідних для іонізації молекул.

Напруженість пробою газу в однорідному полі прямопропорційна

напрузі і щільності газу, і оберненопропорційна відстані між електродами.

Велику електричну міцність вакууму використовують у техніці при виготовленні вакуумних конденсаторів для великих напруг високої частоти.

Гази при великих тисках застосовуються як ізоляцію для високовольної апаратури, а також у виробництві кабелів і конденсаторів високої напруги.

Мінімальне значення пробивних напруг для різних газів лежить у межах 280-420В. Для повітря мінімальна пробивна напруга складає близько 300 В.

Неоднорідне поле. Неоднорідне поле має місце між двома вістрями, вістрям і площиною, між проводами ліній електропередач, між сферичними поверхнями при відстані між ними, що перевищує радіус сфери, і т.д.

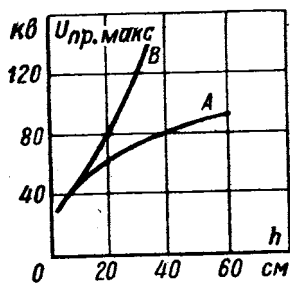


Рис. 5.1. Залежність коронної (А) і пробивної (В) напруги для повітря від відстані між двома паралельними проводами

Особливістю пробою газу в неоднорідному полі є виникнення часткового розряду у вигляді корони в місцях, де напруженість поля досягає критичних значень, з подальшим переходом корони в іскровий розряд і дугу при зростанні напруги.

На рис. 5.1 приведені значення пробивної і коронної напруги для повітря, отримані при дослідженні пробою між двома паралельними дротами діаметром 8 мм при різних відстанях між ними. Як видно, при малих відстанях значення пробивної і коронної напруг близькі, але при великих відстанях поява корони передують пробоеві.

Напруга пробою є тим нижчою, чим вищою є частота струму. Збільшення відносної вологості повітря істотно знижує напругу пробою.

ПРОБІЙ РІДКИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Рідкі діелектрики відрізняються значно більш високою електричною міцністю, ніж гази.

Теорії механізму пробою рідин:

- 1). **теплова теорія** пов'язує пробій технічних рідких діелектриків з частковим перегрівом рідини і скипанням її в місцях найбільшої кількості домішок, що приводять до утворення газового містка між електродами.
- 2). **теорія іонізаційного пробою** (для рідин, максимально очищених від домішок).
- 3). **теорія чисто електричного пробою** рідких діелектриків пов'язує явище пробою з вириванням електронів з металевих електродів або з руйнуванням самих молекул рідини.

Домішки суттєво впливають на електричну міцність рідких діелектриків. Так, збільшення змісту води в нафтовому маслі від 0 до 0,05% знижує напруженість пробою в 5 разів.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРОБІЙ ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Розрізняють чотири види пробою твердих діелектриків:

- 1) електричний пробій однорідних діелектриків;
- 2) електричний пробій неоднорідних діелектриків;
- 3) електрохімічний пробій;
- 4) тепловий (електротепловий) пробій;

Кожний з зазначених видів пробою може мати місце у твердому діелектрику в залежності від характеру електричного поля (постійною або перемінною, імпульсного, з низькою або високою частотою), наявності в діелектрику дефектів, умов охолодження, часу дії напруги тощо.

Електричний пробій однорідних діелектриків за своєю природою є чисто електронним процесом, коли у твердому тілі при певній напруженості електричного поля утворюється електронна лавина.

Характеризується швидким розвитком, протікає за час 10^{-7} - 10^{-8} с без виділення теплової енергії, хоча величина електричної міцності при електричному пробі до деякої міри залежить від температури. Такий вид пробою спостерігається в деяких монокристалах (молібденове скло) і в деяких органічних полімерах. В цьому випадку $E_{пр}$ досягає більш 300 кВ/мм.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків спостерігається у технічних діелектриків, що містять газові включення. Характеризується швидким розвитком.

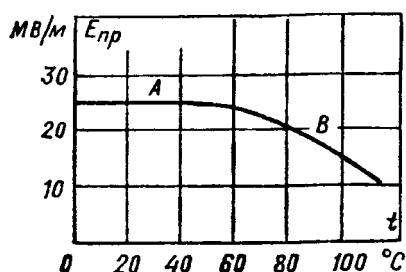


Рис. 5.2. Залежність електричної міцності електротехнічного фарфору від температури ($f=50$ Гц): А – область електричного пробою; В – область теплового пробою

Має місце в деяких видах скла, фарфору, кераміки. Пробивні напруги для неоднорідних діелектриків зазвичай $E_{пр}=10$ -30 кВ/мм.

Електрична міцність твердих неоднорідних діелектриків практично не залежить від температури до деякого значення останньої. При перевищенні цього значення спостерігається помітне зниження електричної міцності, що говорить про появу механізму теплового пробою (рис. 5.2).

Низькою електричною міцністю відрізняються неоднорідні діелектрики з відкритою пористістю (мармур, непросочений папір, дерево, пориста кераміка). Їх електрична міцність лежить в межах $E_{пр}=1$ -10 кВ/мм.

Електрохімічний пробій ізоляційних матеріалів пов'язаний зі зміною їх хімічних властивостей. Зазвичай спостерігається при підвищених температурах і високій вологості повітря.

Часто призводить до старіння діелектрика в електричному полі (тобто до деградації фізичних і механічних властивостей), в результаті чого відбувається

поступове зниження електричної міцності. Явище старіння характерне для електролітів, органічних діелектриків (просочений папір, гума і т.д.), і для деяких неорганічних діелектриках, наприклад, для титанової кераміки.

Срібло, дифундуючи в кераміку, полегшує електрохімічний пробій, на противагу, наприклад, золоту.

Тепловий пробій твердих діелектриків виникає в результаті матеріалу в електричному полі до температур, при яких має місце його розтріскування, оплавлення, обвуглювання і інші види термічного руйнування. Явище теплового пробою пов'язане з надмірним зростанням наскрізної електропровідності або діелектричних втрат.

Напруга, при якій відбувається тепловий пробій є характеристикою не стільки самого діелектрика, скільки виготовленого з нього електроізоляційного виробу.

Пробивна напруга при тепловому пробіі залежить від частоти поля, умов охолодження, температури навколишнього середовища й ін. Крім того, напруга теплового пробою залежить від нагрівостійкості матеріалу. Органічні діелектрики за інших рівних умов мають більш низькі значення пробивних напруг при тепловому пробіі, ніж неорганічні, внаслідок меншої нагрівостійкості.

Для нормальної роботи ізолятора має бути забезпечений відвід тепла. У більшості випадків тепловідвід зумовлюється природньою конвекцією повітря (підвісні і опорні ізолятори, керамічні конденсатори, каркаси котушок індуктивності). Тепловідвід за рахунок теплопровідності навколишнього середовища має місце для кабелів, вмонтованих у стіни. В приладах, комп'ютерах використовується примусове охолодження складових частин, які інтенсивно розігріваються.

Запитання для самоперевірки:

1. Що таке пробій діелектриків і якою величиною він характеризується?
2. Особливості пробою газоподібних та рідких діелектриків.
3. Назвіть види пробою твердих діелектриків.
4. Яким чином температура і частота струму впливає на електричну міцність твердих діелектриків?

ЛЕКЦІЯ 6

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ

При виборі електроізоляційного матеріалу в залежності від умов експлуатації можуть бути важливими не тільки його електричні властивості, але й інші фізичні, а також механічні і хімічні властивості.

Фізичні властивості (зумовлені особливостями мікроструктури): вологостійкість, термостійкість (здатність протистояти високим і низьким температурам), радіаційна стійкість (здатність протистояти різним видам випромінювань), температурні коефіцієнти лінійного розширення (для деталей, у яких контактують різні матеріали).

Механічні властивості (зумовлені особливостями макроструктури): статична і динамічна міцність, твердість, пружність, пластичність, зносостійкість тощо. У ряді випадків до виробів пред'являються вимоги стійкості до вібрацій різних амплітуд і частот.

Хімічні властивості: окислюваність поверхні, розчинність, склеюваність (когезія і адгезія) матеріалів, хіміко-біологічна стійкість в умовах агресивного навколишнього середовища (наприклад, у тропічних умовах захист від гнильних бактерій, комах і утворення цвілі) тощо.

ВОЛОГОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вологостійкість – здатність матеріалу протистояти проникненню вологи з навколишнього середовища. Безпосередньо залежить від такої його властивості, як гігроскопічність.

Гігроскопічність – здатність матеріалу всотувати вологу з навколишнього середовища.

Вологопроникність – здатність матеріалу пропускати крізь себе пари води.

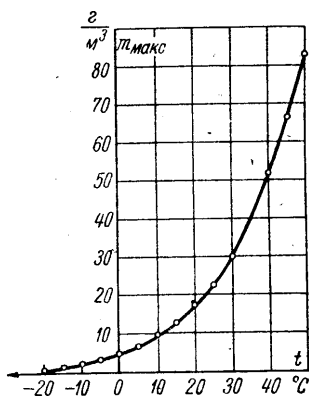


Рис. 6.1. Залежність абсолютної вологості повітря при насиченні від температури

Атмосферне повітря завжди містить деяку кількість водяної пари. **Абсолютну вологість повітря** оцінюють масою m (г) водяної пари, що міститься в одиниці об'єму повітря (м^3). На рис. 6.1 наведена температурна залежність абсолютної вологості повітря при насиченні ($m_{\text{макс}}$), тобто більшої кількості води при всіх зазначених температурах повітря містити не може, тому надлишок вологи випадає у вигляді роси. З рисунка видно, що абсолютна вологість різко зростає зі збільшенням температури.

Відносна вологість повітря дорівнює відношенню маси водяної пари в одиниці об'єму до його маси при насиченні

$$\varphi_{\text{в}} = \frac{m}{m_{\text{max}}} 100 (\%).$$

Вода є сильнополярним діелектриком з низьким питомим опором ($\rho=10^3-10^4$ Ом·м), а тому її проникнення в пори твердих діелектриків веде до різкого зниження їх електричних властивостей. Особливо помітний вплив вологості при підвищених температурах (30-40°C) і відносній вологості 98-100%. Подібні умови спостерігаються в країнах з вологим тропічним кліматом, причому в період дощів вони можуть зберігатися протягом тривалого періоду часу, що негативно позначається на експлуатаційних характеристиках електричних машин і апаратів.

В першу чергу підвищена вологість повітря впливає на поверхневий опір діелектриків. При наявності в діелектрику відкритої пористості волога потрапляє всередину матеріалу. Для захисту твердих діелектриків від дії вологості їх покривають лаками, що не змочуються водою.

Вологість матеріалів – це деякий "рівноважний" стан вологості, якого досягає електроізоляційний матеріал при даній вологості і температурі навколишнього середовища через достатньо тривалий час.

На гігроскопічність матеріалу істотно впливає його структура і хімічна природа. Велику роль грають наявність і розмір капілярних проміжків усередині матеріалу, в які проникає волога. Крупнопористі матеріали, зокрема волокнисті, більш гігроскопічні, ніж матеріали щільної структури.

Орієнтовані розміри пор, що зустрічаються в різних електроізоляційних матеріалах (для порівняння діаметр молекули води $D_{\text{в}} \approx 2,7 \text{ \AA}$):

- макропори в кераміці – 10^3-10^6 \AA ;
- капіляри у волокнах целюлози – 10^3 \AA ;
- міжмолекулярна пористість різних матеріалів – 10-50 \AA .

Характеристика вологопроникності важлива для оцінки матеріалів, застосовуваних для **захисних покриттів** (шланги кабелів, опресування конденсаторів, компаундні заливання, лакові покриття деталей). Завдяки наявності дрібної пористості більшість матеріалів має вологопроникність. Тільки для скла, добре обпаленої кераміки і металів вологопроникність практично дорівнює нулеві.

Для зменшення гігроскопічності і вологопроникності пористих ізоляційних матеріалів широко застосовується їхнє **просочування**. Однак просочення целюлозних волокнистих матеріалів і інших пористих органічних діелектриків дає лише уповільнення зволоження матеріалу, оскільки молекули просочувальних речовин більше молекул води і не в змозі створити повну непроникність пор матеріалу для вологи.

Висока вологість сприяє розвитку цвілі. Поява цвілі погіршує питомий поверхневий опір діелектриків, може погіршити механічну міцність ізоляції і

викликати корозію дотичних з нею металевих частин. Найбільш уразливі для розвитку цвілі целюлозні матеріали (гетинакс, текстоліт, каніфоль, масляні лаки й ін.). Найбільш стійкими до утворення цвілі є неорганічні діелектрики - кераміка, скло, слюда, кремнійорганічні матеріали і деякі з органічних, наприклад епоксидні смоли, фторопласт-4, поліетилен, полістирол.

ТЕПЛОВІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

До найважливіших теплових властивостей діелектриків відносяться: нагрівостійкість (теплостійкість), морозостійкість, теплопровідність і теплове розширення.

Нагрівостійкість – здатність електроізоляційних матеріалів і виробів без шкоди для них витримувати вплив високої температури, а також різкі зміни температури.

Нагрівостійкість неорганічних діелектриків визначають за початком істотної зміни електричних властивостей, наприклад за зниженням питомого електричного опору. Величину нагрівостійкості оцінюють відповідними значеннями температури (°C), при якій з'явилися ці зміни. Нагрівостійкість органічних діелектриків часто визначають за початком механічних деформацій розтягування або згину, зануренню голки під тиском при нагріванні діелектрика (визначення "теплостійкості").

При оцінці якості, трансформаторного масла, а також розчинників, застосовуваних у виробництві електроізоляційних лаків використовують такі характеристики, як температура спалаху і запалення.

Температура спалаху – це температура рідини, при нагріванні до якої суміш її випарів з повітрям спалахує при піднесенні відкритого полум'я.

Температура запалення – це температура, при якій загоряється випробувана рідина (більш висока, ніж температура спалаху).

Теплове старіння ізоляції – погіршення якості ізоляції при тривалому впливові підвищеної температури через інтенсифікацію хімічних процесів.

Старіння може виявлятися, наприклад, у лакових плівок і целюлозних матеріалів у вигляді підвищення твердості і крихкості, утворення тріщин і т.п. Старіння діелектричних матеріалів прискорюється від опромінення зразка ультрафіолетовими променями, впливу електричного поля, механічних навантажень і агресивного середовища.

Відповідно до рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК), електроізоляційні матеріали для електричних машин, трансформаторів і апаратів розділені на 7 класів нагрівостійкості.

Теплові імпульси – різка (за короткий проміжок часу) зміна температури експлуатації електротехнічного приладу.

Особливо чутливі до теплових імпульсів крихкі неметалеві матеріали: скло, керамічні матеріали й ін. Результатом швидкоплинного нагрівання чи охолодження можуть бути утворення тріщин чи крихке руйнування ізолятора.

Морозостійкість – здатність ізоляції працювати без погіршення експлуатаційних властивостей при низьких кліматичних температурах (до -

70°C).

При низьких температурах, як правило, електричні властивості ізоляційних матеріалів поліпшуються, однак багато матеріалів при низьких температурах стають крихкими (окрихчуються).

Теплопровідність – властивість матеріалу проводити тепло.

Практичне значення теплопровідності визначається тим, що тепло, яке виділяється внаслідок втрат енергії в оточених ізоляцією провідниках і магнітопроводах трансформаторів, а також внаслідок діелектричних втрат в ізоляції, переходить у навколишнє середовище через різні матеріали. Висока теплопровідність дозволяє відводити зайве тепло і запобігати перегріванню електротехнічних виробів.

Теплове розширення матеріалів оцінюють температурним коефіцієнтом лінійного розширення.

Матеріали, що мають малі значення температурного коефіцієнта лінійного розширення, мають, як правило, і більш високу нагрівостійкість. Температурні коефіцієнти лінійного розширення деяких діелектриків: кварцове скло (неорганічний матеріал) – $\alpha=0,55 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹; поліетилен (органічний матеріал) – $\alpha=100 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Виходячи з цього очевидно, що розміри деталей, виготовлених з неорганічних матеріалів, набагато більш стабільні при коливаннях температури.

Важливо враховувати різницю температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів, з яких виготовляється той чи інший електротехнічний виріб, який при експлуатації суттєво розігрівається (вакуумні лампи і тп).

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Оскільки деталі з електроізоляційних матеріалів зазнають впливу статичних і динамічних навантажень, велике практичне значення має механічна міцність цих матеріалів.

Статична міцність визначається в результаті іспитів матеріалів на розтяг і стиск. Характеризується межею міцності

$$\sigma_B = P/F,$$

де P – сила, F – площа поперечного перетину зразка). Вимірюється в Паскалях (Па=Н/м²).

Для анізотропних електроізоляційних матеріалів (шаруватих, волокнистих і т.п.) значення механічної міцності суттєво залежить від знака навантаження. Наприклад, для скла, керамічних матеріалів, багатьох пластмас і ін. межа міцності при стиску значно більше, ніж при розтягуванні.

Механічна міцність полімерних матеріалів суттєво зменшується з підвищенням температури. Міцність гігроскопічних матеріалів знижується при збільшенні вологості.

Пластичні властивості матеріалу характеризуються **відносним подовженням або звуженням**

$$\delta = \Delta l_k / l, \quad \psi = \Delta F_k / F,$$

(l і F – довжина і площа поперечного перетину зразка; Δl_k і ΔF_k - максимальне видовження і максимальне зменшення площі поперечного перетину зразка після руйнування).

Пластична (залишкова) деформація – деформація, що залишається в матеріалі після зняття навантаження.

Пружна деформація – деформація, що зникає після зняття навантаження.

Пластична (холодна) текучість матеріалу - здатність при тривалому прикладанні порівняно малих навантажень пластично деформуватись.

Врахування можливості пластичної текучості необхідний, якщо виріб в експлуатації знаходиться під дією тривалого статичного навантаження і при цьому повинен зберігати незмінними форму і розміри. При підвищенні температури і наближенні її до температури розм'якшення даного матеріалу пластична текучість матеріалу суттєво збільшується.

В'язкість руйнування (динамічна міцність) характеризує здатність матеріалу протистояти динамічним (раптово прикладеними) зусиллями.

Для оцінки в'язкості руйнування проводять іспит на згинальний удар на маятникових копрах. Визначається як відношення витраченої на злам зразка енергії до поперечного перерізу зразка (вимірюється в Дж/м²). Наприклад ударна в'язкість поліетилену 100 кДж/м², а для керамічних матеріалів вона складає всього 2-5 кДж/м².

У ряді випадків необхідно визначати здатність електроізоляційних матеріалів витримувати без руйнування тривалий вплив вібрацій, тобто повторюваних коливань визначеної частоти й амплітуди. Визначення вібраційної стійкості важливо для електроустаткування, що зазнає вібрацій при експлуатації.

Твердість - здатність матеріалу протистояти механічному проникненню в його поверхню іншого, більш твердого тіла (індентора). Визначається методами Бринеля, Роквелла, Вікерса й ін. за зусиллям, що прикладається до індентора, і за розмірами відбитка в досліджуваній поверхні. Вимірюється в кГ/мм².

В'язкість рідин і газів. Для рідких і напіврідких електроізоляційних матеріалів (масел, лаків, заливальних і просочувальних компаундів і т.п.) і газів важливою механічною характеристикою є в'язкість, яка характеризується величиною динамічної в'язкості.

Динамічна в'язкість (або коефіцієнт внутрішнього тертя рідини) характеризує опір переміщенню одних шарів рідини (газу) щодо інших.

ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Хімічні властивості матеріалів:

- хімічне руйнування (розкладання) при роботі з виділенням побічних продуктів;
- корозія металів (окислення поверхні);
- хімічна стійкість при контакті з різними речовинами (наприклад, газами,

водою, кислотами, лугами, розчинами солей і т.п.);

- здатність склеюватись (когезія і адгезія) і розчинність у розчинниках з утворенням лаків.

Адгезія – здатність різнорідних матеріалів (речовин) утворювати міцне з'єднання (склеюватись). **Когезія** – здатність одного матеріалу (речовини) утворювати міцне з'єднання.

Розчинність твердих матеріалів може бути оцінена кількістю матеріалу, що переходить у розчин за одиницю часу з одиниці поверхні матеріалу, що стикається з розчинником. Розчинність зменшується з підвищенням ступеня полімеризації. Високомолекулярні речовини з лінійною структурою молекул розчиняються порівняно легко, а з просторовою структурою - важко. При підвищенні температури розчинність звичайно збільшується.

ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ ПІД ВПЛИВОМ ВИПРОМІНЮВАНЬ ВИСОКОЇ ЕНЕРГІЇ

У сучасній техніці можливі такі умови використання електроапаратури, при яких вона знаходиться під короткочасним або тривалим впливом радіоактивних випромінювань високої енергії. При цьому важливо знати їх радіаційну стійкість.

Радіаційна стійкість – ступінь стійкості матеріалів (збереження ними своїх електричних і механічних властивостей) до впливу високоенергетичних випромінювань.

У деяких випадках електротехнічні матеріали окрім своїх основних функцій мають виконувати функції поглиначів-екранів випромінювань. Вплив випромінювання може привести до ряду молекулярних перетворень і хімічних реакцій. Іонізаційні процеси викликають миттєвий потік електронів з утворенням вільних радикалів. В органічних полімерах під дією інтенсивного опромінення відбуваються виділення газу, полімеризація, вулканізація й ін.

При тривалому або дуже інтенсивному опроміненні відбувається руйнування будь-якого полімеру. З часом під впливом високоенергетичного опромінювання матеріалів відбувається суттєва деградація (погіршення) як їх електричних властивостей, так і хімічних і фізико-механічних.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть характеристики діелектриків, які залежать від кліматичного впливу.
2. Як визначаються основні механічні властивості діелектриків?
3. Яким чином агресивні середовища впливають на основні властивості діелектрика?
4. Назвіть основні теплові властивості діелектриків.

ЛЕКЦІЯ 7

ДИЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ (I)

Електроізоляційні матеріали розділяють:

- 1). за агрегатним станом – на газоподібні, рідкі і тверді (особлива група – матеріали, що твердіють: у початковому стані вони є рідинами, але в готовій ізоляції стають твердими тілами (наприклад, лаки і компаунди));
- 2). за хімічною природою – на органічні і неорганічні.

ГАЗОПОДІБНІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Повітря – основний газоподібний електроізоляційний матеріал.

В окремих частинах електричних установок, на ділянках повітряних високовольтних ліній електропередач повітря утворює єдину ізоляцію між дротами лінії. У ряді випадків замість повітря (наприклад, для заповнення газових конденсаторів) застосовується азот, оскільки, він близький за електричними властивостями до повітря, але не містить кисню, захищаючи матеріали від окислення.

Елегаз (шестифториста сірка, SF_6) має високу електричну міцність (пробивна напруга в нормальних умовах $U_{\text{пр}}=20\text{кВ}$). Не токсичний, хімічно стійкий, не розкладається при нагріванні до 800°C ; його використовують у конденсаторах, кабелях і т.п. Особливо великі переваги елегаза при підвищених тисках.

Фреон (дихлордифторметан, CCl_2F_2) має електричну міцність, близьку до електричної міцності елегаза. При нормальній температурі може бути стиснутий лише до 6 атм. Фреон викликає корозію деяких твердих органічних електроізоляційних матеріалів, що треба мати на увазі при конструюванні електричних холодильників.

Для заповнення електровакуумних приладів, ламп вживаються **інертні гази**: аргон, неон і інші, а також пари ртуті і натрію. Інертні гази мають низьку електричну міцність. Найнижчу електричну міцність серед усіх газів має гелій - приблизно в 17 разів менше електричної міцності повітря. Електрична міцність різних газів розрізняється майже в 200 разів.

НАФТОВІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАСЛА

Трансформаторне масло. З рідких електроізоляційних матеріалів найбільше застосування в електротехніці має трансформаторне масло, яким заливають силові трансформатори. Воно підвищує електричну міцність ізоляції і відвід тепла, що виділяється в обмотках і сердечнику трансформатора. Масло відводить тепло приблизно в 30 разів краще, ніж повітря.

Лише деякі силові і вимірювальні трансформатори виготовляються з заливанням термореактивними компаундами (наприклад, на основі епоксидних смол). **Компаунди** – композиції (суміші) на основі різних полімерів і мономерів.

Трансформаторне масло застосовують також у масляних вимикачах

високої напруги, де має місце виникнення електричної дуги між контактами вимикача. Масло сприяє охолодженню каналу дуги і швидкому її гасінню. Трансформаторне масло – горюча рідина. Пожежна небезпека масла оцінюється за її температурою спалаху (повинна бути не нижче 135°C). Більш в'язке масло гірше відводить тепло від обмоток і сердечника трансформатора. Температура застигання масла повинна бути не нижче -45°C. Ця характеристика важлива для масла, що заливається в масляні вимикачі, встановлювані на відкритих підстанціях.

Електрична міцність трансформаторного масла не встановлюється стандартами, оскільки вона надзвичайно чутлива до зволоження. Різко знижується електрична міцність масла в результаті попадання сторонніх домішок. З часом масло погіршує свої характеристики (старіє). Зовнішня ознака старіння – масло стає більш темним. В ньому утворюються забруднюючі продукти - кислоти, смоли. Низькомолекулярні кислоти, що утворюються в маслі, руйнують ізоляцію обмоток і викликають корозію дотичних з маслом металів.

Швидкість старіння масла зростає:

- а) при доступі повітря (старіння масла в значній мірі пов'язано з його окисленням на повітрі);
- б) при підвищенні температури;
- в) при контакті масла з деякими металами (мідь, залізо, свинець і т.п.) і іншими речовинами, що є каталізаторами старіння;
- г) під дією світла;
- д) при дії електричного поля високої напруженості.

Конденсаторне масло служить для просочення паперових конденсаторів, розрахованих на велику напругу. При просоченні паперової ізоляції конденсатора підвищується як опір ізоляції, так і її електрична міцність. Конденсаторне масло досить близьке за властивостями до трансформаторного.

Кабельне масло використовуються у виробництві силових електричних кабелів. Просочуючи паперову ізоляцію кабелів, воно підвищує її електричну міцність. Для звичайних силових кабелів із в'язким просоченням, застосовуваних для робочих напруг до 35 кВ, використовуються в'язкі нафтові масла (наприклад, типу "брайтсток"), у яких для додаткового підвищення в'язкості розчиняється каніфоль (масляно-каніфольний компаунд).

СИНТЕТИЧНІ РІДКІ ДІЕЛЕКТРИКИ

Хлоровані вуглеводні. Походять з різних вуглеводнів шляхом заміни в їхніх молекулах деяких (або усіх) атомів водню атомами хлору. Найбільш широке застосування мають продукти хлорування дифенілу ($C_{12}H_{10}$). У промисловості застосовуються матеріали, що представляють собою суміші різних ізомерів дифенілу з різним ступенем хлорування. Мають загальне найменування "аскарели" (зокрема, піранол, пірален, ароклор, клофен, сибанол, совол і ін.).

Діелектрична проникність совола при нормальній температурі і низькій частоті струму $\epsilon \approx 5$, тобто більш ніж у два рази перевищує проникність

нафтового масла. Заміна соволом нафтового масла у виробництві силових паперових конденсаторів дозволила знизити розміри конденсатора в два рази. Недоліком конденсаторів, просочених соволом, є сильне зменшення ємності при спаді температури нижче 0°C. Совол і совтол токсичні, тому необхідно забезпечувати захист шкіри і вентиляцію повітря.

Кремнійорганічні і фторорганічні рідини. Кремнійорганічні рідини мають малий кут діелектричних втрат, низьку гігроскопічність і підвищену нагрівостійкість. Використовуються, зокрема, для просочення і заливання конденсаторів і інших пристроїв. Перевагою фторорганічних рідин у порівнянні з кремнійорганічними є їхня повна негорючість і висока дугостійкість. Характерними властивостями фторорганічних рідин є мала в'язкість, низький поверхневий натяг, що сприяє просоченню пористої ізоляції, високий температурний коефіцієнт об'ємного розширення, порівняно значна летючість. Остання обставина вимагає герметизації апаратів, що заливаються фторорганічними рідинами.

ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНІ ОРГАНІЧНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

Органічні речовини - це низькомолекулярні і високомолекулярні з'єднання вуглецю (C) з іншими елементами. Вже відкрито більш мільйона органічних сполук, в той час як з'єднань, що не містять вуглецю, відомо біля п'ятдесяти тисяч. Кількість діелектриків з органічних матеріалів набагато перевершує кількість діелектриків з неорганічних матеріалів.

Органічні електроізоляційні матеріали бувають **низькомолекулярні і високомолекулярні**.

В молекулу **низькомолекулярного матеріалу** входить порівняно невелика кількість - одиниці або десятки, іноді сотні – атомів (наприклад, фреон, вуглеводні нафтових масел, совол).

Високомолекулярні з'єднання - це речовини з великими молекулами, що складаються з тисяч атомів. Молекулярна маса таких речовин може доходити приблизно до мільйона, а геометричні розміри молекул настільки великі, що розчини цих речовин, якщо вони взагалі здатні розчинятися, за своїми властивостями наближаються до колоїдних систем.

Високомолекулярні речовини, що входять до складу рослинних і тваринних організмів, широко застосовуються в техніці (целюлоза, шовк, каучук і т.п.)

Штучні високомолекулярні матеріали за своїм походженням можуть бути розділені на два класи:

- 1). Штучні матеріали, виготовлені шляхом хімічної обробки природних високомолекулярних речовин (наприклад, при переробці целюлози утворюються ефіри целюлози).
- 2). Синтетичні високомолекулярні матеріали, виготовлені за допомогою синтезу з низькомолекулярних речовин (природний газ, нафта, викопне вугілля й ін.).

Високомолекулярні з'єднання за своєю хімічною природою є **полімерами**, тобто речовинами, молекули яких представляють собою циклічну сукупність

великої кількості груп, що мають однакову будову груп атомів (мономерів)

Полімеризація - реакція утворення полімеру з мономера.

Мономер – речовина, молекули якої здатні реагувати між собою і з молекулами інших речовин з утворенням полімера. Найбільш важливі мономери: етилен, пропілен, ізопрен, вінілхлорид, стирол, фенол, бутадиєн.

При полімеризації відбувається закономірна зміна властивостей речовини: молекулярна маса збільшується, зростає температура плавлення і кипіння, підвищується в'язкість (в процесі полімеризації речовина може переходити з газоподібного або рідкого стану в стан густої рідини і далі – в стан твердого тіла), зменшується розчинність, і т.д.

Стирол - рідкий ненасичений вуглеводень, що має елементарний склад C_8H_8 , має здатність легко полімеризуватися. В результаті полімеризації зі стиrolу (мономера) утворюється полімер стиrolу (полістирол), який є твердою речовиною.

За певних умов (вплив високої температури, механічна обробка й ін.) полімер може розкладатися на речовини з меншим ступенем полімеризації до мономера включно. Такий процес, протилежний процесові полімеризації, називається деполімеризацією.

За будовою полімери поділяють на лінійні і просторові.

Молекули лінійних полімерів мають вигляд ланцюжків або ниток. Молекули просторових ("тривимірних") полімерів рівномірно формуються в просторі в різних напрямках, тому мають більш компактну форму, наближаючись до форми кулі.

Як правило, лінійні полімери порівняно гнучкі й еластичні. Зазвичай при підвищенні температури розм'якшуються, а потім розплавляються. Просторові полімери мають більшу твердість. Розм'якшення їх відбувається лише при досить високих температурах, а деякі ще до досягнення температури розм'якшення хімічно руйнуються (згоряють, обвуглюються і т.п.). Лінійні полімери звичайно здатні розчинятися в відповідних розчинниках. Просторові полімери розчиняються важко, багато з них практично нерозчинні.

Більшість лінійних полімерів з досить довгими молекулами здатні при витягуванні з розчину або розплав утворювати тонкі, гнучкі і міцні волокна, придатні для виготовлення текстильних матеріалів, а також гнучкі плівки. Просторові полімери не можуть утворювати ні текстильних волокон, ні гнучких плівок.

За здатністю відновлювати структуру полімери поділяють на термопластичні і термореактивні.

Термопластичні полімери не зазнають необоротних змін їхніх властивостей при нагрівання до температури, що відповідає їхньому пластичному стану. Після охолодження термопластичні полімери відновлюють свої властивості. Це лінійні полімери, що зберігають лінійну структуру молекул і при підвищених температурах (полістирол, поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, полікарбонати). При нагріванні стають м'якими (пластичними) і легко деформуються. Можуть розчинятися у відповідних розчинниках.

Терморективні полімери при нагріванні зазнають необоротних змін властивостей. При підвищених температурах запікаються (отверджуються), тобто здобувають значну механічну міцність і твердість, втрачаючи при цьому властивості розчинності і плавкості. При нагріванні набувають структури, властивої просторовим полімерам (стирол з добавкою дивенілбензола). Використовуються, якщо електрична ізоляція в експлуатації повинна витримувати вплив підвищених температур, не розм'якшуючись, не деформуючись, зберігаючи високу механічну міцність, якщо вона повинна бути стійкою до дії розчинників.

Термопластичні матеріали більш еластичні, ніж терморективні матеріали, менше піддаються тепловому старінню, технологія їх обробки простіша. Створюються нові термопластичні матеріали, що мають підвищену нагрівостійкість (політетрафторетилен, поліпропілен і т.п.) і можуть застосовуватися для ізоляції, яка працює при порівняно високих температурах.

Гігроскопічність, механічна міцність, електроізоляційні властивості полімерів значною мірою залежать від хімічного складу і структури молекули. Речовини з несиметрично побудованими ланками полімерних молекул є полярними і звичайно мають помітну гігроскопічність, але їх механічна міцність вище, ніж у неполярних полімерів. Високомолекулярні вуглеводні практично неполярні, тому їх гігроскопічність є незначною.

СМОЛИ

Смоли – це складні суміші органічних речовин, головним чином високомолекулярних, різного ступеню полімеризації. При низьких температурах смоли – це аморфні, склоподібні крихкі маси. При нагріванні (якщо тільки вони не зазнають хімічних змін) смоли розм'якшуються, стають пластичними, а потім – рідкими.

Застосовувані в електроізоляційній техніці смоли здебільшого не розчинні у воді і мало гігроскопічні, але вони розчинні в органічних розчинниках. Звичайно смоли є клейкими і при переході з рідкого стану у твердий міцно пристають до твердих тіл. Смоли застосовуються для створення електричної ізоляції, а також в якості складової частини багатьох лаків, компаундів, пластичних мас, плівок, штучних і синтетичних волокнистих матеріалів і т.п.

За походженням смоли поділяють на **природні, штучні і синтетичні**.

За хімічною природою синтетичні смоли поділяють на **полімеризаційні і конденсаційні**. Молекули конденсаційних смол, як правило, містять полярні групи, що збільшує їх діелектричні втрати і гігроскопічність. Полімеризаційні смоли можуть бути і неполярними (політетрафторетилен).

Природні смоли є продуктом життєдіяльності деяких тваринних організмів (шелак) або рослин-смолоносів (каніфоль). Сюди ж відносять викопні смоли (копали), що представляють собою викопні залишки дерев-смолоносів.

Шелак – це смола, що виділяється на гілках дерев деякими комахами, що живуть у тропічних країнах Південної і Південно-Східної Азії. Шелак збирають вручну, очищають від забруднень і переплавляють. Він має вигляд тонких,

тендітних лусочок жовтуватого або червоно-коричневого кольору. Основну частину шелаку складають органічні кислоти складного складу. Шелак добре розчиняється в спирті. $E_{пр}=20-30$ кВ/мм. При 50-60°C шелак стає гнучким, а при подальшому підвищенні температури розм'якшується і розплавляється. В електроізоляційній техніці шелак використовується у вигляді клеючих лаків.

Каніфоль – крихка смола жовто-коричневого кольору, одержувана з живиці (природної смоли хвойних дерев, головним чином – сосни) за допомогою відгону її рідких складових частин (скипидару). Каніфоль в основному складається з органічних кислот, розчинна в рідких вуглеводнях, рослинних оліях, спирті, скипидарі й ін. Каніфоль, розчинена в нафтових маслах, застосовується при виготовленні просочувальних і заливних кабельних компаундів.

Копали – тугоплавкі смоли, з характерним блиском, великою твердістю і порівняно важкорозчинні. Ці смоли частково добувають як викопні продукти розкладання викопних дерев-смолоносів. Застосовують як добавку до масляних лаків, що збільшує твердість їхніх плівок. До копал відносять і янтар, який іноді застосовується у приладах, де важливо мати високий опір ізоляції.

Синтетичні смоли на основі етилена і його похідних. Найпростіший ненасичений вуглеводень C_2H_4 називається **етиленом** (мономер). **Поліетилен** отримують полімеризацією етилена. Поліетилен має непагані механічні властивості, високу прозорість, стійкість до дії кислот і лугів, широко застосовується для виготовлення різного роду побутових виробів, посуду, як пакувальний матеріал і т.п. Понад 10% поліетилену використовується для електричної ізоляції - головним чином для ізоляції радіочастотних кабелів і кабелів зв'язку (це основний матеріал для ізоляції підводних телефонних кабелів). Нагрівостійкість поліетилена обмежена.

Поліпропілен – це гомологічний член етиленового ряду вуглеводнів $H_2C=CH-CH_3$. Поліпропілен - полімер цього мономера. Має щільність 0,90-0,91 г/см³, еластичний (відносне видовження 500-700%). Електроізоляційні властивості того ж порядку, що і поліетилену, але нагрівостійкість вище (температура розм'якшення - до 170°C).

Поліізобутилен – каучукоподібна липка речовина, схильна до холоднотекучості навіть при малих механічних навантаженнях. Є холодостійким (зберігає еластичність при температурі до -80°C). Щільність поліізобутилену 0,91-0,93 г/см³. За хімічною стійкістю і гігроскопічністю близький до поліетилену і поліпропілену. Має низьку вологопроникність. Поліізобутилен з низьким ступенем полімеризації є в'язкою рідиною.

Полістирол – утворюється в результаті полімеризації стиролу. Недоліками його є помітна крихкість при знижених температурах, схильність до поступового утворення поверхневих тріщин, мала стійкість до дії розчинників (зокрема, рідких вуглеводнів), а також невисока нагрівостійкість.

Полімери вуглецево-водневого складу (поліетилен, поліпропілен, поліізобутилен, полістирол) є практично неполярними діелектриками, з чим пов'язані їх надзвичайно високі електроізоляційні властивості і вкрай низька

гігроскопічність.

Полівінілхлорид, полівініловий спирт, поліакрилати – дипольні похідні етилена.

Полівінілхлорид (поліхлорвініл) - твердий продукт полімеризації газоподібного мономера - вінілхлориду (хлорвінілу) $H_2C=CH-Cl$. Є полярним діелектриком і тому має занижені властивості в порівнянні з неполярними полімерами. Вологість помітніше впливає на питомий поверхневий опір матеріалу. Поліхлорвініл досить стійкий до дії води, лугів, розведених кислот, олій, бензину і спирту. Широко використовується для виготовлення різноманітних пластичних мас і резиноподібних продуктів, зокрема для ізоляції дротів, для захисних оболонок кабелів, для виготовлення акумуляторних баків і т.п. Для поліпшення еластичності і холодостійкості поліхлорвінілу до нього додають пластифікатори.

Полівініловий спирт – є основою для синтезу смол типу полівінілацеталей, що знаходять широке застосування, зокрема, для виготовлення емалей-лаків. Ізоляція емалей-дротів на цих лаках має більш високу механічну міцність, ніж ізоляція емалей-дротів на основі олій, що висихають.

Поліакрилати – є полімерами ефірів акрилової і метакрилової кислот. Це полярні діелектрики, що мають гарну холодо-, масло- і лугостійкість. Найбільш розповсюджений полімер з числа поліакрилатів – **поліметилметакрилат (органічне скло або плексиглас)**. Цей прозорий безбарвний матеріал широко застосовується як конструкційний матеріал. Під дією електричної дуги виділяє велику кількість газів (CO , H_2), які сприяють гасінню дуги. Тому органічне скло застосовують у розрядниках високої напруги, де потрібне швидке гасіння виникаючої дуги.

Фторорганічні смоли – полімери етилена і його похідних. Можуть бути як нейтральними, так і полярними. До складу входить хімічно активний елемент фтор (F).

Політетрафторетилен – утворюється шляхом полімеризації тетрафторетилену. Неполярний діелектрик. Виробляється під назвою фторопласт-4 (або фторлон-4, тефлон, дайфлон і ін.). Цифра 4 вказує на число атомів F в мономері. Має високу для органічної речовини нагрівостійкість (до $250^\circ C$). Винятково хімічно стійкий, перевершуючи в цьому відношенні золото і платину (на нього не діють соляна, сірчана, азотна і плавикова кислоти, луги; деяку дію на нього справляють лише розплавлені лужні метали, елементарний фтор і фтористий хлор при підвищеній температурі). Негорючий, практично абсолютно негігроскопічний і не змочується водою й іншими рідинами.

Фторопласт-4 - білий або сіруватий напівпрозорий матеріал. Щільність ($2,1-2,3 \text{ г/см}^3$) велика в порівнянні з щільністю звичайних органічних полімерів. Матеріал порівняно м'який і має схильність до холоднотекучості. Належить до кращих з відомих діелектриків, особливо при роботі в полях високих і надвисоких частот. Добре механічно обробляється. Має низьку радіаційну стійкість, швидко старіє під впливом корони. Погано склеюється. При температурах вище $375^\circ C$ фторопласт-4 починає розкладатися з виділенням

фтору, отруйного і хімічно активного газу.

Фторопласт-3 – спільний полімер тетрафторетилену з гексафторпропіленом. Має характеристики, що наближаються до характеристик політетрафторетилену, однак технологічніший при механічній обробці. Через несиметричну структуру молекул є полярним діелектриком.

Термопластичні синтетичні смоли.

Поліамідні смоли мають відносно високу механічну міцність і еластичність. Розчинні лише в обмеженому числі розчинників (зокрема, у крезолі і розплавленому фенолі). Поліаміди застосовуються для виготовлення синтетичних волокон, гнучких плівок і пластичних мас. Гігроскопічні і пластичні (при підвищених температурах), однак мають низьку радіаційну стійкість і світлостійкість. До числа цих смол належить капрон (силон, дедерон), нейлон.

Поліуретани – лінійні полімери. У деяких умовах можуть утворювати і молекули просторової структури. Використовуються для емалювання дротів. Поліуретанові емалі-дроти більш нагрівостійкі, ніж дроти на полівінілацеталевих лаках, але поступаються поліефірним лакам. Поліуретанові емалі-дроти здатні лудитися без попереднього зачищення емалевої ізоляції. Недоліком є помітна термопластичність (схильність до розм'якшення емалевої плівки при підвищених температурах, починаючи приблизно з 150°C), що зумовлює небезпеку ушкодження ізоляції при коротких замиканнях.

Фенолформальдегідні смоли – полярні внаслідок наявності в їхніх молекулах гідроксильних груп. Бувають як термореактивними, так і термопластичними. Якщо в реакції смолоутворення бере участь не менш одного моля формальдегіду на моль фенолу, утворюється термореактивна смола **бакеліт** (або резол, резольна смола – синтетичний термореактивний полімер, що утвориться на початковій стадії синтезу фенол-формальдегідної смоли; може отверджуватись без отверджувачів).

Поліефірні смоли - продукти поліконденсації різних спиртів і кислот (або їхніх ангідридів). Велике практичне значення мають ненасичені поліефірні смоли - продукти поліконденсації гліколей або багатоатомних спиртів з ненасиченими кислотами або їх ангідридами, наприклад фталевим ангідридом, малеїновим ангідридом і ін. Ці смоли широко застосовуються для виготовлення термореактивних компаундів, для ізоляції електричних машин і апаратів, як зв'язуючий у виробництві шаруватих пластиків і т.п. Мають хороші електроізоляційні властивості і високу нагрівостійкість.

Епоксидні смоли (епоксисмоли) – характеризуються наявністю в їхніх молекулах епоксидних груп $\text{H}_2\text{C}-\text{CH}$ -. У початковому стані мають лінійну структуру. Є в'язкими рідинами, що розчиняються в ацетоні й інших розчинниках. Після додавання до них отверджувачів епоксидні смоли стають твердими (полімеризуються), здобуваючи просторову структуру. У якості холодних отверджувачів використовуються азотовмісткі речовини (аміни), для отвердження при нагріванні - ангідриди органічних кислот (фталевий, малеїновий і ін.). Вибір отверджувача впливає на властивості (еластичність, нагрівостійкість і ін.) епоксидної смоли. Застосовуються для виготовлення

клеїв, лаків, заливальних компаундів (для заливання невеликих трансформаторів або вузлів апаратури). Неотверджені епоксидні смоли шкідливо впливають на організм людини, викликаючи, зокрема, шкірні захворювання. Після закінчення процесу полімеризації епоксидних смол вони не є токсичними.

Кремнійорганічні смоли (поліорганосилоксани, силікони) – складаються з вуглецю і кремнію, який є однієї з найважливіших складових частин багатьох неорганічних діелектриків - слюди, азбесту, деяких видів скла, керамічних матеріалів.

Кремнійорганічні полімери можуть бути як термопластичними і мати лінійну структуру, так і термореактивними й утворювати просторові структури. Є більш нагрівостійкими в порівнянні з більшістю органічних полімерів. Використовуються в лаках, компаундах, пластмасах, в композиціях з термостійкими неорганічними матеріалами (слюда, скляне волокно, азбест і ін.) у вигляді міканітів, склотканей, пластмас. Кремнійорганічні з'єднання мають малу гігроскопічність і практично не змочуються водою. Покриття цими з'єднаннями целюлозних матеріалів, пластичних мас, кераміки створює **гідрофобізацію** оброблюваних матеріалів, тобто знижує їх змочуваність, роблячи їх водовідштовхувальними. Кремнійорганічні матеріали порівняно дорогі, що обмежує можливість їхнього широкого застосування.

Штучні полімери.

Ефіри целюлози – це штучні полімери, одержувані шляхом хімічної переробки природного полімеру - целюлози (клітковини). Найбільше значення в техніці мають складні ефіри целюлози (нітроцелюлоза, ацетилцелюлоза).

Нітроцелюлоза досить горюча, а при великому вмісті в ній нітрогруп навіть вибухонебезпечна, що є великим недоліком при використанні в техніці електричної ізоляції. **Ацетилцелюлоза** менш вогненебезпечна, тому що практично негорюча.

РОСЛИННІ ОЛІЇ

Рослинні олії - в'язкі рідини, одержувані з насіння рослин.

Олії, що висихають – це олії, здатні під впливом нагрівання, світла, зіткнення з киснем повітря й інших факторів переходити у твердий стан. Тонкий шар олії, налитий на поверхню якого-небудь матеріалу, висихає і утворює тверду блискучу електроізоляційну плівку. Плівки олій стійки до дії розчинників. При нагріванні плівка не розм'якшується, тобто є термореактивною. Найбільш розповсюджені олії, що висихають - лляна і тунгова.

Лляна олія – рідина золотаво-жовтого кольору, що отримується з насіння льону. Її щільність 0,93-0,94 г/см³, температура застигання - біля -20°C.

Тунгова (деревна) олія отримується з насіння тунгового дерева, що росте на Далекому Сході і Кавказі. Тунгова олія не є харчовою (як лляна) і навіть токсична. Щільність 0,94 г/см³, температура застигання від 0 до -5°C. У порівнянні з лляною олією тунгова висихає швидше і більш рівномірно по товщині і є більш водонепроникною.

Олії, що висихають, застосовуються в електропромисловості для виготовлення електроізоляційних масляних лаків, лакотканей, для просочення дерева і т.п. Рослинні олії, що не висихають, застосовуються як рідкі діелектрики.

Касторова олія – отримується з насіння рицини, іноді використовується для просочення паперових конденсаторів. На противагу лляній і тунговій олії касторова олія не розчиняється в бензині, але розчиняється в етиловому спирті. На відміну від нафтових масел касторова олія не викликає набрякання звичайної гуми.

БІТУМИ

Бітуми - аморфні матеріали, що є складною сумішшю вуглеводнів, а також деякої кількості кисню і сірки. Мають чорний (або темно-коричневий) колір, при низьких температурах крихкі. Розчиняються у вуглеводнях (бензолі, толуолі, бензині). Не є маслостійкими. У спирті і воді бітуми нерозчинні, мають малу гігроскопічність і практично водонепроникні. Бітуми термопластичні.

За походженням розрізняють бітуми штучні (нафтові) і природні (копалини або асфальти). Бітуми - слабополярні речовини і використовуються для виготовлення лаків і компаундів. $E_{пр}=10-25$ кВ/мм.

ДИЕЛЕКТРИКИ НА ОСНОВІ ВОСКУ

Матеріали на основі воску є твердими легкоплавкими речовинами білого або жовтого кольору, що мають кристалічну структуру, низьку механічну міцність і малу гігроскопічність. Вони вживаються для просочення пористих матеріалів і заливання пустот. Істотним недоліком їх при використанні як просочувальні маси є значна усадка при застиганні, що доходить до 15-20%. Тому частина об'єму пор ізоляції залишається заповненою повітрям, що приводить до зниження електричної міцності ізоляції.

Парафін – найбільш дешева і широко відома неполярна воскоподібна речовина. Одержують його з парафінистої нафти, що містить підвищену кількість твердих вуглеводнів метанового ряду. Очищений парафін – кристалічна біла речовина з щільністю $0,85-0,90$ г/см³ і температурою плавлення $50-55^{\circ}\text{C}$.

Діелектрична проникність парафіну знижується з підвищенням температури. Парафін не змочується водою. $E_{пр}=20-25$ кВ/мм. При нормальній температурі парафін має високу хімічну стабільність, але при підвищених температурах на повітрі легко окислюється. Парафін застосовують для просочення паперових конденсаторів низької напруги, для просочення дерева і картону, для заливання котушок з невисокою робочою температурою.

Церезин – суміш твердих вуглеводнів метанового ряду. Звичайно церезин виготовляють шляхом очищення мінералу озокериту ("гірського воску"), що представляє собою продукт природного переродження нафти в умовах доступу повітря. Перевагами церезину в порівнянні з парафіном є більш висока температура плавлення ($65-80^{\circ}\text{C}$) і стійкість до окислення. Церезин, незважаючи на його підвищену вартість у порівнянні з парафіном, майже

цілком замінив його, зокрема при просоченні паперових і слюдяних конденсаторів.

Синтетичний парафін і синтетичний церезин – є високомолекулярними вуглеводнями, що одержуються як побічні продукти при виробленні синтетичного бензину й олій. Електроізоляційні властивості цих матеріалів близькі до властивостей натурального парафіну і натурального церезину, але мають підвищену температуру плавлення (100-130°C).

Галовакс – продукт хлорування ароматичного вуглеводню нафталіну. Полярний кристалічний діелектрик світло-жовто-зеленуватого кольору. Його діелектрична проникність значно вище, ніж у неполярних воскоподібних речовин, тому при просоченні паперових конденсаторів галоваксом можна підвищити їх ємність на 25-30%. На відміну від неполярних воскоподібних речовин, галовакс практично не окислюється при нагріванні і є негорючим. Галовакс токсичний, пари його шкідливо діють на слизові оболонки і викликають захворювання шкіри. Тому в приміщеннях, де ведуть роботи з галоваксом, необхідно забезпечувати вентиляцію.

Вазелін – суміш твердих і рідких вуглеводнів, одержуваних з нафти. При нормальній температурі напіврідка (мазеподібна); застосовується для просочення паперових конденсаторів.

ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ ЛАКИ І КОМПАУНДИ

Лаки і компаунди є електроізоляційними матеріалами, що твердіють.

Лаки – колоїдні розчини смол, бітумів, олій, що висихають, і тому подібних речовин, що утворюють так звану лакову основу в розчинниках. При сушінні лаку розчинник випаровується, а лакова основа переходить у твердий стан, утворюючи лакову плівку.

Електроізоляційні лаки розділяють за застосуванням на три основні групи: **просочувальні, покривні і лаки, що клеять.**

Просочувальні лаки служать для просочення пористої, волокнистої ізоляції (папір, картон, пряжа, тканина, ізоляція обмоток електричних машин і апаратів). Після просочення пори в ізоляції виявляються заповненими не повітрям, а лаком, що має значно більш високу електричну міцність і теплопровідність, ніж повітря. В результаті просочення підвищується пробивна напруга, збільшується теплопровідність, зменшується гігроскопічність і вологопроникність, поліпшуються механічні властивості ізоляції, підвищується нагрівостійкість.

Покривні лаки служать для утворення механічно міцної, гладкої, блискучої, вологостійкої плівки на поверхні виробів. Нерідко цими лаками покривають тверду пористу ізоляцію, попередньо вже піддану просоченню. Це поліпшує властивості твердої ізоляції (зокрема, підвищує напругу поверхневого розряду і поверхневого опору, посилює захист ізоляції від дії вологи або хімічно активних речовин), а також зовнішній вигляд виробу.

Деякі види покривних лаків (емалі-лаки) наносять не на тверду ізоляцію, а безпосередньо на метал, утворюючи на його поверхні електроізоляційний шар (ізоляція емалі-дроту; ізоляція листів електротехнічної сталі в магнітопроводах

електричних машин і апаратів).

Лаки, що клеять, застосовуються для склеювання твердих електроізоляційних матеріалів (наприклад, клеєння листочків розщепленої слюди при виготовленні міканітів) або для приклеювання електроізоляційних матеріалів до металу.

Компаунди відрізняються від лаків відсутністю в їхньому складі розчинника. Складаються з різних смол, бітумів, восків, олій і ін. Якщо компаунд у початковому стані твердий, його перед уживанням нагрівають до необхідної температури, щоб одержати масу низкою в'язкості.

Компаунди бувають просочувальними і заливними.

Просочувальні компаунди призначені для просочення пористої і волокнистої ізоляції.

Заливні компаунди служать для заповнення порівняно великих порожнин, проміжків між різними деталями в електричних машинах і апаратах, а також для одержання порівняно товстого покриття на електротехнічних виробках. Застосування заливних компаундів має на меті захист ізоляції від зволоження і від дії хімічно активних речовин, збільшення розрядної напруги, поліпшення умов відводу тепла і т.п. У техніці слабких струмів для просочення і заливання ізоляції застосовують різні **воскоподібні речовини** і їхні сплави з іншими матеріалами.

Найважливіші типи електроізоляційних лаків.

Смоляні лаки є розчинами синтетичних, штучних або природних смол.

Бакелітовий лак є розчином бакеліту в спирті. Це просочувальний лак і лак, що клеїть. Дає механічно міцну, але малоеластичну і схильну до теплового старіння плівку. Широко використовується у виробництві **гетинаксу** і **текстоліту**, при виготовленні ізоляції електричних апаратів високої напруги і т.п.

Гліфталеві лаки – розчини гліфталевої смоли в сумішах спиртів і рідких вуглеводнів і тому подібних розчинниках. Це термореактивні лаки з високою клеючою здатністю, тому використовуються для клеєння міканітів і т.д., гнучкість їхніх плівок вище, ніж плівки бакелітового лаку, але вологостійкість нижче.

Кремнійорганічні лаки вимагають сушіння при підвищеній температурі, утворюють нагріво- і вологостійкі плівки. Застосування цих лаків у колекторних машинах із закритим циклом вентиляції приводить до прискореного зносу щіток і порушенням комутації (внаслідок присутності кремнію).

Поліхлорвінілові лаки є стійкими до дії бензину, масла, багатьох хімічно активних речовин і застосовуються як покривні лаки для захисту ізоляції, що працює в атмосфері з кислотними парами.

Полістирольний лак утворює плівку з високими електроізоляційними властивостями і незначною гігроскопічністю. Використовується у виробництві високочастотної апаратури.

Шелачний лак є розчином шелаку в спирті. Застосовується як клеючий лак при виготовленні міканітів, а також при різних монтажних і ремонтних

роботах. Для одержання плівки високої якості її потрібно запікти.

Целюлозні лаки є розчинами ефірів целюлози. Плівки їх термопластичні. Велика частина целюлозних лаків – лаки холодного сушіння. Найбільше значення з них мають нітроцелюлозні лаки (нітролаки). Плівки нітролаків механічно міцні, відрізняються блиском, добре протистоять дії повітря, вологи, олій і ін. Нітролаки погано пристають до металів, тому перед нанесенням нітролаку на метал звичайно попередньо наносять шар "грунтового" лаку, що добре пристає до металу, але менш стійкого до дії повітря, світла і вологи (наприклад, гліфталевого або масляного). Нітролаки застосовують для просочення бавовняних обплетень автомобільних і авіаційних дротів (поверх шару гумової ізоляції), для захисту гуми від впливу озону, масла і бензину.

Масляні лаки – основу цих лаків складають масла, що висихають, головним чином лляне і тунгове. Крім них, масляний лак містить **сикативи**, що служать для прискорення процесу сушіння, і летучий розчинник, що зменшує в'язкість лаку (**сикативи** – каталізатори, що прискорюють висихання лакофарбових матеріалів, що містять рослинні масла.).

Масляно-смоляні лаки – масляні лаки до яких додають природні або синтетичні смоли. Наприклад, масляно-гліфталеві лаки: у порівнянні з чисто масляними лаками вони мають підвищену еластичність, нагрівостійкість і клеючу здатність, а в порівнянні з чисто гліфталевими лаками – знижену гігроскопічність. Такі лаки широко застосовують для просочення обмоток маслоснаповнених трансформаторів, забезпечуючи маслостійкість і високу механічну міцність просочених обмоток, для просочення обмоток, що зазнають дії кислотних випарів і хлору, для покриття ізоляції, що містить фенолформальдегідні смоли.

ГНУЧКІ ПЛІВКИ

Особливий вид виробів з органічних полімерів – тонкі (товщиною до 0,02 мм) прозорі гнучкі плівки, що випускаються в рулонах. Гнучкі плівки, як правило, мають високу електричну і механічну міцність і знаходять широке застосування в ізоляції електричних машин, кабелів і обмотувальних дротів, як діелектрик конденсаторів і в ряді інших випадків.

Гнучкі плівки виготовляються з лінійних полімерів з досить високою молекулярною масою, тобто з великою довжиною молекул.

З неполярних плівок широке застосування мають плівки з поліетилену, поліпропілену, полістиролу, політетрафторетилена.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть основні газоподібні діелектрики, їх властивості та застосування.
2. Назвіть основні рідкі діелектрики, їх властивості та застосування.
3. Властивості і застосування полімерних ізоляційних матеріалів.
4. З чого виготовляють штучні і природні лаки і компаунди?
5. Де використовують діелектрики з воску?

ЛЕКЦІЯ 8

ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ (II)

ВОЛОКНИСТІ І ТЕКСТИЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Волокнисті матеріали – це матеріали, що утворюються з часток подовженої форми (волокон). В волокнистих матеріалах типу дерева, паперу, картону волокниста структура розрізняється під мікроскопом.

Перевагами волокнистих матеріалів є відносна дешевизна, достатня механічна міцність і гнучкість, зручність обробки. Загальними недоліками є невисока електрична міцність і питома теплопровідність (через наявність проміжків між волокнами, заповненими повітрям), значна гігроскопічність. Властивості волокнистих матеріалів істотно поліпшуються просоченням.

Більша частина вироблених волокон – це матеріали органічного складу. До них належать матеріали **рослинного походження** (дерево, бавовняне волокно, папір і ін., що складаються в основному з целюлози), **тваринного походження** (шовк), **штучні волокна**, одержувані шляхом хімічної переробки природного волокнистої сировини, **синтетичні волокна**, що виготовляються з синтетичних полімерів.

Текстильні матеріали виробляють методами прядіння з довговолокнутої сировини. За інших рівних умов текстильні матеріали (тканини, стрічки) мають більш високу механічну міцність, ніж волокнисті, особливо при перегині і при стиранні, але просочені вироби з них дорожче і мають нижчу електричну міцністю, ніж просочений папір. В електроізоляційній техніці пряжу (тобто нитки, скручені з окремих волокон) застосовують для ізоляції дротів і шнурів шляхом обмотки й обплетення. Тканини і стрічки звичайно використовують для захисту основної ізоляції електричних машин і апаратів від зовнішніх механічних впливів. Тканини використовують також у виробництві лакотканей і шаруватих пластиків типу **текстоліту**.

Бавовняні тканини і стрічки – в електротехніці застосовують переважно тканини простого полотняного переплетення.

Натуральний шовк – електроізоляційні шовкові тканини мають товщину 0,07-0,08 мм, завдяки чому їхнє застосування дає можливість одержувати більш тонку ізоляцію, ніж з бавовни, однак шовк дорожче бавовняного волокна.

Штучний шовк – основні типи штучного шовку (віскозний і ацетатний) є результатом переробки ефірів целюлози. На відміну від вихідної целюлози (клітковини) її ефіри мають гарну розчинність у відповідних розчинниках і дозволяють виготовляти з них тонкі нитки при видавлюванні розчинів через отвори (**філ'єри**) малого діаметра.

Синтетичні волокнисті матеріали – поліетилентерефталатні (**лавсан, терилен, терин, дакрон** і ін.), поліамідні (**капрон, дедерон, найлон, анід** і ін.), поліетиленові, полістирольні, полівінілхлоридні (**хлорин** і ін.) і політетрафторетиленові.

Лакотканина – гнучкий електроізоляційний матеріал, що представляє

собою тканину, просочену електроізоляційним лаком. Тканина забезпечує значну механічну міцність, а лакова плівка - електричну міцність матеріалу. Як основу для виготовлення лакотканин найчастіше застосовують бавовняну тканину (**перкаль**) або ж тонку шовкову тканину (**ексцельсіор**).

ПЛАСТИЧНІ МАСИ

Пластичні маси (пластмаси, пластики) – матеріали, що складаються з наповнювача і зв'язуючого.

Зв'язуюче – органічне, зазвичай високомолекулярне з'єднання (смола), що має здатність до пластичної деформації під впливом прикладеного ззовні тиску. В окремих випадках застосовуються і неорганічне зв'язуюче (скло в мікалексі, цемент в асбоцементі).

Наповнювач може бути порошкоподібним, волокнистим, листовим (кам'яне борошно, деревне борошно, бавовняне, азбестове або скляне волокно, слюда, папір, тканина і т.п.). Наповнювач здешевлює пластмасу і поліпшує її механічні характеристики.

Гігроскопічність і електроізоляційні властивості пластмас в результаті введення наповнювача, як правило, погіршуються, тому високі електроізоляційні властивості мають пластмаси без наповнювача. До складу пластмас вводять іноді **пластифікатори**, що збільшують пластичність і зменшують крихкість матеріалу, барвники, що додають пластмасі визначене фарбування, і інші добавки. Пластмаси бувають термопластичними і термореактивними. До термопластів належать пластмаси на основі полівінілових і поліамідних смол, ефірів целюлози і ін., а до реактопластів – пластмаси на основі фенолоформальдегідних, карбамідних і інших термореактивних смол.

Вініпласт – пластмаса з полівінілхлориду, виготовляється у вигляді орієнтованих аркушів товщиною до 1 мм. Крім того з вініпласту виготовляють труби, стержні і різні фасонні вироби. $E_{пр}=15-35$ кВ/мм. Теплостійкість не нижче 65°C. Вініпласт застосовується для створення ізоляції, що працює в умовах високої вологості і впливу хімічно активних речовин, але при відносно невисокій робочій температурі.

Шаруваті пластики (гетинакс, текстоліт і ін.) - композитні матеріали, у яких наповнювачем є той або інший волокнистий матеріал.

Гетинакс виробляють за допомогою гарячого опресування папера, просоченого бакелітом. Для виробництва гетинаксу береться міцний і нагрівостійкий просочувальний папір.

Гетинакс марки А має підвищені ізоляційні властивості: електрична міцність (скрізь шари матеріалу) $E_{пр}=20-25$ кВ/мм. Електричні властивості вздовж шарів матеріалу нижчі (анізотропний матеріал). Питомий об'ємний опір гетинаксу вздовж шарів у 50-100 разів, а електрична міцність – у 5-8 разів нижче, ніж скрізь шари. Гетинакс може оброблятися різальним інструментом із твердих сплавів.

Текстоліт – виготовляється з просоченої тканини. Властивості текстоліту

на бавовняній тканині близькі до властивостей гетинаксу. Має підвищену ударну в'язкість, стійкість до стирання і розколювання. Однак текстоліт у п'ять-шість разів дорожче гетинаксу.

Особливим видом текстоліту є **склотекстоліт**, який виготовляється на основі скляної тканини. Має порівняно високу нагрівостійкість, вологостійкість, механічну міцність і електроізоляційні властивості.

Шаруваті пластики застосовують у високо- і низьковольтному апаратоприладобудуванні як основу для виготовлення друкованих плат.

ЕЛАСТОМІРИ

Еластоміри - матеріали на основі каучуку і близьких до нього за властивостями речовин. Каучук характеризується високою еластичністю і малою проникністю для вологи і газів.

Натуральний каучук добувають з рослин-каучуконосів. Каучуконоси містять природний сік – **латекс**. Каучук виділяється при коагуляції латексу і видаленні домішок. За хімічним складом натуральний каучук являє собою полімерний вуглеводень, що має склад (C_5H_8). Уже при нагріванні до температури $50^\circ C$ каучук розм'якшується і стає липким, а при низьких температурах – крихким. Каучук розчиняється у вуглеводнях і сірковуглеці. Розчин каучуку в бензині (**гумовий клей**) застосовується для склеювання каучуку і гуми.

Через малу стійкість до дії підвищених і низьких температур, а також розчинників чистий каучук для виготовлення електричної ізоляції не вживають. Каучук **вулканізують**, тобто нагрівають після додавання сірки. Вулканізація поліпшує як нагрівостійкість, так і морозостійкість каучуку, підвищує його механічну міцність і стійкість до розчинників.

Гуми. В залежності від кількості сірки, що додається до каучуку, при вулканізації одержують: **м'яку гуму** (1-3% сірки, має високу пружність), **тверду гуму** (30-35% сірки, ебоніт – твердий матеріал, що має високу стійкість до ударних навантажень). Відносне видовження до розриву для різних технічних гум складає від 150 до 500%, а для ебоніту – від 2 до 6%. Крім каучуку і сірки при виготовленні гуми й ебоніту до складу гумової суміші вводять різні наповнювачі (крейда, тальк і ін.), що істотно впливають на властивості гуми, а також барвники, каталізатори ("прискорювачі") процесу вулканізації й інших речовин.

Гуму широко застосовують для ізоляції монтажних дротів, гнучких переносних проводів і кабелів. Вона вживається також для виготовлення захисних рукавичок, галош, ковриків і ізоляційних трубок. Недоліки гуми як електроізоляційного матеріалу – низька нагрівостійкість (при нагріванні гума старіє, охрупчується і тріскається), мала стійкість до дії нафтових масел, у яких гума набухає, і інших неполярних рідин (бензол, бензин і ін.), а також до дії світла, особливо ультрафіолетового, під впливом якого гума швидко старіє.

Залишки вільної сірки, що є в гумі, шкідливо дію на мідь, особливо при підвищеній температурі (мідь з'єднується із сіркою, утворюючи сірчисту мідь).

Тому неприпустимо безпосередньо накладати звичайну гумову ізоляцію на мідну жилу кабельного виробу. Попередньо мідь покривають так званім розділителем – шаром олова або папером. На алюмінієві жили гума може накладатися безпосередньо, без розділителя.

Сажеві гуми містять у якості наповнювача сажу, тому мають чорний колір. Електроізоляційні властивості низькі. Такі гуми використовують лише в тих випадках, коли високі електричні властивості ізоляції не потрібні (наприклад, зовнішні захисні оболонки (шланги) гумових кабелів). Для звичайних електроізоляційних гум $E_{пр} = 20-30 \text{кВ/мм}$.

Ебоніт для цілей електротехніки випускається у вигляді листів (дошок), стержнів і трубок. Він добре піддається механічній обробці і застосовується переважно в техніці слабких струмів, для акумуляторних баків і т.п. Останнім часом ебоніт значною мірою витісняється пластмасами.

Синтетичні каучуки – синтетичні матеріали, сировиною для виготовлення яких служать спирт, нафта і природний газ.

Бутадієновий каучук – найбільш розповсюджений синтетичний каучук, синтезується в результаті полімеризації газоподібного вуглеводню бутадієну. Широко застосовується замість натурального каучука або в суміші з ним для виготовлення як м'якої гуми, так і ебоніту. Каучуки (натуральний і синтетичні) є термореактивними матеріалами.

СКЛО

Скло - неорганічна аморфна речовина, що є складною системою різних окислів. Крім склостворюючих окислів, тобто таких, кожен з яких здатний сам по собі утворювати скло (Si_2O і ін.), до складу скла входять і інші окисли: лужні, лужноземельні й ін. Здебільшого основа скла – кремній (Si_2). Скло на основі кремнія називають **силікатним**.

Властивості скла змінюється в широких межах в залежності від складу і режиму теплової обробки. Щільність скла може становити від 2 до $8,1 \text{ г/см}^3$. Об'ємний опір при нормальних умовах може бути в межах $\rho_v = 10^6 \dots 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Електрична міцність при електричному пробіі мало залежить від складу скла і досягає $E_{пр} = 500 \text{кВ/мм}$. Основний вплив на $E_{пр}$ мають повітряні включення в товщі скла. Як правило, пробій скла має електротепловий характер.

Важке скло – скло з високим вмістом свинцю (кришталі, флінти).

Міцність скла при стискаючому навантаженні порівняна з міцністю сталей, а міцність при розтягуванні – майже на порядок менше. У звичайних умовах скло крихке. Як і інші аморфні речовини, скло не має різко вираженої температури плавлення. Температура розм'якшення для різних типів скла знаходиться в межах від 400 до 1600°C .

При швидкому нагріванні або охолодженні скла виникають температурні напруги, що є причиною його розтріскування. Тонкостінні скляні вироби більш стійкі до різкої зміни температур, ніж товстостінні.

Температурний коефіцієнт розширення скла при впаюванні металевого дроту або стрічки в скло (наприклад, у електровакуумних приладах) необхідно

підбирати таким чином, щоб його значення були близькими до значень температурного коефіцієнту матеріалів, що з'єднуються з склом.

Гідролітична стійкість (стійкість до дії вологи) оцінюється за кількістю складових частин скла, що переходять у розчин з одиниці поверхні скла при тривалому зіткненні з водою. Розчинність скла збільшується при зростанні температури. Найвищу гідролітичну стійкість має кварцове скло.

Сітал – новий перспективний вид склоподібних матеріалів, що отримують шляхом майже повної кристалізації скла спеціального складу (назва "сітал" - скорочення слів "силікат" і "кристал"). Вони займають проміжне положення між звичайним склом і керамікою (тому іноді їх називаються склокерамікою). Мають відносно високу міцність і хімічну стійкість.

За призначенням розрізняють шість типів електротехнічного скла:

1. **Конденсаторне** – використовуються як діелектрик конденсаторів, застосовуваних у високовольтних фільтрах, в імпульсних генераторах, у коливальних контурах високочастотних пристроїв.
2. **Монтажне** – служать для виготовлення кріпильних деталей, ізоляторів (телеграфних, антенних, опорних, прохідних і ін.).
3. **Лампове** – застосовуються для балонів і ніжок освітлювальних ламп, різних електронних приладів. До них пред'являється вимога з'єднуваності з металом (вольфрамом, молібденом і ін.)
4. **Склоемалі** – легкоплавкі непрозорі емалі, що призначаються для покриття поверхонь різних виробів.
5. **Скло з наповнювачем** – пластмаса гарячого пресування зі скла і слюдяного порошку (мікалексу).
6. **Скловолокно** – скло, що витягується в довгі гнучкі нитки, що використовуються для виготовлення текстильних скломатеріалів і світловодів.

КЕРАМІЧНІ ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Електротехнічна кераміка – неорганічні матеріали, одержувані спіканням глини з мінеральними добавками, а також оксидів металів і інших неорганічних з'єднань (карбідів, боридів, нітридів). У результаті спікання в керамічній масі відбувається утворення міцних зв'язків між складовими суміші, що надає кераміці значної міцності і термостійкості.

В електротехніці керамічні матеріали використовують в якості напівпровідникових, магнітних (ферити) і електроізоляційних.

Керамічні електроізоляційні матеріали мають високу механічну міцність, малий кут діелектричних втрат, високу діелектричну проникність, значну нагрівостійкість. У порівнянні з органічними електроізоляційними матеріалами кераміка більш стійка до електричного і теплового старіння, не дає залишкових деформацій при тривалій дії механічного навантаження.

Металізація кераміки – нанесення на поверхню кераміки якогось металу (наприклад, срібла) термічним методом. Забезпечує можливість здійснення м'якої і твердої спайки кераміки з металом, що має особливе значення для створення герметизованих конструкцій.

Фарфор є одним з основних матеріалів ізоляторного виробництва. Для виготовлення фарфору застосовують спеціальні сорти глини (каолін) і мінерали кварц і польовий шпат. Основні властивості обпаленого фарфору: щільність 2,3-2,5 г/см³; температурний коефіцієнт лінійного розширення менше, ніж у сталі. Фарфор менш крихкий, ніж скло, хімічно стійкий (тому його застосовують для виготовлення хімічного посуду). Електрична міцність при нормальній температурі $E_{пр}=10-30$ кВ/мм; об'ємний опір $\rho_v=10^{12} \dots 10^{13}$ Ом·м. При підвищених температурах електроізоляційні властивості порцеляни погіршуються.

Глазур – склоподібна маса, що наноситься тонким шаром на поверхню фарфорового ізолятора. При випалі глазур розплавляється і покриває поверхню ізолятора тонким шаром. Глазур захищає фарфор від проникнення вологи в пори і тим самим зменшує її гігроскопічність.

З технічного фарфору виготовляють:

- **лінійні ізолятори** – підвісні для більш високих напруг (більше 35кВ) і штирьові для більш низьких;
- **станційні ізолятори**: опорні і прохідні;
- **апаратні ізолятори**, що входять у конструкцію різноманітних апаратів: трансформаторів, масляних вимикачів, роз'єднувачів, розрядників;
- **монтажні фарфорові вироби**: ролики, деталі патронів, вимикачів, штепсельних з'єднань, запобіжників, відтяжні антенні ізолятори, телеграфні і телефонні ізолятори.

Радіофарфор і його сучасна модифікація - **ультрафарфор** - це в основному фарфор з різними добавками, зокрема, окис барію (BaO). Ультрафарфор має підвищену в порівнянні зі звичайним фарфором механічну міцність.

Стеатит – вид кераміки, виготовлений на основі мінералу тальку (завдяки його надзвичайній м'якості розмелюється в порошок). Спеціальні сорти стеатиту використовуються для високочастотної ізоляції. Не потребує в глазурування завдяки надзвичайно щільній структурі.

Конденсаторна кераміка – матеріал з високим значенням діелектричної проникності, що дозволяє його використовувати як діелектрик для компактних конденсаторів. Деякі з видів конденсаторної кераміки мають в якості основної складової частини рутил (двоокис титану, титанові білила).

Сегнетокераміка – має високу діелектричну проникність, що сильно змінюється з температурою, а також нелінійну залежність ємності від величини прикладеної напруги, що дає можливість її використовувати в різних електротехнічних і радіотехнічних пристроях. Найпоширеніший представник сегнетоелектриків – титанат барію (тибар, BaO·TiO₂). З сегнетоелектриків виготовляють **вариконди** – особливий тип конденсаторів, ємність яких нелінійно залежить від прикладеної напруги.

СЛЮДА І МАТЕРІАЛИ НА ЇЇ ОСНОВІ

Слюда є найважливішим із природних мінеральних електроізоляційних

матеріалів завдяки її високій електричній міцності, нагрівостійкості, вологостійкості, механічній міцності і гнучкості. Слюду застосовують у відповідальній електричній ізоляції, зокрема, в ізоляції електричних машин високих напруг і великих потужностей (у тому числі великих турбогенераторів і гідрогенераторів, тягових електродвигунів і т.п.), і як діелектрик у деяких конструкціях конденсаторів.

Слюда зустрічається в природі у вигляді кристалів, характерною рисою яких є здатність легко розшаровуватись по паралельним площинам (площини спайності). За хімічним складом різні види слюди є водними алюмосилікатами. Найважливіші з них: **мусковіт і флогопіт**. Слюда відноситься до електроізоляційних матеріалів вищого класу нагрівостійкості.

Міканіти – це листові або рулонні матеріали, склеєні з окремих пластинок слюди за допомогою клеючого лаку або сухої смоли, іноді з застосуванням волокнистої "підкладки" з паперу або тканини. Внаслідок наявності в міканітах великої кількості (не менш 50% ваги) слюди вони мають порівняно високою нагрівостійкістю.

АЗБЕСТ І АЗБЕСТОВІ МАТЕРІАЛИ

Азбест – назва групи мінералів, що мають чітко виражену волокнисту структуру. Найбільш розповсюджений тип азбесту – хризотилевий – є волокнистим різновидом мінералу хризотилу (змійовика).

Азбест залягає в кам'яній гірській породі у вигляді жил, що складаються з пучків волокон. Основною перевагою азбесту в порівнянні з органічними волокнистими матеріалами є висока нагрівостійкість. Азбест є гігроскопічним, тому часто просочується бітумами, смолами і т.п. Звичайний хризотилевий азбест розчиняється в кислотах, однак деякі порівняно рідкі види азбестів мають високу кислотостійкість. Електроізоляційні властивості азбесту порівняно невисокі, тому він не застосовується в ізоляції при високих напругах і частотах струму. Є надзвичайно шкідливим, тому при роботі з азбестом необхідно захищати дихальні шляхи.

Азбестоцемент (азбоцемент) – застосовувана в електротехніці пластична маса холодного пресування чисто неорганічного складу, у якій наповнювачем є азбестове волокно, а зв'язувальною речовиною – цемент. Азбоцемент випускається у вигляді дошок, труб і фасонних виробів. Він має непогані механічні, властивості і високу нагрівостійкість, добре протистоїть впливові іскор і електричної дуги, тому його використовують для виготовлення розподільних дошок і щитів, стінок іскрогасильних камер і перегородок.

ГІРСЬКІ ПОРОДИ

Електроізоляційні властивості гірських порід, як правило, невисокі, тому вони зазвичай використовуються лише при низьких напругах і частотах.

Мармур – гірська порода зернисто-кристалічної структури, що має здатність поліруватися до дзеркального блиску. Мармур застосовується як

декоративний (лицювальний) матеріал. В електротехніці з нього виготовляють розподільні щити і дошки, основи рубильників і перемикачів при робочих напругах до 500 В. Він має красивий зовнішній вигляд у полірованому стані, досить високу механічну міцність при статичних навантаженнях, негорючий, стійкий до дії води, лугів, органічних розчинників і олій.

Шифер (сланець, аспід) – розповсюджена гірська порода, має звичайно темно-сірий колір і шарувату структуру. Шифер значно поступається мармуру за зовнішнім виглядом, його не можна полірувати. Він гірше за електроізоляційними властивостями, більш гігроскопічний, але і більш кислотостійкий і нагрівостійкий, ніж мармур.

Тальк (мильний камінь, жировик) – водний магнезійний силікат. Це камінь світлого кольору, лускатої будови, жирний або мильний на дотик (звідси і назва), досить м'який, його можна різати ножом. Тальк легко розмелюється в тонкий порошок, що широко застосовується в різних галузях промисловості. У техніці електричної ізоляції тальк використовується як сировина у виробництві керамічних матеріалів, як наповнювач у гумових сумішах, як присипка для попередження злипання дротів з гумовою й азбестовою ізоляцією й ін.

Гагат (сибірський гагат) – гірська порода органічного походження. Він має темно-коричневий колір, добре полірується і механічно обробляється. При 100°C він стає гнучким, при 250°C починає розкладатися, при 400°C загоряється.

ОКСИДНА І ФТОРИДНА ІЗОЛЯЦІЇ

При окислюванні деяких металів на їхній поверхні утворюється шар окислу (оксиду) металу, що має електроізоляційні властивості. Найчастіше на практиці застосовується оксидний ізоляційний шар на алюмінії, одержуваний шляхом спеціальної обробки (за допомогою електрохімічної "анодної" обробки). Оксид алюмінію має досить високу для практичних цілей пробивну напругу ($E_{пр}=1,2...4,3$ кВ/мм). Недоліками оксидної ізоляції є мала гнучкість і значна гігроскопічність (тому зазвичай її покривають лаком). Оксидна ізоляція алюмінію відноситься до найвищого класу нагрівостійкості, оскільки її температура плавлення близько 2050°C.

Фторидна ізоляція створюється при взаємодії металу з фтором при підвищеній температурі. Таким чином утворюється фторид алюмінію (AlF_3) і фторид міді (CuF_2).

Запитання для самоперевірки:

1. Волокнисті матеріали.
2. Які шаруваті пластики ви знаєте і для чого вони використовуються?
3. Що таке еластоміри?
4. Охарактеризуйте основні властивості та застосування Електротехнічна гума.
5. Назвіть основні властивості та технічного скла. Де воно застосовується?
6. Керамічні діелектрики: класифікація, властивості та застосування.
7. Що таке технічний фарфор і де він використовується?

ЛЕКЦІЯ 9

КЛАСИФІКАЦІЯ Й ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Провідниками електричного струму можуть бути тверді тіла (головним чином метали), а також рідини і гази при певних умовах. Найбільше широко як провідники використовуються метали.

За здатністю проводити електричний струм металеві провідники умовно розділяють на **матеріали високої і низької провідності** (або, відповідно, на матеріали з низьким і високим опором).

Метали з високою провідністю (в основному це срібло, мідь і алюміній) використовуються для виготовлення проводів, кабелів, обмоток трансформаторів, електричних машин і т.д. **Метали і сплави високого опору** (наприклад, ніхром) застосовуються в електронагрівальних приладах, лампах накаливання, реостатах, зразкових опорах і т.п.

До рідких провідників відносяться розплавлені метали і різні електроліти. При нормальній температурі тільки ртуть є рідким металевим провідником.

За фізичним механізмом струму провідники розділяють на **провідники першого і другого роду**.

Провідниками першого роду або провідниками з електронною провідністю називають матеріали, в яких механізм протікання струму зумовлений наявністю вільних електронів. При цьому механізм переносу енергії (внаслідок руху електронів або передачі імпульсу від електрона до електрона) є питанням відкритим.

Провідниками другого роду, або електролітами, є розчини (в основному водні) кислот, лугів і солей, виникнення струму в яких пов'язано з рухом іонів.

Внаслідок переміщення молекул-іонів рідини склад електроліту поступово змінюється внаслідок виділення продуктів електролізу на електродах. Це зумовлює принципову різницю між провідниками першого і другого роду: в першому випадку не відбувається жодних змін хімічних і фізичних властивостей провідника внаслідок проходження електричного струму, в другому – такі зміни мають місце.

Гази і пара, у тому числі і пара металів, при низьких напруженнях електричного поля не є провідниками. Однак при деякому критичному значенні напруженості поля, що забезпечує початок ударної і фотоіонізації, газ стає провідником з електронним й іонним механізмами провідності.

Металеві провідники є основним типом провідникових матеріалів, застосовуваних в електротехніці.

Основні фізичні характеристики провідникових матеріалів:

- 1). питомий електричний опір або питома провідність;
- 2). температурний коефіцієнт питомого опору;
- 3). питома теплопровідність;
- 4). контактна різниця потенціалів і термоелектрорушійна сила (термо- ε .р.с).

Основні механічні характеристики провідникових матеріалів:

- 1). межа міцності;
- 2). твердість, зносостійкість;
- 3). відносне видовження (звуження).

Опір провідників обчислюється за формулою

$$R = \rho \frac{l}{S}, [\text{Ом}]$$

де ρ - питомий опір матеріалу [$\text{Ом}\cdot\text{м}$], l - довжина провідника [м], S - площа поперечного перерізу [м^2]. (Георг Ом (1787-1854), на честь якого названо одиницю вимірювання електричного опору, визначний німецький фізик в галузях електрики, кристалооптики і акустики).

При послідовному з'єднанні кількох опорів (R_1, R_2, \dots, R_n) загальний опір обчислюється як сума складових

$$R_{\text{посл}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При паралельному з'єднанні кількох опорів загальний опір обчислюється наступним чином

$$\frac{1}{R_{\text{прл}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Питомий опір матеріалу для провідника з постійним поперечним перерізом S і довжиною l обчислюється за формулою

$$\rho = R \frac{S}{l},$$

вимірюється в [$\text{Ом}\cdot\text{м}$] і є найважливішою електричною характеристикою матеріалу провідників.

Діапазон питомих опорів металевих провідників досить вузький - від $0,016 \cdot 10^{-6}$ Ом·м для срібла і приблизно до $1,5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м для залізо-хром-алюмінієвих сплавів (тобто біля трьох порядків). Питомі опори чистих металів відрізняються набагато менше (табл. 9.1). Наприклад, питомі опори срібла і ртуті відрізняються у 60 разів.

Чисті метали з правильними кристалічними ґратками характеризуються найменшими значеннями питомого опору. Домішки інших металів або неметалічні домішки, спотворюючи кристалічні ґратки, зумовлюють його збільшення, оскільки на дефектах кристалічних ґрат відбувається розсіювання електронних хвиль. Зростання питомого опору спостерігається і при сплавленні двох металів, якщо вони утворюють сплав твердий розчин.

Для більшості металів існує прямий зв'язок між їх питомою теплопровідністю і питомою провідністю: чим вищою є питома теплопровідність металу, тим нижчим є його питомий опір.

Таблиця 9.1. Фізичні властивості деяких чистих металів

Метал	Питомий опір, [мкОм·м]	Температура плавлення, [°С]	Щільність, [кг/м ³]
Срібло	0,016	961	10 500
Мідь	0,017	1083	8 940
Золото	0,024	1063	19 300
Алюміній	0,028	657	2 700
Вольфрам	0,055	3380	19 300
Молібден	0,057	2620	10 200
Нікель	0,073	1455	8 900
Залізо	0,098	1535	7 870
Платина	0,105	1770	21 400
Палладій	0,110	1554	12 100
Олово	0,120	232	7 310
Свинець	0,210	321	11 400
Хром	0,210	1850	7 100
Титан	0,480	1725	4 500
Ртуть	0,958	-39	13 600

ТЕМПЕРАТУРНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ОПОРУ ПРОВІДНИКІВ

Зі збільшенням температури в металевому провіднику посилюються коливання вузлів кристалічних ґрат, тому з'являється більше перешкод на шляху спрямованого руху електронів і їх рухливість знижується. Внаслідок цього **питомий опір чистих металів** з підвищенням температури зростає.

Типова крива зміни питомого опору міді в залежності від температури представлена на рис. 9.1. При переході з твердого стану в рідке в більшості металів спостерігається різке збільшення питомого опору (як видно з рис. 9.1, для міді цей скачок має місце при температурі її плавлення, тобто при 1083°С). Подальше суттєве зростання питомого опору зумовлене посиленням теплового руху атомів металу.

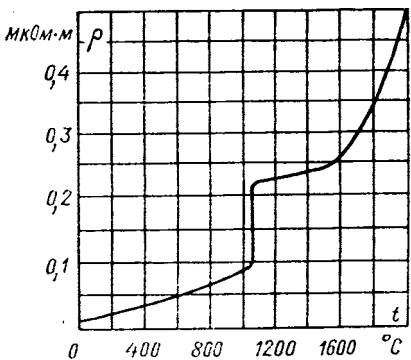


Рис. 9.1. Залежність питомого опору міді від температури

Питомий опір більшості металів при розплавленні збільшується, оскільки їх об'єм при цьому збільшується (а щільність, відповідно, зменшується). Але деякі метали при розплавленні зменшують свій об'єм (наприклад, галій, сурьма, вісмут), тому їх питомий опір при цьому також зменшується.

В діапазоні невисоких температур можна прийняти, що питомий опір залежить від температури лінійно і може бути підрахований за формулою

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha_\rho \Delta t),$$

де ρ_0 – значення питомого опору на початку діапазону; α_ρ – температурний коефіцієнт питомого опору в даному діапазоні температури Δt :

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 \Delta t} \text{ (град}^{-1}\text{)}.$$

Значення α_ρ чистих металів у твердому стані можна визначати за наближеною формулою:

$$\alpha_\rho \approx \frac{1}{273} \approx 0,0037 \text{ (град}^{-1}\text{)}.$$

Виключення складають метали, що відносяться до магнетиків: залізо, нікель, кобальт і хром.

НАДПРОВІДНІСТЬ.

Якщо екстраполювати залежність питомого опору від температури в область низьких температур, то при температурі, близькій до абсолютного нуля, тобто при $-273,16^\circ\text{C}$ (або 0 К), він має бути малим, але насправді при наднизьких температурах питомий опір багатьох металів практично зникає. Електричний опір ряду металів і сплавів починає різко падати при температурах вище абсолютного нуля, в результаті чого вони переходять у **надпровідний стан**.

Явище надпровідності було відкрито у 1911 р. нідерландським фізиком Х.Камерлінг-Оннес.

Надпровідність – явище різкого зменшення практично до нуля питомого електричного опору матеріалів при температурах близьких до абсолютного нуля. Температура, при якій матеріал переходить в надпровідний стан називається **температурою надпровідного переходу**. Матеріал, що переходить в надпровідний стан стає **надпровідником**. Температура надпровідного переходу для деяких чистих металів наведено у табл. 9.2. Срібло, мідь, золото, платину і деякі інші метали перевести у надпровідний стан не вдалося.

Деякі сплави металів мають більш високі температури переходу у надпровідний стан, ніж чисті метали (табл. 9.2). Це відкриває можливості виготовлення малогабаритних магнітів, що створюють магнітні поля великої напруженості при роботі в рідкому гелії (4,2 К). Однак виявилось, що при перевищенні деяких значення магнітної індукції, яка характеризує магнітне поле на поверхні надпровідника, надпровідність зникає. Як видно з табл. 9.2, значення магнітної індукції надпровідності для різних металів і сплавів відрізняються на чотири порядки.

Перспективним напрямком електротехнічного матеріалознавства є

створення матеріалів з високотемпературною надпровідністю. Зокрема, сплави ніобія і титана, ніобія і цирконія, а також з'єднання ніобію з оловом (Nb_3Sn), мають відносно високу температуру переходу у надпровідний стан (18,2К), оскільки ніобій характеризується найвищою з усіх чистих металів температурою переходу у надпровідний стан (9,5К).

Таблиця 9.2. Температура переходу деяких металів і сплавів у надпровідний стан

Метали і сплави	Температура надпровідності, [К]	Магнітна індукція надпровідності, [Тл]
Чисті метали		
Іридій	0,14	0,002
Титан	0,4	-
Молібден	1,0	-
Алюміній	1,2	0,010
Олово	3,7	0,031
Ртуть	4,2	0,046
Свинець	7,2	0,080
Ніобій	9,5	0,195
Сплави		
50%Nb+50%Ti	8,7	12,0
50%Nb+50%Zr	9,5	11,0
Хімічні з'єднання		
V_3Ga	14,0	50,0
Nb_3Sn	18,2	22,0

Криогенна провідність (криопровідність) – явище досягнення низького електричного опору у провідників при криогенних температурах без переходу у надпровідний стан. Криогенні температури (низькі температури) – температури нижче 120К. Температура рідкого водню 20,3К, рідкого кисню – 54,6К, рідкого азоту – 77,4К.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПИТОМОГО ОПОРУ ВІД ДЕФОРМАЦІЙ.

При пружному розтяганні або стиску питомий опір наближено можна розраховувати за формулою:

$$\rho_{\varepsilon} = \rho(1 \pm \varphi\sigma),$$

де σ - механічне напруження; φ - коефіцієнт механічного напруження. Знак плюс у формулі відповідає деформації розтягу, а знак мінус - стиску.

Зміна питомого опору при пружних деформаціях пояснюється зміною амплітуди коливань вузлів кристалічних ґрат металів; при розтяганні - збільшенням, при стиску - зменшенням.

Пластична деформація (тобто деформація, яка залишається в тілі після його розвантаження), як правило, підвищує питомий опір металів внаслідок спотворення кристалічних ґраток, утворення пор, розрихлення матеріалу. При рекристалізації (відновлення правильної кристалічної структури) шляхом термічної обробки (відпал) питомий опір може повернутись до початкового

значення.

ТЕРМІЧНА ЕЛЕКТРОРУШІЙНА СИЛА

При контакті двох різних металів між ними виникає **контактна різниця потенціалів**. Причина контактної різниці потенціалів полягає в тому, що різні метали мають різне значення роботи виходу електронів, а, отже, і різний електричний потенціал.

Термічна електрорушійна сила (термо-е.р.с.) зумовлена різницею потенціалів контактуючих металів, а її величина прямо пропорційна різниці потенціалів і температурі контакту.

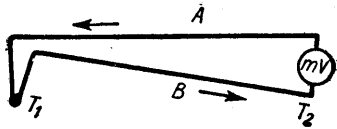


Рис. 9.2. Схема термопари

Контактна різниця потенціалів між двома металами А і В (рис. 9.2) пропорційна різниці температур спаїв T_1 і T_2 . Термоелектрорушійна сила між ними визначається формулою:

$$U = k(T_1 - T_2),$$

де коефіцієнт k є постійною для кожної пари металів і є тим більшим, чим більшою є різниця роботи виходу електронів для даної пари металів. В іншому крайньому випадку, тобто якщо ця різниця дорівнює нулю, термоелектрорушійної сили не виникає. Контактна різниця потенціалів для різних пар металів коливається в межах від мілівольт до декількох вольтів.

Явище термо-е.р.с. використовується для вимірювання температури за допомогою термопари (рис. 9.2). Метали, які використовуються для виготовлення термопар, наведені у лекції 12.

Запитання для самоперевірки:

1. За яким принципом класифікують провідники?
2. Назвіть основні фізичні і механічні властивості провідникових матеріалів.
3. Що таке надпровідність та криопровідність?
4. Від яких факторів і яким чином залежить питомий опір металів?
5. Що таке термоелектрорушійна сила і яким чином це явище використовується?

ЛЕКЦІЯ 10

МАТЕРІАЛИ ВИСОКОЇ І ПОСЕРЕДНЬОЇ ПРОВІДНОСТІ

Провідникові матеріали умовно поділяють на матеріали високої ($\rho \leq 0,03 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$), посередньої ($0,03 < \rho < 0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) і низької ($\rho \geq 0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) провідності.

МЕТАЛИ З НИЗЬКИМ ОПОРОМ

До найбільш розповсюджених металів **високої провідності** відносяться мідь і алюміній. Срібло, незважаючи на найвищу провідність, а також золото не мають широкого вжитку внаслідок відносно високої вартості.

Срібло – сірувато-білий метал, стійкий до окислення при нормальній температурі, має чудову віддзеркалюючу здатність. Срібло характеризується найменшим значенням питомого опору серед інших металів (див. табл. 9.1), але не переходить в надпровідний стан при наднизьких температурах. Має достатньо високу міцність (межа міцності біля 200 МПа) і високу пластичність (відносне подовження до 50%), тому з срібла можна одержати листки товщиною усього лише 0,25 мкм.

Срібло застосовують для виготовлення проводу і контактів, розрахованих на малі струми, а також для безпосереднього нанесення на діелектрики в якості електродів, у виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів, акумуляторів. В електротехніці досить поширене сріблення. Найтоншу срібну плівку наносять не тільки заради високої віддзеркалюючої здатності, а і заради підвищення хімічної стійкості (срібло краще багатьох інших металів протистоїть дії лугів) і електропровідності виробів. Перевага срібного покриття ще і в високій і щільності (безпористі). Недоліком срібла є його схильність до міграції всередину діелектрика при безпосередньому контакті, а також більш низька хімічна стійкість срібла в порівнянні з іншими благородними металами.

Мідь – питомий опір чистої міді ($\rho = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) незначно поступається питомому опору срібла, але надзвичайно чутливий до наявності домішок. При вмісті в міді 0,5% Zn, Cd або Ag питома провідність її знижується на 5%. При тім же вмісті Ni, Sn або Al питома провідність міді падає на 25-40%. Домішки Be, Fe, Si або P знижують питому провідність до 55%.

Мідь має високу теплопровідність, що забезпечує інтенсивний відвід тепла від електричних пристроїв. Залежність питомого опору міді від температури наведена в лекції 9.

Вміст міді в земній корі невеликий – до 0,007%. Це в 1000 разів менше, ніж алюмінію і у 600 разів менше, ніж заліза. Мідь одержують шляхом переробки сульфідних руд. Після ряду плавок руди мідь, призначена для електротехнічних цілей, проходить процес електролітичного очищення.

Широке застосування міді в електротехніці зумовлене:

1) малим питомим опором;

- 2) досить високою механічною міцністю і пластичністю;
- 3) задовільною корозійною стійкістю;
- 4) хорошою механічною оброблюваністю;
- 5) відносною легкістю пайки і зварювання;
- 6) порівняно низькою вартістю одержання.

Основні марки міді – М1 і М0 розрізняються за вмістом домішок в основному металі. Мідь марки М1 містить 99,90% Cu, а в загальній кількості домішок (до 0,1%) кисню має бути не більше 0,08%. Присутність у міді кисню погіршує її механічні властивості. Кращі механічні властивості має мідь марки М0 – містить 99,95% Cu, і не більш 0,05% домішок, у тому числі до 0,02% кисню. З міді марки М0 виготовляється тонкий провід.

При холодній протяжці одержують **тверду (твердотягнуту) мідь** (маркірується МТ), що завдяки наклепу має відносно високу міцність при розтягуванні при малому відносному видовженні, а також твердість і пружність. Тверду мідь вживають, коли треба забезпечити високу механічну міцність, твердість і опір зношуванню: для виготовлення контактних проводів, шин розподільних пристроїв, пластин колекторів електричних машин і ін.

Якщо ж мідь відпалити, то вийде **м'яка (відпалена) мідь** (маркірується ММ). Вона є пластичною, має малу твердість і невелику міцність, але досить значну величину відносного видовження і більш високу питому провідність. Деякі механічні характеристики твердої і м'якої міді наведено в табл. 10.1.

Відпал міді роблять у спеціальних печах без доступу повітря, щоб уникнути окислювання (мідь окислюється на повітрі значно повільніше, ніж залізо; інтенсивне окислювання міді відбувається тільки при підвищених температурах). З м'якої міді виготовляють мідний листовий прокат товщиною до сотих міліметра і провід діаметром до тисячних часток міліметра.

М'яку мідь у вигляді проводів круглого і прямокутного поперечного перетину застосовують головним чином як струмопровідні жили кабелів і обмотувальних проводів, де важлива гнучкість, а механічна міцність не має істотного значення. Мідною фольгою вкривають листовий гетинакс і текстоліт, отримуючи **фольгований гетинакс і текстоліт**, які використовують для виготовлення друкованих плат.

Сплави міді – бронзи і латуні.

Бронзи – сплави міді з оловом, кремнієм, берилієм, алюмінієм, хромом, кадмієм і ін. Такі сплави мають більш високі механічні властивості (межа міцності бронз досягає 800-1200 МПа), ніж мідь, але більш високий питомий опір. Бронзи широко застосовують для виготовлення струмопровідних пружин.

Таблиця 10.1. Механічні характеристики міді і алюмінію

Характеристика	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Межа міцності, [МПа]	360-390	260-280	160-170	80
Відносне видовження, [%]	0,5-2,5	18-35	1,5-2,0	10-18

Кадмієву бронзу застосовують для виготовлення контактних проводів і колекторних пластин особливо відповідального призначення, оскільки, з одного боку, додавання кадмію значно підвищує механічну міцність і твердість, а з другого, кадмієва бронза є дорогим сплавом.

Латунь – сплав міді з цинком. Цинк поліпшує механічні властивості міді (її міцність, пластичність, корозійну стійкість) і при цьому здешевлює сплав. Тому вироби з латуні виготовляють штампуванням, глибокою витяжкою і т.п. Сплав міді і цинку – латунь – був отриманий набагато раніш, ніж металевий цинк. Найдревніші латунні предмети, зроблені приблизно в 1500 р. до н.е.

Алюміній – метал срібисто-білого кольору, найважливіший представник так званих **легких металів** (тобто металів із щільністю менш 5 г/см^3). Щільність литого алюмінію близько $2,6 \text{ г/см}^3$, а прокатоного - $2,7 \text{ г/см}^3$. Таким чином, алюміній приблизно в 3,5 рази легше міді. Температурний коефіцієнт лінійного розширення, питома теплоємність і теплота плавлення алюмінію більше, ніж у міді, а температура плавлення – менша.

Приблизно 8,80% маси земної кори складаються з алюмінію – третім за поширеністю на нашій планеті елементом. Вперше металевий алюміній у 1825 р. одержав датський фізик Ганс Християн Ерстед. Тоді його виробництво коштувало у 1500 разів дорожче заліза (сьогодні алюміній дорожче вуглецевої сталі, але дешевше нержавіючої). Сучасне виробництво алюмінію приблизно в 2,5 рази дешевше, ніж міді. Світове виробництво алюмінію постійно росте. Зараз воно складає близько 2% від виробництва сталі по масі

Внаслідок високих значень питомої теплоємності і теплоти плавлення, для нагрівання алюмінію до температури плавлення і переведу в розплавлений стан потрібно витратити більше енергії, ніж для нагрівання і розплавлення такої ж кількості міді, хоча температура плавлення алюмінію нижче, ніж міді (відповідно 660 і 1083°C).

В порівнянні з міддю алюміній має нижчі як механічні, так і електричні властивості. Питомий електричний опір чистого алюмінію ($\rho=0,028 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$) більше, ніж міді, у 1,65 рази. Алюмінієвий провід такого ж електричного опору, як і мідний, повинен мати діаметр в 1,3 рази більше діаметра мідного проводу. При цьому алюмінієвий провід буде в два рази легший мідного проводу при однаковій довжині і електричному опорі.

Добавки нікелю, кремнію, цинку або заліза до 0,5% знижують провідність алюмінію у відпаленому стані не більше ніж на 2-3%; домішки міді, срібла і магнію знижують провідність алюмінію на 5-10%. Дуже сильно знижують провідність алюмінію добавки титану і марганцю.

Алюміній широко використовується для виготовлення проводів повітряних ліній електропередач, для електричної розводки в житлових приміщеннях, а також при виробництві ізольованих кабелів.

Марки алюмінію. Для електротехнічних цілей використовують алюміній марки А1 (містить не більш 0,5% домішок), алюміній марки АВ00 (не більше 0,03% домішок), алюміній марки АВ0000 найвищої чистоти (вміст домішок до 0,004%). Чим чистіше алюміній, тим він легший, тим вища його

електропровідність, теплопровідність, пластичність, віддзеркалююча здатність. Особливо помітний ріст хімічної стійкості внаслідок більшої щільності захисної окисної плівки.

Алюміній добре обробляється тиском: прокаткою, пресуванням, штампуванням, куванням. З алюмінію АВ00 можна прокатувати тонку (до 6-7 мкм) фольгу, яка застосовується в якості обкладинок у паперових конденсаторах. З алюмінію виготовляють також електроди і корпуси електролітичних конденсаторів. Виготовляють тверді і м'які (відпалені) алюмінієві проводи. Механічні властивості твердого (АТ) і м'якого (АМ) алюмінію наведено в табл. 10.1.

Алюміній окислюється і покривається тонкою оксидною плівкою (Al_2O_3) з великим електричним опором. Ця плівка має високу механічну міцність, високу температуру плавлення ($2050^\circ C$) і захищає алюміній від подальшої корозії, але створює великий перехідний опір у місцях контакту алюмінієвих проводів і унеможлиблює паяння алюмінію звичайними методами. Для пайки алюмінію застосовуються спеціальні пасти-припої або ультразвукові паяльники.

У місцях **контакту алюмінію і міді** має місце **гальванічна корозія**. Якщо область контакту знаходиться під дією вологи, то виникає місцева гальванічна пара з досить високим значенням $\mathcal{E}.p.c.$, причому полярність цієї пари така, що струм іде від алюмінію до міді, тому саме алюмінієвий провідник руйнується корозією. Для попередження цього явища місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими повинні ретельно захищатися від зволоження (покриттям лаками і тому подібними способами).

Для виготовлення проводів **повітряних ліній електропередачі**, використовують алюмінієві сплави з підвищеною механічною міцністю. Найбільше широко з цих сплавів використовується **альдрей** (містить 0,3-0,5%Mg, 0,4-0,7%Si і 0,2-0,3%Fe). За механічною міцністю наближається до твердотягнутої міді.

Для високовольтних ліній електропередач широко застосовують **сталєво-алюмінієвий провід**, що представляє собою сердечник, звитий зі сталевих жил і оповитий зовні алюмінієвим проводом. У проводах такого типу механічна міцність визначається сталевим сердечником, а електропровідність – алюмінієм. Збільшення діаметра проводу, що має місце в цьому випадку, зменшує можливість виникнення корони.

Золото – метал жовтого кольору, має посередню міцність (межа міцності 150 МПа), але високу пластичність (відносне видовження до 40%), досить м'який, має високу корозійну стійкість (при нагріванні вище $100^\circ C$ на поверхні золота утвориться окисна плівка, яка не зникає при охолодженні до $20^\circ C$; товщина плівки дорівнює 30Å). Електрична провідність золота вища, ніж у алюмінію, але гірша, ніж у міді (див. табл. 9.1). В електротехніці золото використовується як контактний матеріал для забезпечення корозійної стійкості покриття і стабільності перехідного електричного опору в механічних контактах точних електричних вимірювальних приладів, комп'ютерів, тощо. З золота

виготовляють електроди фотоелементів і ін..

Зі сплавів золота зі сріблом або міддю роблять волоски гальванометрів і інших точних приладів, а також мініатюрні електричні контакти, що мають забезпечувати велику частоту замикань і розмикань без злипання контактів. У сплавах, що забезпечують найменше злипання, золоту належить особлива роль. Безвідмовно працюють сплави золота з палладієм (30%) і платиною (10%), палладієм (35%) і вольфрамом (5%), цирконієм (3%), марганцем (1%). Крайні контактні сплави є дуже дорогим, однак без них не може обійтися сучасна космічна техніка, техніка зв'язку, тощо.

МЕТАЛИ ПОСЕРЕДНЬОЇ ПРОВІДНОСТІ

Залізо, платина і палладій відносяться до широко вживаних в електротехніці металів з посередньою провідністю.

Залізо і сталі (сплав заліза з вуглецем) - дешевий і широко розповсюджений метал, має високу механічну міцність, але низьку корозійну стійкість. Питомий опір ($\rho=0,098$ мкОм·м) майже в 6 разів вищий, ніж у міді.

Оскільки сталь є феромагнітним матеріалом, опір сталевих провідників перемінному струму є вищим, ніж постійному.

Сталь як провідниковий матеріал використовується для виготовлення коліс трамваїв, електропоїздів залізниць і метро, рейок, сердечників сталевих алюмінієвих повітряних проводів.

Біметал (провідниковий біметал, не плутати з термічним біметалом) – це сталь, покрита зовні шаром міді (рис. 10.1). Механічна міцність біметалу більше, ніж міді, але електрична провідність менше. Застосування міді в зовнішньому шарі забезпечує більш високу провідність біметалу при перемінному струмі і захист стали від корозії. Такий провід застосовують для ліній зв'язку, ліній електропередачі, у потужних підсилювачах і т.п. Із провідникового біметалу виготовляються шини для розподільних пристроїв, конструктивні елементи рубильників і різні струмопровідні частини електричних апаратів.

Розрахунок опору біметалевого провідника (сталь (с) – мідь (м)):

$$\frac{1}{R_{M+C}} = \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_C}; \Rightarrow R_{M+C} = \frac{R_M R_C}{R_M + R_C};$$

$$R_M = \frac{4l\rho_M}{\pi(d_M^2 - d_C^2)}; \quad R_C = \frac{4l\rho_C}{\pi d_C^2};$$

$$R_{M+C} = \frac{4l}{\pi} \left(\frac{d_C^2}{\rho_C} + \frac{d_M^2 - d_C^2}{\rho_M} \right)^{-1}.$$

Наприклад, якщо довжина провідника $l=1$ м, діаметри відповідних його

складових $d_m=0,01\text{м}$ і $d_c=0,005\text{м}$, а питомі опори міді і сталі $\rho_m=0,017\cdot 10^{-6}\text{Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_c=0,098\cdot 10^{-6}\text{Ом}\cdot\text{м}$, то $R_{m+c}=2,728\cdot 10^{-4}\text{Ом}$, а $R_m=2,886\cdot 10^{-4}\text{Ом}$, тобто опір біметалу в даному випадку на 6% нижчий, ніж суцільно мідного провідника.

Платина – метал, що практично не реагує з киснем і є досить стійким до хімічних реагентів. Платина добре механічно обробляється, витягується в дуже тонкі нитки і стрічки (відносно видовження 30-35%). Механічна міцність така ж, як у золота.

Платину застосовують для виготовлення термопар на робочі температури до 1600°C (у парі з платинородієм, див. лекцію 12). Особливо тонкі нитки з платини діаметром $0,001\text{ мм}$ використовують для виготовлення підвісок рухливих систем в стрілочних і інших чутливих приладах.

Внаслідок малої твердості платина рідко застосовується для виготовлення контактів у чистому виді, але є основою ряду контактних сплавів. Найбільш поширені сплави платини з іридієм. Вони не окислюються, мають високу твердість, малий механічний знос, допускають велику частоту механічних контактів, однак є дорогими і застосовуються тільки для виготовлення відповідальних пристроїв.

Паладій - за багатьма властивостям близький до платини й у ряді випадків служить її заміном. Межа міцності 200МПа , відносно видовження до 40%. Має високу корозійну стійкість: на паладій при нормальній температурі не діє навіть фтор.

Паладій використовують у електровакуумній техніці для поглинання водню. При кімнатній температурі один одиниця об'єму паладія вбирає в себе до 950 одиниць об'єму водню. При цьому він розрихлюється і розтріскується. Підвищена здатність до газопоглинання характерна для всього класу платинових металів.

Паладій і його сплави зі сріблом і міддю застосовуються як контактні матеріали.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть метали з найвищою провідністю.
2. Як домішки впливають на питомий опір міді і алюмінію?
3. Що таке біметал і де він використовується?
4. В яких випадках в електротехніці застосовують срібло?
5. Назвіть основні переваги і застосування золота, платини і паладія.

ЛЕКЦІЯ 11

МЕТАЛИ І СПЛАВИ З ВИСОКИМ ОПОРОМ

До провідникових матеріалів з високим опором умовно відносять метали і сплави з питомим електричним опором $\rho \geq 0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

МЕТАЛИ ВИСОКОГО ОПОРУ

Титан – має високу механічну міцність, співставну з міцністю кращих сталей, і надзвичайно високу в'язкість руйнування. При цьому щільність титану майже вдвічі нижча, ніж щільність заліза. Корозійно стійкий. Тому використовується для виготовлення відповідальних елементів конструкцій.

Лише три технічно важливих у сучасному світі метали – алюміній, залізо і магній – поширені в природі більше, ніж титан.

Серед чистих металів титан має найбільший електроопір, поступаючись лише ртуті. Питомий опір титану у 28 раз більший, ніж у міді. Домішки титану сильно знижують провідність алюмінію. Титан є немагнітним металом.

Широке практичне застосування має сполука титану і барію (титанат барію BaTi_3) – один з найважливіших сегнетоелектриків. П'єзокристали титанату барію за багатьма характеристикам перевершують такі розповсюджені п'єзоелектрики, як кварц і сегнетова сіль **п'єзоелектрики** – матеріали, при механічному деформуванні яких на їх поверхні утворюється електричний заряд).

Ртуть – метал, що знаходиться в рідкому стані при нормальній температурі і перетворюється у тверде тіло при охолодженні до $-38,9^\circ\text{C}$. Її добувають із сірчистого з'єднання червоної кіноварі. Ртуть легко випаровується і має значний тиск пари при кімнатній температурі. Пари ртуті отрутні.

Питомий електричний опір ртуті є найбільшим з відомих металів (див. табл. 9.1) і перевищує опір міді майже у 60 разів. Ртуть – перший з відкритих надпровідників. У 1911 р. голландський учений Гейке Камерлінг-Оннес, досліджуючи електропровідність ртуті, помітив, що при досягненні температури $4,2^\circ\text{K}$ опір ртуті практично зникає. Так було відкрите явище надпровідності.

Ртуть хімічно стійкий метал: вона окислюється на повітрі лише при температурах, близьких до температури її кипіння (357°C), і слабо взаємодіє з воднем, окисом вуглецю й азотом.

Лужні, лужно-земельні метали, магній, алюміній, цинк, олово, свинець, кадмій, платина, золото і срібло розчиняються у ртуті, утворюючи тверді або рідкі розчини – **амальгами** (сплави). Деякі з них, наприклад амальгами срібла і кадмію, хімічно інертні і тверді при температурі людського тіла, але легко розм'якшуються при нагріванні. Амальгаму таллія, що затвердіває лише при -60°C , застосовують в спеціальних конструкціях низькотемпературних термометрів.

Ртуть застосовують як рідкий катод у промислових ртутних випрямлячах електричного струму. Дотепер їх використовують у багатьох електрохімічних виробництвах і на транспорті з електричною тягою, хоча останнім часом їх витісняють більш економічні і нешкідливі напівпровідникові випрямлячі.

Видиме світіння парів ртуті використовують в конструкціях потужних ламп освітлення, у лампах денного світла (лампи денного світла – це газорозрядні трубки, у яких знаходяться інертні гази і пари ртуті). Ртуть використовують також для виготовлення ртутних контактів у реле, ртутних електродів при вимірюванні електричних властивостей твердих діелектриків.

СПЛАВИ ВИСОКОГО ОПОРУ

Сплави високого опору застосовуються при виготовленні електровимірювальних приладів, зразкових опорів, реостатів і електронагрівальних приладів. В усіх цих випадках від провідника потрібно можливо більший питомий опір.

Для сплавів високого опору при їхньому використанні в електровимірювальних приладах і зразкових опорах важлива також слабка залежність питомого опору від температури і мала термо- ϵ .р.с. відносно міді. Сплави для електронагрівальних приладів повинні бути довговічними при роботі на повітрі при температурах порядку 1000°C , технологічними при виготовленні з них тонкого проводу і відносно недорогими.

Найбільш поширеними є високоомні **сплави на мідній основі** (манганін і константан), а також на **хромо-нікелевій** і **залізо-хромовій** основі з додаванням алюмінію.

Манганін – сплав на основі міді (Cu – 86%; Mn – 12%; Ni – 2%). Питомий опір у 25 разів вище, ніж у міді. Відрізняється характерним жовтуватим відтінком. Добре витягується в тонкий провід діаметром до 0,02 мм. Має високу термічну стабільність і незначну термо- ϵ .р.с. в парі з міддю (табл. 11.1). Найбільша допустима робоча температура для сплаву – 200°C . Використовується у електровимірювальних приладах і для виготовлення зразкових резисторів.

Константан – сплав міді і нікелю (Cu – 55%; Ni – 45%). Питомий опір у 28 разів вище, ніж у міді, і практично не залежить від температури (табл. 11.1). Тому константан застосовують для виготовлення реостатів і електронагрівальних елементів. Робоча температура сплаву до 450°C (при нагріванні до більш високих температур окислюється).

Константан у парі з міддю або залізом зумовлює виникнення значної термоелектрорушійну силу. Це є недоліком при використанні **константанових резисторів** у вимірювальних схемах, оскільки за рахунок різниці температур у місцях контакту константанових провідників з мідними виникають небажані термоелектрорушійні сили. Константан застосовують також для виготовлення термопар, призначених для вимірювання невисоких температур (декілька сот градусів), а також **тензорезисторів** (пристроїв для вимірювання деформацій).

Сплави на основі заліза-нікеля-хрома – використовуються переважно

для виготовлення електронагрівальних пристроїв. Висока нагрівостійкість таких сплавів зумовлена додаванням нікеля, хрому і алюмінію. Чим більша частка заліза у сплаві, тип менш нагрівостійким є сплав.

Таблиця 11.1. Фізичні властивості металів і сплавів високого опору

Метал, сплав	Питомий опір, [мкОм·м]	Температурний коефіцієнт електроопору, [K ⁻¹]	Коефіцієнт термо-е.р.с. при контакті з міддю, [мкВ/К]
Манганін	0,42-0,48	$(5-30) \cdot 10^{-6}$	1-2
Константан	0,48-0,52	$-(5-25) \cdot 10^{-6}$	45-55
Титан	0,480	$33 \cdot 10^{-4}$	-
Ртуть	0,958	$9 \cdot 10^{-4}$	-
Ніхром	1,0-1,1	$(100-200) \cdot 10^{-6}$	-
Ферроніхром	1,1-1,2	$(100-200) \cdot 10^{-6}$	-
Фехраль	1,2-1,35	$(100-120) \cdot 10^{-6}$	-
Хромаль	1,3-1,5	$65 \cdot 10^{-6}$	-

Залізо-хромо-нікелеві сплави (**ферроніхром**: Ni – 60%; Cr – 18%; Fe – 20,5%; Mn – 1,5%; **ніхром**: Ni – 75%; Cr – 21%; Fe – 3,5%; Mn – 1,5%). Питомий опір у 60 разів вище, ніж у міді. У діапазоні температур від 0 до 1000°C питомий опір ніхрому збільшується не більше ніж на 10% (рис. 11.1). Використовуються для виготовлення нагрівальних елементів, електричних печей, плиток, паяльників і т.д. З цих сплавів виготовляють провід діаметром від 0,02 мм і фольгу товщиною 0,1 мм.

Мають високу жаростійкість. Причина стійкості залізо-хромо-нікелевих сплавів при високій температурі на повітрі є, по-перше, нелетучість окислів, по друге, близькі значення температурних коефіцієнтів лінійного розширення сплаву і його оксидної плівки. **Тому останні не розтріскуються і не відскакують від проводу при постійній температурі.** Однак при різких

змінах температури внаслідок невеликої відмінності температурних коефіцієнтів розширення сплаву й окислів хрому і нікелю відбувається розтріскування шару окислу. При наступному нагріванні кисень проникає в тріщини і окислює більш глибокі шари сплаву. Тому при багаторазовому вмиканні-вимиканні електронагрівального елемента з ніхрому він перегорить швидше, ніж у випадку безперервного режиму нагрівання (термін служби відрізняється в 20-30 разів).

Збільшення терміну служби нагрівальних елементів досягається закладенням спіралей у інертне середовище типу глини-шамоту або в герметичні трубки (**тени**), що захищає їх від механічних впливів і від доступу кисню.

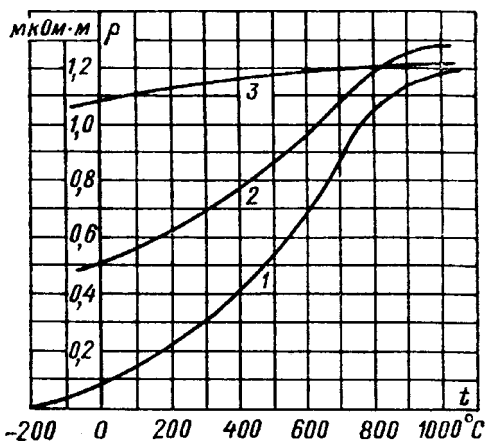


Рис. 11.1. Температурні залежності питомого опору для: 1 – чистого заліза; 2 – сплаву Fe+4%Si; 3 – сплаву Fe+Ni+Cr

Залізо-хром-алюмінієві сплави (фехраль: 12-15%Cr; 3,5-5,5%Al; Fe; хромаль: 23-27%Cr; 4,5-6,5%Al; Fe). Питомий опір у 70 разів вище, ніж у міді. Вони є більш дешевими сплавами, застосовуються для потужних електронагрівальних пристроїв і промислових печей. У порівнянні з хромо-нікелевими сплавами ці сплави більш тверді і крихкі, виготовлення з них проводів і стрічок утруднене.

Розрахунок потужності нагрівального приладу при постійному і перемінному струмі:

Постійний струм: $W = U \cdot I = U^2 / R$.

Перемінний струм: $W = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ (φ - зсув фаз між напругою і струмом; $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності).

У випадку постійного струму: $R = U / I$; $R = \rho \frac{l}{S} = \frac{4\rho l}{\pi D^2}$ (D – діаметр проводу). Тоді довжина провідника, на якому буде виділятися енергія W буде обчислюватись за формулою

$$l = \frac{\pi D^2 U^2}{4\rho W}.$$

Наприклад, якщо $W=1000$ Вт, $U=220$ В, $D=0,5$ мм довжина мідного провідника $l_m=559,0$ м, а довжина провідника з ніхрому $l_n=8-9$ м. При $D=0,1$ мм довжина мідного провідника зменшується до $l_m=25,4$ м.

Розрахунок втрат енергії при передачі постійного струму на великі відстані.

Алюмінієвий (а) витий провід з n жил на сталевому осерді (s):

$$\frac{1}{R_{a+s}} = \frac{n}{R_a} + \frac{1}{R_s}; \Rightarrow R_{a+s} = \frac{R_a R_s}{n R_s + R_a};$$

$$R_{a+s} = \frac{4l}{\pi} \left(\frac{n d_a^2}{\rho_a} + \frac{d_s^2}{\rho_s} \right)^{-1}.$$

Наприклад, якщо $l=100$ км= 10^5 м, $n=8$, $d_a=0,003$ м, $d_s=0,005$ м, $\rho_a=0,028 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\rho_s=0,098 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $U=120$ кВ, то $W=3,2 \cdot 10^8$ Вт. При $U=500$ кВ, $W=5,5 \cdot 10^9$ Вт= 5500 МВт.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть основні метали низької провідності і їх характерні особливості.
2. Що таке амальгами і де вони використовуються?
3. Властивості та застосування сплавів високого питомого опору.
4. Чому в електровимірювальних приладах і зразкових опорах необхідний низький температурний коефіцієнт питомого опору і мала термо-е.р.с. відносно міді?

ЛЕКЦІЯ 12

ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Вольфрам – важкий метал сірого кольору, вміст якого в земній корі оцінюється в 0,0055%. Технічно чистий вольфрам плавиться при 3410°C, а кипить при 6690°C. Має високу твердість. Щільність у 1,7 рази більше, ніж у свинцю.

Сильно окислюється (добре реагує з киснем при нагріванні і особливо легко – у присутності парів води), тому використовується лише в глибокому вакуумі або в атмосфері інертного газу (азот, аргон і т.п.).

Вольфрам застосовують також для виготовлення контактів через малий механічний знос внаслідок його високої твердості. Псевдосплави вольфраму з міддю і сріблом – чудовий матеріал для виготовлення рубильників і вимикачів електричного струму високої напруги: вони служать у шість разів довше звичайних мідних контактів (для отримання цього псевдосплаву вольфрамовий порошок пресують і спікають, а отриману таким шляхом пористу заготовку просочують рідким розплавом міді і срібла).

Вольфрам є одним з найважливіших матеріалів електровакуумної техніки, використовується для виготовлення ниток ламп накаливання (запропонована Лодигінім у 1872 році; вдосконалена Едісоном у 1879 році). Незамінність вольфраму для виготовлення електролампочок розжарювання зумовлене не тільки його тугоплавкістю, але і пластичністю. З одного кілограма вольфраму витягається дріт довжиною 3,5 км, а цього досить для виготовлення ниток накаливання 23 тис. 60-ватних лампочок.

Сплав вольфраму, нікелю і міді (важкий метал) служить для виготовлення контейнерів, у яких зберігають радіоактивні речовини. Його захисна дія на 40% вище, ніж у свинцю.

Молібден – за зовнішнім виглядом, а також за технологією обробки близький до вольфраму. При нагріванні чистий молібден починає реагувати з киснем (окислюється: при температурі близько 500°C перетворюється на окисел цілком), тому розжарювані деталі з молібдену повинні працювати у вакуумі.

Молібден застосовується як матеріал для електричних контактів. Якщо впаяти вольфрамову нитку в скляний стержень в центрі лампочки, то він незабаром трісне через теплове розширення нитки. Тому вольфрамові нитки накаливання підвішують на молібденових гачках, впаяних у скло, тому що у молібдену мізерно малий коефіцієнт теплового розширення.

Молібден застосовують у електровакуумній техніці, але при менш високих температурах, ніж вольфрам. До вакуумних приладів електричний струм підводиться через молібденові прутки, впаяні в спеціальне скло, що має однаковий з молібденом коефіцієнт теплового розширення (молібденове скло). Молібденовий дріт може служити обмоткою в високотемпературних (до

2200°C) індукційних печах, але не в окисному середовищі.

Молибден добре прокатується в тонкі листи товщиною 0,1...0,2 мм, які здатні витримати сильне нагрівання. Тому він виявився гарним матеріалом для анодів радіоламп. Молибденом користуються також для очищення дорогих (зазвичай це аргон і неон) газів від домішок кисню. Для цього аргон або неон пропускають над нагрітою до 600...900°C молибденовою поверхнею, яка і поглинає кисень.

Великий вплив на швидкість окислювання металів справляє здатність окислу до летючості.

Летючий окисел випаровується з поверхні металу, не захищаючи метал від подальшого окислювання. Окисли вольфраму і молибдену летючі, тому вони не можуть довгий час працювати в присутності кисню.

Нелетючий окисел утворює стійкий шар на поверхні металу, який захищає його від подальшої корозії (наприклад, окисел алюмінію або ніхрому).

Нікель – сріблясто-білий метал, легко піддається всім видам механічної обробки: куванню, пресуванню, прокатці, штампуванню, волочінню і т.п. З нікелю можуть бути виготовлені різні за розмірами і складності конфігурації вироби. Жаростійкий, хімічно пасивний при нагріванні, стійкий до окислення, тому часто використовується в якості антикорозійних (в тому числі і декоративних) захисних покриттів.

Широко застосовується у електровакуумній техніці. З нього виготовляють провідникові тримачі, сітки, аноди, екрани і ряд інших деталей. Тут важливо, що пари нікелю не впливають на глибокий вакуум лампи.

Під дією зовнішнього магнітного поля нікель деформується (скорочується). Це явище було названо магнітострикцією (див. лекцію 13). Тому стержень з нікелю в перемінному магнітному полі високої частоти стає джерелом ультразвуку. Дуже важливим в електротехніці є магнітний сплав заліза і нікелю – пермаллой (FeNi_3). Сердечники з пермаллою є в будь-якому телефонному апараті, а тонкі пермаллойні плівки – головний елемент запам'ятовуючих пристроїв обчислювальних машин.

Окиснонікелеві електроди використовують при виготовленні лужних акумуляторів, оскільки електроди на основі окислів нікелю мають великий позитивний заряд, стійки в електроліті, добре обробляються, порівняно недорогі і довго служать.

Сплави нікелю, зокрема **ніхром і ферроніхром**, застосовують для виготовлення нагрівальних елементів (див. лекцію 11).

Свинець – метал сіруватого кольору, що дає на свіжому зрізі сильний металевий блиск, але потім що швидко тьмяніє внаслідок поверхневого окислювання. М'який, пластичний (відносно видовження 55%) і легкоплавкий метал (температура плавлення 327°C). Має високий питомий електричний опір (у 12 разів вищий, ніж у міді) і щільність (у 1,3 разів більше, ніж у міді). Свинець був одним з перших металів, переведених у стан надпровідності. Зі свинцю була зроблена обмотка першого надпровідного трансформатора,

побудованого у 1961 р.

Перевагою свинцю є його висока антикорозійна здатність, він стійкий до дії води, сірчаної і соляної кислот (на холоді) і ряду інших реагентів (тому широко використовується у сірчаноокислій промисловості). Однак азотна, мурашина і оцтова кислоти, органічні речовини, що гниють, вапно і деякі інші з'єднання його руйнують.

Свинець інтенсивно поглинає радіоактивне випромінювання. П'ятнадцяти-двадцятисантиметрового шару свинцю досить, щоб захистити людей від дії рентгенівського випромінювання. Свинець і його сплави у великих кількостях застосовують як оболонки, що захищають ізоляцію кабелів від проникнення в неї вологи (останнім часом свинцева оболонка замінюється більш дешевою з полівінілхлоридного пластикату). Багато свинцю йде і на виготовлення легкоплавких сплавів (з вісмутом, оловом і кадмієм) для електричних запобіжників, а також пластин свинцевих акумуляторів (сплав свинцю з вісмутом) і т.д.

У гальванотехніці хромові ванни з гарячим електролітом зсередини облицьовують свинцем. Окисел свинцю (PbO) є одним з кращих **сикативів** (прискорювачів висихання масел).

Свинець і його з'єднання отруйні. Необхідно запобігати попаданню свинцю в організм людини.

Олово – один з металів, відомих людині ще з доісторичних часів. Олово і мідь були відкриті раніш заліза, а їх сплав, бронза, – найперший сплав, виготовлений людиною. Сріблито-білий метал, що має виражену кристалічну структуру. При згинанні палички олова чутний тріск, викликаний тертям кристалів. Олово – м'який, тягучий метал, що дозволяє одержувати шляхом прокатки тонку фольгу. Температура плавлення 232°C

При низькій температурі на білому олові з'являються сірі плями (виділення сірого олова), що одержали назву "олов'яної чуми" (**поліморфне** перетворення олова). При нагріванні сіре олово знову переходить у біле.

При звичайній температурі олово на повітрі не окислюється, вода на нього не впливає, а розведені кислоти діють дуже повільно.

Олово використовують як захисні покриття металів (лудіння). Воно входить до складу бронз і сплавів для пайки. Станіоль – тонка олов'яна фольга (6-8 мкм), що застосовується у виробництві деяких типів конденсаторів.

Цинк - світлий метал, при кімнатній температурі крихкий, при нагріванні до 100°C стає тягучим і пластичним, а при подальшому нагріванні (понад 200° С) знову охрупчується. Використовується як захисне покриття (на антикорозійний захист сталі йде 40% світового виробництва цинку), складова частина латуней і електродів гальванічних елементів, а також для металізації папера в малогабаритних металопаперових конденсаторах.

Хімічні сполуки цинку (селеніди, теллуриди, антимопід і арсенід) – серед найбільш широко застосовуваних напівпровідникових матеріалів. Сульфід

цинку застосовують для покриття світних екранів телевізорів, осцилографів, рентгенівських апаратів. З'явилися акумулятори з електродами зі срібла і цинку.

Припої – спеціальні сплави, що застосовуються при пайці. Пайка здійснюється або з метою створення механічно міцного (іноді герметичного) шва, або з метою одержання електричного контакту з малим перехідним опором.

Припій змочує метал, розтікається по ньому і заповнює зазори між деталями, що з'єднуються. Припоєю дифундує в основний метал і розчиняє його, в результаті чого утворюється проміжний прошарок, який після застигання з'єднує деталі.

Припої поділяють на дві групи - м'які і тверді. До м'яких відносять припої з температурою плавлення до 400°C. До твердих - з температурою плавлення вище 500°C. **М'якими припоями** є олов'яно-свинцеві сплави (ПОС) з вмістом олова від 18% (ПОС-18) до 90% (ПОС-90). Питома провідність цих припоїв складає від 9 до 13% питомої провідності чистої міді. Існують також м'які припої з добавками алюмінію, срібла. Ще більш легкоплавкими є припої, до складу яких входять, крім олова і свинцю, вісмут і кадмій (сплав Вуда: 50% Ві, 25% Рб, 12,5% Sn, 12,5% Cd з температурою плавлення 68°C; був винайдений англійським інженером Вудом у 1860). Вони застосовуються там, де потрібна знижена температура пайки.

Найбільш вживані срібні припої: ПСР-10, ПСР-12, ПСР-25. Цифра вказує на процентний вміст срібла (інше – мідь і 1% цинку). Паяний ними шов не тільки міцний і щільний, але і корозійно стійкий. Чим вище вимоги до міцності і корозійної стійкості паяного шва, тим більше срібла має містити припій. В окремих випадках використовують припої з 70% срібла. Для пайки титана придатне лише чисте срібло. М'який свинцево-срібний припій нерідко застосовують як заміник олова.

Флюси – матеріали, що використовуються для одержання надійної пайки шляхом видалення окислів металів і таким чином сприяють лудінню. Бувають кислотними (при монтажній пайці електрорадіоприладів їхнє застосування заборонене), безкислотними (на основі спирту, гліцерину), активовані (на основі каніфолі), антикорозійні (на основі фосфорної кислоти).

СПЛАВИ ДЛЯ ТЕРМОПАР

Для виготовлення термопар застосовуються мідь, платина і наступні сплави:

- 1) копель (56% Cu і 44% Ni);
- 2) алюмель (95% Ni, інше - Al, Si і Mg);
- 3) хромель (90% Ni і 10% Cr);
- 4) платинородій (90% Pt і 10% Rh);
- 5) вольфрам-реній-1 (95% W, 5% Re);
- 6) вольфрам-реній-2 (80% W, 20% Re).

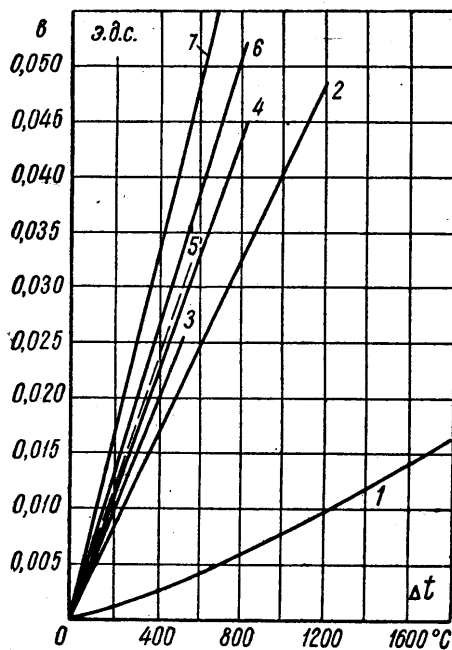


Рис. 12.1. Залежності термо-е.р.с. від різниці температур спаїв термопар: 1 – платинородій-платина; 2 – хромель-алюмель; 3 – мідь-константан; 4 – залізо-константан; 5 – мідь-копель; 6 – залізо-копель; 7 – хромель-копель

На рис. 12.1 наведені криві залежності термо-е.р.с. від різниці температур гарячого і холодного спаїв для найбільш уживаних термопар. Сплав молібдену з вольфрамом у парі з чистим вольфрамом можна використовувати для вимірювання температури до 2900°C у інертній атмосфері.

Температурний діапазон використання різних термопар:

- вольфрам-реній-1 - вольфрам-реній-2 – 0-2500°C;
- платинородій-платина – 0-1600°C;
- хромель-алюмель - -200-1000°C;
- хромель-константан - -200-700°C;
- хромель-копель - -200-600°C;
- мідь-копель - -200-100°C;
- мідь-константан - -200-400°C;
- залізо-константан- -200-700°C.

Найбільшу термо-е.р.с. за рівних інших умов розвиває термопара хромель-копель (0,6 мВ на 10°C). Знак термо-е.р.с.

у приведених на рис. 12.1 термопар такий, що в холодному спаї струм йде від першого названого в парі матеріалу до другого (тобто від хромелі до копелі, від міді до константану і т.д.), а в гарячому спаї - у зворотньому напрямку.

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ ВУГІЛЛЯ

Електротехнічне вугілля використовують для створення електричного контакту між рухомими частинами провідників. Необхідні характеристики: достатньо низький електричний опір і коефіцієнт тертя.

З електротехнічного вугілля виготовляють щітки електричних машин, контакти для тролейбусів, трамваїв і електропоїздів, електроди для прожекторів, електроди для печей і електролітичних ванн, аноди гальванічних елементів. Вугільні порошки використовують у мікрофонах для створення опору, що змінюється від звукового тиску. З вугілля виготовляють високоомні регульовані резистори, розрядники для телефонних мереж; вугільні вироби застосовують у електровакуумній техніці.

Питомий опір **вугільних і графітованих електродів** (при високих температурах вуглець набуває структури графіта - графітування) відповідно 50 і 15 мкОм·м, тобто у 3000 і 880 разів більше, ніж у міді. У діапазоні температур від 0 до 1750°C питомий опір вугільних електродів знижується лише на 30%.

Як сировину для виробництва електровугільних виробів використовується сажа, природний графіт або антрацит. Для одержання стрижневих електродів здрібнена маса зі зв'язувальною речовиною, у якості якої використовується

кам'яновугільна смола (іноді рідке скло), продавлюється через мундштук.

Контактний елемент багатьох електричних машин – щітки - служать для утворення ковзного контакту між нерухомою й обертовою частинами електричної машини, тобто для підведення (або відводу) струму до колектора або контактних кілець. Розрізняють щітки **вугільно-графітні** (позначення Т і УГ), **графітні** (позначення Г), **електрографітовані** (термічно електрооброблені, позначення ЕГ), мідно-графітні (з вмістом металевої міді, позначення М і МГ). Щітки з вмістом порошкового металу мають особливо малий електричний опір і дають незначне контактне спадання напруги (між щіткою і колектором).

Вугільні порошки для мікрофонів виготовляються з антрациту. Мікрофонні порошки випускають двох типів: дрібнозернисті і крупнозернисті. Опір порошоків вимірюють у кубіку об'ємом 1 см³, опір дрібнозернистого порошку повинний бути 400 Ом·см.

Непроводові резистори з природного графіту (природний графіт являє собою одну з модифікацій чистого вуглецю шаруватої структури, з великою анізотропією як електричних, так і механічних властивостей), сажі (сажі є дрібнодисперсними різновидами вуглецю), піролітичного вуглецю (отримують в результаті термічного розкладу без доступу кисню - піроліз), боровуглецеві плівки, а також високоомні сплави металів, відрізняються від прововодних значно меншими розмірами і високою верхньою межею номінального опору. Знаходять широке застосування в автоматичній, у вимірювальній і лічильно-обчислювальній техніці і деяких інших областях електротехніки. Мають малу залежність опору від напруги і відрізняються високою стабільністю при зміні температури і вологості.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть характерні особливості вольфраму і молібдену.
2. Чому вольфрам і молібден швидко згоряють на повітрі при високій температурі, а ніхроми – ні?
3. Які метали використовують для виготовлення припоїв?
4. Яка характеристика зумовлює вибір металу або сплаву для виготовлення термопари?
5. Що таке неметалеві провідники? Наведіть приклади.

ЛЕКЦІЯ 13

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МАГНЕТИЗМ

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Провідники зі струмом, провідники зі струмом і магніти а також магніти взаємодіють між собою. Ця взаємодія здійснюється за допомогою магнітного поля. Величина сили, що діє на провідник одиничної довжини зі струмом у магнітному полі, визначається законом Ампера

$$\Delta F = i \cdot \Delta l \cdot B \cdot \sin \beta,$$

де i – сила струму, Δl – одинична довжина провідника (є вектором, напрямком якого збігається з напрямком струму), B – індукція магнітного поля, β - кут між вектором B і напрямком струму.

Індукція магнітного поля B чисельно дорівнює силі, з якою магнітне поле взаємодіє з одиничним елементом струму ($i \cdot \Delta l = 1$), розташованим перпендикулярно векторові індукції. Вимірюється в Тл. Один Тесла – це індукція поля, що діє на одиничний елемент струму ($i \cdot \Delta l = 1$ А·м), розташований перпендикулярно векторові індукції, із силою в 1 Н. Залежить від властивостей середовища.

Напруженість магнітного поля H чисельно дорівнює індукції магнітного поля у вакуумі. Не залежить від властивостей середовища, а визначається силою струму і формою провідника.

Відношення $B/H = \mu_a$ називається **абсолютною магнітною проникністю** середовища.

Напруженість магнітного поля H – векторна величина, що збігається в однорідному середовищі за напрямком з вектором магнітної індукції, але за величиною в μ_a раз менше його. У системі СІ вимірюється в А/м.

Відносна магнітна проникність дорівнює $\mu = \mu_a / \mu_0$, де μ_0 – магнітна проникність вакууму ($\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ Тл·м/А).

Напрямок сили, що діє на провідник зі струмом у магнітному полі, визначається правилом лівої руки: якщо розташувати долоня лівої руки так, щоб силові лінії магнітного поля входили в неї, а витягнуті пальці вказували напрямку струму, то відставлений великий палець укаже напрямку дії сили (рис. 13.1).

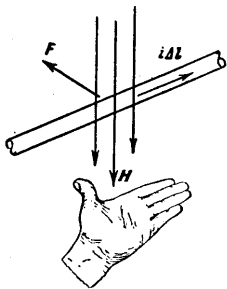


Рис. 13.1. Правило лівої руки

Два паралельних провідники зі струмом притягаються, якщо напрямок їхніх струмів збігається, і відштовхуються, якщо струми спрямовані в протилежні сторони.

Вектор намагнічування I є мірою намагнічування магнетика і дорівнює векторній сумі всіх магнітних моментів молекул, що знаходяться в одиниці об'єму

речовини. Вектор намагнічування пропорційний векторові напруженості магнітного поля:

$$I = k \cdot H,$$

де k - магнітна сприйнятливість (безрозмірна величина), $\mu = 1 + k$.

Крива, що виражає залежність між H і B або H і I , називається **кривою намагнічування**. Речовини, для яких $k > 0$ (але незначно), називаються **парамагнетиками**, $k < 0$ – **діамагнетиками**, $k \gg 1$ – **феромагнетиками**.

МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

Найбільш важливими в електротехніці магнітними матеріалами є феромагнітні речовини і феримагнітні хімічні сполуки – ферити.

Явище феромагнетизму пов'язане з утворенням в матеріалах мікрообластей спонтанної намагніченості до насичення, які називають **магнітними доменами**. Характерною властивістю феромагнітних матеріалів є наявність у них мимовільної (спонтанної) намагніченості у відсутності зовнішнього магнітного поля. Напрямки магнітних моментів окремих доменів при відсутності зовнішнього магнітного поля довільні. Під впливом зовнішнього магнітного поля домени орієнтуються вздовж його ліній, багаторазово підсилюючи магнітний потік.

Монокристали феромагнітних речовин характеризуються магнітною анізотропією, тобто ступінь намагнічування уздовж різних осей суттєво відрізняється. На рис. 13.2

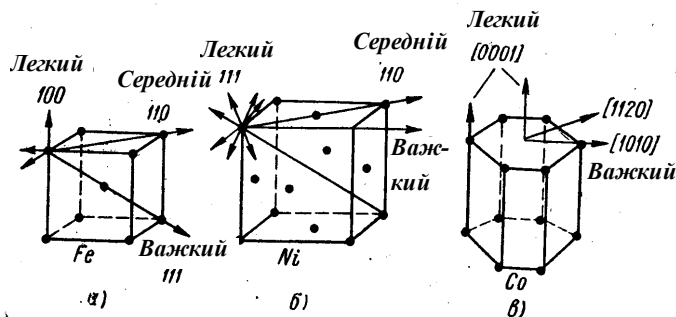


Рис. 13.2. Анізотропія магнітних властивостей в монокристалах заліза (а), нікелю (б) і кобальта (в)

показані легкі, середні і важкі напрямки намагнічування в монокристалах трьох основних феромагнітних елементів: заліза, нікелю і кобальта. Легким напрямком намагнічування для монокристала заліза є ребро куба, а найбільш важким - діагональ; для кристалічної ґратки нікелю напрямком

вздовж ребра куба відповідає напрямкові важкого намагнічування.

У тих випадках, коли анізотропія в полікристалічних магнетиках виражена досить різко, прийнято говорити, що феромагнетик має **магнітну текстуру**. Одержання заданої магнітної текстури використовується для створення підвищених магнітних характеристик матеріалу в потрібному напрямку.

Процес намагнічування феромагнітного матеріалу під впливом зовнішнього магнітного поля зумовлений: 1) ростом доменів, магнітні моменти яких складають найменший кут з напрямком поля; 2) поворотом векторів магнітних моментів у напрямку зовнішнього поля.

Магнітне насичення – це найбільше можливе для даного матеріалу намагнічування, яке досягається, коли ріст доменів досягає максимуму і їхні

магнітні моменти орієнтуються в напрямку поля.

Магнітострикція – явище зміни феромагнетиком своїх лінійних розмірів (деформування) під дією зовнішнього магнітного поля. Величина і напрямок деформації залежить від природи феромагнетика і напруженості магнітного поля. Величина магнітострикційного ефекту не залежить від напрямку поля: нікель під дією магнітного поля коротшає, а залізо – подовжується (у слабких полях, але при істотній зміні величини напруженості поля може коротшати).

Вілларі-ефект – явище, зворотне магнітострикції: зміна намагніченості при деформуванні феромагнетика (явище відкрите італійським фізиком Вілларі у 1865р.).

Величина магнітострикції монокристала заліза різна для різних напрямків. Монокристал заліза, намагнічений у напрямку ребра куба, подовжується в напрямку діагоналі і стискається в напрямку намагнічування. Магнітострикція має місце й у полікристалічних матеріалах. З трьох основних феромагнітних металів (Fe; Ni; Co) найбільшу магнітострикцію має нікель.

Протікання процесів намагнічування феромагнітного матеріалу характеризують кривими намагнічування $B=f(H)$. На рис. 13.2 наведені криві намагнічування ряду магнітних матеріалів.

Відносна магнітна проникність на практиці визначається як відношення індукції B до напруженості магнітного поля H в даній точці кривої намагнічування (рис. 13.3):

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$

Магнітну проникність μ при $H \approx 0$ називають **початковою проникністю**, визначаючи її величину при дуже слабких полях (близько 0,1 А/м).

Найбільше значення магнітної проникності носить найменування **максимальної проникності** і позначається μ_{max} . В сильних полях в області насичення

магнітна проникність наближається до одиниці.

Характеристикою феромагнетиків у перемінних магнітних полях є величина динамічної магнітної проникності.

Динамічна магнітна проникність μ_d – це відношення амплітудного значення індукції до амплітудного значення напруженості магнітного поля. Зі збільшенням частоти перемінного поля динамічна магнітна проникність

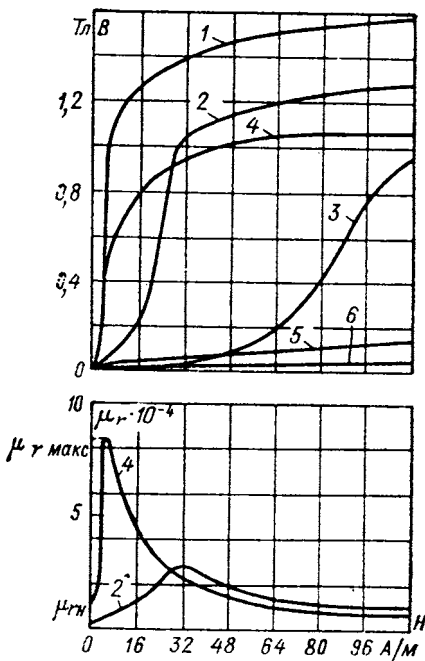
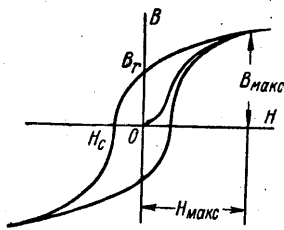


Рис. 13.3. Залежності магнітної індукції і магнітної проникності від напруженості магнітного поля: 1 – 100%Fe; 2 – 99,98%Fe; 3 – 99,92%Fe; 4 – пермалой; 5 – нікель; 6 – Fe+26%Ni

зменшується через інерційність магнітних процесів.

Магнітна проникність феромагнітних матеріалів суттєво залежить від температури, досягаючи максимуму при температурах, близьких до точки Кюрі (для чистого заліза – 768°C, для нікелю – 358°C, для кобальту – 1131°C). При температурах вище точки Кюрі області спонтанного намагнічування руйнуються тепловим рухом і матеріал перестає бути магнітним.

Для характеристики зміни магнітної проникності з температурою використовується **температурний коефіцієнт магнітної проникності**:



$$\alpha_{\mu} = \frac{1}{\mu_t} \cdot \frac{d\mu}{dt},$$

де μ_t - постійна матеріалу.

При зміні напруженості магнітного поля величина індукції магнітного поля також змінюється, але з деяким відставанням за фазою. Залежність між ними має вигляд петлі гістерезису (рис. 13.4).

Зміна знака напруженості магнітного поля викликає **перемагнічування матеріалу**.

Рис. 13.4. Залежність між напруженістю магнітного поля і магнітною індукцією для феромагнітного матеріалу

Максимальна величина індукції магнітного поля для даного матеріалу B_{\max} досягається при його намагнічуванні до насичення. Значення B при $H=0$ у процесі розмагнічування зразка, намагніченого до насичення, називається **залишковою індукцією B_r** . Для того щоб зменшити індукцію від значення B_r до нуля (тобто розмагнітити матеріал), необхідно прикласти зворотню напруженість поля H_c , що називається **коерцитивною (або затримуючою) силою**.

Матеріали з малим значенням H_c і великою величиною магнітної проникності називаються **магнітом'якими матеріалами**.

Матеріали з великою коерцитивною силою і порівняно малою магнітною проникністю називаються **магнітотвердими матеріалами** (з магнітотвердих матеріалів виготовляються постійні магніти).

ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЇ НА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

Деформування феромагнетиків під дією зовнішнього або внутрішнього навантаження впливає на їхні магнітні властивості.

Так прикладення розтягуючої сили викликає різке зменшення магнітної проникності в матеріалах з негативною магнітострикцією (нікель). У матеріалах з позитивною магнітострикцією під дією розтягуючих напружень проникність зростає.

Внутрішні напруження у феромагнетиків виникають в результаті пластичного деформування, наприклад, при прокатці, куванні, протяжці й інших видах механічної обробки. При намагнічуванні вони перешкоджають росту доменів і орієнтації магнітних моментів у напрямку поля. Зі збільшенням

внутрішніх напружень магнітна проникність зменшується, а коерцитивна сила зростає.

Внутрішні напруження виникають також при наявності в матеріалі різних домішок або присадок, наприклад кобальту, хрому, вольфраму, або при гартуванні матеріалу. Використовуючи домішки або технологічну операцію гартування, можна штучно збільшити внутрішні напруження й одержати магнітотвердий матеріал. Для відновлення магнітних властивостей магнітом'які матеріали відпалюють, що знімає внутрішні напруження і викликає **рекристалізацію** (відновлення) зерен.

Магнітні властивості феромагнетиків залежать від величини зерна: у дрібнозернистих матеріалів коерцитивна сила більше, ніж у грубозернистих. Це пояснюється більшою поверхнею zdeформованих зерен у дрібнозернистих матеріалів, що приводить до збільшення коерцитивної сили.

ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ В ФЕРОМАГНЕТИКАХ

При перемагнічуванні феромагнетиків мають місце втрати енергії, які викликають розігрів матеріалу. Втрати енергії зумовлені: 1) гістерезисною залежністю між напруженістю й індукцією магнітного поля; 2) динамічними втратами. Динамічні втрати зумовлені **вихровими струмами**. Втрати на вихрові струми залежать від електричного опору феромагнетика: чим вище питомий опір феромагнетика, тим менше втрати на вихрові струми.

Втрати енергії на перемагнічування феромагнетика пропорційні площі петлі гістерезиса і частоті струму. Гістерезисне розсіювання енергії визначається за формулою:

$$W_h = \eta \cdot B_{\max}^n \cdot f \cdot V,$$

де η - коефіцієнт, що залежить від матеріалу; B_{\max} - максимальна індукція; n - показник ступеня ($n=1,6\dots 2,2$); f - частота струму; V – об'єм феромагнетика.

Розсіювання енергії на вихрові струми визначається за формулою:

$$W_f = \xi \cdot B_{\max}^2 \cdot f^2 \cdot V,$$

де ξ - коефіцієнт, що залежить від типу феромагнетика (зокрема, від його питомого опору) і форми. Оскільки W_f залежить від частоти у другому ступені, а величина W_h - у першому, то при високих частотах необхідно враховувати в першу чергу втрати на вихрові струми.

Запитання для самоперевірки:

1. Назвіть основні характеристики магнітного поля.
2. Чим зумовлене явище феромагнетизму?
3. Що таке феромагнетизм, діамагнетизм і парамагнетизм?
4. В чому полягає різниця між магнітострикцією і Віларі-ефектом?
5. Яка величина характеризує здатність феромагнетика перемагнічуватися?

ЛЕКЦІЯ 14

МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

Магнітні матеріали, що застосовують в електротехніці, поділяють на:

- 1) магнітом'які матеріали;
- 2) магнітотверді матеріали;
- 3) матеріали спеціалізованого призначення.

МАГНІТОМ'ЯКІ МАТЕРІАЛИ

Магнітом'які матеріали – матеріали, що мають високу магнітну проникність, невелику коерцитивну силу і малі втрати на гістерезис. Використовуються як сердечники трансформаторів, електромагнітів, у вимірювальних приладах і в інших випадках, коли необхідно за найменших втрат енергії досягти найбільшої індукції. Для зменшення втрат на вихрові струми в трансформаторах використовують магнітом'які матеріали з великим електричним опором, зазвичай застосовуючи магнітопроводи, зібрані з окремих ізольованих тонких листів.

Залізо – технічно чисте залізо (армко-залізо) звичайно містить невелику кількість домішок вуглецю, сірки, марганцю, кремнію й інших елементів (до 0,1%), які погіршують його магнітні, властивості. Через порівняно низький електричний опір використовується рідко, в основному для магнітопроводів постійного магнітного потоку.

Низьковуглецева електротехнічна листовая сталь – містить до 0,04% вуглецю і до 0,6% інших домішок. Випускається у вигляді листів товщиною від 0,2 до 4 мм. Відносна магнітна проникність - не менше 3500-4500, коерцитивна сила - до 100 А/м.

Кремнієва електротехнічна сталь – найбільш вживаний магнітом'який матеріал. Введенням кремнію досягається підвищення питомого опору сталі, що дає зниження втрат на вихрові струми і гістерезис, збільшення магнітної проникності, зменшення коерцитивної сили. Кремній несприятливо впливає на механічні властивості заліза, збільшуючи його крихкість і утруднюючи прокатку в листи. При вмісті кремнію понад 5% сталь стає дуже крихкою.

Листова електротехнічна сталь маркується буквою Э (Э11, Э12, Э13). Перша цифра вказує вміст кремнію у відсотках, друга – характеризує сталь за її електричними і магнітними властивостями.

Пермалой – залізо-нікелеві сплави. Характеризуються великим значенням початкової магнітної проникності в області слабких полів, що пов'язано з практичною відсутністю в них анізотропії і магнітострикції. Розрізняють високонікелеві і низьконікелеві пермалой. Високонікелеві пермалой містять 70-83% Ni, низьконікелеві – 40-50% Ni. Введення до складу пермалоя домішок Mo, Cr, Si, Mn підвищує його питомий опір. Домішка молібдену сприяє також зменшенню чутливості пермалоя до деформування.

Високонікелевий пермалой (79НМ, 80НХС) застосовується для

виготовлення сердечників малогабаритних дроселів, слабкострумівих малогабаритних трансформаторів звукового діапазону й імпульсних трансформаторів, а також у магнітних підсилювачах.

Низьконікелевий пермалой (45Н, 50НСХ)) має індукцію насичення майже вдвічі вищу, ніж високонікелевий, що дозволяє застосовувати низьконікелеві сплави в силових трансформаторах, дроселях і інших приладах, де потрібна висока концентрація магнітного потоку. Пермалої з прямокутною петлею гістерезису можуть використовуватися для сердечників магнітних підсилювачів, що переключають пристрої, випрямних установок і для елементів комп'ютерів.

Альсіфери – потрійні сплави заліза з кремнієм і алюмінієм. Оптимальний склад альсіфера: 9,5% Si, 5,6% Al, інше - Fe. Такий сплав відрізняється твердістю і крихкістю, тому виготовляється у вигляді фасонних виливок. Вироби з альсіфера: магнітні екрани, корпуси приладів і т.п. - виготовляються методами лиття з товщиною стінок не менш 2-3 мм через крихкість сплаву. Ця особливість обмежує застосування даного матеріалу. Завдяки крихкості альсіфера його можна розмелювати в порошок і використовувати поряд з карбонільним залізом для виготовлення високочастотних пресованих сердечників.

МАГНІТОТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ

Магнітотверді матеріали розділяють на:

- 1) леговані сталі, що гартуються на мартенсит;
- 2) литі магнітотверді сплави;
- 3) магніти з порошків;
- 4) магнітотверді ферити.

Матеріали для постійних магнітів характеризуються за коерцитивною силою, залишковою індукцією і максимальною енергією, що розсіюється магнітом (магнітна проникність матеріалів для постійних магнітів повинна бути мала, а коерцитивна сила велика).

Леговані сталі, що гартуються на мартенсит – ці сталі є найбільш доступним матеріалом для постійних магнітів. Вони легується добавками вольфраму, хрому, молібдену, кобальту (ЕХ, ЕХ5К5). Коерцитивна сила досягає 14 кА/м. **Мартенсит** – пересичений твердий розчин вуглецю в залізі, має голчасту структуру й утворюється в результаті гартування легової сталі.

Переваги постійних магнітів з легової сталі – відносна дешевизна і можливість механічної обробки. В даний час витісняються постійними магнітами з інших матеріалів з більш високими магнітними властивостями.

Литі магнітотверді сплави – потрійні сплави Al-Ni-Fe (сплави альні). Мають відносно велику магнітну енергію. При додаванні кобальту або кремнію магнітні властивості сплавів підвищуються. Сплав альні з добавкою кремнію називають **альнісі**, а сплав альні з кобальтом – **альніко**. Сплав альніко з найбільшим вмістом кобальту (24%) одержав назву **магніко**.

Недоліком сплавів типу альні, альніко і магніко є труднощі виготовлення з

них виробів точних розмірів внаслідок крихкості і твердості сплавів, що допускають обробку тільки шляхом шліфування. Сучасне маркірування сплавів системи Al-Ni-Fe поширюються на 11 складів. У марках сплавів прийняті наступні позначення: Ю - алюміній, Н - нікель, Д - мідь, К - кобальт, Т - титан, Б - ніобій, А - кристалічна текстура. Найбільше застосування мають сплави ЮНД4, ЮНДК24, ЮНДК15. Сплав ЮНД4 найбільш дешевий із усіх магнітотвердих залізо-нікель-алюмінієвих сплавів. Сплав ЮНДК24 застосовують тоді, коли важливо одержати особливо високі магнітні властивості в одному напрямку, а сплав ЮНДК15 - у тому випадку, коли потрібні порівняно високі магнітні властивості без магнітної анізотропії. Сплави зі спрямованою кристалізацією ЮН13ДК25БА, ЮНДК35Т5БА мають найбільший запас магнітної енергії, тому з них виготовляють малогабаритні магніти.

Магнітні властивості магнітотвердих матеріалів залежать від кристалографічної і магнітної текстур. У всіх магнітотвердих матеріалів найкращі магнітні властивості досягаються при значних спотвореннях кристалічних ґрат. Поліпшення магнітних властивостей магнітних сплавів обумовлені не тільки складом, але і спеціальною обробкою - охолодженням магнітів після виплавки в сильному магнітному полі. Якщо виплавлений магніт є анізотропним, то найкращі магнітні властивості він виявляє в тому напрямку, в якому при охолодженні на нього діяло магнітне поле.

Магніти з порошків виготовляються методами порошкової металургії. Розрізняють **металокерамічні магніти** і **магніти з зерен порошку**, скріплених зв'язуючою речовиною (металопластичні магніти). Виготовлення перших зводиться до пресування порошку, що складається з подрібнених тонкодисперсних магнітотвердих сплавів, і до подальшого його спікання при високих температурах за аналогією з процесами відпалу кераміки. Деталі при такій технології можна виготовляються досить точно і не вимагають подальшої обробки. Виготовлення других аналогічне пресуванню деталей із пластмас, але в порошок додається наповнювач з зерен подрібненого магнітотвердого сплаву.

Металокерамічні магніти (ММК1... ММК11) звичайно мають пористість 3-5%, а магнітна енергія і залишкова індукція в них на 10-20% нижче, ніж у литих магнітів з відповідного сплаву, зате за механічною міцністю вони переважають литі магніти в 3-6 разів. Коерцитивна сила 24-128 кА/м.

Магнітні властивості металопластичних магнітів низькі. Коерцитивна сила нижча на 10-15%, залишкова індукція – на 35-50%, а магнітна енергія – на 40-60% у порівнянні з литими магнітами. Зниження магнітних властивостей пояснюється великим вмістом (до 30%) немагнітної сполучної речовини. Металопластичні магніти мають високий електричний опір, що дозволяє застосовувати їх в апаратурі з наявністю перемінного магнітного поля підвищеної частоти.

Магнітотверді ферити – найбільш відомий барієвий ферит $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (**фероксдюр**). На відміну від магнітом'яких феритів, він має не кубічну, а гексагональну кристалічну ґратку з одноосною анізотропією. Промисловість випускає два види барієвих магнітів: марки БИ (барієві ізотропні) і марок БА

(барієві анізотропні). Технологія виробництва БИ подібна технології магнітом'яких феритів, у технологічному процесі виробництва БА операція пресування ведеться в магнітному полі певної орієнтації напруженістю 650-800 кА/м.

Магніти з ферита барію мають коерцитивну силу до 240 кА/м, що перевищує коерцитивну силу магнітів системи альні (145 кА/м), однак за залишковою індукцією і магнітною енергією вони поступаються цим сплавам.

Барієві магніти доцільно виготовляти у вигляді шайб і тонких дисків, вони відрізняються високою стабільністю по відношенню до впливу зовнішніх магнітних полів і не бояться тряски й ударів. Магніти з барієвого ферита можна використовувати при високих частотах. Недоліки барієвих магнітів – низька механічна міцність, значна крихкість, сильна залежність магнітних властивостей від температури. Крім того, вони виявляють необоротну зміну магнітних властивостей після охолодження від кімнатної до низької температури (-60°C) і нагрівання до початкової температури.

Матеріали для звукозапису. Для запису звуку використовують магнітотверді сталі і сплави, що дозволяють виготовляти з них дріт або льняні, а також целюлозні стрічки з покриттям з порошкоподібних феритів.

Вікалої відноситься до ковких магнітотвердих сплавів, з яких можна виготовляти стрічку і дріт. Склад вікалоя: 34% Fe; 52% Co; 14% V. Коерцитивна сила його 68 кА/м.

Як магнітний матеріал використовується магнітна стрічка з ацетилцелюлози з покриттям з магнетиту (оксид заліза Fe_3O_4).

МАТЕРІАЛИ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Спеціальні магнітом'які феромагнетики – це матеріали з особливостями магнітних властивостей, обумовлених структурою і складом:

1) Сплави, що відрізняються незначною зміною магнітної проникності при зміні напруженості поля.

Пермінвар – потрійний сплав Fe-Ni-Co з вмістом цих компонентів відповідно 30, 45 і 25%. Пермінвар має невелику коерцитивну силу. Початкова магнітна проникність пермінвару дорівнює 300 в інтервалі напруженості поля до 250 А/м при індукції 0,1 Тл. Однак магнітні властивості пермінвару чутливі до впливу температури і механічних напружень.

Більш стабільним є сплав **ізоперм**, до складу якого входять Fe, Ni і Al або Cu. Ізоперм має магнітну проникність 30-80, що мало змінюється в полях до напруженості кілька сотень А/м.

2) Сплави з різкою залежністю магнітної проникності від температури.

Термомагнітні сплави на основі: Ni-Cu, Fe-Ni, Fe-Ni-Cr, Fe-Ni-Co. Ці сплави застосовуються для компенсації температурної погрішності в установках, зумовленої зміною індукції постійних магнітів або опору проводів у магнітоелектричних приладах у порівнянні з тим значенням, при якому виконувалось градування. Для одержання різкої температурної залежності

магнітної проникності використовується властивість феромагнетиків знижувати індукцію з ростом температури поблизу точки Кюрі. Для зазначених феромагнетиків точка Кюрі лежить між 0 і 100°C в залежності від добавок легуючих елементів. Сплав Ni-Cu при вмісті 30% Cu може компенсувати погіршеності в температурних межах від –20 до 80°C, при 40% Cu - від –50 до +10°C.

3) Сплави з високою магнітострикцією.

Це сплави Fe-Pt, Fe-Co і Fe-Al. Такі сплави знаходять застосування в якості сердечників генераторів акустичних коливань при звукових і ультразвукових частотах. Поздовжня магнітострикція цих сплавів має позитивний знак, а відносна деформація коливається в межах $(40-120) \cdot 10^{-6}$. Найчастіше в цій якості використовується чистий нікель, що має значну магнітострикцію.

4) Сплави з особливо високою індукцією насичення.

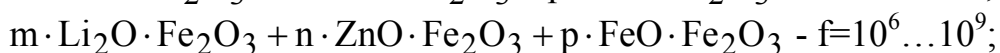
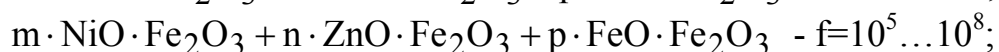
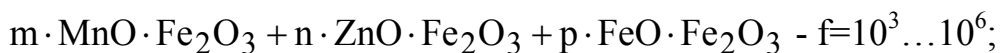
Залізо-кобальтові сплави – мають особливо високу індукцію насичення (до 2,4 Тл). Електричний опір таких сплавів невеликий. Сплави, що містять від 50 до 70% Co, називаються **пермендюрами**. Пермендюри можуть застосовуватися через їх високу вартість тільки в спеціальній апаратурі, зокрема в динамічних репродукторах, осцилографах, телефонних мембранах і т.п.

Феримагнетики (ферити) – це складні оксидні матеріали, що мають доменну структуру. Феримагнетики відрізняються від феромагнетиків меншою величиною індукції, мають більш складну температурну залежність індукції і підвищене або дуже високе значення питомого опору. Ферити тверді і крихкі матеріали, тому їх не можна різати, можна лише шліфувати і полірувати.

Ферити є магнітною керамікою з незначною електронною провідністю, внаслідок чого вони можуть бути віднесені до **електронних напівпровідників**. Велика величина питомого опору, що перевищує ρ заліза в 10^6-10^{11} разів, а отже, і відносно невеликі втрати енергії в діапазоні підвищених і високих частот і досить високі магнітні властивості забезпечують феритам широке застосування у високочастотних пристроях.

Ферити є системою з окислів заліза й окислів двовалентних, рідше одновалентних металів, що відповідають загальній формулі $MeO \cdot Fe_2O_3$, де Me - символ двовалентного металу. Ферити мають кубічні кристалічні ґратки. Більшість з'єднань зазначеного типу, як і природний магнітний залізняк (магнетит) $FeO \cdot Fe_2O_3$, мають магнітні властивості.

Технічні ферити є твердими розчинами декількох найпростіших з'єднань, у тому числі і неферомагнітних. В даний час використовуються наступні групи змішаних феритів: марганець-цинковий, нікель-цинкові і літій цинковий:



де коефіцієнти m , n , p визначають кількісні співвідношення компонентів. Процентний склад компонентів впливає на магнітні властивості матеріалу.

Технологічний процес виробництва феритових виробів зводиться до того, що попередньо одержують феритний порошок, що складається з подрібнених і попередньо відпалених окислів відповідних металів. У порошок додають пластифікатор - звичайно розчин полівінілового спирту, і з отриманої маси пресують під великим тиском вироби необхідної форми. Виріб відпалюють при температурі 1100-1400°C. При цьому відбувається спікання порошку і утворення твердих розчинів феритів. Відпалювання проводять в окисному середовищі (звичайно в повітрі). Недолік технології полягає в тому, що усадка феритів при відпалюванні може досягати 20%.

Магнітом'які ферити – до таких відносять **марганець-цинковий, нікель-цинковий і літій-цинковий** ферити. Характеризуються вузькою петлею гістерезису, високою магнітною проникністю і малою коерцитивною силою. У феритах спостерігається явище магніострикції. Ферити з низькою температурою Кюрі мають менший магніострикційний ефект.

Найбільш розповсюджене маркірування магнітом'яких феритів: спочатку приводять значення початкової магнітної проникності, потім букви, що позначають частотний діапазон застосування, що обмежується зверху значенням граничної частоти. Під **граничною частотою** розуміють частоту, при якій починається швидкий ріст тангенса кута втрат ферита. Ферити для звукових, ультразвукових і низьких радіочастот для стислості позначають буквою Н (низькочастотні, 2000НМ). Гранична частота їх для різних марок може лежати в межах від 0,1 до 50 МГц. У маркіруванні високочастотних феритів використовуються букви ВЧ, гранична частота - від 50 до 600 МГц (100ВЧ). Далі в маркіруванні йдуть букви, що позначають склад матеріалу: М - марганець-цинковий, Н - нікель-цинковий і т.п.

Магнітна проникність нікель-цинкових феритів підвищується з ростом температури до точки Кюрі і потім різко падає. Чим вище значення початкової проникності, тим нижче точка Кюрі фериту. Ферити мають відносно велику діелектричну проникність, що залежить від частоти поля і складу феритів. З підвищенням частоти діелектрична проникність феритів падає. Тангенс кута втрат феритів – від 0,005 до 0,1.

Ферити з прямокутною формою петлі гістерезису (ППГ) – використовуються для запам'ятовуючих пристроїв обчислювальної техніки. Матеріали з ППГ повинні забезпечувати малий час перемагнічування, можливо велику температурну стабільність магнітних характеристик, а отже, мати високу точку Кюрі.

Магніострикційні ферити – це матеріали з високим рівнем магніострикції (ферит заліза, пермалой, кобальтовий ферит). Використовуються як високочастотні перетворювачі електромагнітної енергії в інші види енергії (механічну), а також як датчики тиску.

Магніодіелектрики – характеризуються великим питомим опором і малими магнітними втратами, оскільки призначені для використання при підвищених частотах як сердечники котушок індуктивності, магнітопроводів

(магнітопровід – елемент магнітного ланцюга, що служить для локалізації потоку магнітної індукції). Їхня магнітна проникність практично не залежить від зовнішнього магнітного поля. Магнітодіелектрики одержують шляхом пресування порошкоподібного феромагнетика з ізолюючим органічним або неорганічним зв'язуючим. Як основу застосовують карбонільне залізо, пермалой, альсифер та ін. Ізолюючим зв'язуючим служать фенолформальдегідні смоли, полістирол, скло і т.п. Від основи вимагається наявність високих магнітних властивостей, від зв'язуючого – здатність утворювати між зернами суцільну ізолюючу плівку.

Конструкційні чавуни і сталі – чавуни і сталі бувають магнітні і немагнітні. До перших відносяться сірий чавун, вуглецеві і леговані сталі; до других - немагнітний сталі і немагнітний чавун.

Сірий чавун містить 3,2-3,5% вуглецю, кремній, марганець, фосфор, сірку. Сірий чавун застосовується для виливків корпусів електричних машин, кріпильних деталей, плит і ін. Чавунні виливки особливо великих розмірів не вимагають подальшої термічної обробки.

Вуглецева сталь з підвищеними механічними властивостями з вмістом вуглецю від 0,08 до 0,2% (вибір відпалюють при 850-900°C) використовується для виготовлення відповідальних деталей електричних машин. Підвищення міцності досягається легуванням сталі нікелем, ванадієм, хромом, молібденом. Межа міцності легованих сталей 500-950 МПа.

Немагнітний чавун – застосовується в тих випадках, коли наявність магнітних властивостей у конструкційному матеріалі не потрібна. Широко застосовується немагнітний чавун, що містить у своєму складі нікель і марганець. Немагнітні чавуни добре механічно обробляються. При нагріванні до 400°C вони зберігають свої парамагнітні властивості. Великий електричний опір немагнітного чавуна знижує втрати на вихрові струми в порівнянні з кольоровими сплавами. Магнітна проникність немагнітного чавуну $\mu=1,03$, питомий опір $\rho=1,4$ мкОм·м. Межа міцності 250-350 МПа. Немагнітний чавун використовують при виготовленні кришок, кожухів, втулок масляних вимикачів, обойм силових трансформаторів, кожухів зварювальних трансформаторів і т.п.

Немагнітні сталі – виготовляють шляхом введення нікелю і марганцю, що сприяє зниженню температури переходу γ -заліза в α -залізо до 20°C і нижче. Приклад немагнітної сталі: нікелева сталь, що має склад: 0,25-0,35% C; 22-25% Ni; 2-3% Cr. Межа міцності такої сталі 700-800 МПа, магнітна проникність $\mu=1,05$ -1,2.

Запитання для самоперевірки:

1. На які три великі групи поділяють магнітні матеріали і чим вони відрізняються?
2. Наведіть приклади магнітом'яких матеріалів.
3. Наведіть приклади магнітотвердих матеріалів.
4. Що таке технічні ферити і як вони виготовляються?
5. Чим відрізняються магнітні матеріали особливого призначення?

ЛЕКЦІЯ 15

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО НАПІВПРОВІДНИКИ

Матеріали з електронною електропровідністю, питомий опір яких при нормальній температурі лежить між питомими опороми провідників і діелектриків, відносять до напівпровідників. Електропровідність напівпровідників залежить від зовнішніх енергетичних впливів, а також від наявності спеціальних домішок.

Керованість електропровідністю напівпровідників за допомогою температури, світла, електричного поля, механічних зусиль покладена в основу принципу дії багатьох напівпровідникових пристроїв: терморезисторів (термісторів), фоторезисторів, нелінійних резисторів (варисторів), тензорезисторів і т.д.

Носіями заряду в напівпровідниках є **електрони провідності і дірки** (носії позитивного заряду). В ідеальних кристалах вони завжди з'являються парами, тому концентрації обох типів носіїв однакові. У кристалах, що містять домішки і дефекти структури, рівне співвідношення концентрацій електронів і дірок порушується й один з видів провідності стає переважним.

З'єднання напівпровідників з **електронною (n) і електронно-дірковою (p)** провідностями дозволяє одержати напівпровідникові вироби з p-n переходом. При існуванні в напівпровіднику p-n переходу виникає замикаючий шар, яким обумовлюється випрямляючий ефект для перемінного струму. Наявність двох і більше взаємно зв'язаних переходів дозволяє одержувати керовані системи – **транзистори**. На використанні можливостей p-n переходів засновані найважливіші застосування напівпровідників в електротехніці для виготовлення випрямлячів, підсилювачів і генераторів.

Напівпровідникові системи використовуються для перетворення різних видів енергії в енергію електричного струму з високими значеннями коефіцієнта перетворення (наприклад, сонячні батареї і термоелектричні генератори на основі напівпровідникових термоелементів).

Виготовлені з напівпровідникових матеріалів прилади мають наступні переваги:

- 1) великий термін служби;
- 2) малі габарити і вага;
- 3) простота і надійність конструкції,
- 4) велика динамічна міцність (не бояться тряски й ударів);
- 4) мала споживана потужність і інерційність;
- 5) економічні у виробництві.

ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Власні напівпровідники. Відповідно до зонної теорії твердого тіла (див. лекцію 1) для напівпровідників характерна наявність не дуже широкої забороненої зони в енергетичній діаграмі. Ширина забороненої зони

напівпровідникових елементів у електронвольтах (eВ) наведена в табл. 15.1. Для найбільше широко використовуваних напівпровідників вона складає величину порядку 1-3 eВ.

Таблиця 15.1. Хімічні елементи-напівпровідники

Елемент	Група таблиці Менделєєва	Ширина забороненої зони, [eВ]	Елемент	Група таблиці Менделєєва	Ширина забороненої зони, [eВ]
Бор	III	1,1	Сірка	VI	2,5
Кремній	IV	1,12	Селен	VI	1,7
Германій	IV	0,72	Телур	VI	0,36
Фосфор	V	1,5	Йод	VII	1,25

На рис. 15.1 (а) наведена енергетична діаграма для власного напівпровідника, у якого електрони в зону вільних енергетичних рівнів можуть поставитися тільки з валентної зони.

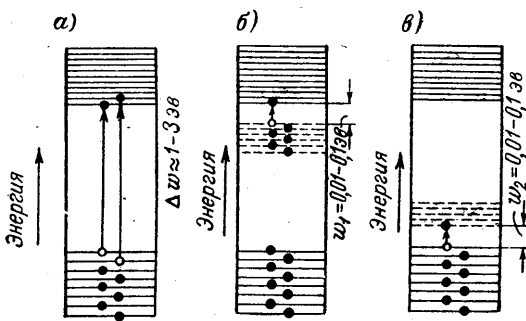


Рис. 15.1. Енергетичні діаграми власного напівпровідника (а), напівпровідника з донорською (б) і акцепторною (в) домішкою

Розподіл електронів за енергією відповідає температурі T , при якій у зону провідності переходить кілька електронів, утворюючи у валентній зоні відповідне число дірок.

При цьому у власному напівпровіднику одночасно створюються два носії заряду протилежних знаків, тому загальна кількість носіїв заряду буде в два рази більше числа електронів у зоні

провідності. При будь-якій температурі тіла встановлюється рівноважна концентрація носіїв обох зарядів. Власна електропровідність таких напівпровідників має слабо переважний електронний характер.

ВПЛИВ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Електропровідність напівпровідників з підвищенням температури збільшується. Ріст питомої провідності напівпровідників зумовлений зростанням з температурою концентрації носіїв заряду.

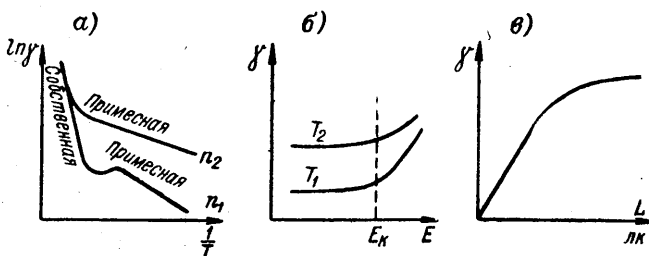


Рис. 15.2. Залежність провідності напівпровідника від температури (а), напруженості електричного поля (б) і освітленості (в)

Криві залежності питомої провідності від температури наведені на рис. 15.2 (а). Відрізки прямих в області низьких температур характеризують домішкову електропровідність (n_1 і n_2 характеризують концентрацію домішок) при

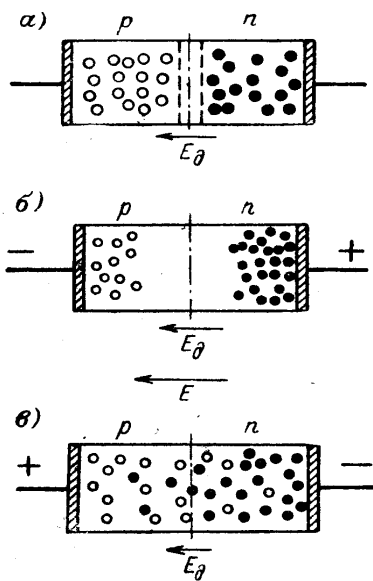


Рис. 15.3. Принцип роботи напівпровідникового випрямляча з p-n переходом

різній концентрації носіїв, потім має місце перехідна ділянка (домішкові рівні "виснажилися") і далі, в області високих температур, проявляється власна електропровідність напівпровідника.

При ширині забороненої зони германія 0,72 eV число власних носіїв заряду в ньому при кімнатній температурі складає величину порядку 10^{13} см^3 , у той час як домішки, що складають тисячну частку відсотка, при малій енергії активації вносять у нього в десятки тисяч разів більшу кількість вільних зарядів. Тому, для керування електропровідністю напівпровідників за допомогою домішок, що вводяться в нього спеціально, основний напівпровідник спочатку повинен бути ретельно очищений від випадкових домішок. На 10^8 - 10^9 атомів основної

речовини повинно бути не більш одного чужорідного атома.

Температурний коефіцієнт питомого опору напівпровідників зменшується з підвищенням температури і знаходиться в прямій залежності від енергії активації напівпровідника.

Електропровідність напівпровідників залежить від **напруженості електричного поля**. На рис. 15.2 (б) показані криві залежності питомої провідності напівпровідника від напруженості електричного поля при різних температурах. Як видно, при низьких значеннях напруженості поля (до деякого значення E_K) діє закон Ома і питома провідність не залежить від напруженості поля. При більш високих напруженостях поля починається ріст питомої провідності за експонентою. Зростання провідності зумовлене ростом числа носіїв заряду, тому що під впливом поля вони більш легко вивільняються тепловим збудженням. При подальшому рості напруженості поля може з'явитися механізм ударної іонізації, що приводить до руйнування структури напівпровідника.

Опромінення напівпровідників **світловою енергією** приводить, як правило, до збільшення провідності (рис. 15.2 (в)). Кванти видимого світла мають енергію 1,5-3 eV, а тому здатні перекидати електрони з заповненої зони в зону провідності. Фотопровідність залежить від частоти випромінювання і температури навколишнього середовища. Зниження температури збільшує чутливість напівпровідників до освітлення.

Питома провідність напівпровідників змінюється від деформації внаслідок збільшення або зменшення (при розтягуванні або стисканні) відстаней між атомами, що приводить до зміни концентрації і рухливості носіїв. У різних напівпровідників одна й та ж сама деформація може спричинити як збільшення, так і зменшення питомої провідності в залежності від того, зменшується чи

збільшується ширина забороненої зони.

Величиною, що чисельно характеризує зміну питомої провідності (або питомого опору) напівпровідників при деформації, є **тензочутливість**, що є відношенням відносної зміни питомого опору напівпровідника до його відносної деформації.

ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВИЙ ПЕРЕХІД

При протіканні струму через контактуючі області напівпровідника з дірковою і електронною електропровідностями проявляється ефект одnobічної провідності системи. На малюнку рис. 15.3 зображена напівпровідникова пластинка, одна половина якої є дірковим напівпровідником р-типу, а інша - електронним n-типу. При цьому в цілому кожна частина нейтральна, тому що має місце рівновага рухомих і нерухомих зарядів. Нерухомі заряди на рисунку не показані.

Границя між областями р і n одержала назву **р–n - переходу**.

Через те, що концентрація вільних електронів в області n більше, ніж у р, а дірок - навпаки, частина електронів під впливом теплової дифузії піде в область р, а деяка кількість дірок - в область n. При цьому область р переходу заряджена негативно, а область n - позитивно. Внаслідок цього виникає дифузійне поле (рис. 15.3 (а)), напрямом якого визначиться знаками нерухомих зарядів. Воно припиняє подальше переміщення рухомих зарядів, тобто ще у відсутності зовнішньої напруги утворюється замикаючий шар. Якщо прикладена ззовні напруга (рис. 15.3 (б)) створює електричне поле, що збігається з дифузійним, то перехід буде "замкнений" і струм не піде. При зміні полярності прикладеної напруги зовнішнє поле буде спрямовано в протилежну сторону відносно дифузійного, перехід виявиться насиченим носіями заряду, опір його різко понизиться, тобто через нього потече великий за величиною прямий струм (рис. 15.3 (в)). Використання властивостей р-n - переходів дозволяє виготовляти силові напівпровідникові випрямлячі, діоди, фотоелементи, транзистори й інші прилади.

Транзистор (напівпровідниковий тріод) є пластиною напівпровідника, у якій між двома областями з однотипною електропровідністю знаходиться область електропровідності протилежного типу. Електричні контакти з цими областями носять назву вхід (емітер), вихід (колектор) і загальний електрод (база). Струмом у ланцюзі колектора можна керувати за допомогою змін напруги і струму в ланцюзі емітера. Розрізняють транзистори з n-p-n і p-n-p переходами.

Фоторезистори – напівпровідникові пристрої, електричний опір яких суттєво залежить від рівня освітленості. Застосовуються для підрахунку деталей при конвеєрному виробництві, при контролі рівня рідких і сипучих тіл, у фотокопіювальних верстатах для обробки деталей за кресленням, для світлової сигналізації, для сигналізації про появу диму і контролю ступеня згоряння палива, у верстатах із програмним керуванням, у пристроях автоматичного захисту пресів холодного штампування й інших верстатів.

Терморезистори – напівпровідникові пристрої, електричний опір яких суттєво залежить від температури. Виготовляються у виді стержнів, пластинок або таблеток методами керамічної технології. Опір і інші властивості терморезисторів залежать не тільки від складу, але і від величини зерна, від технологічного процесу виготовлення: тиску при пресуванні і температури відпалу. Приклад терморезисторів: мідно-марганцеві терморезистори ММТ-1 і ММТ-4.

З напівпровідникової кераміки, у якої низька точка Кюрі (125°C), виготовляються терморезистори, що відрізняються від всіх інших тим, що вони мають не негативний, а дуже великий позитивний температурний коефіцієнт опору (понад +20%/град) у вузькому інтервалі температур (порядку 10°C). Такі терморезистори іноді називають **позисторами**. Позистори виготовляються у вигляді дисків невеликої товщини і призначаються для контролю і регулювання температури, використання в системах пожежної сигналізації, запобігання двигунів від перегріву, обмеження струмів, виміру потоків рідин і газів.

Запитання для самоперевірки:

1. Які матеріали відносять до напівпровідників?
2. Як зовнішні фактори впливають на електропровідність напівпровідників?
3. Що таке електронна і діркова провідність?
4. Які переваги мають пристрої на основі напівпровідників?
5. Які напівпровідникові пристрої ви знаєте і який принцип їхньої дії?

ЛЕКЦІЯ 16

НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Напівпровідникові матеріали поділяються на:

- 1) прості напівпровідники (хімічні елементи),
- 2) напівпровідникові хімічні сполуки;
- 3) багатофазні напівпровідники (композиції);
- 4) склоподібні і рідкі напівпровідники.

ХІМІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ З ВЛАСТИВОСТЯМИ НАПІВПРОВІДНИКІВ

З простих напівпровідників найбільш вживаними є германій, кремній і селен (див. табл. 15.1).

Германій. Кількість германія в земній корі невелика. У результаті хімічної переробки вихідної сировини утворюється тетрахлорид германія, який переводять у двоокис германія (GeO_2) - порошок білого кольору. Двоокис германія відновлюється у водневій печі при температурі $650-700^\circ\text{C}$ до елементарного германія, що представляє собою сірий порошок.

Злитки германія використовують як вихідний матеріал для одержання особливо чистого германія методом зонної плавки або ж для безпосереднього одержання монокристалів методом витягування з розплаву. У германії в невеликих концентраціях звичайно присутні Ni, Ca, Cu, Mn, As, Fe, Si.

Германій застосовується для виготовлення випрямлячів перемінного струму на різні потужності, транзистори різних типів. З нього виготовляються датчики е.р.с. Холла й інших гальваноманітних ефектів, застосовувані для вимірювання напруженості магнітного поля, струмів і потужності і т.д.

Оптичні властивості германія дозволяють використовувати його для виготовлення фототранзисторів і фоторезисторів, оптичних лінз із великою світлосилою (для інфрачервоних променів), оптичних фільтрів, модуляторів світла і коротких радіохвиль. Германієві прилади повинні бути захищені від вологи.

Кремній. Кремній, як і германій, відноситься до ковалентних кристалів четвертої групи таблиці Менделєєва і має кубічні ґратки типу алмаза. Це один з найбільш розповсюджених елементів земної кори.

Електропровідність кремнію, як і германія, дуже сильно залежить від присутності домішок. Використовується для виготовлення діодів, тріодів, фотоелементів.

Селен. Елемент шостої групи таблиці Менделєєва. Існує в декількох різновидах - як аморфних, так і кристалічних. Сірий кристалічний селен має гексагональну структуру. Питомий опір селена змінюється в дуже широких межах і залежить від роду і концентрації домішок, температури і освітленості.

Домішки галоїдів (хлору, бром, йода) зменшують питомий опір селена, якщо концентрація цих домішок менше $5-10^{-4}\%$ за вагою. При подальшому збільшенні вмісту цих домішок опір зростає. Домішки телуру, ртуті і ряду

інших металів збільшують опір технічно чистих зразків селена.

Селен застосовується для виготовлення випрямлячів і фотоелементів із замикаючим шаром. Пробіи селенових випрямлячів відбувається при перенарузі з амплітудою порядку 80 В, причому в ряді випадків пробите місце заплавляється шаром аморфного селена з дуже малою провідністю, і випрямляч може продовжувати роботу. Температурний інтервал роботи селенових випрямлячів складає від -60 до $+75^{\circ}$ С. Чутливість селенових фотоелементів залежить від довжини хвилі падаючого світла і доходить до 500мкА/лм. Коефіцієнт корисної дії селенового фотоелемента малий - близько 0,2%.

ДОМІШКОВІ НАПІВПРОВІДНИКИ

Домішкові напівпровідники використовуються у більшості напівпровідникових приладах. У робочому інтервалі температур постачальниками вільних носіїв зарядів у таких напівпровідниках є домішки.

Під **домішками** в напівпровідникових хімічних сполуках розуміють:

- 1) включення атомів сторонніх елементів;
- 2) надлишкові атоми елементів, що входять у хімічну формулу самого з'єднання;
- 3) дефекти кристалічних ґрат: порожні вузли, атоми або іони між вузлами ґрат, дислокації або зсуви, що виникають при пластичній деформації кристала, мікротріщини.

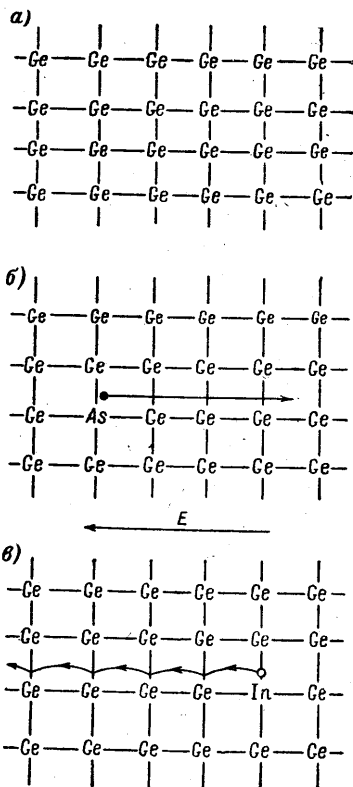


Рис. 16.1. Кристалічна ґратка германія без домішок (а), з донорською (б) і акцепторною (в) домішками

Якщо домішкові атоми знаходяться у вузлах кристалічних ґрат, то вони називаються **домішками заміщення**, а якщо між вузлами – то **домішками впровадження**.

Донори й акцептори. Домішки, що поставляють електрони в зону провідності напівпровідника називають **донорами** (рис. 16.1 (б)). Домішки, що захоплюють електрони з валентної зони напівпровідника, називають **акцепторами** (рис. 16.1 (в)).

Носії заряду, концентрація яких у даному напівпровіднику більше, зветься **основними**, а ті, концентрація яких менше – **неосновними**.

Так, у напівпровіднику n-типу електрони є основними носіями, а дірки - неосновними. У напівпровіднику р-типу основні носії - дірки, а неосновні - електрони.

Домішкова електропровідність для своєї появи вимагає менших енергетичних впливів (0,01-0,1 еВ), ніж власна, тому вона має

місце при нижчих температурах, ніж власна електропровідність напівпровідника.

ДОМІШКИ ЗАМІЩЕННЯ

Ковалентні структури типу алмаза. Германій і кремній - елементи четвертої групи таблиці Менделєєва - мають структуру алмаза, у якій кожен атом оточений чотирма найближчими сусідами. У даній структурі діють ковалентні зв'язки. Валентні електрони закріплені за своїми атомами і не переміщуються по кристалу. Якщо на місце одного з атомів напівпровідника (у даному випадку германія) у який-небудь вузол ґратки попадає сторонній атом іншої хімічної природи й іншої валентності, то система валентних зв'язків у цьому місці кристала виявляється порушеною, і можуть бути два випадки, що пояснюються рис. 16.1 (б) і (в).

На рис. 16.1 (б) наведена кристалічна ґратка германія з домішкою миш'яку (елемент п'ятої групи), у якого на зовнішній орбіті розташовано п'ять електронів. Потрапивши у вузол ґрат германія і зв'язавши чотири зі своїх електронів, така домішка дає надлишковий слабо зв'язаний електрон, що під впливом теплової енергії може почати безладно блукати по кристалу, а під впливом електричного поля буде направлено переміщатися (електропровідність типу n). Атом домішки, що втратив електрон, є позитивно зарядженою частинкою, нерухомо закріпленою в даному місці ґратки напівпровідника. У цьому випадку домішка елемента п'ятої групи періодичної системи буде донорською.

На рис. 16.1 (в) зображена кристалічна ґратка германія з домішкою елемента третьої групи – індію, що має на зовнішній орбіті три валентних електрони. Така домішка в ґратках германія створює дірку, запозичаючи електрон в одного із сусідніх атомів германія. Атом домішки, що приєднав електрон, являє собою негативно заряджену частку, нерухомо закріплену в даному місці ґрат напівпровідника. Дірка може блукати по кристалу. При накладанні електричного поля, як показано на рисунку, електрон буде узятий від лівого атома германія, що при цьому одержує позитивний заряд і, у свою чергу, захопить електрон від наступного атома, тобто дірка почне направлено пересуватися справа наліво (електропровідність типу p). Насправді в цьому випадку рухаються тільки електрони, але їхнє естафетне перескакування з атома на атом можна формально описати як рух однієї дірки, що переміщається в напрямку, зворотньому напрямкові руху електронів, тобто в напрямку поля. Домішка елемента третьої групи періодичної системи є акцепторною.

Ковалентні напівпровідникові з'єднання. У напівпровідникових з'єднаннях, наприклад $A^{III}B^V$, зазвичай домішкові атоми заміщення II групи (Mg, Zn і ін.), що мають меншу валентність, є акцепторами. Домішкові атоми VI групи (Se, Te), що мають більшу валентність, будуть донорами. Домішкові атоми IV групи в напівпровідникових з'єднаннях $A^{III}B^V$ можуть бути і донорами, і акцепторами, в залежності від того, який атом з'єднання заміщається домішковим атомом. Якщо, наприклад, домішковий

чотиривалентний атом заміщає в ґратах InAs тривалентний атом In, то він буде донором, якщо п'ятивалентний атом As, то акцептором.

ДОМІШКИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Структури типу алмаза. Тип електропровідності визначається розмірами і величиною негативного заряду домішкових атомів, що впроваджуються між вузлами ґрат напівпровідників IV групи періодичної системи. Якщо атом Ge або Si під енергетичним впливом потрапляє між вузлами, то утворюються два домішкові рівні: донорський впровадженого атома й акцепторний порожнього вузла.

Іонні структури. Атоми металів можуть впроваджуватися в тісні проміжки між вузлами іонних ґрат лише в тому випадку, якщо вони різко зменшують свої розміри, позбавившись зовнішніх електронів, що обумовлюють електропровідність n-типу. Іони багатьох металоїдів, що мають великі діаметри, не можуть впроваджуватися між вузлами іонних з'єднань.

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ХІМІЧНІ СПОЛУКИ І МАТЕРІАЛИ НА ЇХНІЙ ОСНОВІ

Напівпровідникові хімічні сполуки складаються з елементів різних груп таблиці Менделєєва, що відповідають загальним формулам $A^{IV}B^{IV}$ (наприклад, SiC), $A^{III}B^V$ (InSb, GaAs, Ga), $A^{II}B^{VI}$ (Cd, ZnSe), а також деякі окисли (наприклад, Cu_2O) і речовини складного складу.

Карбід кремнію. Це з'єднання елементів IV групи таблиці Менделєєва: кремнію і вуглецю ($A^{IV}B^{IV}$), що відповідає формулі SiC. Карбід кремнію містить 70,045% Si і 29,955% C (за вагою). У природі цей матеріал зустрічається вкрай рідко. Електропровідність кристалів SiC при нормальних температурах – домішкова, коливається в широких межах і збільшується з температурою. Електропровідність порошкоподібного карбиду кремнію залежить від електропровідності зерен вихідного матеріалу, напруженості електричного поля і температури.

Карбід кремнію в електротехніці застосовується для виготовлення резисторів для вентильних розрядників, що захищають лінії передачі високої напруги й апаратуру, для виробництва низьковольтних варисторів (**варистор** – це резистор з нелінійною вольт-амперною характеристикою), для цілей автоматики, обчислювальної техніки і електроприладобудування, для виготовлення сілітових стержнів нагрівачів високотемпературних електричних печей і т.п.

Арсенід галію – це з'єднання $A^{III}B^V$. Ширина забороненої зони дещо перевищує ширину забороненої зони германія і кремнію. При цьому рухливість електронів у нього вище, ніж у германія і кремнію, а рухливість дірок порівнянна з такою для кремнію. Цинк, кадмій, мідь є акцепторами, рівні яких лежать вище діапазона валентної зони від 0,08 до 0,37 еВ. Донорами є сірка, селен, телур, а також елементи IV групи таблиці Менделєєва.

З арсеніду галію виготовляють фотоелементи з к.к.д. порядку 7%,

дозиметри рентгенівського випромінювання, тунельні діоди, напівпровідникові лазери. Напівпровідникові прилади з арсеніду галію здатні працювати до температури 450°C.

Антимонід індію. Одержують сплавкою високочистих індію і сурьми. Матеріал проходить зонне очищення, а монокристали з нього роблять методом витягування. Фотопровідність InSb охоплює широку область, що лежить в інфрачервоній частині спектра, доходячи до 8 мк. Максимум фотопровідності відповідає довжині хвилі 6,7 мк.

Антимонід індію застосовується для виготовлення фотоелементів високої чутливості, а також для термоелектричних генераторів і холодильників.

З'єднання А^{IV}В^{VI} (сульфіди). Сірчистий свинець (PbS), сірчистий вісмут (Bi₂S₃) і сірчистий кадмій (CdS) використовуються для виготовлення фоторезисторів і люмінофорів.

Окисли. Закис міді (Cu₂O) – напівпровідник р-типу. Провідність сильно залежить від домішок, термічної обробки і температури. З окислених мідних пластин, на поверхні яких утворився шар закису міді, були отримані перші типи напівпровідникових випрямлячів і фотоелементів. З часом міднозакисневі випрямлячі старіють, що призводить до падіння струму.

Серед інших напівпровідників-окислів - окис цинку (ZnO) – напівпровідник n-типу, і двоокис титану TiO₂.

Напівпровідникові окисли використовуються для виготовлення фоторезисторів, терморезисторів, випрямлячів і т.п.

Запитання для самоперевірки:

1. Як класифікують напівпровідникові матеріали?
2. Які хімічні елементи напівпровідники ви знаєте?
3. З яких груп хімічних елементів періодичної таблиці формуються напівпровідники хімічні сполуки?
4. Яким чином домішки впливають на провідність напівпровідникових хімічних сполук?
5. Що таке термістор і варистор? Де вони застосовуються?

ЛІТЕРАТУРА

Підручники:

1. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. - Л.: Энергоатомиздат, 1985, 304 с.
2. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1986.
3. Пасынков В.В. Материалы электронной техники. - М.: Высшая школа, 1980, 406 с.
4. Электрорадиоматериалы / Под ред. Тареева Б.М. - М.: Высшая школа, 1978, 336 с.
5. Материаловедение / Под ред. Б.Н. Арзамасова.- М.: Машиностроение, 1986.

Методичні посібники:

1. Електротехнічні матеріали. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт студентами спеціальності 6.090.603 "Електротехнічні системи електроспоживання".- К.: УДУХТ, 2001 (№5828).
2. Електротехнічні матеріали. Методичні вказівки до вивчення дисципліни та виконання контрольної роботи для студентів спеціальності 6.090.600 "Електротехнічні системи електроспоживання" напряму 0906 "Електротехніка" денної та заочної форм навчання.- К.: УДУХТ, 2001 (№5852).

ЗМІСТ

Лекція 1. Предмет курсу “Електротехнічні матеріали”	3
Лекція 2. Поляризація діелектриків та діелектрична проникність	7
Лекція 3. Електропровідність діелектриків	14
Лекція 4. Діелектричні втрати в діелектриках	22
Лекція 5. Пробій діелектриків	27
Лекція 6. Фізико-механічні та хімічні властивості електротехнічних матеріалів	31
Лекція 7. Діелектричні матеріали (I)	37
Лекція 8. Діелектричні матеріали (II)	50
Лекція 9. Класифікація і основні властивості провідникових матеріалів ...	58
Лекція 10. Матеріали високої і посередньої провідності	64
Лекція 11. Метали і сплави з високим опором	70
Лекція 12. Провідникові матеріали спеціального призначення	74
Лекція 13. Загальні відомості про магнетизм	80
Лекція 14. Магнітні матеріали	85
Лекція 15. Загальні відомості про напівпровідники	92
Лекція 16. Напівпровідникові матеріали	97
Література	102