

З М І С Т

ВСТУП	4
РОЗДІЛ I. ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ	7
1.1. Загальні уявлення про діелектричні матеріали.....	7
1.2 Класифікація діелектричних матеріалів.....	8
1.3 Поляризація діелектриків.....	11
1.4 Класифікація діелектриків за видом поляризації.....	14
1.5 Діелектрична проникність. Природа електропровідності газоподібних, рідких і твердих діелектриків.....	15
1.6 Електропровідність газоподібних, рідких і твердих діелектриків.....	17
1.7 Діелектричні втрати в діелектриках.....	22
1.8 Пробій діелектриків.....	39
1.8 Фізико-хімічні та механічні властивості діелектричних матеріалів.....	50
РОЗДІЛ II. ІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ	65
1.1. Ізоляційні матеріали.....	65
2.2 Полімери.....	74
2.3 Властивості і застосування полімерів.....	83
2.4 Інші види ізоляційних матеріалів.....	91
РОЗДІЛ III. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ	108
3.1 Загальні відомості про провідники.....	108
3.2 Провідники з великим опором.....	114
3.3 Надпровідники.....	115
РОЗДІЛ IV. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ	118
4.1. Будова і властивості напівпровідникових матеріалів.....	118
РОЗДІЛ V. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ	127
5.1. Будова і властивості магнітних матеріалів.....	127
5.2 Феромагнетики. Процеси при намагнічуванні феромагнетиків.....	138
5.3 Магнітні втрати.....	140
5.4 Вплив температури на магнітні властивості феромагнетиків.....	143
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	144

ВСТУП

Розробка нових матеріалів і безперервне вдосконалення вже відомих відбувається одночасно із загальним розвитком електротехніки та розширенням вимог промисловості до якості матеріалів.

Першим практичним застосуванням матеріалу для створення порівняно потужного джерела електричної енергії можна вважати виготовлення великої батареї, електрорушійна сила якої створювалася за рахунок контактної різниці потенціалів між дисками з різних металів. Ця батарея була створена в 1802 р. Академіком В.В. Петровим. У ній використовувалося 8400 мідних і цинкових дисків з прокладками з паперу, просоченого електролітом. За допомогою цієї батареї вперше була отримана електрична дуга.

У 1832 р. в своїх дослідах щодо створення електромагнітного телеграфу російський вчений П.Л. Шиллінг використовував в якості ізоляції плівку, просочену воском, невулканізований каучук і шовкову пряжу.

У 1872 р. винахідник А.Н. Лодигін створив першу вугільну лампу розжарювання; інженер П.Н. Яблочков у 1876 р. винайшов електричну «свічку», щр поклато початок широкому застосуванню електричного освітлення. У цих винаходах були використані провідники, магнітні матеріали та електрична ізоляція. По мірі розвитку електротехніки все більшого значення набував правильний вибір матеріалів, що допомагав успішно вирішувати виникаючі завдання.

Швидке зростання промисловості у всіх її галузях супроводжується безперервним збільшенням номенклатури застосовуваних матеріалів, удосконаленням технології їх виготовлення і все більш широким використанням нових видів сировини, які раніше не застосовувалися в техніці.

На даний час нові електротехнічні матеріали з'являються в результаті попереднього глибокого вивчення фізичних, механічних і хімічних характеристик таких речовин, які могли б бути використані в якості технічних матеріалів.

Для розуміння електричних, магнітних і механічних властивостей матеріалів та інших їх особливостей необхідно, в першу чергу, досліджувати їх структуру і хімічний склад.

Електротехнічні матеріали (ЕТМ) поділяють на чотири основні класи: діелектричні, напівпровідникові, провідникові і магнітні. За своєю поведінкою в електричному полі ЕТМ класифікують за класами: діелектричні, напівпровідникові і провідникові. Значення їх питомого опору знаходяться відповідно в межах: 10^{-8} - 10^{-5} , 10^{-6} - 10^8 , 10^7 - 10^{17} Ом-м, а значення ширини забороненої зони відповідно рівні 0-0,05; 0,05-3 і більше 3 еВ. магнітному ж полі - на два класи: магнітні і немагнітні. До першого відносяться феромагнетики, а до другого - діа-, пара-і антиферомагнетики.

Діелектричні матеріали мають здатність поляризуватися під дією прикладеного електричного поля і поділяються на два підкласи: діелектрики пасивні та активні. Пасивні діелектрики (або просто діелектрики) використовують для створення електричної ізоляції струмопровідних частин - вони перешкоджають проходженню електричного струму іншими, небажаними шляхами і є матеріалами електроізоляційними; 2 - в електричних конденсаторах - служать для створення певної електричної ємності; в даному випадку важливу роль відіграє їх діелектрична проникність: чим вище ця величина, тим менше габарити і вага конденсаторів.

Активні діелектрики на відміну від звичайних застосовують для виготовлення активних елементів (деталей) електричних схем. Деталі, виготовлені з них, служать для генерації, посилення, модуляції, перетворення електричного сигналу. До них відносяться: сегнето- і п'єзоелектрики, люмінофори, рідкі кристали, електрооптичні матеріали та ін.

Напівпровідникові матеріали за величиною питомої електропровідності займають проміжне положення між діелектриками і провідниками. Характерною їх особливістю є істотна залежність електропровідності від інтенсивності зовнішнього енергетичного впливу: напруженості електричного поля, температури, освітленості, довжини хвилі падаючого світла, тиску і т. ін. Перелічені особливості покладені в основу роботи напівпровідникових приладів: діодів, транзисторів, термісторів, фоторезисторів, тензодатчиків та ін.

Провідникові матеріали підрозділяються на чотири підкласи: матеріали високої провідності, надпровідники і кріопровідники, матеріали високого (заданого) опору, контактні матеріали.

Матеріали високої провідності використовують там, де необхідно, щоб електричний струм проходив з мінімальними втратами. До таких матеріалів відносяться метали: Сі, Al, Ре, Аі, Рl та

сплави на їх основі. З них виготовляють проводи, кабелі та інші струмопровідні частини електроустановок.

Надпровідниками є матеріали, у яких при температурах нижче деякої критичної $T_{кр}$ опір електричному струму стає рівним нулю. Кріопровідники - це матеріали високої провідності, що працюють при кріогенних температурах (температурі кипіння рідкого азоту - 195,6 °С).

Провідниковими матеріалами високого (заданого) опору є металеві сплави, що утворюють тверді розчини. З них виготовляють резистори, термопари і електронагрівальні елементи. З контактних матеріалів виготовляють ковзаючі і розривні контакти. В залежності від пропонованих вимог ці матеріали дуже різноманітні за своїм складом і будовою. До них відносяться, з одного боку, метали високої провідності (Сі, АІ, Р1 і т. ін.) і сплави на їх основі, з іншого - тугоплавкі метали (W, Та, Мо й ін) і композиційні матеріали. Останні, хоча і мають відносно високий електричний опір, характеризуються підвищеною стійкістю до дії електричної дуги, що утворюється при розриві контактів. До магнітних матеріалів, що використовуються в техніці, відносять феромагнетики і ферити. Їх магнітна проникність має високі значення і залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля і температури. Магнітні матеріали застосовують для концентрації магнітного поля в сердечниках котушок індуктивності, дроселях та інших конструкціях, в якості магнітопроводів запам'ятовуючих пристроїв в ЕОМ і т. ін. Вони здатні сильно намагнічуватися навіть у слабких полях, а деякі з них зберігають намагніченість і після зняття зовнішнього магнітного поля. До найбільш широко використовуваних в техніці магнітних матеріалів відносяться Ре, Со, Ні та їх сплави.

1.1. ЗАГАЛЬНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Діелектриками називають речовини, основною електричною властивістю яких є здатність поляризуватися в електричному полі, і в яких можливе існування електростатичного поля, так як електричні заряди його атомів, молекул або іонів пов'язані. Діелектрики, що використовуються на практиці, містять і вільні заряди, які, переміщаючись в електричному полі, обумовлюють електропровідність при постійній напруженості. Однак кількість таких вільних зарядів у діелектрику невелика, а тому струм дуже малий, тобто для діелектрика характерним є великий опір проходженню постійного струму.

Згідно ГОСТ 21515-76 діелектричними матеріалами вважають клас електротехнічних матеріалів, призначених для використання їх діелектричних властивостей, а саме великого опору проходженню електричного струму і здатності поляризуватися. Електроізоляційними матеріалами називають «діелектричні матеріали, призначені для електричної ізоляції», яка є невід'ємною частиною електричного кола та необхідною для того, щоб не пропускати струм по непередбачених електричною схемою шляхах.

За агрегатним станом діелектричні матеріали поділяються на газоподібні, рідкі та тверді. За походженням розрізняють діелектричні матеріали природні, які можуть бути використані без хімічної переробки, штучні, виготовлені хімічною переробкою природної сировини, і синтетичні, одержані в ході хімічного синтезу. За хімічним складом їх поділяють на органічні, що являють собою з'єднання вуглецю з воднем, азотом, киснем та іншими елементами; елементоорганічні, в молекули яких входять атоми кремнію, магнію, алюмінію, заліза та інших елементів; неорганічні, що не містять у своєму складі вуглецю.

З різноманіття властивостей діелектричних матеріалів, що визначають їх технічне застосування, головними є електричні властивості: електропровідність, поляризація і діелектричні втрати, електричний пробій і електричне старіння.

Електропровідність діелектричних матеріалів обумовлена існуванням у них невеликої кількості вільних зарядів: електронів (дірок), іонів, моліонів. Моліони властиві рідким діелектрикам і являють собою частинки (10^{-6} м) твердих діелектриків колоїдних розмірів, які заряджаються, адсорбуючи наявні в рідині іони. Носії заряду утворюються в результаті термічної генерації, фотогенерації, дії іонізуючих випромінювань, інжекції електронів (дірок) з металевих електродів, ударної іонізації в сильних електричних полях. Розрізняють дрейфовий, стрибковий (носії заряду більшу частину часу локалізовано) і дифузійний механізми переміщення носіїв заряду. Спрямований потік носіїв заряду в діелектриках (електричний струм) може обумовлюватися: електричним полем; градієнтом температур; поєднаннями електричного поля і градієнта температур, електричного і магнітного полів, градієнта температур і магнітного поля.

Електропровідність діелектрика ρ характеризується питомими об'ємною та поверхневою провідностями або питомими об'ємним і поверхневим опорами (для газоподібних і рідких діелектриків останні не визначаються). При нормальній температурі, вологості та напруженості електричного поля ρ становить $10^6 - 10^8$ для низькоякісних і $10^{14} - 10^{17}$ Ом · м для високоякісних діелектриків. Зі зростанням температури ρ рідких і твердих діелектриків, як правило, зменшується, що характеризується температурним коефіцієнтом питомого об'ємного опору. Вимірювання ρ_v і ρ_s , виконують при постійній напрузі згідно ГОСТ 6433.1-71.

1.2 КЛАСИФІКАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Діелектричні матеріали діляться на наступні групи:

1. Електроізоляційні - для електричної ізоляції, яка оточує струмоведучі частини електричних пристроїв, відокремлює один від одного частини, що перебувають під різними електричними потенціалами. Призначення електричної ізоляції – не допускати проходження електричного струму по колах, крім електричної схеми.
2. Електроізоляційні матеріали, що використовуються в якості діелектриків в електричних конденсаторах для створення певного значення електричної ємності конденсатора, а в деяких випадках для

забезпечення певного виду залежності цієї ємності від температури чи інших факторів.

3. Активні діелектрики - діелектрики з керованими властивостями: сегнетоелектрики, п'єзоелектрики, електрети.

Крім електричних властивостей, велику роль відіграють механічні, теплові та інші фізико-хімічні властивості, здатність матеріалів піддаватися тим чи іншим видам обробки при виготовленні з них необхідних виробів, а також вартість і дефіцитність матеріалів.

Електроізоляційні матеріали підрозділяються по їх агрегатним станам на газоподібні, рідкі та тверді. В особливу групу можуть бути виділені матеріали, що тверднуть, і які в початковому стані, під час введення їх в ізоляцію, є рідинами, але потім тверднуть і в готовій ізоляції являють собою тверді тіла (лаки, компаунди).

За хімічною природою поділяються на органічні та неорганічні. Органічні електроізоляційні матеріали, за винятком фторлону, поліімідів, мають відносно низьку нагревостійкість.

Неорганічні електроізоляційні матеріали в більшості випадків не володіють гнучкістю і еластичністю, часто вони крихкі; технологія їх обробки порівняно складна. Однак, як правило, неорганічні матеріали володіють значно більш високою нагревостійкістю, ніж органічні, а тому вони з успіхом застосовуються в тих випадках, коли потрібно забезпечити високу робочу температуру ізоляції.

Елементорганічні матеріали - матеріали з проміжними властивостями (в полімерні органічні молекули входять типові неорганічні елементи - Si, Al, P та ін).

Необхідно мати на увазі, що електроізоляційні, механічні, теплові, вологісні та інші властивості діелектриків помітно змінюються в залежності від технології отримання та обробки матеріалів, наявності домішок, умов випробувань і т.д.

Газоподібні діелектрики повинні бути хімічно інертні; при іонізації не повинні утворювати особливо активних речовин, здатних руйнувати тверді матеріали або викликати корозію металів. Основними характеристиками газоподібних діелектриків є електропровідність, пробій в однорідному електричному полі, пробій в неоднорідному електричному полі.

Електропровідність газів пов'язана з наявністю в них деякого числа іонів та електронів, які утворюються під впливом зовнішніх впливів або в результаті зіткнень заряджених частинок з молекулами газу. У відповідності з цим в газах виникає несамостійна або

самостійна провідність. У нормальних умовах число заряджених частинок (іонів газу або твердих і рідких домішок, які знаходяться в підвішеному стані) в 1 м^3 атмосферного повітря не перевищує кількох десятків мільйонів.

Утворення носіїв зарядів пов'язано з різними природними факторами: радіоактивне випромінювання Землі, випромінювання Сонця, радіація, проникаюча з космічного простору, тепловий вплив, рентгенівського і гамма-променів, потік нейтронів і т. ін. Провідність газу підвищується, якщо докласти напругу до електродів, між якими він знаходиться.

При поглинанні енергії молекула газу втрачає електрон і перетворюється в позитивний іон. Електрон, який при цьому вивільняється, «прилипає» до нейтральної молекули і утворює негативний іон. Молекули газу і заряджені іони, що не мають електричного заряду, здійснюють неупорядковані теплові рухи. При зустрічі позитивних і негативних іонів відбувається їх рекомбінація. Коли число іонів не змінюється з плином часу, між процесами генерації і рекомбінації заряджених частинок встановлюється динамічна рівновага. У розглянутому режимі виконується закон Ома

$$J = \gamma E = \gamma U / h \quad (1.1)$$

де J – щільність струму;
 γ – питома провідність;
 U – напруга, що прикладається;
 h – відстань між електродами.

На рис. 1.1 цей режим відповідає ділянці ОА.

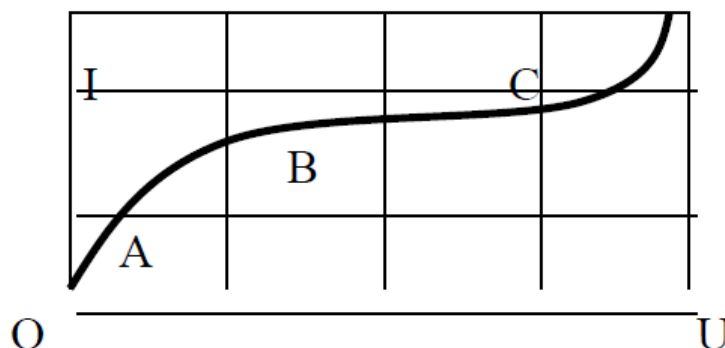


Рисунок 1.1 – Вольтамперна характеристика газового проміжку

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

$$J = Nqh \quad (1.2)$$

де N – кількість позитивних і негативних іонів;
 q – заряд іона;
 h – відстань між електродами.

Подальше збільшення напруги супроводжується посиленням ударної іонізації і збільшенням кількості вільних електронів практично в геометричній прогресії, що приводить до різкого зростання струму. В результаті розвитку процесу ударної іонізації виникає електронна лавина, яка рухаючись до позитивного електрода, зустрічає лавинний потік позитивних іонів, спрямований до негативного електрода. В результаті утворення в газовому проміжку провідної газорозрядної плазми виникає пробій газу.

1.3 ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

В електричному полі в діелектрику відбуваються поляризації: за час 10^{-16} - 10^{-15} с електронна пружна у всіх діелектриків незалежно від агрегатного стану; протягом 10^{-14} - 10^{-13} с іонна пружна (в іонних кристалах); за час напівперіоду прикладеної напруги - дипольна (в полярних діелектриках) і міграційна - об'ємно-зарядова і тепла іонна; доменна (у сегнетоелектриках), обумовлена орієнтацією векторів спонтанної поляризації.

В залежності від видів зв'язків розрізняються види поляризації, перераховані вище. Пригадаємо основні види зв'язків: ковалентний, іонний, металевий, міжмолекулярний за рахунок Ван-дер-Ваальсових сил. Частка кожного зв'язку присутня в реальних матеріалах. Розглянемо кожний зв'язок на найпростіших прикладах.

Ковалентний зв'язок молекул: H_2 , O_2 , CO , Cl_2 , H_2O та ін.

Центри молекул не зміщені - неполярні молекули.

Центри молекул зміщені - полярні або дипольні молекули.

Полярні молекули характеризуються дипольним моментом.

Дипольний момент μ дорівнює добутку заряду q на відстань між центрами поляризації (зарядами):

$$\mu = q \cdot l \quad (1.3)$$

Ковалентний зв'язок може бути в молекулах і між атомами, що утворюють решітки кристалів: алмаз, C-C, Si - Si та ін.

Іонний зв'язок - зв'язок між зарядженими частинками, наприклад в іонному кристалі NaCl. Ці речовини відрізняються підвищеною механічною міцністю і підвищеною температурою плавлення.

Металевий зв'язок - електростатична взаємодія між позитивно зарядженим іонним остовом кристала і негативною електронною хмарою.

Міжмолекулярний зв'язок (Ван-дер-Ваальсова взаємодія).

Виникає, наприклад, в деяких речовинах між молекулами з ковалентними внутрішньомолекулярними зв'язками (органіка). До них відноситься парафін - має низьку температуру плавлення, що говорить про неміцність їх кристалічної решітки.

Обмежений пружний зсув зв'язаних зарядів або орієнтація дипольних молекул називається поляризацією. Про явища, обумовлені поляризацією, можна судити за значенням діелектричної проникності, а також кута діелектричних втрат, якщо поляризація діелектрика супроводжується розсіюванням енергії, що викликана нагріванням діелектрика. Нагрівання спричиняється також рухом вільних зарядів - малим наскрізним струмом.

Наскрізний струм пояснює електропровідність технічного діелектрика, чисельно характеризується питомою об'ємною (γ_v) електричної провідністю і питомою поверхневою (γ_s) електричною провідністю, що є оберненими величини питомого об'ємного (ρ_v) і поверхневого (ρ_s) опору.

Будь-який діелектрик може бути використаний до певного значення напруги в певних умовах, інакше настає пробій діелектрика - втрата діелектричних властивостей.

Величина напруги, при якій відбувається пробій називається пробивною напругою.

Основні види поляризації

Миттєва поляризація - цілком пружна, без розсіювання енергії, без виділення теплоти. Може носити електронний та іонний характер.

Наростаюча поляризація - наростаюча і спадаюча не миттєва, супроводжується розсіюванням енергії, нагріванням діелектрика.

Різні види поляризації спостерігаються у різних діелектриків.

Електронна поляризація - пружне зміщення і деформація електронних оболонок атомів та іонів. Час установки 10^{-15} с. Зсув і деформація електронних орбіт не залежить від температури, але поляризація знижується з температурою, з тепловим розширенням діелектрика і зменшенням числа частинок в одиниці об'єму. Електронна поляризація є у всіх видів діелектриків і не пов'язана з втратою енергії.

Іонна поляризація - характерна для твердих тіл з іонною будовою і пов'язана зі зміщенням пружних іонів. З підвищенням температури вона посилюється в результаті ослаблення пружних сил між іонами через збільшення відстані між ними. Час 10^{-13} с.

Дипольно-релаксаційна - пов'язана з тепловим рухом частинок. Дипольні молекули в хаотичному русі орієнтуються на поле, що і є поляризацією. Можлива, якщо молекулярні сили не перешкоджають орієнтації диполя. Зі збільшенням температури молекулярні сили слабшають, збільшується орієнтація молекул, в'язкість знижується, але збільшується тепловий рух. Тому дипольна поляризація спочатку збільшується, а потім спадає.

У в'язких рідинах опір повороту диполя великий і при великих частотах прикладена напруга може зникнути. Час релаксації - час, протягом якого кількість впорядковано орієнтованих полем диполей зменшиться в 2,7 рази.

У кристалах зі слабкими Ван-дер-Ваальсовими зв'язками можлива поляризація великих часток.

Іонно-релаксаційна поляризація - спостерігається у неорганічному склі, іонних кристалічних неорганічних речовинах з нещільною упаковкою іонів. Останні зміщуються у бік поля. Іонно-релаксаційна поляризація після зняття напруги U загасає, а при підвищенні температури посилюється.

Електронно-релаксаційна поляризація - виникає внаслідок збудження тепловою енергією надлишкових (дефектних) електронів чи дірок. Характерна для діелектриків з великим внутрішнім полем, електронною електропровідністю. Наприклад, TiO_2 , забруднений домішками Nb_{5+} , Cu_{2+} , Ba_{2+} .

Діелектрична проникність кераміки з домішками Ti має електронно-релаксаційну поляризацію, що зменшується зі зростанням частоти електричного поля.

Міграційна поляризація - додатковий механізм поляризації в твердих тілах неоднорідної структури. Проявляється при низьких частотах і пов'язана з неоднорідностями і домішками провідними включеннями, шарами різної провідності. У шаруватих пластиках йде накопичення зарядів в шарах, а також повільний рух іонів.

Спонтанна поляризація спостерігається у сегнетоелектриків. В змінних електричних полях йде виділення теплоти. Області (домени) мають електричний момент навіть при відсутності поля. При накладенні поля спостерігається орієнтація доменів.

У речовин зі спонтанною поляризацією є області (домени), що мають електричний момент у відсутності поля.

1.4 КЛАСИФІКАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ ЗА ВИДОМ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

1 група: з переважно електронною поляризацією, наприклад неполярні і слабополярні тверді речовини в кристалічному й аморфному стані (парафін, сірка, полістирол), а також неполярні і слабополярні рідини і гази.

2 група: діелектрики, що мають електронну, дипольно-релаксаційну поляризацію - це полярні (дипольні) органічні напіврідкі й тверді речовини (масляно-каніфольні компаунди, епоксидні смоли, целюлоза, хлоровані вуглеводні, масла, смоли).

3 група: тверді неорганічні діелектрики з електронною, іонною, іонно-електронно-релаксаційною поляризацією:

3.1. Діелектрики з електронною та іонною поляризацією - кристалічні щільноупаковані речовини (кварц, слюда, кам'яна сіль, корунд, рутил).

3.2. Діелектрики з електронною, іонною і релаксаційною поляризацією - скло, фарфор та ін. - діелектрики з нещільною упаковкою частинок.

4 група: сегнетоелектрики - зі спонтанною електронною, іонною поляризацією (титанат барію, сегнетова сіль).

1.5 ДІЕЛЕКТРИЧНА ПРОНИКНІСТЬ. ПРИРОДА ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ГАЗОПОДІБНИХ, РІДКИХ І ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Відносна діелектрична проникність, або діелектрична проникність ϵ - один з найважливіших макроскопічних електричних параметрів діелектрика. Діелектрична проникність ϵ кількісно характеризує здатність діелектрика поляризуватися в електричному полі, а також оцінює ступінь його полярності; ϵ константою діелектричного матеріалу при даній температурі і частоті електричного напруги і показує, у скільки разів заряд конденсатора з діелектриком більше заряду конденсатора тих же розмірів з вакуумом.

Діелектрична проникність визначає величину електричної ємності виробу (конденсатора, ізоляції кабелю і т.ін.). Для плоского конденсатора електрична ємність C , виражається формулою:

$$C = \epsilon_0 \epsilon S / h, \quad (1.4)$$

де S - площа вимірювального електрода, m^2 ; h - товщина діелектрика, м. З формули (1.4) видно, що чим більше величина ϵ використовуваного діелектрика, тим більше електрична ємність конденсатора при тих же габаритах. У свою чергу, електрична ємність C є коефіцієнтом пропорційності між поверхневим зарядом Q_k , накопиченим конденсатором, і прикладеною до нього електричною напругою:

$$Q_k = CU = U \epsilon_0 \epsilon S / h. \quad (1.5)$$

З формули (1.5) випливає, що електричний заряд Q_k , накопичений конденсатором, пропорційний величині ϵ діелектрика. Знаючи Q_k і геометричні розміри конденсатора, можна визначити ϵ діелектричного матеріалу для даної напруги.

Розглянемо механізм утворення заряду Q_k на електродах конденсатора з діелектриком і з яких складових складається цей заряд. Для цього візьмемо два плоских конденсатора однакових геометричних розмірів: один - з вакуумом, інший - з міжелектродним

простором, заповненим діелектриком, і подамо на них однакову електричну напругу U . На електродах першого конденсатора утворюється заряд Q_0 , на електродах другого - Q_k . У свою чергу, заряд Q_k є сумою зарядів Q_0 та Q :

$$Q_k = Q_0 + Q. \quad (1.6)$$

Заряд Q_0 , утворений зовнішнім полем E_0 шляхом накопичення на електродах конденсатора сторонніх зарядів з поверхневою щільністю σ_0 . Q - додатковий заряд на електродах конденсатора, створюваний джерелом електричної напруги для компенсації зв'язаних зарядів, що утворилися на поверхні діелектрика.

У рівномірно поляризованому діелектрику заряд Q відповідає величині поверхневої густини зв'язаних зарядів σ . Заряд σ утворює поле $E_{сз}$, спрямоване протилежно полю E_0 .

Діелектричну проникність розглянутого діелектрика можна представити як відношення заряду Q_k конденсатора, заповненого діелектриком, до заряду Q_0 такого ж конденсатора з вакуумом:

$$\varepsilon = \frac{Q_k}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q}{Q_0} = 1 + \frac{Q}{Q_0}. \quad (1.7)$$

З формули (1.7) випливає, що діелектрична проникність ε - величина безрозмірна і у будь-якого діелектрика вона більше одиниці; у разі вакууму $\varepsilon = 1$. З розглянутого прикладу також видно, що щільність заряду на електродах конденсатора з діелектриком в ε разів більше щільності заряду на електродах конденсатора з вакуумом, а напруженості при однакових напругах однакові і залежать тільки від величини напруги U і відстані між електродами ($E = U/h$).

Крім відносної діелектричної проникності ε розрізняють абсолютну діелектричну проникність ε_a , Ф / м:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon, \quad (1.8)$$

Відносна зміна діелектричної проникності ε_r при підвищенні температури на 1 К називається температурним коефіцієнтом діелектричної проникності. Електричне старіння у сегнетоелектриках

виражається в зменшенні ε_r з часом. Причиною є перегрупування доменів.

Особливо різка зміна діелектричної проникності з часом спостерігається при температурах, близьких до точки Кюрі. Нагрівання сегнетоелектриків до температури понад точки Кюрі і подальше охолодження повертає ε_r до попереднього значення. Таке ж відновлення діелектричної проникності можна здійснити, впливаючи на сегнетоелектрик електричним полем підвищеної напруженості.

Поляризація діелектрика може бути викликана: механічними навантаженнями (п'єзополаризація в п'єзоелектриках); нагріванням (пірополаризація в піроелектрика); світлом (фотополаризація).

Поляризований стан діелектрика в електричному полі E характеризується електричним моментом одиниці об'єму, поляризацією P , Кл/м², яка пов'язана з його відносною діелектричною проникністю ε_r :

$$P = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) \cdot E, \quad (1.9)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф / м. Додаток $\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r = \varepsilon$, Ф / м, називають абсолютною діелектричною проникністю. В газоподібних діелектриках ε_r практично не відрізняється від 1,0, в неполярних рідких і твердих досягає 1,5 - 3,0, в полярних має великі значення; в іонних кристалах $\varepsilon_r = 5$, а в тих, які мають перовскітову кристалічну решітку досягає 200; в сегнетоелектрик ε_r - 10^3 і більше.

У неполярних діелектриках з ростом температури ε_r незначно зменшується, в полярних зміни пов'язані з переважанням того чи іншого виду поляризації, в іонних кристалах збільшується, в деяких сегнетоелектриках при температурі Кюрі досягає 10^4 і більше. Температурні зміни ε_r характеризують температурним коефіцієнтом. Для полярних діелектриків характерним є зменшення ε_r в області частот, де час T на поляризацію порівняний з $T/2$.

1.6 ЕЛЕКТРОПРОВІДНІСТЬ ГАЗОПОДІБНИХ, РІДКИХ І ТВЕРДИХ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Газоподібні діелектрики широко використовуються при виготовленні високовольтних апаратів (повітряні та елегазові вимикачі, розрядники і ін.), крім того, повітря оточує велике число електротехнічних установок, а в ЛЕП є основним ізолюючим середовищем. У ряді електро- і радіотехнічних, радіоелектронних

пристроїв і приладів використовуються різні газонаповнені елементи, де важливі не тільки загальнофізичні властивості газів, але й їх електричні характеристики.

Найбільш важлива властивість газів з точки зору використання в електроапаратурі - це здатність їх відновлювати електричну міцність. Іншими важливими властивостями є мала щільність і діелектрична проникність, високе значення питомого опору, дуже малий $tg\delta$, практично відсутність старіння, інертність ряду газів по відношенню до твердих та рідких матеріалів, нетоксичність, здатність їх працювати при низьких температурах і високому тиску, негорючість.

Сучасна техніка використовує велику кількість рідин, які володіють електроізоляційними властивостями. Конкретна сфера застосування пред'являє до рідких діелектриків і інші вимоги: високу теплопровідність, стійкість до окислення, сумісність з твердими матеріалами, пожежобезпеку, екологічну безпеку, в'язкість, стабільність і т. ін. Жодна рідина не може задовольнити всім вимогам, що пред'являються одночасно, тому необхідно при використанні тієї або іншої рідини орієнтуватися на найважливіші для кожного конкретного випадку властивості.

Більшість з електроізоляційних властивостей рідин залежить від температури, тиску, вологості, напруженості електричного поля та інших зовнішніх впливів (рис.1 - 5).

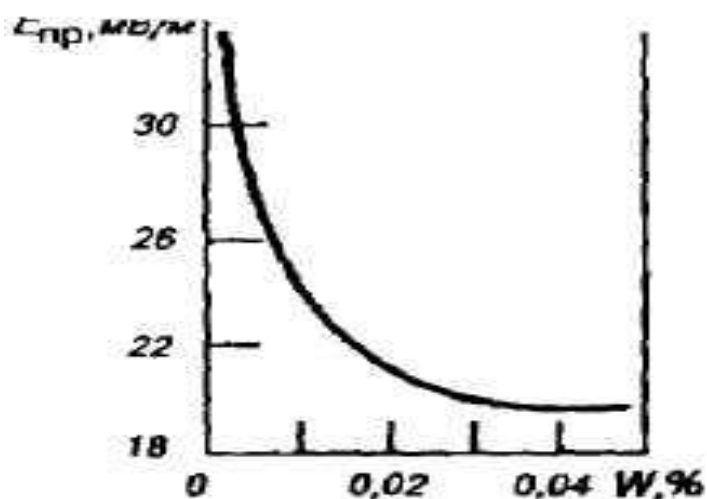


Рисунок 1.2 – Залежність напруги пробію трансформаторної олії від температури

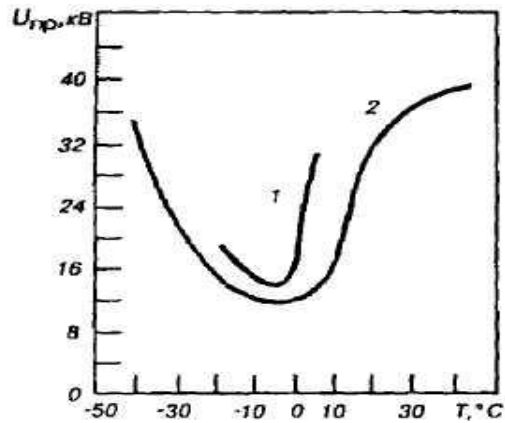


Рисунок 1.3 – Залежність електричної міцності олії від вмісту в ній вологи: 1 - олія ТКП; 2 - олія Т-1500; електроди - диски діаметром 25 мм із закругленими краями, відстань між дисками 2,5 мм.

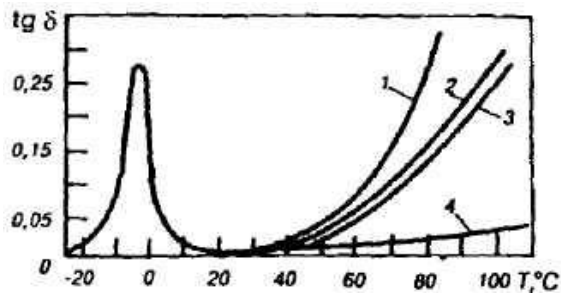


Рисунок 1.4 – Залежність $tg \delta$ від температури для соволу різного ступеня очищення при частоті 50 Гц: 1 - після першої перегонки; 2 - після другої перегонки; 3 - після обробки силікагелевим адсорбентом; 4 - після обробки глиняним адсорбентом

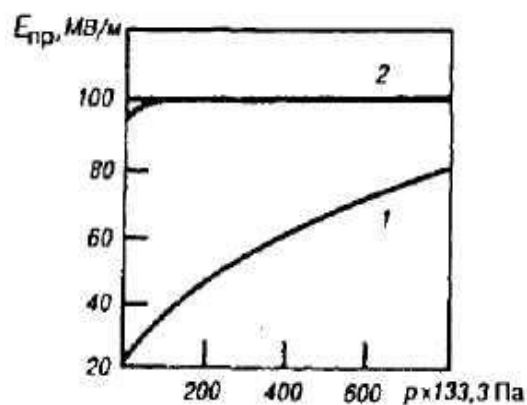


Рисунок 1.5 – Залежність електричної міцності нафтової олії від тиску: 1 - недегазованої; 2 - дегазованої

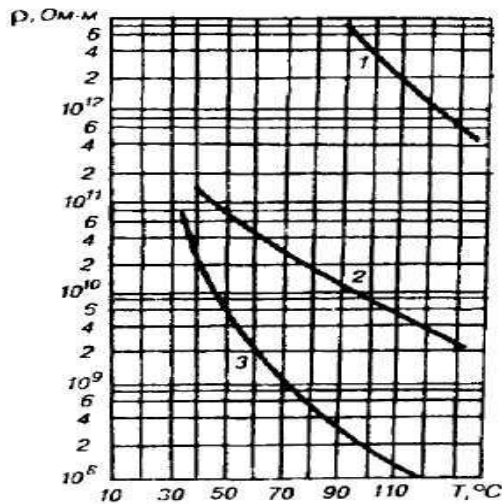


Рисунок 1.6 – Залежність питомого об'ємного опору рідких діелектриків від температури: 1 - трансформаторна олія ретельного очищення; 2 - промислова трансформаторна олія; 3 – совол

Всі електроізоляційні рідини можна підрозділяти по хімічній природі на дві великі групи:

- 1) нафтові олії (трансформаторна, конденсаторна і кабельна);
- 2) синтетичні рідини (хлоровані і фторовані вуглеводні, кремнійорганічні, фторорганічні та ін.)

Однак можливий поділ і за іншими ознаками: за застосуванням, за верхньою межею допустимої робочої температури, за ступенем горючості і т. ін.

Тверді електроізоляційні матеріали являють собою дуже велику групу матеріалів, що включає в себе органічні, елементорганічні і неорганічні діелектрики. До цієї групи матеріалів умовно, з точки зору експлуатації, можна віднести і матеріали, які з часом твердіють (лаки, емалі, компаунди та клеї), і в готовому виробі є твердими, хоча в технологічному процесі введення або нанесення їх вони можуть бути рідкими або пластичними. До твердих матеріалів відносяться більшість полімерів, папір та картон, шаруваті і просочені волокнисті матеріали, намотані вироби, всі види кераміки, скла, слюди і слюдовмістні матеріали, деревина і т. ін.

Фізико-хімічні властивості твердих електроізоляційних матеріалів залежать від зовнішніх впливів і умов навколишнього середовища, що дозволяє мати досить великий вибір для використання матеріалів в практичних цілях.

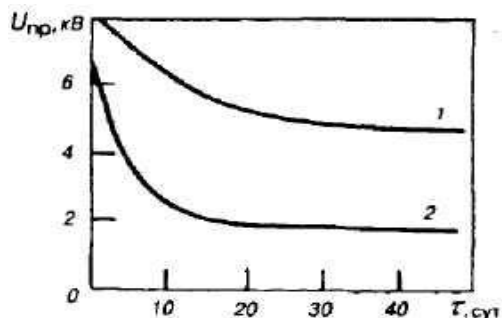


Рисунок 1.7 – Залежність напруги пробою ізоляції проводів діаметром 1,0 мм, емальованих лаками ПЕ-955 (1) і ПЕ-943 (2), від тривалості старіння при 180 ° С.

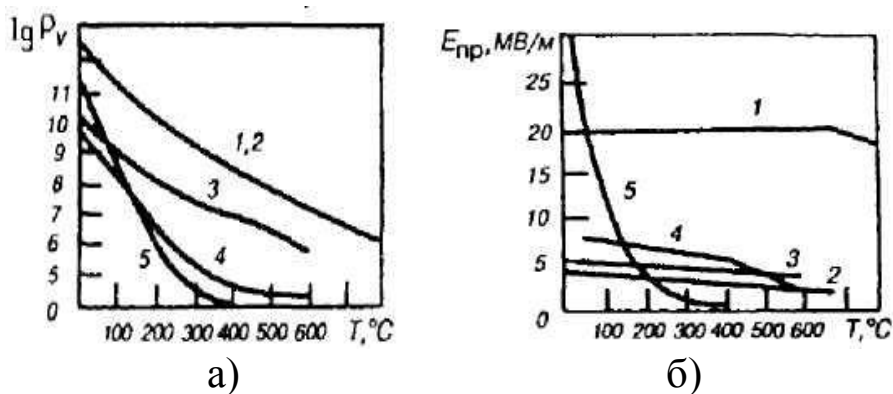


Рисунок 1.8 – Температурні залежності електричного опору (а) і електричної міцності (б) матеріалів:

- 1 - слюдопластовий папір; 2 - периклаз; 3 - азбестовий пластик;
- 4 - кордієритова кераміка; 5 - електрофарфор

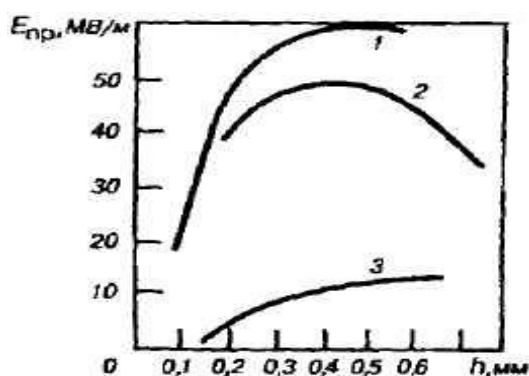


Рисунок 1.9 – Залежність електричної міцності стрічкової ізоляції від товщини (при різному числі шарів):

- 1 - поліїмідна плівка 35 мкм; 2 - поліїмідна плівка 55 мкм;
- 3 - мікалента ЛФК-ТТ 0,1 мм

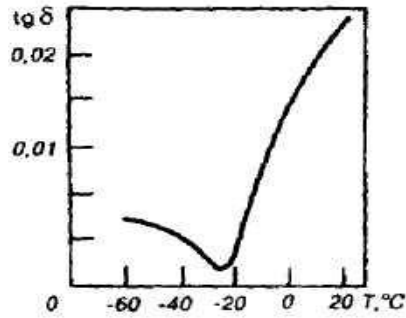


Рисунок 1.10 – Залежність $tg\delta$ електрокартону від температури

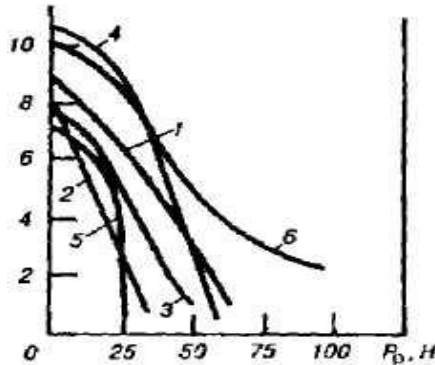


Рисунок 1.11 – Залежність напруги пробою лакотканин від розтягуючого зусилля: 1 - ЛХМ-105 (А-0,15 мм); 2 - ЛШМ-105 (А-0,10 мм); 3 - ЛКМ-105 (Л-0,10 мм); 4 - ЛСБ-120/130 (А-0,17 мм); 5 - ЛСК-155/180 (А-0,15 мм); 6 - ЛСЭ-105/130 (4-0,15 мм)

Відповідно до прийнятої на даний час класифікації групи керамічних матеріалів складають тверді речовини неорганічного походження, основними класифікаційними ознаками яких є: спосіб отримання (керамічна технологія), структура (полікристалічні багатофазні системи); особливі характерні властивості: електричні (висока електрична міцність, стійкість до електричного і теплового старіння), механічні (висока механічна міцність, твердість, відсутність деформацій при тривалому прикладенні навантаження), теплові (виключно висока нагрівостійкість), фізико-хімічні (стійкість до дії агресивних середовищ і випромінювань високих енергій, мала гігроскопічність і водонепроникність, вакуумна щільність). Сукупність настільки унікальних властивостей обумовлює широке застосування керамічних матеріалів в сучасній електротехніці, електроенергетиці та радіотехніці. У багатьох видах електротехнічної апаратури питома вага керамічних виробів становить понад 80%.

В залежності від призначення і області застосування керамічні матеріали прийнято ділити на підгрупи, що включають матеріали з визначеними електрофізичними параметрами і складом.

Ізоляторні матеріали використовуються для виготовлення ізоляторів різних типів: лінійних (підвісні, підвісні стрижневі, штирєві), опорних, прохідних (вводи), телеграфних і телефонних, апаратних (використовуються в конструкціях різних електричних апаратів); настановних виробів (ролики, деталі запобіжників, патронів, штепсельних з'єднань); для виготовлення виробів в радіотехніці та мікроелектроніці: лампових панелей, каркасів котушок індуктивності, осей, антенних ізоляторів (опорних, прохідних, підвісних), ізоляційних підстав плат в мікромодулях і товстоплівкових мікросхемах, деталей корпусів напівпровідникових приладів і інтегральних мікросхем.

Часто ізоляторні керамічні матеріали крім основної функції виконують також функції конструкційних елементів апаратури, піддаючись при експлуатації впливу значних механічних навантажень. У зв'язку з цим вибір ізоляторного матеріалу для конкретного застосування слід проводити з урахуванням його механічних характеристик. Залежність основних електричних характеристик таких матеріалів від температури наведено на рис.12.

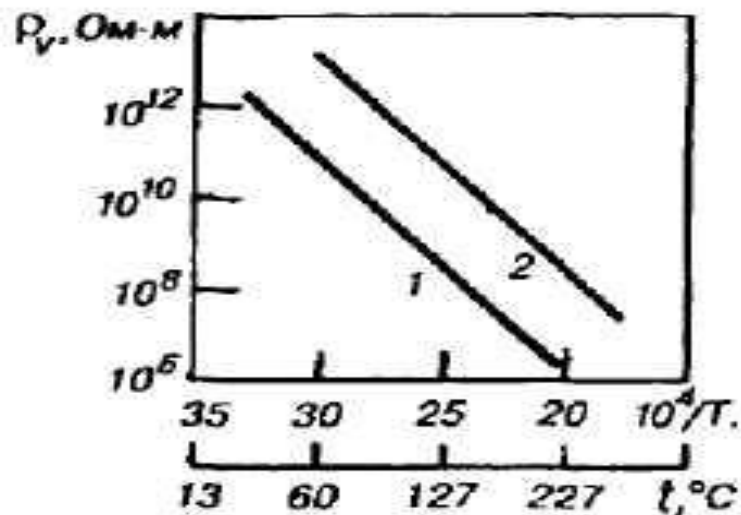


Рисунок 1.12 – Залежність питомого електричного опору ізоляторної порцеляни (1) і радіофарфору (2) від температури

1.7 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ

Загальні поняття про діелектричні втрати

Діелектричними втратами P (Вт) називають ту частину енергії прикладеного електричного поля, яка розсіюється в діелектрику за одиницю часу. Ця енергія переходить у тепло і діелектрик нагрівається.

При неприпустимо високих діелектричних втратах електроізоляційна конструкція може нагрітися до температури теплової руйнації, тобто настане електротепловий пробій.

Діелектричні втрати електроізоляційних матеріалів і конструкцій часто характеризують тангенсом кута діелектричних втрат $\operatorname{tg}\delta$, δ - кут, що доповнює до 90° кут зсуву фаз між струмом і напругою (кут φ) в ємнісному ланцюзі):

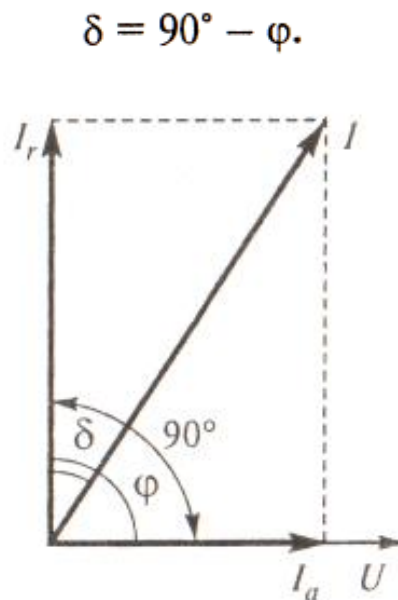


Рисунок 1.13 – Векторна діаграма діелектрика з втратами

Величина $\operatorname{tg}\delta$ є важливою характеристикою діелектриків. Вона визначає діелектричні втрати в матеріалі: чим більше $\operatorname{tg}\delta$, тим більш високі (при інших рівних умовах) діелектричні втрати. Для найбільш широко застосовуваних діелектриків $\operatorname{tg}\delta$ має значення в межах від 0,0001 до 0,03. Про величину діелектричних втрат ділянки ізоляції і деяких радіодеталей (конденсаторів, котушок індуктивності і т.ін.) можна судити також за значенням їх добротності Q :

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg}\delta} = \operatorname{ctg}\delta = \operatorname{tg}\varphi. \quad (1.10)$$

Діелектричні втрати можуть бути як при постійній, так і при змінній напрузі. При постійній напрузі втрати обумовлені тільки струмом наскрізної провідності, і величина діелектричних втрат в даному випадку залежить (обернено пропорційно) від значень питомих об'ємного і поверхневого опорів. При змінній напрузі діелектричні втрати виникають під дією як струму наскрізної провідності, так і релаксаційних видів поляризації. У сильних електричних полях (в постійному і змінному) додатково виникають іонізаційні втрати.

Еквівалентна схема заміщення діелектрика з втратами

Щоб вивчити діелектричні втрати діелектричного матеріалу, необхідно розглянути конденсатор з цим матеріалом у колі змінної напруги. Конденсатор з досліджуваним діелектриком, що має ємність C , розсіюваною потужністю P і кутом зсуву фаз між струмом і напругою c_p , замінимо еквівалентною схемою, в якій до ідеального конденсатора активний опір підключено або паралельно - паралельна еквівалентна схема, або послідовно - послідовна еквівалентна схема. Ці еквівалентні схеми заміщення діелектрика з втратами повинні бути вибрані так, щоб активна потужність, яка в них втрачається дорівнювала потужності P , яка розсіюється в конденсаторі з досліджуваним діелектриком, а струм випереджав би напругу на той же кут c_p . Еквівалентні схеми вводяться умовно і не пояснюють механізму діелектричних втрат. Величини ємності ідеального конденсатора і активного опору для паралельної і послідовної схем заміщення позначимо відповідно c_p і R , c_s , і r .

Паралельна еквівалентна схема заміщення діелектрика з втратами і векторна діаграма струмів в ній представлені на рис. 1.14, з якої видно, що активна складова струму I_a збігається по фазі з напругою U , а реактивна складова струму I_r випереджає напругу на кут, рівний 90° . Значення відповідних струмів дорівнюють:

$$I = U/z, I_a = U/R, I_r = U/x_c = U\omega C_p, \quad (1.11)$$

де z – повний опір, x_c – реактивний ємнісний опір конденсатора з діелектриком.

З трикутника струмів випливає, що:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{U}{RU\omega C_p} = \frac{1}{\omega RC_p}. \quad (1.12)$$

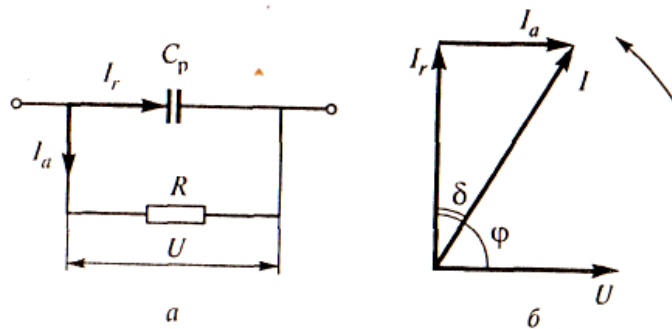


Рисунок 1.14 – Паралельна еквівалентна схема заміщення діелектрика з втратами (а) і векторна діаграма струмів в ній (б)

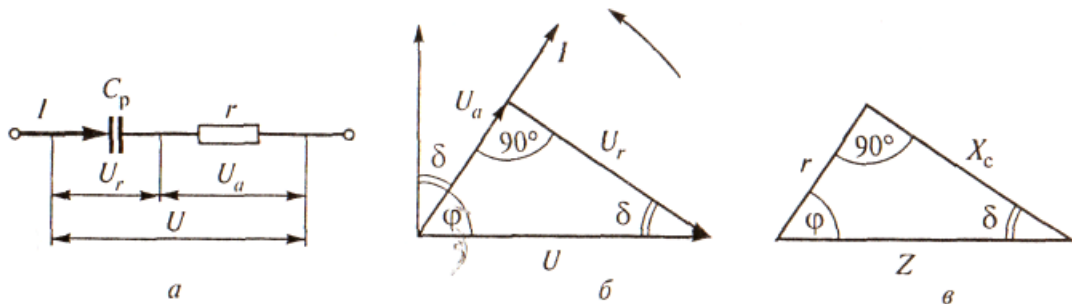


Рисунок 1.15 – Послідовна еквівалентна схема заміщення діелектрика з втратами (а), відповідні їй векторна діаграма напруг (б) і трикутник опорів (в)

Схема заміщення діелектрика з втратами і відповідні їй векторна діаграма напруг і трикутник опорів, представлені на рис.1.15, показують, що активна складова напруги збігається по фазі з струмом I , а реактивна складова напруги U_r відстає від струму на кут 90° . Якщо трикутник напруг (1.15, б) розділити на постійну величину струму I , отримаємо трикутник опорів (в), з якого маємо:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{r}{X_c} = \omega r C_s. \quad (1.13)$$

Величину потужності, що розсіюється P при постійній напрузі можна визначити за допомогою закону Джоуля-Ленца:

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (1.14)$$

При змінній напрузі ця величина в загальному вигляді дорівнює:

$$P = UI \cos \varphi. \quad (1.15)$$

Для паралельної схеми заміщення, використовуючи вираз (1.15) і векторну діаграму струмів, зображену на рис. 2, б, отримаємо:

$$P = UI \cos \varphi = UI \sin \delta = U \frac{I_r}{\cos \delta} \sin \delta = UI_r \operatorname{tg} \delta, \quad (1.16)$$

Підставивши в цей вираз значення струму I отримаємо:

$$P = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta. \quad (1.17)$$

Для послідовної схеми заміщення отримаємо:

$$P = UI \cos \varphi = U \frac{U r}{z z} = \frac{U^2 r}{x_c^2 + r^2} = \frac{U^2 r}{x_c^2 (1 + r^2/x_c^2)} = \frac{U^2 \operatorname{tg} \delta}{x_c (1 + \operatorname{tg}^2 \delta)}, \quad (1.18)$$

де $\cos \varphi = r/z$, $I = U/z$; $z = \sqrt{x_c^2 + r^2}$.

$$P = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (1.19)$$

Прирівнявши один до одного праві частини виразів (1.18) і (1.19), визначимо співвідношення між C_p і C_s , а також між R і r :

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta},$$

$$R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right).$$
(1.20)

Види діелектричних втрат

Розрізняють такі основні види діелектричних втрат:

- 1) втрати, обумовлені струмом наскрізної провідності;
- 2) втрати, обумовлені релаксаційним видами поляризації;
- 3) іонізаційні втрати.

Перші два види втрат мають місце при будь-яких напруженостях поля, третій вид - тільки в сильних електричних полях. Діелектричні втрати, обумовлені струмом наскрізної провідності, спостерігаються у всіх діелектриках. В діелектриках з молекулярною структурою неполярних (повітря, нафтові електроізоляційні масла, парафін і т.ін.) або мають іонну кристалічну структуру з щільною упаковкою решітки (кварц, слюда, корунд і т.ін.) цей вид втрат є єдиним. Діелектричні втрати в цьому випадку обумовлені спрямованим рухом заряджених частинок. В залежності від природи діелектрика, його стану і величини прикладеної напруги зарядженими частинками можуть бути іони і електрони, іони і колоїдні частинки або одні іони.

Для втрат, обумовлених струмом наскрізної провідності:

$$\operatorname{tg} \delta = 1/(R\omega C).$$

$$\omega = 2\pi f, \quad C = \varepsilon_0 \varepsilon (S/h) \quad (\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}),$$

$$R = \rho(h/S),$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon f \rho}.$$
(1.21)

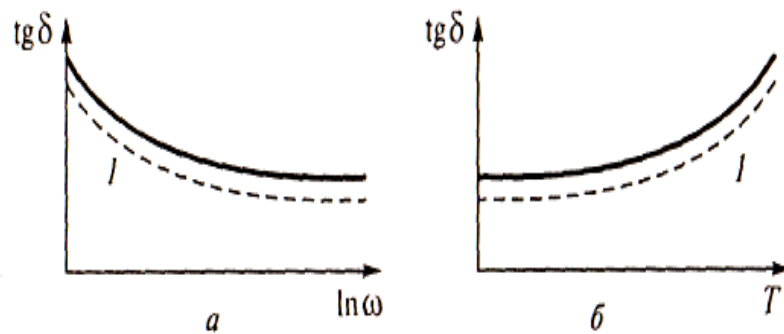


Рисунок 1.16 – Загальний вигляд залежності тангенса кута діелектричних втрат, обумовлених струмом провідності, від частоти напруги (а) і температури T (б):

З виразу (13) випливає, що $tg\delta$ зменшується зі збільшенням частоти за гіперболічним законом (рис. 1.16, а). Однак втрати на електропровідність істотні лише при низьких частотах (до 103 Гц), а при частотах вищих за 104 Гц $tg\delta$, обумовлений струмом наскрізної провідності, стає величиною незначною - 10^{-4} і менше. Зі збільшенням частоти (в області низьких частот) $tg\delta$ знижується (рис. 1.16, б). Величину $tg\delta$ при даній частоті можна визначити відповідно до (1.22), якщо відомі значення ϵ і ρ при даній частоті f .

Зі збільшенням температури діелектричні втрати, обумовлені струмом наскрізної провідності, зростають, оскільки зростає питома електропровідність y в результаті збільшення концентрації носіїв заряду та їх рухливості. За таким же законом змінюється в залежності від температури і величина потужності, що розсіюється P :

$$P = Ae^{-\frac{B}{T}}. \quad (1.22)$$

Діелектричні втрати, обумовлені релаксаційним видами поляризації, зустрічаються найбільш часто і основними з них є: дипольно-релаксаційні (в полярних діелектриках молекулярної будови); іонно-релаксаційні (в аморфних або кристалічних діелектриках іонної будови з нещільною упаковкою решітки); втрати, викликані міграційною поляризацією, яка спостерігається при наявності провідної і напівпровідної домішки у вигляді включень. При цих видах втрат $tg\delta$ діелектриків має високі значення і сильно залежить від температури і частоти прикладеної напруги.

Дипольно-релаксаційні втрати характеризуються наявністю взаємопов'язаних максимумів на температурній і частотній залежностях $\operatorname{tg}\delta$, що визначаються часом релаксації τ . Положення максимуму $\operatorname{tg}\delta$, обумовленого дипольно-релаксаційним втратами, на кривих $\operatorname{tg}\delta(f)$ і $\operatorname{tg}\delta(T)$ визначається з умови:

$$\omega = 1/\tau, \quad (1.23)$$

де ω – кутова частота прикладеної напруги, τ – час релаксації, що залежить від щільності середовища i , відповідно, від його температури.

Загальний вигляд температурної залежності тангенса кута діелектричних втрат, зумовлених дипольно-релаксаційною поляризацією, представлений на рис.1.17, а, показує, що при нагріванні $\operatorname{tg}\delta$ зростає, проходить через максимум і далі знижується. Такий характер зміни $\operatorname{tg}\delta$ пояснюється тим, що при нагріванні в полярних діелектриках молекулярної будови мають місце два конкуруючих процеси. Спочатку (ділянка а-б) в результаті ослаблення міжмолекулярних сил, викликаних підвищенням температури, поліпшуються умови орієнтації диполів уздовж силових ліній поля, тому дипольно-релаксаційна поляризація зростає, зростають і дипольно-релаксаційні втрати, оскільки вся енергія електричного поля, споживана на орієнтацію диполів, витрачається на тертя і переходить в тепло. При подальшому нагріванні (ділянка б-в) в результаті значного зростання енергії хаотичного теплового руху полярних молекул, дипольно-релаксаційна поляризація зменшується, зменшуються і дипольно-релаксаційні втрати. Зі збільшенням частоти прикладеної напруги, максимум $\operatorname{tg}\delta$ зміщується в область більш високих температур.

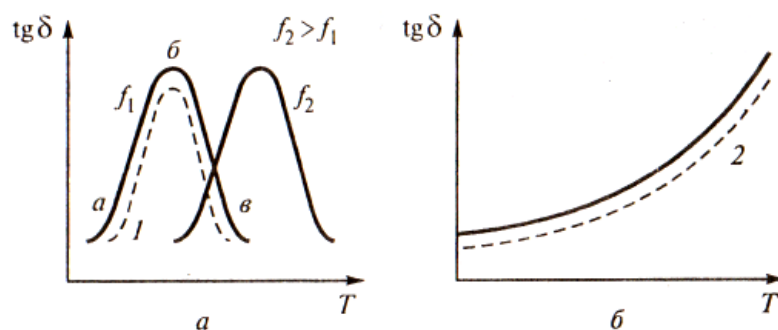


Рисунок 1.17 – Схематичне зображення температурної залежності тангенса кута діелектричних втрат, зумовлених дипольно-релаксаційною (а) і іонно-релаксаційною (б) поляризаціями

У полімерних діелектриках дипольно-релаксаційні втрати проявляються у вигляді двох основних різновидів: дипольно-сегментального і дипольно-групового і мають залежності $tg\delta$ від температури і частоти, відповідно: $\alpha_{др}(T)$ и $\alpha_{др}(f)$.

Дипольно-сегментальні втрати викликані дипольно-сегментальною поляризацією, пов'язаної з рухливістю сегментів (відрізків) молекулярних ланцюгів. Цей вид поляризації і відповідні йому втрати проявляються при $T > T_c$ в полярних і неполярних аморфних полімерах, а в тих, що кристалізуються - тільки в аморфних областях.

Дипольно-групові втрати викликані дипольно-груповою поляризацією, яка має місце завдяки рухливості головним чином полярних груп (-Cl, -F, -ОН, -COОН, >СО та ін.). Цей вид поляризації і відповідні йому втрати спостерігаються тільки в полярних полімерах при $T > T_c$.

У аморфних та кристалічних діелектриках іонної будови, з нещільною упаковкою решітки іонами іонно-релаксаційні втрати при нагріванні істотно зростають, оскільки збільшується іонно-релаксаційна поляризація в результаті ослаблення іонних зв'язків і полегшення переходу слабо зв'язаних іонів у вакантні вузли решітки, а також у результаті збільшення числа релаксаторів (слабо зв'язаних іонів). Іонно-релаксаційні втрати, як правило, спостерігаються при частотах до 10^6 - 10^{10} Гц. У діелектриках, що представляють собою композиційні матеріали (наприклад, гетинакс, текстоліт, полімер з порошкоподібним або волокнистим наповнювачем), а також містять частинки провідної і напівпровідної домішки (наприклад, пор, заповнених вологою), будуть виникати додатково діелектричні втрати, обумовлені міграційною поляризацією. Іонізаційні втрати - це та частина потужності прикладеного електричного поля, яка витрачається на іонізацію молекул газу. Оскільки всі тверді тіла мають газові включення (пори і мікротріщини), а в рідинах можуть бути присутні мікропухирці газу (повітря), то іонізаційні втрати спостерігаються і в твердих, і в рідких діелектриках в сильних полях.

При $U < U_n$ (область слабких полів) газ не іонізується, і $tg\delta$ визначається тільки втратами самого твердого діелектрика, тому величина $tg\delta$ від прикладеної напруги не залежить. При $U \geq U_n$ (область сильних полів) в газових включеннях ізоляції виникають часткові електричні розряди, що призводять до збільшення розсіяної

потужності прикладеного електричного поля і відповідно до зростання $tg\delta$ (рис.1.18). Графік залежності $tg\delta$ ізоляції від величини прикладеної напруги називають кривою іонізації, а U_u — порогом іонізації. Як видно з рис. 1.18, фактичний поріг іонізації настає при більш низькій напрузі, ніж він фіксується на кривій в точці U_i . З подальшим збільшенням напруги $tg\delta$ зростає, оскільки в цей процес залучаються нові газові включення. В сильних полях власна електропровідність твердого діелектрика починає зростати, і при $U = U_{np}$ настає пробій (рис. 1.18, 2). Чим вище U_i і менше прирощення $tg\delta$ (більш пологий підйом $tg\delta$, тим краще якість високовольтної ізоляції. Останнє досягається шляхом зменшення пористості (кількості, а головне-розміру пор) високовольтної ізоляції. Під дією часткових електричних розрядів, що відбуваються в газових включеннях твердої ізоляції, йде поступове її руйнування. При цьому чим більше діаметр газових включень (особливо більше 0,1 мм), тим нижче U_i і вище інтенсивність іонізації.

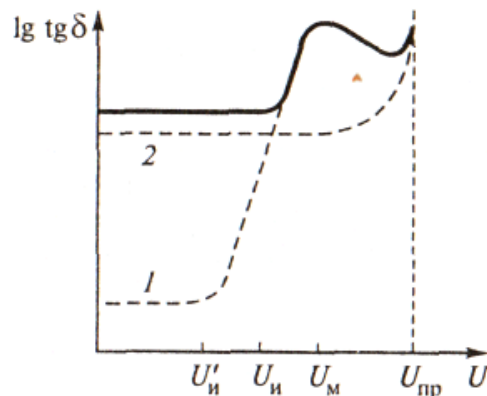


Рисунок 1.18 – Залежність $tg\delta$ від напруги U для ізоляції з повітряними включеннями

Діелектричні втрати в газоподібних діелектриках

Діелектричні втрати в газоподібних діелектриках в слабких електричних полях (розглянемо на прикладі повітря) є наслідком лише струму наскрізної провідності. Оскільки у повітря $\rho = 10^{17}$ Ом м.

Якщо $\epsilon = 1$, то $tg\delta$ при частоті 50 Гц буде дорівнювати 10^{-8} .

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\varepsilon f \rho} = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{1 \cdot 50 \cdot 10^{17}} \approx 10^{-8}.$$

Діелектричні втрати повітря мають найнижче значення і практично не залежать ні від температури, ні від частоти напруги. Однак в сильних полях втрати можуть значно (на кілька десяткових порядків) зростати в результаті поглинання енергії, що йде на іонізацію молекул повітря.

Діелектричні втрати в рідких діелектриках

В рідких неполярних діелектриках (наприклад, в нафтових електроізоляційних оліях) діелектричні втрати обумовлені тільки струмом наскрізної провідності й мають невеликі значення (близько 10^{-4}), які мало залежать від частоти і температури, але істотно залежать від природи і концентрації домішки (рис 1.19). Наявність домішки (наприклад, вологи, вільних органічних кислот і т.ін.) призводить до істотного збільшення електропровідності і, отже, діелектричних втрат.

З рис. 1.19, б видно, що із збільшенням температури $\operatorname{tg}\delta$ чистої сухої нафтової трансформаторної олії зростає незначно. Втрати зростають, оскільки збільшується струм наскрізної провідності. У експлуатаційній олії з гранично припустимим значенням кислотного числа (к.ч. = 0,25 мг $\text{K}_{\text{OH}}/1\text{г}$) дуже високий вміст іоногенної домішки - органічних кислот і води. З підвищенням температури ступінь дисоціації молекул кислот, води та інших іоногенних домішок зростає, отже, зростає іонна провідність в трансформаторному маслі і, як наслідок, збільшуються діелектричні втрати. У рідких полярних діелектриках (в касторовій олії, поліхлордіфенілах і т.ін.) діелектричні втрати є наслідком як струму наскрізної провідності, так і дипольно-релаксаційної поляризації. При цьому дипольно-релаксаційна поляризація істотно впливає на загальний рівень діелектричних втрат. Величина $\operatorname{tg}\delta$ може мати значення $\sim 10^3$ - 10^2 і більше.

У разі дипольно-релаксаційної поляризації $\operatorname{tg}\delta$ при нагріванні проходить через максимум і далі із збільшенням температури зростає, оскільки зростає струм провідності (рис. 1.20, а). Зі збільшенням частоти напруги максимум $\operatorname{tg}\delta$, обумовлений дипольно-релаксаційною поляризацією, зміщується в бік більш високих температур (рис. 1.20, б). Якщо діелектричні втрати вимірювати в

частотному інтервалі, то зі збільшенням частоти напруги вони знижуються, особливо різко спочатку, тому що зменшуються втрати, обумовлені струмом наскрізної провідності. Максимум втрат на кривій залежності викликаний дипольно-релаксаційною поляризацією.

Із зростанням частоти напруги $tg\delta$ в області максимуму зростає до тих пір, доки дипольно-релаксаційна поляризація встигає слідувати за зміною поля. Коли ж частота стає настільки великою, що диполі вже не встигають орієнтуватися в напрямку поля і дипольно-релаксаційна поляризація знижується, то знижується і $tg\delta$, стаючи мінімальним. Зі збільшенням температури максимум $tg\delta$ зміщується в область більш високих частот.

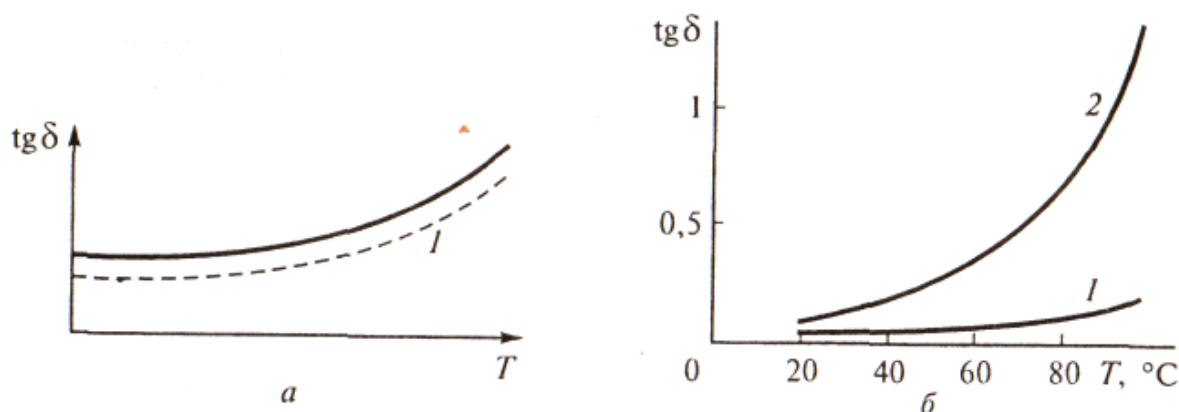


Рисунок 1.19 – Загальний вигляд (а) залежно $tg\delta$ рідких неполярних діелектриків від температури T

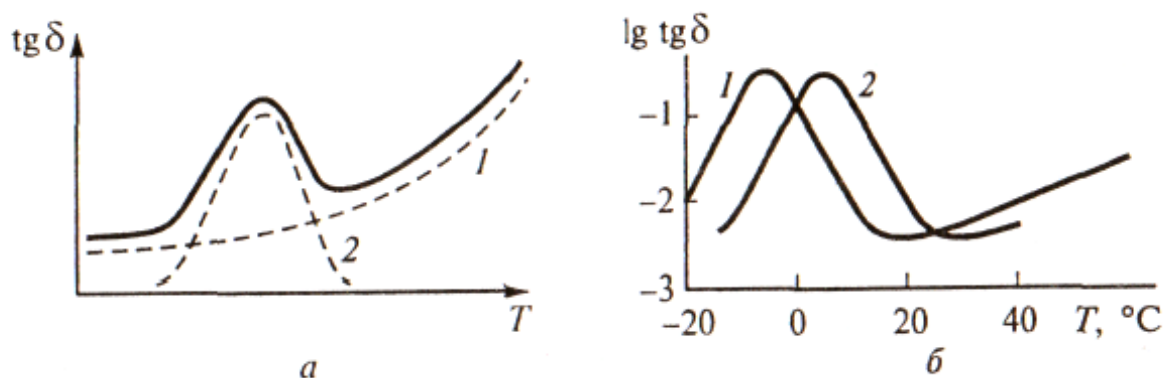


Рисунок 1.20 – Загальний вигляд (а) залежно $tg\delta$ рідких полярних діелектриків від температури

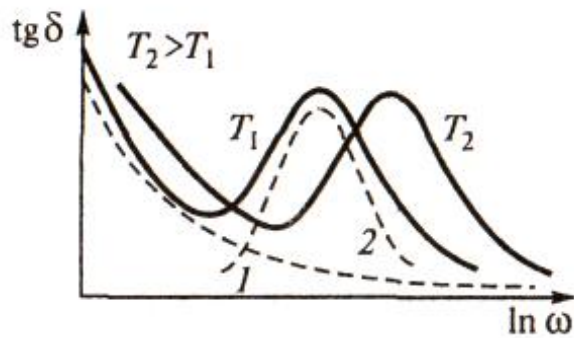


Рисунок 1.21 – Теоретична залежність $tg\delta$ полярних діелектриків від частоти зі напруги: втрати, обумовлені струмом провідності (1), дипольно-релаксаційною поляризацією (2)

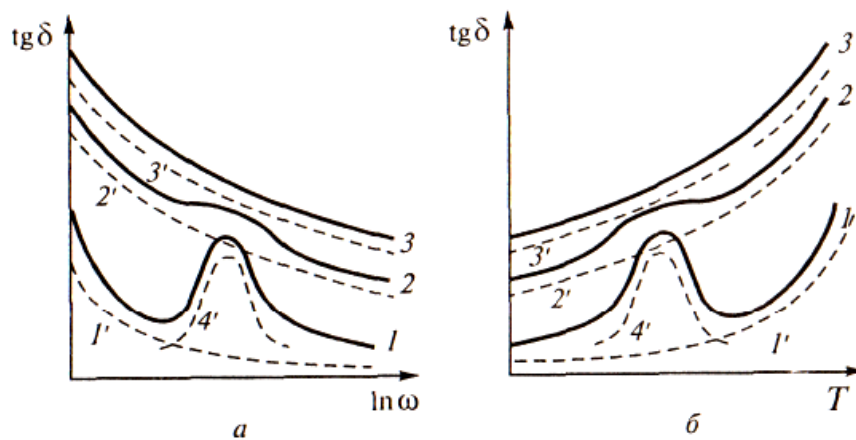


Рисунок 1.22 – Криві залежності $tg\delta$ від частоти напруги (а) і температури T (б) полярного рідкого діелектрика різного ступеня чистоти

На рис. 1.22 наведені криві частотної та температурної залежності $tg\delta$ полярного рідкого діелектрика різного ступеня чистоти. Зі збільшенням номера кривої вміст іоногенної домішки зростає. При великому вмісті домішки дипольно-релаксаційний максимум втрат може бути повністю замаскований втратами, зумовленими струмом провідності (крива 3).

*Діелектричні втрати у твердих діелектриках
Тверді діелектрики іонної будови.*

У кристалічних діелектриках з щільною упаковкою решітки іонами (в кварці, слюді, корундовій кераміці тощо) спостерігаються електронна та іонна поляризації, що не викликають розсіювання потужності прикладеного електричного поля, тому діелектричні

втрати в цьому випадку обумовлені тільки струмом наскрізної провідності. Діелектричні втрати цих матеріалів мають невеликі значення і при підвищенні температури незначно зростають, оскільки зростає струм наскрізної провідності. Наявність домішки, що спотворює кристалічну решітку, призводить до істотного збільшення $tg\delta$. У аморфних та кристалічних діелектриках з нещільною упаковкою решітки (в неорганічних склах, азбесті, електротехнічній кераміці тощо), крім електронної та іонної поляризацій, присутня і іонно-релаксаційна, що викликає іонно-релаксаційні втрати. Діелектричні втрати в цьому випадку обумовлені струмом наскрізної провідності й іонно-релаксаційною поляризацією. Діелектричні втрати в цих діелектриках вище (10^2), ніж в кристалічних діелектриках з щільною упаковкою решітки іонами і сильно залежать від температури: при нагріванні $tg\delta$ істотно зростає.

На значення $tg\delta$ сильно впливає термообробка. У відпалених скляних ізоляторів $tg\delta = 0,0073$, у загартованих - $tg\delta = 0,125$.

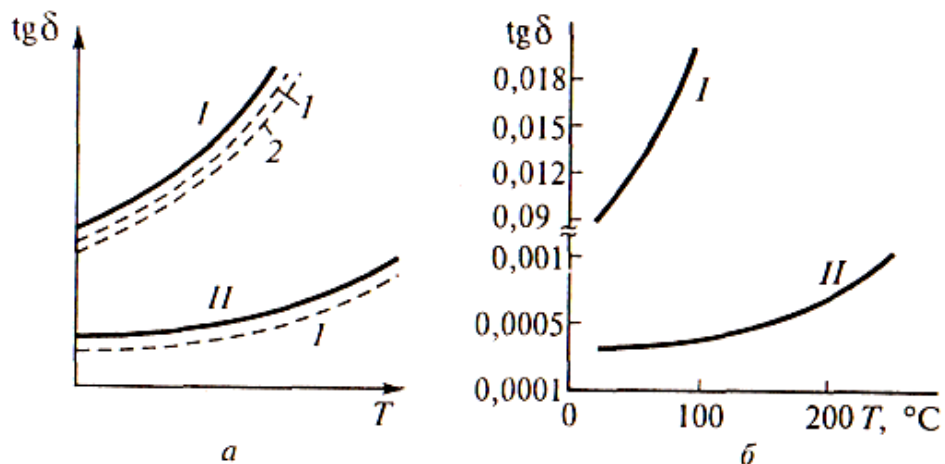


Рисунок 1.23 – Загальний вигляд (а) залежності $tg\delta$ від температури T аморфних або кристалічних діелектриків іонної будови з нещільною (I) і з щільною упаковкою решітки (II): втрати, обумовлені струмом провідності (1) і іонно-релаксаційною поляризацією (2)

Тверді діелектрики молекулярної будови

У неполярних діелектриках (наприклад, в парафіні) втрати обумовлені тільки струмом наскрізної провідності. У цих діелектриків спостерігається електронна поляризація, релаксаційні види поляризації відсутні. Діелектричні втрати невеликі і при

нагріванні злегка зростають. Наявність іоногенної домішки (наприклад, вологи) призводить до істотного зростання діелектричних втрат. В полярних діелектриках (наприклад, в каніфолі) на кривих залежності $tg\delta$ від температури і частоти напруги, подібно полярним рідким діелектрикам, проявляється максимум тангенса кута діелектричних втрат, обумовлений дипольно-релаксаційною поляризацією. В цих діелектриках, так само як в рідких полярних, діелектричні втрати складаються з втрат, зумовлених струмом наскрізної провідності й дипольно-релаксаційною поляризацією.

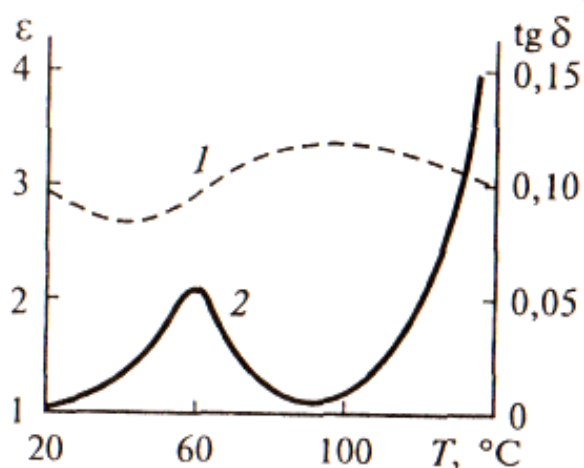


Рисунок 1.24 – Залежність ϵ (1) і $tg\delta$ (2) каніфолі від температури T при 50 Гц

Полімерні діелектрики

У неполярних полімерах (полістиролі, поліпропілені та ін.) діелектричні втрати при температурах нижче температури склування мають невелику величину $tg\delta$ і практично не залежать від частоти прикладеної напруги і дуже слабо залежать від температури (рис. 1.24). При нагріванні (при $T < T_c$) $tg\delta$ незначно зростає, оскільки злегка зростає струм наскрізної провідності. Крива залежності при температурах вище температури склування ($T > T_c$) зростає і проходить через максимум, обумовлений дипольно-сегментальною поляризацією. З подальшим збільшенням температури $tg\delta$ зростає внаслідок збільшення струму провідності.

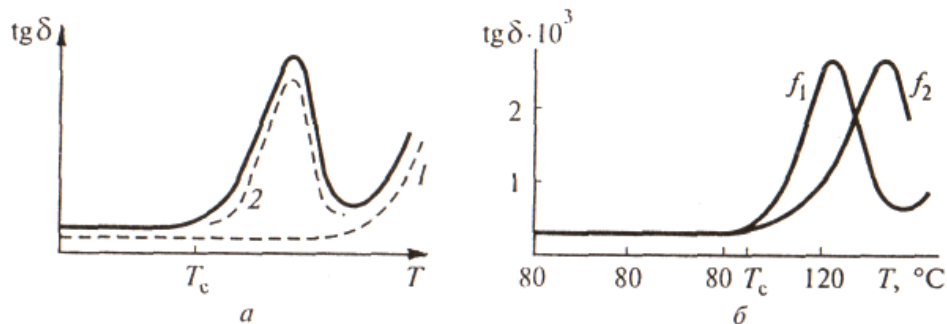


Рисунок 1.25 – Загальний вигляд залежності неполярних полімерів від температури T

Із збільшенням частоти прикладеної напруги максимум дипольно-сегментальних втрат зміщується в область більш високих температур.

Полярні полімери (полівінілхлорид, поліетилентерефталат, поліаміди та ін.) мають значно більші значення $tg\delta$ ніж неполярні. Зі збільшенням температури $tg\delta$ проходить через два максимуми, обумовлені відповідно дипольно-груповою (при $T < T_c$) і дипольно-сегментальною (при $T > T_c$) поляризаціями і далі зростає внаслідок збільшення струму провідності. Із збільшенням ступеня кристалічності до поліетилентерефталату діелектричні втрати знижуються, особливо значно в області дипольно-сегментальної поляризації. Ці результати ще раз показують, що дипольно-сегментальна поляризація має місце в аморфних полімерах, а в тих, що кристалізуються, яким є поліетилентерефталат, - в аморфних областях. Тому зі збільшенням ступеня кристалічності поліетилентерефталату максимум, обумовлений дипольно-сегментальною поляризацією, зменшується.

Зі збільшенням частоти напруги обидва максимуми діелектричних втрат на кривій зміщуються в бік більш високих температур. Тому в області високих температур і СВЧ обидва максимуми втрат зближуються впритул, викликаючи один релаксаційний максимум діелектричних втрат.

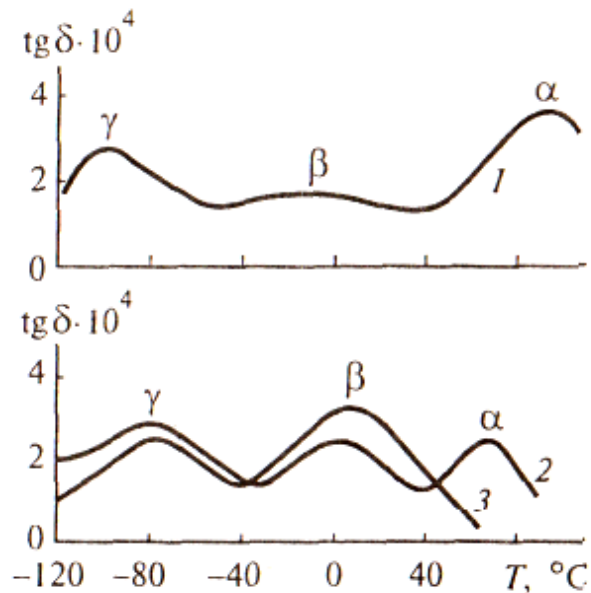


Рисунок 1.26 – Температурна залежність $tg\delta$ лінійного поліетилену високої щільності (1), розгалуженого низької щільності (2) і загартованого (3)

На величину діелектричних втрат полімерів істотно впливають полярність і пористість матеріалу і відносна вологість повітря. У результаті накопичення води в порах ізоляції виникає міграційна поляризація, яка призводить до істотного збільшення діелектричних втрат, особливо при низьких частотах. Тому у полярних полімерів зі збільшенням відносної вологості повітря $tg\delta$ значно зростає.

1.8 ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Загальна характеристика явища пробією

Діелектрик, перебуваючи в електричному полі, втрачає властивості електроізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Це явище носить назву пробією діелектрика або порушення його електричної міцності. Значення напруги, при якому відбувається пробій діелектрика, називається пробивною напругою, а відповідне значення напруженості поля - електричною міцністю діелектрика.

$$E_{np} = U_{np}/h, \quad (1.24)$$

де E_{np} – електрична міцність діелектрика, U_{np} - пробивна напруга, h - товщина діелектрика.

Явище електричного пробою пов'язано з електронними процесами в діелектрику, виникаючими в сильному електричному полі і призводять до раптового різкого місцевого зростання щільності електричного струму до моменту пробою.

Електричний пробій (електронний), що протікає за 10^{-8} - 10^{-5} с, обумовлений ударною іонізацією прискореними в електричному полі електронами. Електрична міцність при пробої повітряних проміжків при нормальних умовах складає $3 \cdot 10^6$ В / м, ретельно очищених рідин досягає 10^8 В / м, твердих діелектриків (монокристалів) - 10^9 В/м.

Електротепловий пробій (тепловий) обумовлений прогресивно наростаючим виділенням теплоти в діелектрику під дією діелектричних втрат в місцях найгіршого тепловідводу зразка (виробу). Такий пробій розвивається за 10^{-3} - 10^{-2} с, E_{np} тут сягає 10^7 В / м.

Електрохімічний пробій (старіння) обумовлений повільними змінами хімічного складу і структури діелектрика, які розвиваються під впливом електричного поля і (або) розрядів в навколишньому середовищі. Час розвитку електрохімічного пробою становить 10^3 - 10^8 с і називається часом життя діелектрика $t_{ж}$. Зі збільшенням температури і напруженості електричного поля $t_{ж}$, як правило, зменшується. Такий пробій розвивається в полях, значно менших, ніж E_{np} діелектрика. Основною причиною електричного старіння полімерів є часткові розряди (ЧР).

Розвиток тієї чи іншої форми пробою залежить від природи діелектрика і умов визначення E_{np} або експлуатації. При випробуваннях на імпульсах тривалістю 10^{-8} - 10^{-5} с в умовах відсутності розрядів у країв електродів відбувається електричний пробій. Якщо s такого діелектрика велика і різко залежить від температури, то при витримці цього ж зразка під напругою протягом 10^{-3} - 10^{-2} с в ньому розвивається тепловий пробій. При впливі на зразок протягом тривалого часу меншими напругами, при яких в діелектрику відбуваються ЧР або інші процеси, що зумовлюють старіння, спостерігається електрохімічний пробій.

Значення U_{np} і E_{np} визначають відповідно до ГОСТ 6433.3-71.

Механічні властивості характеризують здатність діелектрика витримувати зовнішні статичні і динамічні навантаження без неприпустимої зміни початкових розмірів і форми. Параметри, що характеризують механічні властивості, як правило, визначаються за стандартними методиками.

*Загальна характеристика явища пробією
Пробій газів*

Зовнішньою ізоляцією в багатьох видах електротехнічних конструкцій: трансформаторах, конденсаторах, лініях електропередачі - служить повітря. Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика в порівнянні з E_{np} більшості рідких і твердих діелектриків. Позитивні та негативні іони і електрони, як і нейтральні молекули газу, що знаходяться в хаотичному тепловому русі, під дією поля отримують деяку додаткову швидкість і починають переміщатися в напрямку поля або в протилежному залежно від знаку заряду. При цьому заряджена частка газу набуває додаткову енергію.

$$W = q U \cdot l, \quad (1.25)$$

де q - заряд, $U \cdot l$ - падіння напруги на довжині вільного пробігу l . Якщо поле досить однорідне, то можна прийняти $U \cdot l = E \cdot l$, де E - напруженість поля. Звідси $W = E \cdot q \cdot l$.

Додаткова енергія заряджених частинок передається молекулам, з якими вони стикаються. Якщо ця енергія досить велика, відбувається збудження атомів і молекул, пов'язане з переходом електрона на більш віддалену від ядра орбіту, або навіть іонізація молекул, тобто їх розщеплення на електрони і позитивні іони. При заданих значеннях тиску газу і температури ударна іонізація починається при певній напруженості поля, оскільки q і l постійні для кожного газу. Ця напруженість поля називається початковою.

Приєднання електрона до нейтральної молекули призводить в подібних випадках до такої перебудови її електронної оболонки, що в підсумку енергія молекули, яка захопила зайвий електрон, виявляється менше енергії нейтральної молекули на деяку величину, яку називають енергією спорідненості до електрону. У деяких випадках електрон, розігнаний полем, може не іонізувати молекулу, а привести її у збуджений стан. В наступний момент ця збуджена молекула віддає свою надлишкову енергію у формі випромінювання - випускає фотон. Фотон поглинається якою-небудь іншою молекулою, яка при цьому може іонізуватися. Електропровідний канал називають стримером, а фотонна іонізація створює в розрядному проміжку канал з підвищеною провідністю газу. Зростання електропровідного каналу (стримера) відбувається швидше, ніж просування електронної

лавини.

Позитивний стример являє собою канал газорозрядної плазми: характеризується інтенсивною фотонною іонізацією; внаслідок іонізації концентрація позитивних іонів на шляху стримера збільшується. Насичений електронами простір заповнюється позитивними зарядами і перетворює цю область в провідну газоподібну плазму.

Однорідне поле можна отримати між плоскими електродами із закругленими краями, а також між сферами при відстані між ними, порівнянною з діаметром сфери. В такому полі пробій настає практично миттєво при досягненні суворо певної напруги, залежить від температури і тиску газу. Між електродами виникає іскра, яка потім переходить у дугу, якщо джерело напруги має достатню потужність. При малих відстанях між електродами спостерігається значне збільшення електричної міцності повітря. Це явище можна пояснити труднощами формування розряду при малій відстані між електродами. Електрична міцність газу в сильному ступені залежить від його щільності (тобто від тиску, якщо температура постійна). При малих змінах температури і тиску газу пробивна напруга пропорційна щільності газу. При великих тисках, підвищується щільність газу, тому для отримання пробією необхідно збільшення напруженості поля. При високому вакуумі пробій можна пояснити явищем виривання електронів з поверхні електрода (холодна емісія).

Закономірності, яким підпорядковується пробій газів в неоднорідному полі, помітно відрізняються від описаних вище закономірностей, які спостерігаються при пробію в однорідному полі. Неоднорідне поле виникає між двома вістрями, вістрям і площиною, між проводами ліній електропередачі, між сферичними поверхнями при відстані між ними, що перевищує діаметр сфери і т.д. Особливістю пробією 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.

Між електродами голка-площина при позитивній полярності голки пробій відбувається при меншій напрузі, ніж при зворотній полярності. Це пояснюється тим, що поляризація газу при будь-якій полярності на електродах відбувається близько голки, тобто там, де існують найбільші значення напруженості електричного поля, і, отже, біля неї утворюється "хмара" з позитивно заряджених іонів - молекул. Тому пробій настає при меншій напрузі, ніж при протилежній

полярності електродів.

Розряд у повітрі біля поверхні твердого діелектрика, названий в техніці поверхневим розрядом (перекриттям), виникає зазвичай при більш низьких напругах, ніж у тому випадку, коли між електродами є тільки повітря. На розрядну напругу впливають форма електричного поля, обумовлена конфігурацією електродів і діелектрика, частота поля, стан поверхні діелектрика, тиск повітря.

Пробій газів в однорідному електричному полі

Однорідне поле утворюється між електродами однакової геометричної форми з великою площею поверхні (наприклад, площина - площина, куля-куля), коли їх діаметр D в 10 разів більше відстані між ними h . Електрична міцність газів у порівнянні з твердими і рідкими діелектриками невелика. Порушення їх ізоляційних властивостей пов'язано з явищем ударної іонізації.

Серед газоподібних діелектриків перш за все повинно бути згадане повітря, яке в силу своєї загальної поширеності входить до складу електричних пристроїв і грає в них роль електричної ізоляції. На ділянках повітряних ліній електропередачі між опорами, повітря утворює єдину ізоляцію між проводами лінії. В неякісній проводці заповнені повітрям пори можуть стати осередками утворення іонізації. За інших рівних умов різні гази можуть мати помітно різні значення електричної міцності. Азот має практично однакоvu з повітрям електричну міцність. Однак деякі гази, що мають високу молекулярну масу, і сполуки, що містять галогени (фтор, хлор), для іонізації яких потрібна велика енергія, мають помітно підвищену в порівнянні з повітрям електричну міцність.

Гексафторид сірки (шестифториста сірка) SF_6 - елегаз, має електричну міцність приблизно в 2,5 рази вище, ніж у повітря. Елегаз нетоксичний, хімічно стійкий, не розкладається при нагріванні до $800\text{ }^\circ\text{C}$, його з успіхом можна використовувати в конденсаторах, кабелях і т.д, особливо при підвищених тисках.

Дихлордифторметан CCl_2F_2 - так званий хладон - 12, має електричну міцність, близьку до електричної міцності елегазу, але його температура кипіння всього лише $242,7\text{ K}$ ($-30,5\text{ }^\circ$), і він при нормальній температурі може бути стиснутий без скраплення лише до $0,6\text{ МПа}$. Хладон -12 викликає корозію деяких твердих органічних електроізоляційних матеріалів.

Перфторовані вуглеводні, у яких всі атоми водню заміщені атомами фтору, мають склад C_xF_y при нормальних умовах, є газами

(CF₄, C₂F₆, C₃F₈, c₄F₈, C₄F₁₀) або рідини (C₇F₈ та ін.). Електрична міцність деяких з цих газів, а також парів рідин істотно (в шістьдесят разів) перевершує електричну міцність повітря.

Електрична міцність фторовмісних газів і парів при нормальних умовах може бути того ж порядку, що і електрична міцність електроізоляційних рідин. Але гази мають над рідинами такі переваги, як значно менша щільність (що призводить до зменшення маси заповнюваних газом апаратів), більш висока нагрівостійкість і стійкість до старіння. Навіть невелика домішка до повітря елегазу, фреону, перфторорганічних газів або парів помітно підвищує його електричну міцність.

Водень - дуже легкий газ, що володіє досить сприятливими властивостями для використання його в якості охолоджуючого середовища замість повітря. Водень характеризується високою теплопровідністю і питомою теплоємністю. За інших рівних умов електрична міцність водню приблизно на 40%, а вугільного ангідриду CO₂ - на 10% нижче, ніж електрична міцність повітря. Для заповнення газорозрядних приладів вживаються інертні гази аргон, неон та інші, а також пари ртуті і натрію. Інертні гази володіють низькою електричною міцністю.

Слід зазначити досить малу теплопровідність криптону і ксенону. Ця обставина використовується у виробництві деяких типів електричних ламп. Особливо велике значення в якості низькотемпературного хладагенту, зокрема для пристроїв, що використовують явище надпровідності, має зріджений гелій. Гелій являє собою виключно цікавий газ, що володіє унікальними властивостями. У нього найнижча в порівнянні з іншими газами температура скраплення (4,216 К при атмосферному тиску). Квантовомехані явища в рідкому гелії роблять його поведінку багато в чому схожою з поведінкою газів, а не рідин. Теплота випаровування його надзвичайно низька, що істотно для криогенної техніки.

Рідкий гелій має дуже малу щільність (приблизно у вісім разів менше щільності води при нормальній температурі, проте ще меншою щільністю володіє рідкий водень). Діелектрична проникність рідкого гелію мала (1,047). При глибокому охолодженні нормальний рідкий гелій (гелій I) переходить в нову модифікацію - гелій II. Цей фазовий перехід, відкритий в 1937 р. академіком П.Л. Капицею, носить назву λ - переходу, а точка перетину кордону λ - переходу з кривою випаровування на фазовій діаграмі гелію називається λ -точкою; температура λ -точки дорівнює 2,1735 К.

В'язкість гелію 11 практично дорівнює нулю (це стан П.Л. Капица назвав надплинністю; так гелій 11 легко проникає крізь щілину між шліфованими скляними пластинками). Коефіцієнт гелію 11 практично нескінченно великий, питома теплоємність рідкого гелію при λ -переході зростає в багато разів. Теоретичне пояснення надзвичайних властивостей гелію 11 було дане академіком Л.Д. Ландау.

Твердий гелій може бути отриманий лише при тиску не нижче 2,5 МПа. Іноді як криогенний хладагент застосовується рідкий неон, температура кипіння якого лише ненабагато перевершує температуру кипіння водню. Для неону, як і для інших інертних газів, характерно дуже мале розходження між температурою кипіння $T_{кип}$ і температурою плавлення $T_{пл}$. Хімічна інертність неону - це його перевага перед вибухонебезпечним воднем. Однак неон дуже дорогий газ: якщо прийняти відносну вартість 1 м³ азоту за одиницю, то вартість водню буде близько 2, гелію - 80, неону - 30 000 одиниць.

Рідкий азот легко виходить при розділенні повітря на азот і кисень; рідкий водень виробляється промисловістю багатьох країн (як ракетне паливо) у великих кількостях.

Для отримання помірно низьких температур широко застосовується твердий вугільний ангідрид CO₂ - «сухий лід».

Пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики відрізняються більш високою електричною міцністю, ніж гази в нормальних умовах. Гранично чисті рідини отримати надзвичайно важко. Постійними домішками в рідких діелектриках є вода, гази і тверді частинки. Наявність домішок і визначає в основному явище пробію рідких діелектриків і викликає великі труднощі для створення точної теорії пробію цих речовин.

Підвищена електрична міцність рідкого діелектрика в порівнянні з газоподібним обумовлена значно меншою довжиною вільного пробігу електронів. Під впливом електричного поля сферичні крапельки води - сильно дипольної рідини - поляризуються, набувають форму еліпсоїдів і, притягуючись між собою рівномірними кінцями, створюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких і проходить електричний пробій.

Наявність води знижує електричну міцність олії при нормальній температурі. Зростання $E_{пр}$ при підвищенні температури обумовлено переходом води зі стану емульсії в стан молекулярного розчину.

Пробій твердих діелектриків

Розрізняють чотири види пробою твердих діелектриків:

- електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків;
- електричний пробій неоднорідних діелектриків;
- тепловий (електротепловий);
- електрохімічний.

Кожен із зазначених видів пробою може мати місце для одного і того ж матеріалу в залежності від характеру електричного поля (постійного або змінного, імпульсного, низької або високої частоти), наявності в діелектрику дефектів, часу впливу напруги.

Електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків - характеризується досить швидким розвитком, він протікає за час, менше 10^{-7} - 10^{-8} с, і не обумовлений тепловою енергією, хоча електрична міцність при електричному пробі в деякій мірі залежить від температури.

Електричний пробій за своєю природою є чисто електронним процесом, коли з небагатьох початкових електронів в твердому тілі створюється електронна лавина - виникає ударна іонізація. Чисто електричний пробій має місце, коли виключено вплив електропровідності та діелектричних втрат, що обумовлюють нагрів матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. Для однорідного поля і повної однорідності структури матеріалу напруженість поля при електричному пробі може служити мірою електричної міцності речовини. Для однорідних матеріалів спостерігається помітна різниця між значеннями пробивної напруги в однорідному і неоднорідному полях.

Електричний пробій неоднорідних діелектриків - характерний для технічних діелектриків, що містять газові включення, і так само, як і електричний пробій однорідного діелектрика, швидко розвивається. Пробивні напруги для неоднорідних діелектриків, що знаходяться у зовнішньому однорідному або неоднорідному полі, як правило, невисокі і мало відрізняються одна від одної.

Зі збільшенням товщини зразка посилюється неоднорідність структури, зростає число газових включень і знижуються електричні міцності як в однорідному, так і в неоднорідному полі. Чим менше площа електродів, тим вище може бути значення електричної міцності керамічних матеріалів внаслідок зменшення числа сторонніх включень, які потрапляють в межі поля. Зниження електричної міцності твердих діелектриків при збільшенні площі електродів спостерігається не тільки у кераміки, але і в інших матеріалів: паперу,

картону, лакотканин.

Електрична міцність твердих діелектриків практично не залежить від температури до деякого її значення, що говорить про появу механізму теплового пробію. Низькою електричною міцністю відрізняються діелектрики з відкритою пористістю (непросочений папір, дерево, пориста кераміка). Високою електричною міцністю характеризуються діелектрики, що мають щільну структуру і не містять газових включень.

Тепловий пробій виникає в тому випадку, коли кількість теплоти, що виділяється в діелектрику за рахунок діелектричних втрат, перевищує кількість теплоти, яка може розсіюватися в даних умовах, при цьому порушується теплова рівновага, а процес набуває лавиноподібний характер. Електрична міцність при тепловому пробію є характеристикою не тільки матеріалу, але і виробу з нього, тоді як електрична міцність при електричному пробію служить характеристикою самого матеріалу. Пробивна напруга, обумовлена нагріванням діелектрика, пов'язана з частотою напруги, умовами охолодження, температурою навколишнього середовища. Механізм теплового пробію найбільш вірогідний при підвищених температурах.

Температура по всьому об'єму матеріалу, що знаходиться в електричному полі між електродами (крайовим ефектом нехтуємо), однакова, якщо товщина діелектрика не дуже велика і теплопровідність його достатня. У загальному випадку тепловий пробій - більш складне явище, ніж було розглянуто, важливу роль в ньому відіграє теплопровідність матеріалу електродів.

Електрохімічний пробій електротехнічних матеріалів має істотне значення при підвищених температурах і високій вологості повітря. Цей вид пробію спостерігається при постійній і змінній напругах низької частоти, коли в матеріалі розвиваються процеси, що обумовлюють необоротне зменшення опору ізоляції (електрохімічне старіння). Електрохімічний пробій може мати місце при високих частотах, якщо в закритих порах матеріалу відбувається іонізація газу, що супроводжується тепловим ефектом і відновленням, наприклад, в кераміці, оксидів металів змінної валентності.

Для розвитку електрохімічного пробію потрібен тривалий час, оскільки він пов'язаний з явищем електропровідності. У кераміці, що містить оксиди металів змінної валентності (наприклад, TiO_2), електрохімічний пробій зустрічається значно частіше, ніж у кераміці, що складається з оксидів алюмінію, кремнію, магнію, барію.

Електрохімічний пробій спостерігається і у багатьох органічних матеріалів і багато в чому залежить від матеріалу електродів.

Таким чином, електричний пробій, що протікає за 10^{-8} - 10^{-5} с, обумовлений ударною іонізацією прискореними в електричному полі електронами. Тоді електрична міцність повітряних проміжків при нормальних умовах складає $3 \cdot 10^6$ В / м, ретельно очищених рідин досягає 10^8 В / м, твердих діелектриків (монокристалів) - 10^9 В / м.

Електротепловий пробій обумовлений прогресивно наростаючим виділенням теплоти в діелектрику під дією діелектричних втрат в місцях найгіршого тепловідводу зразка (виробу). Такий пробій розвивається за 10^{-3} - 10^2 с, $E_{пр}$ тут досягає 10^7 В / м.

Старіння керамічних матеріалів

Під старінням керамічних матеріалів і скла зазвичай мається на увазі зниження їх електрофізичних характеристик, головним чином електричної міцності, при впливі електричних полів. Величину зниження електричної міцності пов'язують з кількістю зарядів, що пройшли через зразок. Збільшення струму можна досягти підвищенням температури або прикладеної до зразка напруги. Однак, підвищення цих параметрів повинно проводитися в таких межах, щоб характер провідності не змінився, тобто механізм прискореного старіння залишився таким же, як і в експлуатаційних умовах.

У фарфорі електропровідність в широкому інтервалі не залежить від температури і здійснюється за рахунок іонів лужних металів, головним чином натрію. Величина напруги при старінні вибирається таким чином, щоб до діелектрика був застосований закон Ома. Вихід за область дії закону Ома пов'язаний зі зміною характеру провідності.

Важливе значення при обґрунтуванні методики старіння кераміки має правильний вибір електродів. Старіння фарфору полягає в тривалому пропусненні через зразки постійного струму, величина якого фіксувалася через певні проміжки часу. При тривалій дії постійного електричного поля відбувається зменшення електричної міцності порцеляни. Зниження електричної міцності фарфорових матеріалів можна пояснити тим, що при тривалому проходженні електричного струму через порцелянові матеріали, що мають електричну провідність, в процесі дії на них високої постійної напруги один з приелектродних шарів об'єднується з носіями струму та його опір зростає. Вся напруга виявляється прикладеною до тонкого приелектродного шару, об'єднаному іонами провідності, що

призводить його до пробою. Це викликає в свою чергу зменшення загальної активної товщини діелектрика ϵ , отже, загальне зниження його електричної міцності.

При збігу напрямків полів «старіння» і пробою е.р.с. високовольтної поляризації частково компенсує зовнішню напругу і для пробою зразка потрібно прикласти більше напруження. Тривале проходження струму через зразок порцеляни, що має в основному іонну провідність, призводить до утворення концентрації оксидів елементів, за рахунок яких здійснюється провідність. Оскільки в порцеляні це іони лужних металів, як правило в основному натрію, то електроліз призводить до обезлужування приелектродних частин зразка з одного боку і виділення оксидів на іншому електроді. Головна відмінність досліджуваних на «старіння» матеріалів полягає в хімічному складі їх склоподібної фази, їй належить вирішальна роль.

Високий опір порцеляни, в якій окис натрію заміщений в еквімолекулярних кількостях окисом кальцію, пояснюється тим, що двовалентний іон кальцію на відміну від одновалентних не створює розривів у сітці скла. Таким чином, ця заміна створює зміцнення склофази порцеляни й призводить до підвищення її електрофізичних властивостей. Разом з тим іон кальцію при електролізі створює розриви в сітці склофази і зниження електричної міцності. При вивченні старіння кераміки на змінній напрузі високої частоти була встановлена важлива роль іонізації в порах, також виявлено вплив цих процесів на старіння при постійній напрузі.

Нейтралізація заряджених часток, що осідають на стінках пор, може проходити за допомогою струму об'ємної і поверхневої провідності. Іонізаційні процеси в порах керамічних зразків при постійній напрузі, як правило, відбуваються швидко і тому мало помітні. Роль іонізаційних процесів зростає, якщо провідність стінок пор помітно збільшується, відбувається їх розігрів, нагрівання посилюється, викликаючи збільшення провідності.

Конденсаторні матеріали на основі сполук титану в полях постійного струму мають тенденцію до старіння. У процесі старіння рутилової кераміки при певній постійній температурі і напрузі величина струму провідності безперервно зростає, і в кінцевому підсумку настає пробій. При періодичній зміні полярності постійного струму властивості рутилової кераміки відновлюються і старіння не спостерігається. Відновлення властивостей конденсаторних матеріалів при зміні полярності поля супроводжується зменшенням

електропровідності.

Рутилова кераміка має електронну провідність і її старіння описується як результат утворення під дією зовнішнього поля парних дефектів. Парний дефект: іон в міжвузлі - аніонна вакансія. При відсутності поля або в полі зворотної полярності відбувається рекомбінація дефектів і регенерація електроізоляційних властивостей.

Таким чином, якщо електропровідність кераміки носить електролітичний характер, то старіння пояснюється електрофізичними процесами і є незворотнім. При електронній провідності старіння носить оборотний характер і можливе відновлення вихідних властивостей шляхом зміни полярності або відпалювання.

Важливе значення мають електролітичні процеси в старінні глазури, яка є неодмінною складовою частиною електроізоляторів. Наявність електродних потенціалів між окислами, що входять до складу глазури, може викликати її корозію навіть при відсутності зовнішнього поля. При подачі змінного поля корозія прискорюється і особливо інтенсивно йде у зволоженій атмосфері в полі постійної напруги.

1.9 ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Вологісні властивості діелектриків

Діелектричні матеріали в більшій чи меншій мірі здатні поглинати вологу з навколишнього середовища, а також пропускати її через себе, тобто вони в певній мірі гігроскопічні і вологопроникні. Кількість поглиненої води з атмосферного повітря залежить не тільки від природи самого діелектрика, але також і від концентрації водяної пари в повітрі.

В атмосферному повітрі завжди присутня та чи інша кількість водяної пари, вміст якої можна оцінити по абсолютній вологості - за масою m водяної пари, що знаходяться в одиниці об'єму повітря, або за відносною вологістю ψ_v , вимірюваною в процентах:

$$\psi_v = (m / m_{\text{н}})100, \quad (1.26)$$

де m - абсолютна вологість повітря, г/м^3 ; m_n - абсолютна вологість повітря при насиченні (при тих же значеннях температури і тиску, що і m), г/м^3 .

На практиці вміст водяної пари в повітрі, тобто вологість повітря, зазвичай оцінюють відносною вологістю ψ_v , оскільки експериментально визначити її простіше, ніж абсолютну вологість. Відносну вологість повітря ψ_v вимірюють за допомогою спеціальних приладів: гігрометрів, психрометрів і т.п. Абсолютна і відносна вологості залежать від температури: з її збільшенням вони зростають (рис.1.27).

Отже, одному і тому ж значенню відносної вологості повітря ψ_v , виміряним при різній температурі, будуть відповідати різні значення абсолютної вологості, тобто різний вміст водяної пари в одиниці об'єму повітря. Знаючи відносну вологість повітря ψ_v , за допомогою формули (1.26) і табл.1.1 можна визначити відповідну їй абсолютну вологість (при тих же значеннях температури і тиску). Наприклад, якщо відносна вологість повітря $\psi_v = 70\%$, то абсолютна вологість при 10°C буде дорівнювати $m = (9,4 \cdot 70)/100 = 6,58 \text{ г/м}^3$, при 20°C $m = (17,3 \cdot 70)/100 = 12,11 \text{ г/м}^3$, при 30°C $m = 20,23 \text{ г/м}^3$.

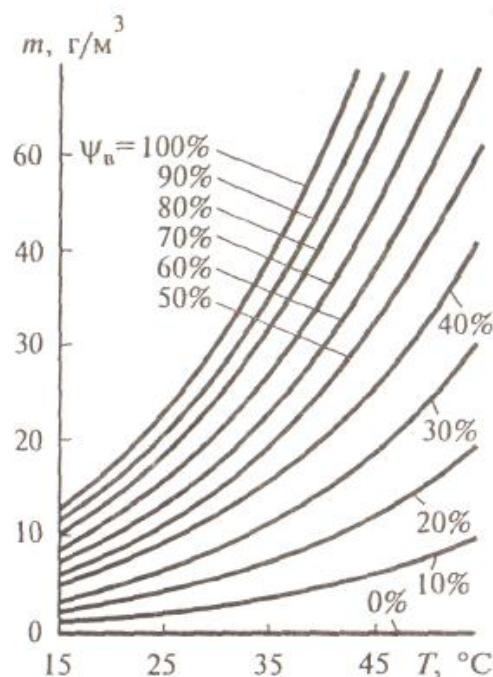


Рисунок 1.27 – Абсолютна вологість повітря m при нормальному атмосферному тиску і різних значеннях відносної вологості ψ_v у функції температури T

Таблиця 1. Абсолютна вологість повітря при насичені m_n для різних значень температури T

$T, ^\circ\text{C}$	$m_n, \text{г/м}^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$m_n, \text{г/м}^3$
-10	2,15	50	89,5
0	4,86	60	131,3
10	9,4	70	200
20	17,3	80	295
30	28,9	90	425
40	50,6	100	600

Якщо в повітря з відносною вологістю ψ_e помістити два зразки одного і того ж матеріалу, один з яких сухий, а інший вологий, то перший зразок почне зволожуватися, а другий підсихати. Вологість обох зразків протягом часу τ буде асимптотично наближатися до деякої рівноважної вологості ψ_p , відповідної даної ψ_e (рис.1.28).

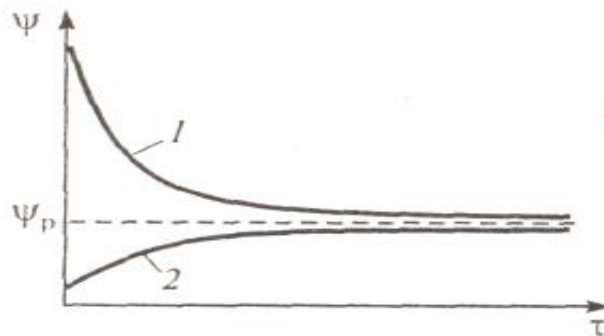


Рисунок 1.28 – Зміна у часі τ вологості ψ зразків матеріалу вологого (1) і сухого (2) при незмінних значеннях ψ_p і T навколишнього повітря

Ця рівноважна вологість ψ_p , до якої матеріал прагне зволожитися або підсохнути, при даній вологості повітря ψ_e і температурі для різних матеріалів різна. У полярних матеріалів при одній і тій же відносній вологості повітря, наприклад, $\psi_e = 80\%$ і однієї і тієї ж пористості рівноважна вологість ψ_p у 7-8 разів більше, ніж у неполярних. Матеріали анізотропної будови вбирають вологу в різних напрямках з різною швидкістю. На ступінь зволоження істотно впливають наявність і розмір капілярних пор. У сильнопористих матеріалів, особливо волокнистих, ψ_p вище, ніж у щільних матеріалів, суцільної будови. Зі збільшенням температури ψ_p знижується.

Якщо поглинена волога всередині матеріалу утворює наскрізні нитки або плівки, то навіть невелика її кількість призводить до різкого погіршення електричних властивостей ізоляції. Якщо ж волога розподілена у вигляді окремих, не з'єднаних між собою включень, то наявність вологи менш істотно впливає на електричні властивості.

Під гігроскопічністю матеріалу (у вузькому сенсі цього слова) розуміють рівноважну вологість ψ_p при 20°C у повітрі з $\psi_e = 100\%$. Якщо відносна вологість повітря $\psi_e = 65\%$ ($T = 20^\circ\text{C}$), то це кондиційна вологість матеріалу. Якщо матеріал безпосередньо стикається з водою, то в цьому випадку він характеризується водопоглинанням.

Велике практичне значення для оцінки якості захисних покриттів (лакові покриття ізоляції електромашин, шлангова ізоляція кабелів, компаундні заливки і т.п.) має вологопроникність матеріалів. Вологопроникність характеризує здатність матеріалу пропускати через себе вологу. Завдяки наявності щонайменшої пористості більшість матеріалів вологопроникні. Тільки скло, обпалена глазуровані кераміка і метали вологонепроникні.

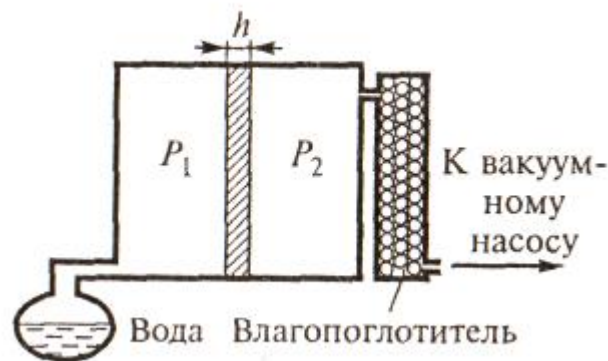


Рисунок 1.29 – Схема установки для визначення вологопроникності матеріалу

Коефіцієнт вологопроникності Π матеріалу знаходиться з основного рівняння вологопроникності:

$$M = \Pi(P_1 - P_2)S\tau/h, \quad (1.27)$$

де M - кількість вологи, кг, що проходить за час τ , с, крізь ділянку поверхні зразка матеріалу площею S , м², і товщиною h , м, під дією різниці тисків P_1 і P_2 , Па, з двох сторін шару.

Величина M є різницею ваг посудини з вологопоглиначем до випробування і через час τ . В одиницях СІ Π вимірюється в секундах.

Рівняння формально аналогічно закону Ома, при цьому різниця тисків P_1 і P_2 подібна різниці потенціалів, відношення M / τ - силі струму, коефіцієнт Π аналогічний питомій об'ємній провідності.

У різних матеріалів величина Π змінюється в дуже широких межах.

Здатність діелектриків змочуватися водою (або іншою рідиною) характеризується крайовим кутом змочування θ краплі води, нанесеної на плоску поверхню тіла. Чим менше θ , тим сильніше змочування; для змочуваних поверхонь $\theta < 90^\circ$, для незмочуваних $\theta > 90^\circ$.

Для зменшення гігроскопічності і вологопроникності простих ізоляційних матеріалів широко застосовується їх просочування. Необхідно мати на увазі, що просочування целюлозних волокнистих матеріалів та інших органічних діелектриків лише уповільнює зволоження матеріалу, не впливаючи на питомий об'ємний опір після тривалого впливу вологості. Молекули просочувальних речовин, що мають вельми великі розміри, у порівнянні з розмірами молекул води, не в змозі створити повну непроникність матеріалу для вологи, а в найбільш дрібні пори матеріалу, що просочується, вони взагалі не можуть проникнути.

Поява цвілі також зменшує питомий поверхневий опір діелектриків, призводить до зростання втрат, може знизити механічну міцність ізоляції і викликати корозію дотичних з нею металевих частин. Найбільш стійкими до утворення цвілі є неорганічні діелектрики: кераміка, скло, кремнійорганічні матеріали і деякі органічні, наприклад епоксидні смоли, фторопласт - 4, поліетилен, полістирол.

Випробування на тропікостійкість - електроізоляційні матеріали та різні електротехнічні вироби довгостроково витримують при температурі 40 - 50°C у повітрі, насиченому парами води, і при впливі культур пліснявих грибків (точні умови цих випробувань встановлені Міжнародною електротехнічною комісією), після чого визначається ступінь погіршення електричних і інших властивостей досліджуваних зразків і відзначається інтенсивність росту цвілі на них.

З метою поліпшення пліснявостійкості органічної електричної ізоляції в її склад вводять добавки фунгіцидів, тобто речовин, отруйних для цвілевих грибків і затримують їх розвиток, або ж покривають ізоляцію лаком, що містить фунгіциди (сполуки, що містять азот, хлор, ртуть).

Механічні властивості діелектриків

Механічні властивості характеризують здатність діелектрика витримувати зовнішні статичні і динамічні навантаження без неприпустимої зміни початкових розмірів і форми. Параметри, що характеризують механічні властивості, як правило, визначаються за стандартними методиками.

Найпростіші види статичних механічних навантажень - розтягування, стискання і згинання - вивчаються на підставі закономірностей прикладної механіки (опору матеріалів). Значення меж міцності при розтягуванні позначається як σ_p , стисненні σ_c і вигині σ_i . В системі СІ виражаються в паскалях ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 \approx 10^{-5} \text{ кгс/см}^2$).

Для електроізоляційних матеріалів анізотропної будови (шаруватих, волокнистих) значення механічної міцності сильно залежать від напрямку прикладання навантаження. Для деяких діелектриків (скло, керамічні матеріали, пластмаси) межа міцності при стисненні значно більше, ніж при розтягуванні і вигині (в той час як у металів σ_p , σ_c і σ_i мають один і той же порядок). Механічна міцність ряду діелектриків сильно залежить від площі поперечного перерізу зразків. Механічна міцність електроізоляційних матеріалів сильно залежить також від температури, як правило, зменшуючись з її ростом. Міцність гігроскопічних матеріалів нерідко істотно залежить від вологості.

Визначення межі міцності і відносної деформації при руйнуванні дає деяке уявлення про механічну міцність матеріалу і його здатність деформуватися під навантаженням (про пластичні властивості матеріалу), але вичерпних відомостей про поведінку матеріалу під дією механічного навантаження вони не дають.

Деякі матеріали (в особливості термопластичні) здатні деформуватися при тривалому впливі. Пластичність небажана, якщо виріб в експлуатації повинен довгостроково зберігати незмінну форму і розміри. При підвищенні температури і наближенні її до температури розм'якшення даного матеріалу пластичність матеріалу сильно збільшується.

Крихкість - здатність руйнуватися без помітної пластичної деформації. Крихкість залежить від структури матеріалу і умов випробування; збільшується при збільшенні швидкості навантаження і при пониженні температури, при підвищенні ступеня концентрації напружень. Крихкість матеріалу, що спостерігається тільки при ударних навантаженнях, називається ударною крихкістю. Багато матеріалів крихкі, тобто володіючи порівняно високою міцністю по відношенню до статичних навантажень, в той же час легко руйнуються динамічними (раптовими) навантаженнями. У кераміки межа пружності і межа міцності при статичному розтягуванні практично збігаються, а у металів перед руйнуванням виявляється пластичність.

Поширений прийом для оцінки здатності матеріалу витримувати динамічні навантаження (крихкості матеріалу) - випробування на ударний вигин (визначення ударної в'язкості). Ударна в'язкість $\sigma_{уд}$ матеріалу - це витрачена на злам зразка енергія W , віднесена до площі поперечного перерізу зразка S . Ударна в'язкість в системі СІ вимірюється в $\text{Дж/м}^2 \approx 10^{-3} \text{ кгс. см/см}^2$). Дуже високою ударною в'язкістю володіє поліетилен, у якого $\sigma_{уд}$ перевищує 100 кДж/м^2 , для керамічних матеріалів і мікалексу $\sigma_{уд}$ складає всього $2-5 \text{ кДж/м}^2$.

Для рідких і напіврідких електроізоляційних матеріалів, масел, лаків, просочувальних компаундів важливою механічною характеристикою є в'язкість (внутрішнє тертя) - властивість рідин і газів чинити опір переміщенню однієї їх частини відносно іншої. Кількісно в'язкість характеризується значенням величини $\dot{\eta}$, званої коефіцієнтом динамічної в'язкості, або коефіцієнтом внутрішнього тертя. В'язкість входить до законів гідродинаміки, наприклад закон Пуазейля - протікання в'язких рідин через капілярні трубки, закон Стокса - рух кульки у в'язкому середовищі під дією невеликої постійної сили.

Динамічна в'язкість $\dot{\eta}$ в системі СІ вимірюється в паскалях, помножених на секунди, а в системі СГС - в сантіпуазах ($1 \text{ Па.с} = 10 \text{ П} = 1000 \text{ сП}$).

Кінематична в'язкість ν дорівнює відношенню динамічної в'язкості рідини до її щільності ρ :

$$\nu = \dot{\eta} / \rho \quad (1.28)$$

В системі СІ кінематична в'язкість вимірюється в $\text{м}^2 / \text{с}$, а в системі СГС в Стоксах ($1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ Ст}$). В'язкість всіх речовин сильно зменшується з підвищенням температури.

Теплові властивості діелектриків

Нагрівостійкість - здатність діелектрика витримувати вплив підвищеної температури протягом часу, порівнянного з терміном нормальної експлуатації, без неприпустимого погіршення його властивостей. В залежності від значень допустимих в експлуатації температур діелектрики розрізняють по класах нагрівостійкості. Нагрівостійкість неорганічних діелектриків визначають, як правило, по початку істотної зміни електричних властивостей, наприклад, по помітному зростанню $\text{tg}\delta$ або зниженню питомого електричного опору. Нагрівостійкість оцінюють відповідними значеннями температури, при якій з'явилися ці зміни. Нагрівостійкість органічних діелектриків часто визначають по початку механічних деформацій розтягування або вигину, зануренню голки в матеріал під тиском при нагріванні (метод Мартенса, спосіб кільця і кулі та ін.) Однак і для них можливе визначення нагрівостійкості за електричними характеристиками.

Температурою спалаху називають температуру рідини, при якій суміш парів її з повітрям спалахує при піднесенні до неї невеликого полум'я. Температура займання - ще більш висока температура, при якій випробувана рідина загоряється. Ці характеристики важливі для оцінки властивостей трансформаторної олії і розчинників, застосовуваних у виробництві електроізоляційних лаків.

Найвища допустима робоча температура визначається на підставі ретельного вивчення короточасної і тривалої нагрівостійкості матеріалу з урахуванням коефіцієнта запасу, що залежить від умов експлуатації, необхідного ступеня надійності і терміну служби ізоляції.

Необоротне погіршення якості ізоляції, внаслідок повільно протікаючих хімічних процесів, при тривалому впливі підвищеної температури називається тепловим старінням ізоляції. Старіння може виявлятися, наприклад, у лакових плівок і целюлозних матеріалів у вигляді підвищення твердості і крихкості, утворення тріщин і ін.

Крім температури істотний вплив на швидкість старіння можуть надати зміна тиску повітря або концентрації кисню, присутність озону, що є сильнішим окислювачем, ніж кисень, а також різних хімічних реагентів, що прискорюють або уповільнюють старіння.

Теплове старіння прискорюється під дією ультрафіолетових променів, електричного поля, механічних навантажень і т.ін.

Можливість підвищення робочої температури ізоляції для практики надзвичайно важлива. З питаннями про допустиму температуру тісно пов'язані заходи з пожежної безпеки і вибухобезпеки. В електричних печах і нагрівальних приладах, в електрозварювальній апаратурі, в освітлювальних пристроях, електронних та іонних приладах значної потужності висока робоча температура електричної ізоляції визначається особливостями роботи всього пристрою.

ГОСТ 8865 передбачає поділ електроізоляційних матеріалів на класи нагрівостійкості, для яких фіксуються найбільші допустимі робочі температури при використанні цих матеріалів в електрообладнанні загального застосування, що тривало (протягом декількох років) працює в нормальних для даного виду електрообладнання експлуатаційних умовах.

Класи нагрівостійкості з (найбільшою допустимою робочою температурою °C) : Y(90), A(105), E(120), B(130), F(155), H(180), C(>180). При зазначених температурах забезпечуються техніко-економічно доцільні строки служби електроустаткування.

Нагрівостійкість ізоляційних матеріалів:

1 - Y - Волокнисті матеріали з целюлози, бавовни, шовку, органічних пластмас, ПВХ, каучуку.

2 - A - Волокнисті матеріали, просочені масляно-смоляними і ін. лаками.

3 - E - Синтетичні волокна, шаруваті пластики на термореактивних сполучниках.

4 - B - На основі слюди, азбесту, скловолокна в поєднанні з органічними зв'язуючими.

5 - F - Ті ж матеріали в поєднанні з синтетичними зв'язуючими.

6 - H - Кремнійорганічні, еластомери.

7 - C - Фторфлогопіт, кераміка, скло, неорганічні матеріали.

Підвищення нагрівостійкості надзвичайно важливе - дає можливість підвищити потужність при менших габаритах установки.

Холодостійкість - здатність ізоляції витримувати вплив низьких температур (від - 60 до - 70 ° C) без неприпустимого погіршення її властивостей. При низьких температурах електричні властивості ізоляції поліпшуються, але гнучкі матеріали при нормальних температурах стають крихкими.

Теплопровідність - перенесення теплоти від більш нагрітих до менш нагрітих частин, що призводить до вирівнювання температури. Теплопровідність матеріалів характеризується коефіцієнтом теплопровідності γ_m (Вт / м К °) з рівняння Фур'є (Н₂О – 0,58 ; фарфор – 1,0; Al₂O₃ – 30).

$$\Delta P = \gamma_m dT / dl \Delta S , \quad (1.29)$$

де ΔP – потужність теплового потоку.

Теплове розширення - оцінюють коефіцієнтом лінійного розширення (фарфор – $3,5 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$, епоксидная смола – $55 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$):

$$TKl = dl = 1/l dl/dt \text{ K}^{-1}. \quad (1.30)$$

Матеріали з малим TKl мають велику нагрівостійкість і навпаки.

Органічні діелектрики мають коефіцієнт лінійного розширення набагато більший, ніж неорганічні діелектрики.

Хімічні властивості діелектричних матеріалів

Важливою характеристикою діелектричних матеріалів є їх хімічна, радіаційна та світлова стійкість, а для матеріалів, що експлуатуються в умовах підвищеної вологості і температури, - стійкість до цвілі (тропікостійкість). При роботі твердих діелектриків в зіткненні з рідинами необхідно знати їх взаємну розчинність. При експлуатації електроізоляційних матеріалів у місцевості, загазованій хімічно агресивними речовинами, необхідно, щоб ці матеріали володіли достатньою хімічною стійкістю, не руйнувалися, а також не викликали корозію металів, з якими вони стикаються. Наприклад, трансформаторна олія з підвищеним кислотним числом може викликати корозію металевих частин трансформатора.

Кислотне число характеризує вміст у олії вільних кислот; воно визначається кількістю міліграмів їдкою калію КОН, яке необхідно для нейтралізації всіх вільних кислот в одному грамі зразка (мгКОН/1г).

Радіаційна стійкість - це здатність матеріалів працювати, не погіршуючи своїх основних властивостей в умовах інтенсивного іонізуючого випромінювання (нейтронного і гамма-випромінювання) або після його впливу. Зазвичай гранично допустимою дозою нейтронного і гамма-випромінювання вважають таку, отримавши яку діелектричний матеріал знижує хоча б одну зі своїх основних

електричних або механічних характеристик на 25% і більше. Часто радіаційну стійкість визначають загальним числом радіоактивних частинок, що потрапляють на одиницю площі матеріалу і викликають помітне погіршення його основних характеристик, наприклад нейтрон / м².

Багато діелектриків мають високу радіаційну стійкість, витримуючи щільність опромінення до 10²³ нейтрон / м², в той час як напівпровідники помітно ушкоджуються при щільності в 10⁸ нейтрон / м². З діелектриків найбільша радіаційна стійкість відзначається у неорганічних матеріалів: кварцу, слюди і т.ін., найменша - у органічних полімерів.

Світлостійкість - це стійкість електроізоляційних матеріалів до дії ультрафіолетових променів. Під дією світлового опромінення деякі матеріали (наприклад, гуми) втрачають еластичність, необхідну механічну міцність, в них з'являються тріщини, лакові покриття відстають від підкладок.

Тропикостійкість характеризує працездатність діелектричних матеріалів у районах з тропічним кліматом ($\psi_v \gg 100\%$, Γ і 30-40 ° С). При тривалій роботі електроустановок у вологому повітрі ($\psi_v = 98-100\%$) електричні характеристики багатьох органічних матеріалів істотно погіршуються. Питомий об'ємний опір ρ органічної ізоляції після кількох діб перебування у воді або в повітрі знижується на порядок і більше, а E_{np} знижується в 1,5-2 рази і більше (рис. 1-3).

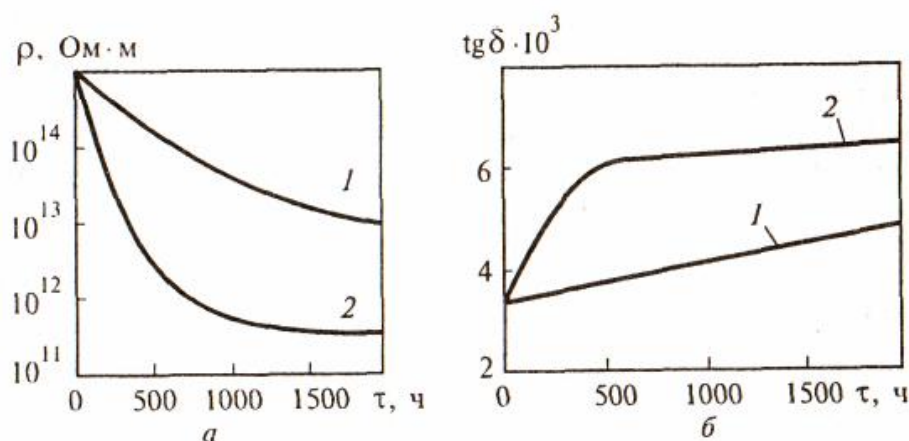


Рисунок 1.30 – Залежність ρ (а) і $tg\delta$ б при $f = 50$ Гц (б) полікарбонатної плівки товщиною 0,1 мм від часу τ зволоження при 20°C: 1 - у воді; 2 - в повітрі

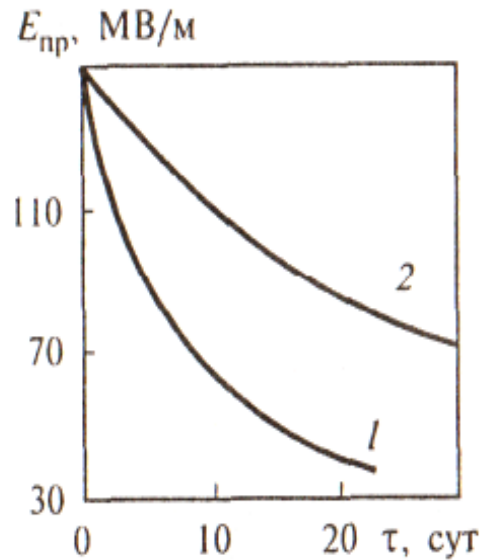


Рисунок 1.31 – Залежність $E_{пр}$ поліїмидної плівки від часу τ зволоження при 40°C : 1 - у воді; 2 - в повітрі

Погіршуються електричні властивості і у пластмас з неорганічним наповнювачем, а з органічним зв'язуючим - через кілька діб перебування в повітрі з вологістю 95-98%. Погіршення електричних характеристик у органічних діелектриків у вологому повітрі відбувається інтенсивніше, ніж за такий же час при безпосередньому контакті матеріалу з водою. Цей факт пояснюється тим, що пари води більш активно проникають в мікропори і мікротріщини з подальшою конденсацією всередині матеріалу. Вода ж в рідкому стані через наявність крайового кута змочування проникає в мікропори з великим уповільненням. Розчинність і коефіцієнт дифузії води в полімерних матеріалах залежать від їхньої природи, температури і відносної вологості повітря.

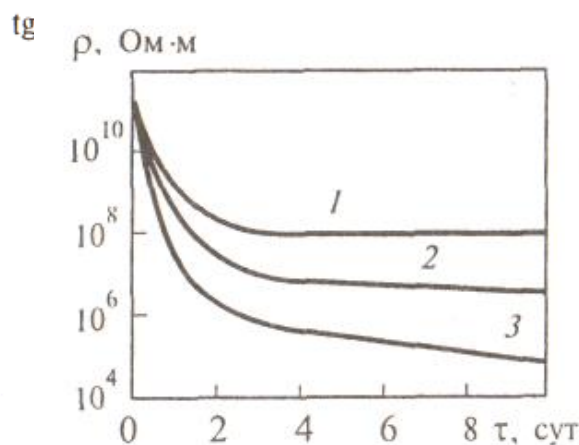


Рисунок 1.32 – Залежність ρ гнучкого слюдиніту від часу τ перебування в повітрі з $\psi_{в} = 95-98\%$ на основі лаку: 1 - кремнійорганічному; 2 - бітумно-олійному; 3 - гліфталієво-олійному

У тропічному кліматі на органічних діелектриках може розвиватися цвіль, що, в свою чергу, призводить до значного зменшення питомого поверхневого опору, зростання діелектричних втрат, зниження електричної міцності, корозії металевих частин. Найменш стійкі до утворення цвілі - матеріали на основі целюлози, в тому числі просоченої (гетинакс, текстоліт). Найбільш стійкі - неорганічні діелектрики (скло, кераміка, слюда), кремнійорганічні і деякі органічні матеріали (епоксидні смоли, політетрафторетилен, поліетилен, полістирол). Важливою характеристикою є розчинність. Цю властивість необхідно враховувати при підборі розчинників для лаків, пластифікаторів для полімерів і т.ін., а також для оцінки стійкості твердого діелектричного матеріалу до дії різних рідин, з якими він може стикатися при виготовленні ізоляції (наприклад, при просоченні лаками) і в процесі експлуатації (наприклад, тверда ізоляція олієнаповнених трансформаторів).

Як правило, тверді матеріали краще розчиняються в рідинах, близьких за своєю хімічною природою. Так, полярні речовини краще розчиняються в полярних рідинах (наприклад, каніфоль у спирті, поліметилметакрилат в діхлоритані); неполярні речовини - в неполярних розчинниках (наприклад, парафін і каучук в рідких вуглеводнях). Лінійні полімери розчиняються краще. Зі збільшенням молекулярної маси розчинність полімеру знижується, при нагріванні - поліпшується.

Хімічні властивості - це насамперед розчинність матеріалів в різних розчинниках (розчинність речовин за одиницю часу з одиниці поверхні матеріалу). Діелектрики повинні при роботі не розкладатися з виділенням побічних продуктів, не викликати корозію дотичних з ними металів.

Вплив випромінювань високих енергій - корпускулярної і хвильової. До першої відносяться - швидкі і повільні нейтрони, α -частинки, β - промені (електрони різних швидкостей). До хвильового випромінювання - γ -промені, чисті і м'які рентгенівські випромінювання. Інтенсивне випромінювання вимірюється в Вт / м². Для нейтронів - щільність потоку енергії швидких і повільних нейтронів крізь поверхню - м². Енергія випромінювання падаючи на поверхню, зменшується в міру проникнення в глибину матеріалу. Розсіювання енергії йде через іонізацію збудження атомів ядерних перетворень, вибивання іонів, атомів в міжвузля. Порушення структури речовини йде в поверхневому шарі, утворюється потік

заряджених частинок. В органіці - виділення газу, полімеризація, вулканізація, зміна фізичних властивостей.

Матеріали, стійкі до опромінення повинні характеризуватися двома властивостями: здатністю поглинати енергію без іонізації, здатністю більшою мірою утворювати подвійні зв'язки, ніж розрив ланцюгів. Можливий перехід з одного структурного стану в інший. На неорганічні полімери випромінювання чинить менший вплив і після відпалу вони можуть відновлювати початкові властивості. Органічні полімери після опромінення набувають такі властивості: стають крихкими, розсипчастими; гумоподібні речовини - перетворюються на в'язку рідину. Захисні властивості оцінюють по товщині шару, що послаблює випромінювання в 10 разів.

Термічні властивості характеризують поведінку діелектрика при нагріванні (охолодженні) і в сукупності визначають його допустиму робочу температуру. Коефіцієнт теплопровідності l , Вт / (м · К), або Вт / (м · °С) для газоподібних діелектриків має значення 2 - 5, для твердих - 0,02 - 3,00 Вт / (м · К) і визначає відведення теплоти з товщі електричної ізоляції, нагрітої за рахунок діелектричних втрат, або нагрів в ході технологічної переробки. Його можна визначати за ГОСТ 236302-79. Час нагріву (охолодження) електроізоляційних конструкцій в періоди виготовлення або експлуатації визначається і теплоємністю діелектричних матеріалів C , Дж / (кг · К). Значення теплоємності визначають за ГОСТ 23630.3-79. Для електротехнічного фарфору, стеатиту, скла C - 300 ÷ 1000, для органічних полімерів 1200 - 2000, для нафтової електроізоляційної олії 1800 - 2500, для води 4200 Дж / (кг К). Тверді кристалічні діелектрики при нагріванні плавляться при температурі плавлення $T_{пл}$, аморфні стають рідкими в інтервалі температур, який характеризують умовною температурою розм'якшення $T_{розм}$; її визначають за ГОСТ 11506-73 для бітуму, компаундів, за ГОСТ 15088-83, ГОСТ 21341-75 для пластмас. Температурний коефіцієнт довжини. K^{-1} , $TKl - \alpha_1 = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dT}$.

Здатність електричної ізоляції без пошкодження і неприпустимого погіршення практично важливих для неї властивостей (наприклад, механічної міцності, E_{np} , $tg\delta$, втрати маси при нагріванні, кількості поглиненої вологи та інших характеристик) витримувати вплив одного або декількох факторів протягом часу, порівнянного з терміном експлуатації, визначає її стійкість до впливу руйнуючих факторів. Трекінгостійкість - здатність діелектрика протидіяти протягом певного часу без неприпустимого погіршення

властивостей поверхні вплив дуги змінного (ГОСТ 10345.1-78) або постійного (ГОСТ 10345.2-78) струму, зберігати менше допустимого значення струму, що протікає каналами – треками по забрудненій електролітом або синтетичним пилом поверхні. Нагрівостійкість електроізоляційних матеріалів визначається їх здатністю витримувати дію підвищених у порівнянні з робочою температур (ГОСТ 21515-76). Холодостійкість визначається шляхом порівняння механічних характеристик (наприклад, деформацій при розтягу) при негативній і нормальній температурах. Стійкість до термоударів визначається для крихких матеріалів і виробів з них здатністю зберігати потрібні властивості після дії потрібного числа циклів термоударів (нагрівання і різкого охолодження). Вологостійкість, водостійкість і водопоглинання діелектрика визначаються (ГОСТ 10315-75) його здатність сорбувати вологу навколишнього середовища, відповідно вологого повітря або в процесі витримки в дистильованій воді. Хімічностійкість характеризує стійкість матеріалу до руйнування (корозії) при контактуванні з водою, кислотами, лугами, сольовими розчинами, паливом, газами і визначається за зміною зовнішнього вигляду, маси, електричних та інших параметрів. Тропікостійкість діелектрика визначається за зміною $tg\delta$, E_{np} , механічної міцності, а також інших параметрів під впливом тропічних кліматичних факторів. Радіаційна стійкість визначається за зміною механічних властивостей, багато в чому визначають зміни $tg\delta$, E_{np} , в процесі радіолізу матеріалу під впливом іонізуючих випромінювань.

2.1. ІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Рідкі діелектрики

Рідкі діелектрики являють собою низькомолекулярні речовини органічного походження, які бувають полярними і неполярними. Їх електрофізичні властивості в значній мірі залежать від будови молекул і наявності домішок. Домішки утворюються при окисненні і розкладанні вуглеводневих фракцій, при поглинанні води і попаданні частинок волокнистих матеріалів.

Рідкі діелектрики характеризуються діелектричною проникністю ε , електропровідністю, діелектричними втратами $tg\delta$, електричною міцністю E_{np} .

У полярних рідин (совол, гексол, етиленгліколь) діелектрична проникність ε визначається одночасно електронною та дипольною поляризаціями (у гексола $\varepsilon = 3$, у етиленгліколю $\varepsilon = 40$).

У неполярних рідин діелектрична проникність визначається в основному тільки електронною поляризацією, не залежить від частоти і зменшується із зростанням температури, наближаючись до одиниці. Це явище пояснюється зменшенням числа молекул в одиниці об'єму. У неполярних рідин діелектрична проникність менше, ніж у полярних. Наприклад, у чотирьохлористого вуглецю $\varepsilon = 2,163$, у толуолу $\varepsilon = 2,294$.

Електропровідність рідких діелектриків обумовлена переміщенням іонів, які виникають в результаті дисоціації самої рідини і домішок, а також переміщенням заряджених частинок - моліонів. З підвищенням температури зростає рухливість іонів і ступінь теплової дисоціації. Ці фактори збільшують електропровідність. При невеликих напруженостях електричного поля набуває чинності закон Ома, тобто електричний струм I , що проходить в рідині, змінюється пропорційно напруженості поля. В електричних полях з великою напруженістю E (приблизно 10 ... 100 МВ / м) електричний струм не підкоряється закону Ома через збільшення числа іонів під впливом поля.

Крім іонної електропровідності у рідких діелектриків спостерігається моліонна електропровідність, коли носіями зарядів є дрібні домішки. Такими домішками можуть бути вода, різні тверді

високодисперсні частинки, що знаходяться в зваженому стані (волокна, порошинки тощо). Ці частинки адсорбують своєю поверхнею іони і при впливі електричного поля переміщуються до відповідних електродів. У технічних діелектриків переважає моліонна провідність. Очищення рідких діелектриків від домішок помітно підвищує їх питомий опір, однак повністю видалити домішки неможливо.

Переважання конкретного виду провідності залежить від енергії дисоціації, тобто енергії, необхідної для руйнування молекул і утворення іонів. Чим вище енергія дисоціації, тим менше іонна провідність. У полярних рідинах діелектричні втрати складаються з втрат на електропровідність і втрат, пов'язаних з дипольно-релаксаційною поляризацією. Вони залежать від температури, частоти і в'язкості рідини, так як поворот диполів у в'язкому середовищі викликає втрати енергії на тертя молекул. Рідкі полярні діелектрики не рекомендуються застосовувати на високих частотах.

Трансформаторна олія. Трансформаторна олія знаходить найбільше застосування в електротехніці з усіх рідких електроізоляційних матеріалів. Її призначення:

1. олія, заповнюючи пори у волокнистій ізоляції, а також проміжки між проводами обмоток і між обмотками і баком трансформатора, значно підвищує електричну міцність ізоляції;

2. вона покращує відведення теплоти, що виділяється за рахунок втрат в обмотках і сердечнику трансформатора;

3. масляні вимикачі високої напруги - у цих апаратах розрив електричної дуги між контактами вимикача, що розходяться, відбувається в олії або в газах, які виділяються олією під дією високої температури дуги і знаходяться під підвищеним тиском: це сприяє охолодженню каналу дуги і швидкому її гасінню;

4. застосовують для заливки олієнаповнених введів, деяких типів реакторів, реостатів та ін.

Трансформаторні та інші нафтові (мінеральні) електроізоляційні олії отримують з нафти за допомогою її ступінчастої перегонки з виділенням на кожному ступені певної (по температурі кипіння) фракції і подальшої ретельної очистки від хімічно нестійких домішок в результаті обробки сірчаною кислотою, потім лугом, промивання водою і сушки. Часто олії додатково обробляються адсорбентами (особливі типи глини або штучні матеріали), які володіють сильно розвиненою поверхнею і при зіткненні з олією поглинають воду і

різні полярні домішки. Після воно відстоюється або фільтрується крізь шар адсорбенту (перколяції).

Трансформаторна олія - це рідина від безбарвного до темно-жовтого кольору, по хімічному складу представляє собою суміш різних вуглеводнів. Властивості олії нормуються стандартом ГОСТ 982. Кінематична в'язкість олії становить 17-18,5 мм² / с при 20°C і 6,5-6,7 мм² / с при 50°C; температура спалаху 135-140 °C; температура застигання близько мінус 45 °C. Це горюча рідина, тому необхідно ретельно дотримуватися всіх вимог пожежної безпеки, яка оцінюється по температурі спалаху.

Температура застигання олії - параметр, важливий при роботі взимку на відкритому повітрі. Спеціальна «арктична» олія має температуру застигання мінус 70 °C. Крім цього параметра для рідин, що мають малу щільність, важлива критична температура плавучості льоду. Нижче цієї температури кристалики льоду, що утворюється при замерзанні домішок води, плавають в електроізоляційній рідині і тому знижують її електричну міцність.

E_{np} олії - величина, чутлива до зволоження, тобто різко знижується від домішок води, тому $\epsilon_r \text{H}_2\text{O} \gg \epsilon_r$ олії. Молекули води витягуються в місця напруженостей, тобто йде пробій. Ще більше знижується E_{np} олії, якщо крім води є ще волокнисті домішки, оскільки вони вбирають воду. Волокна витягуються у напрямку прикладеної напруги, що полегшує пробій. Вода потрапляє в олію при перевезенні, зберіганні, при переливанні у вологу тару.

Сушка олії:

1. пропускають під тиском у фільтр-пресах,
2. центрифугують (відокремлюють по фракціям домішки),
3. обробляють адсорбентами,
4. розпорошують гарячу олію в камері, заповненій азотом (звільняють від домішок вологи).

Після сушіння електрична міцність масла відновлюється.

За правилами технічної експлуатації електростанцій (ПТЕ) потрібно найменше значення E_{np} . Визначають пробивну напругу при частоті 50 Гц. ПТЕ передбачає різні норми U_{np} для чистої і сухої олії, яке заливається в трансформатори або експлуатується в олієнаповненому апараті. Ще більше знижується електрична міцність олії, якщо крім H_2O є ще волокнисті домішки, оскільки вони вбирають воду.

Щільність трансформаторної олії 0,85 - 0,90 г/см³, коефіцієнт теплопровідності дорівнює 1 Вт / м·К температурний коефіцієнт

об'ємного розширення $0,00065 \text{ K}^{-1}$, питома теплоємність олії $1,5 \text{ Дж / кг}\cdot\text{К}$. При збільшенні температури питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності збільшується. Олія відводить тепло від обмоток трансформатора в 20 - 30 разів краще, ніж повітря.

Старіння олій. Старіння олій сильно залежить від часу експлуатації. При старінні олія темніє, забруднюючі продукти - кислоти, суспензії мулу, нерозчинні смоли. Вони погіршують тепловідвід, руйнують ізоляцію, викликають корозію металу.

При старінні збільшується в'язкість і кислота погіршує електроізоляційні властивості. Електрична міцність олії зменшується, температура спалаху знижується, йде крекінг - розрив полімерних молекул, збільшується концентрація вуглеводнів низької молекулярної маси.

Швидкість старіння олії зростає з ряду причин:

1. при доступі повітря відбувається окислення (особливо в присутності озону),
2. при підвищеній температурі ($95 \text{ }^\circ\text{C}$ - найвища робоча температура олії),
3. зіткнення олії з металами Cu, Fe, Pb - це каталізatori старіння,
4. при впливі світла,
5. при впливі електричного поля.

При старінні олії виділяються гази, що небезпечні з протипожежної точки зору, оскільки вони є джерелами іонізації і пробую газу.

Газостійкість - здатність не виділяти гази при старінні. Перед експлуатацією трансформаторну олію випробовують на прискорене старіння в особливо жорстких умовах.

Регенерація застарілої олії - це видалення, очищення олії від домішок, тобто відновлення властивостей олії. Регенерація проводиться різними способами:

1. обробкою адсорбентами,
2. при працюючому трансформаторі (трансформатор обладнано термосифонним фільтром). Нагріваючись і розширюючись при роботі потрапляє у фільтр з адсорбентом, потім надходить у нижню частину бака трансформатора, фільтр змінюють;
3. повітря над олією проходить через клапан і фільтр, який наповнений силікагелем CaCl_2 , поглинає з повітря вологу, пил, хімічні забруднення;
4. замість повітря простір заповнюють азотом;

5. додають у олію інгібітори (антиокислювальні присадки), які уповільнюють старіння (іонол, амідопірин та ін.)

Для кожної олії схема регенерації своя.

Інші види олій

Конденсаторна олія - служить для просочення паперових конденсаторів, особливо силових, призначених для компенсації індуктивного фазового зсуву. При просочуванні паперового діелектрика підвищуються як його ε_r , так і E_{np} ; те й інше дає можливість зменшити габаритні розміри, масу і вартість конденсатора при заданій робочій напрузі, частоті і ємності. Нафтова конденсаторна олія має щільність 0,86 - 0,89 г/см³, температуру застигання мінус 45 °С, $\varepsilon_r = 2,1 - 2,3$ і $tg\delta = 0,002$ (при частоті 1 кГц).

Вазелінова конденсаторна олія по щільності і електричним властивостям близька до нафтової, але має більш високу температуру застигання (мінус 5 °С). Електрична міцність конденсаторних олій не менше 20 МВ / м.

Кабельні олії використовуються у виробництві силових електричних кабелів; просочуючи паперову ізоляцію цих кабелів, вони підвищують її електричну міцність, а також сприяють відведенню теплоти втрат.

Кабельні олії бувають різних типів. Для просочення ізоляції силових кабелів на робочі напруги до 35 кВ в свинцевих або алюмінієвих оболонках (кабелі з в'язким просоченням) застосовується олія марки КМ-25 з кінематичною в'язкістю не менше 23 мм² / с при 100 °С і температурою спалаху не нижче + 220 °С . Для збільшення в'язкості до цієї олії додатково додається каніфоль або ж синтетичний загущувач.

У олієнаповнених кабелях використовуються менш в'язкі олії. Так, олія марки МН-4 застосовується для олієнаповнених кабелів на напруги 110 -220 кВ, в яких під час експлуатації за допомогою підживлюючих пристроїв підтримується надлишковий тиск 0,3 - 0,4 МПа. Кінематична в'язкість цієї олії при 100 °С не більше 3,5 мм²/с, при 50 °С не більше 10 мм² / с, при 20 °С не більше 40 мм²/с і при 0 °С не більше 110 мм² / с; температура застигання не вище мінус 45 °С і температура спалаху не нижче +135 °С.

Для олієнаповнених кабелів високого тиску (до 1,5 МПа) і напруги від 110 до 500 кВ, які прокладаються в сталевих трубах, застосовується особливо ретельно очищена олія марки С-200; вона має кінематичну в'язкість при 100 °С не більше 11 мм² / с, при 50 °С

не більше $50 \text{ мм}^2 / \text{с}$, при 20°C не більше $800 \text{ мм}^2 / \text{с}$ і при 0°C не більше $5000 \text{ мм}^2 / \text{с}$. Температура застигання олії не вище мінус 30°C ; температура спалаху не нижче плюс 200°C ; $\text{tg}\delta$ (при 50 Гц і 100°C) не більше $0,003$; електрична міцність (при 50 Гц і 20°C) не менше $20 \text{ МВ} / \text{м}$.

Трансформаторна та інші електроізоляційні олії нафтового походження володіють перевагами, які забезпечили їм широке застосування: вони порівняно дешеві і можуть вироблятися заводами нафтопереробної промисловості у великих кількостях; при ретельному очищенні $\text{tg}\delta$, як це і властиво чистим неполярним діелектриків, малий, а електрична міцність, досить висока.

Однак у деяких випадках якість цих олій виявляється недостатньо високою. Наприклад, коли потрібна повна пожежна безпека і вибухобезпечність, олієнаповнені трансформатори та інші апарати використовуватися не можуть. Нафтові олії схильні і до електричного старіння, тобто вони можуть погіршувати свої властивості під дією електричного поля високої напруженості. Для просочення конденсаторів з метою отримання підвищеної ємності в даних габаритних розмірах конденсатора бажано мати полярний рідкий діелектрик з більш високим, ніж у неполярних нафтових олій. Для цих цілей застосовуються синтетичні рідкі діелектрики.

Синтетичні рідкі діелектрики

Застосування синтетичних рідких діелектриків переважно в тих випадках, коли вони по властивостях перевершують електроізоляційні олії. Наприклад, якщо потрібно застосування неполярних рідких діелектриків або рідких діелектриків з більш високою пожежо- і вибухонебезпечністю, ніж у електроізоляційних олій. Синтетичні рідкі діелектрики, з тих чи інших властивостей перевершують нафтові електроізоляційні олії. Розглянемо найважливіші з них.

Хлоровані вуглеводні отримують з різних вуглеводнів шляхом заміни в їх молекулах деяких (або навіть усіх) атомів водню атомами хлору. Найбільш широке застосування мають полярні продукти хлорування дифенілу, що мають загальний склад $\text{C}_{12}\text{H}_{10-n}\text{Cl}_n$. Молекула дифенілу $\text{C}_{12}\text{H}_{10}$ (або $\text{H}_5\text{C}_5 - \text{C}_5\text{H}_5$) складається з двох фенільних залишків. Найчастіше застосовуються суміші різних ізомерів хлорованих дифенілів із середнім ступенем хлорування n від 3 до 6.

Хлоровані дифеніли (ХД) володіють підвищеною ϵ_r в порівнянні з неполярними нафтовими оліями. Так, пентахлордифеніл $C_{12}H_5Cl_5$ (совол) має при 50 Гц і 20 °С $\epsilon_r = 5$, а при 90 °С - 4,1. Совол є негорючою речовиною і не окислюється, що є його головними перевагами перед нафтовими оліями. Однак його застосування обмежується наступними недоліками: щільність $D = 1500 \dots 1560$, температура спалаху $T_{cn} = 205 \dots 230$ °С, температура застигання $T_z = +5$ °С, електрична міцність при температурі $T = 20$ °С $E_{np} = 14 \dots 18$ МВ / м, значна в'язкість в області робочих температур, що не дозволяє використовувати його в чистому вигляді; він приблизно в 10 разів дорожче трансформаторної олії. Застосовується замість конденсаторної олії для просочення низьковольтних паперових конденсаторів з підвищеною ємністю. Тому заміна олій на ХД при просочення конденсаторів зменшує розмір конденсатора (при тій же електричній ємності) майже в два рази.

Совол і севтол - 10 мало схильні до старіння, не утворюють з повітрям вибухових сумішей, негігроскопічні. Севтол - 10 - негорюча, з підвищеною температурою застигання рідина, яку одержують, розбавляючи совол трихлорбензолом. Застосовують замість трансформаторної олії для вибухонебезпечних трансформаторів.

Перевагою ХД є також їх негорючість. Однак ХД мають свої недоліки. Вони токсичні, через що застосування їх для просочення конденсаторів в деяких країнах заборонено законом.

У зв'язку з сильно вираженою полярністю ХД на їх електроізоляційні властивості досить значно впливають домішки; наявність домішок істотно позначається на втратах наскрізної електропровідності при підвищеній температурі, але практично не впливає на $tg\delta$ в області дипольного максимуму втрат. Недоліком ХД є також помітне зниження їх ϵ_r і, отже, ємності просочених ХД конденсаторів при знижених температурах. Хлоровані дифеніли володіють порівняно високою в'язкістю, що в деяких випадках викликає необхідність їх розведення менш в'язкими хлорованими вуглеводнями.

Кінематична в'язкість совола складає $75 \text{ мм}^2 / \text{с}$, тріхлорфеніла ($C_{12}H_7Cl_3$) - $126 \text{ мм}^2 / \text{с}$, совтола (суміш 90% совола і 10% трихлорбензолу $C_6H_3Cl_3$) має при тій же температурі в'язкість $25 \text{ мм}^2 / \text{с}$, а гексол (суміш 20% совола і 80% гексахлорбутадієну C_4Cl_6) всього $1,8 \text{ мм}^2 / \text{с}$. Температура спалаху совола дорівнює $+5$ °С, совтола - мінус 7 °С, гексола - нижче мінус 60 °С.

Кремнійорганічні рідини - це продукт синтезу крем'янистих і вуглецевих сполук, властивості яких визначаються типом органічних радикалів. Вони володіють малим $tg\delta$, низькою гігроскопічністю і підвищеною нагрівостійкістю. Для них характерна слабо виражена залежність в'язкості від температури. Як і інші кремнійорганічні продукти, ці рідини досить дорогі. В залежності від характеру радикалів, приєднаних до атомів Si, розрізняють поліметилсілоксанові (ПМС), поліфенілсілоксанові (ПФС) та інші кремнійорганічні рідини.

Кремнійорганічні рідини мають ϵ_r від 2,5 до 3,3 і $tg\delta$ від 0,0001 до 0,0003 (при 1 кГц і 20 °С); найвища допустима робоча температура деяких з цих рідин доходить до 250 °С (довгостроково) і до 350 °С (короткочасно). Кінематична в'язкість рідини марки ПМС - 10 близько 10 мм² / с, а марки ПМС-20 - близько 20 мм² / с (при 20 °С).

Фторорганічні рідини мають малий $tg\delta$, мізерно малу гігроскопічність і високу нагрівостійкість. Деякі з них можуть довгостроково працювати при температурі 200 °С і вище, а деякі мають надзвичайно високу електричну міцність. Характерною властивістю фторорганічних рідин є мала в'язкість, низький поверхневий натяг (що сприяє просочуванню пористої ізоляції), високий температурний коефіцієнт об'ємного розширення (значно більший, ніж у інших електроізоляційних рідин), порівняно висока летючість. Остання обставина вимагає герметизації апаратів, що заливаються фторорганічними рідинами. Вони здатні забезпечувати значно більш інтенсивний відвід теплоти втрат від охолоджуваних ними обмоток і магнітопроводів, ніж нафтова олія або кремнійорганічні рідини.

Поліметилсілоксанові рідини отримують гідролізом диметилхлорсіланів з триметилхлорсіланів. Вони не розчиняються в спиртах і ацетоні, володіють високою інертністю і не впливають на властивості металів і гум при контакті з ними. Застосовують для просочення паперових конденсаторів і гідрофобізації ізоляційних стрічок.

Полідиетилсілоксанові рідини являють собою суміші поліетилсілоксанів. Безбарвні, застосовуються для просочення і заливки конденсаторів, що працюють в інтервалі температур від -60 до + 100 °С. Поліметилфенілсілоксанові рідини відрізняються більш високою нагрівостійкістю і стійкістю до радіаційного випромінювання.

Фторорганічні рідини являють собою похідні вуглеводнів, у яких атоми водню заміщені фтором. Їх пари не утворюють з повітрям вибухонебезпечних сумішей. Вони володіють малими діелектричними втратами $tg\delta$, мізерно малою гігроскопічністю, високою нагрівостійкістю (деякі рідини можуть довгостроково працювати при температурі 200 °С і вище), високою теплопровідністю, повною негорючістю, високою дугостійкістю. Їх застосовують для просочення і заливки конденсаторів і трансформаторів, для випробування елементів радіоелектроніки при низьких і високих температурах.

Існують спеціальні конструкції малогабаритних електротехнічних пристроїв із заливкою фторорганічними рідинами, в яких для поліпшення відводу теплоти використовується випаровування рідини з подальшою конденсацією її в охолоджувачі і поверненням в пристрій (кипляча ізоляція); при цьому теплота випаровування відводиться від охолоджуваних обмоток, а наявність в просторі над рідиною фторорганічних парів, особливо під підвищеним тиском, значно збільшує електричну міцність газового середовища в апараті.

Перевага фторорганічних рідин перед нафтовою олією і, тим більше, перед кремнійорганічною рідиною безперечне.

Важливою перевагою фторорганічних рідин в порівнянні з кремнійорганічними є повна негорючість і висока дугостійкість (кремнійорганічні рідини, як і нафтові олії, порівняно легко спалахують і горять). Як і кремнійорганічні сполуки, фторорганічні рідини поки ще досить дорогі.

Інші синтетичні рідини

Крім зазначених рідких діелектриків в радіоелектроніці застосовують сильно полярні синтетичні електроізоляційні рідини. Представляють інтерес і деякі інші полярні електроізоляційні рідини. Нітробензол $\text{H}_5\text{C}_6\text{-NO}_2$, етиленгліколь $\text{HO-CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH}$, який використовують в якості контрольної рідини при перевірці герметичності мікросхем, і ціаноетілсахароза $\text{C}_{38}\text{H}_{46}\text{N}_8\text{O}_{11}$ мають високу діелектричну проникність $\epsilon_r = 35 - 39$.

Крім синтетичних електроізоляційних рідин, які відрізняються за хімічним складом і властивостями від нафтових олій, існують і синтетичні рідини вуглеводневого складу. Ці неполярні рідини в деяких випадках мають цінніші властивостями (кращі електроізоляційні властивості, стійкість до теплового старіння,

газостійкість) в порівнянні з нафтовими оліями. Так, просочення паперових конденсаторів поліізобутиленом з низькою (10-20) ступенем полімеризації призводить до підвищення постійної часу саморозряду конденсатора приблизно на порядок порівняно з просоченням нафтовою конденсаторною олією або вазеліном.

Порівняно дешевий вітчизняний матеріал (октол) являє собою суміш полімерів ізобутилену і його ізомерів, що мають загальний склад C_4H_8 і одержуваних з газоподібних продуктів крекінгу нафти. Октол має молекулярну масу від 400 до 1500 і щільність 0,850 - 0,875 г/см³; його в'язкість при плюс 70 °С становить 1,3 - 3,0. Значення ϵ_r октола 2,0-2,2; $tg\delta$ (при 1 кГц) 0,0001; температура застигання мінус 12 °С.

Діелектричні втрати у неполярних рідин, що не містять домішок, - це втрати, по суті, на електропровідність. Вони не залежать від частоти і ростуть із зростанням температури, що пояснюється збільшенням наскрізного струму. Діелектричні втрати цих рідин малі, оскільки як мала їх електропровідність. Електрична міцність рідких діелектриків в основному визначається наявністю сторонніх домішок, полярністю рідини, температурою та іншими факторами. Присутні в рідині бульбашки газу іонізуються, виділяючи енергію, яка приводить до місцевого перегріву рідини. Це веде до утворення газового каналу між електродами і в результаті до пробію рідини. Крім газових включень значним чинником, що знижує електричну міцність рідких діелектриків, є вода. Крапельки води поляризуються під впливом електричного поля і утворюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яких і відбувається електричний пробій. Електрична міцність рідин, що містять домішки, нижче, ніж у очищених.

Отже, в якості рідких електроізоляційних матеріалів в електротехнічних пристроях використовують нафтові (мінеральні) олії (трансформаторне, кабельне, конденсаторне), синтетичні рідкі діелектрики (хлоровані вуглеводні, кремній- та фторорганічні рідини, складні ефіри різних типів) і рослинні олії.

2.2 ПОЛІМЕРИ

Тверді органічні діелектрики

До органічних діелектриків відносяться матеріали, в складі яких знаходиться вуглець. В якості органічних діелектриків в

промисловості застосовують як природні, так і синтетичні полімери, які отримують методом хімічного синтезу. Часто їх називають смолами.

Більшість органічних діелектриків являють собою високомолекулярні речовини, які містять дуже велике число атомів або найпростіших молекул. Основу багатьох високомолекулярних діелектриків складають полімерні сполуки. В техніці полімери знайшли широке застосування в якості електроізоляційних і конструкційних матеріалів. У електроізоляційній техніці полімерні матеріали є одними з переважаючих. Вони широко використовуються у виробництві різноманітних по конструкції і призначенню електричних конденсаторів, дротів, кабелів і інших виробів. На їх основі отримані також матеріали, що володіють напівпровідниковими і магнітними властивостями, які, однак, ще широко не вийшли за межі лабораторних випробувань.

Будова полімерів

За будовою й особливостями властивостей полімери не можна суворо віднести до аморфних або кристалічних тіл, оскільки вони мають ряд якісних ознак, властивих тільки їм: великою довжиною молекул, їх високоасиметричністю, ланцюговою будовою і гнучкістю. На підставі цих ознак полімери виділені в самостійний клас матеріалів. Молекули полімерів - макромолекули або молекулярні ланцюги, побудовані з багаторазово повторюваних хімічних ланок. Кількість хімічних ланок в макромолекулі визначає її протяжність і називається ступенем полімеризації. Наприклад, макромолекула поліетилену $(-CH_2-CH_2-)_n$ складається з n хімічних ланок, в даному випадку етилену - $CH_2 = CH_2$. В залежності від величини макромолекул одного і того ж полімеру розрізняють:

1) мономер - низькомолекулярний вихідний продукт, який утворює хімічні ланки макромолекули;

2) олігомер - низькомолекулярний продукт полімеризації (або поліконденсації); це вже не мономер, але ще не полімер;

3) високомолекулярний продукт - полімер.

Полімери отримують двома основними методами: полімеризацією і поліконденсацією.

Полімеризація - хімічний процес об'єднання в молекулярний ланцюг великої кількості мономерів за місцем їх кратних (подвійних, потрійних) зв'язків або розриву нестійких циклів.

Поліконденсація - хімічний процес утворення молекулярного ланцюга з мономерів за рахунок їх функціональних груп (це полярні групи), що супроводжується утворенням побічного низькомолекулярного сильнополярного продукту (води, аміаку, галоїдоводороду і т.ін.). Якщо мономері неполярні, то утворюється неполярний полімер, а якщо полярні - полярний. На відміну від простих речовин полімер складається з безлічі макромолекул, що мають різну молекулярну масу. Отже, за своєю природою полімер полімолекулярний. Тому, говорячи про молекулярну масу полімеру, мають на увазі її середнє значення. Полімолекулярність характеризується величиною, названою молекулярно-масовим розподілом (ММР). Величина ММР (як молекулярна маса) впливає на ряд фізичних властивостей полімеру: чим ближче значення ММР до одиниці, тим однорідніші по величині макромолекули полімеру. Полімер з $\text{ММР} = 1$ - мономолекулярний. За будовою макромолекул полімери поділяють на лінійні, розгалужені або просторові («зшиті»).

Лінійними називають полімери, макромолекули яких мають високу асиметрію і являють собою довгі ланцюги. У розгалужених полімерів молекулярні ланцюги мають бічні відгалуження, число і довжина яких можуть варіювати в дуже широких межах.

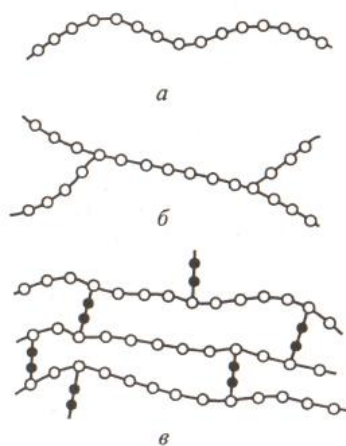
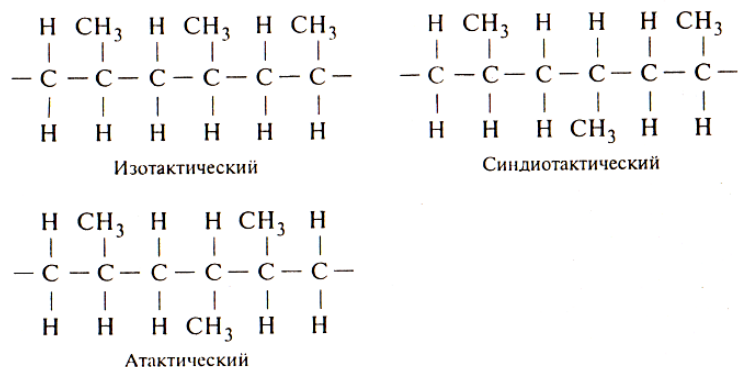


Рисунок 2.1 – Схематичне зображення будови макромолекул полімеру: а - лінійного, б - розгалуженого; в - просторового

Бічні відгалуження є дефектами будови. Просторові полімери побудовані з довгих молекулярних ланцюгів, з'єднаних («зшитих») між собою в просторі поперечними хімічними зв'язками. Полімери лінійні та розгалужені утворюють клас термопластичних полімерів або термопластів, а просторові - клас термореактивних полімерів або реактопластів. Характерна особливість термопластів - при нагріванні вони, як правило, плавляться і у відповідних розчинниках

розчиняються; реактопласти при нагріванні не плавляться і в розчинниках не розчиняються.



В залежності від характеру розташування хімічних ланок у молекулярного ланцюга розрізняють полімери стереорегулярні і стереонерегулярні. У стереорегулярних (ізотактичних і сіндіотактичних) полімерах мономери об'єднані хімічними зв'язками в молекулярний ланцюг таким чином, що всі заміщувачі (наприклад, групи - CH₃ у поліпропілену) розташовані в просторі в якомусь одному, суворо певному порядку (мономери об'єднані «голова до хвоста»). Якщо при цьому всі заміщувачі знаходяться по одну сторону відносно осі молекулярного ланцюга, такі полімери мають дуже високу стереорегулярність і називаються ізотактичними.

У сіндіотактичних полімерах заміщувачі у одних мономерів знаходяться по одну сторону осі молекулярного ланцюга, в інших - по іншу сторону. Стереорегулярність полімерів здатні кристалізуватися. Вони мають більш високі значення щільності, нагрівостійкості і багатьох інших експлуатаційно-технічних характеристик. У стереонерегулярних полімерах мономери об'єднані в молекулярний ланцюг за випадковим законом. Такі полімери є речовинами аморфними.

Наявність в макромолекулах неврівноважених ковалентних полярних зв'язків (це має місце при непарному числі полярних груп в хімічній ланці) призводить до виникнення дипольного моменту. Такі полімери є полярними. Полярними групами можуть бути: -Cl, -P, -OH (спиртова або фенольна), -COOH (карбоксильна), -CO (карбонільна), -NO₂ (нітро), -NH₂ (аміно), -O-O- (перекисна). Із всіх видів внутрішнього теплового руху макромолекул полімерів найбільш важливими, що пояснюють ряд їх специфічних властивостей (включаючи електричні), є сегментальна і групова рухливості.

Сегментальна рухливість спостерігається у полярних і неполярних полімерів при температурах, вище температури

склування, і полягає в самостійному, незалежному один від одного русі окремих відрізків молекулярних ланцюгів - сегментів, що складаються з десятків і навіть сотень мономерних ланок. Чим менше величина сегментів, тим більше гнучкість полімерного ланцюга. У цьому зв'язку полімери розрізняють гнучколанкові - їх сегменти містять всього кілька десятків мономерних ланок (сегмент поліетилену складається з -18 мономерних ланок) та жорстколанкові - їх сегменти містять кілька сотень і навіть тисяч мономерних ланок (ефіри целюлози - близько трьох тисяч мономерних ланок). Сегмент не є якоюсь певною фізичною величиною. Це кінетична одиниця, яка залежить не тільки від хімічної природи полімеру, але і від його молекулярної маси, ступеня пластифікації, температури і т. ін. Сегментальна рухливість - це рух не тільки одиничних сегментів але і їх кооперативних областей, тобто коли в сегментальний рух залучаються сегменти довколишніх макромолекул.

Групова рухливість спостерігається тільки у полярних полімерів при температурах, нижче температури склування, і полягає у самостійному русі полярних груп. В полімерах, навіть аморфних, макромолекули агрегуючи утворюють надмолекулярні структурні утворення різні за типами та розмірами. У формуванні надмолекулярної організації полімерів беруть активну участь молекулярні ланцюги і їх хімічні ланки. В залежності від взаємного розташування окремих ділянок ланцюгів, їх взаємозв'язку і агрегації полімери можуть знаходитися в одному з двох фазових станів: аморфному або кристалічному. У силу особливостей будови полімеру, зазначених вище, його ще не вдалося перевести повністю в кристалічний стан. У кристалічних полімерів поряд з кристалічною фазою існує аморфна фаза, тому ці полімери фактично є аморфно-кристалічними. Їх називають такими, що кристалізуються.

В полімерах, які знаходяться в аморфному стані, має місце тільки ближній порядок, який поширюється на області, утворені складчастою конформацією молекулярних ланцюгів (конформація - одна з можливих форм макромолекули, яка набувається нею під дією теплового руху або зовнішнього поля без розриву хімічних зв'язків). Ці області називають доменами. Домени мають чіткі межі. Вони відокремлені і дезорієнтовані один щодо одного. Розмір доменів порівняний з макромолекулою. В аморфних полімерах об'ємна частка доменів становить близько 50%. Домен утворений за рахунок складання окремих частин молекулярного ланцюга (в тому числі сусідніх макромолекул) паралельний один одному. Однак відрізки

молекулярних ланцюгів в доменах не мають прямолінійної (втягнутої) форми і не розташовані один щодо одного суворо на певній відстані.

Тому, хоча в доменах спостерігається деяка впорядкованість в розташуванні відрізків макромолекул, вони не володіють кристалографічним порядком. Домени є перехідним типом структури від аморфної до кристалічної. Істинно неупорядкованими ділянками аморфних полімерів є області, розташовані між доменами. Вони утворені вільними кінцями і довгими петлями молекулярних ланцюгів і частинами «прохідних» макромолекул. Ці області називають міждоменними. Вони містять порожнечі, мають найменшу густину молекулярної упаковки, найбільшу концентрацію домішок і інших дефектів. Домени - це найпростіші надмолекулярні структурні утворення аморфних полімерів, з яких можуть формуватися більш великі надмолекулярні («наддоменні») структури, наприклад глобули. Домени пов'язані між собою прохідними молекулярними ланцюгами і можуть грати роль зародків кристалізації, безпосередньо утворюючи моношарові кристалічні пластини.

Зі сказаного випливає, що аморфні полімери не є речовинами, утвореними з переплутаних молекулярних ланцюгів, подібно ниткам, а являють собою молекулярні системи з відносно впорядкованими областями. Кристалізацію ж полімеру можна розглядати як перехід структури від менш впорядкованої до високоупорядкованої.

У полімерах, що кристалізуються, утворюються області як ближнього, так і далекого порядку, які на відміну від доменів володіють значно більш високої впорядкованістю в розташуванні молекулярних ланцюгів, що мають складчасту конформацію. Для даної складчастої конформації молекулярних ланцюгів характерний прояв регулярно повторюваних вигинів (складок) з випрямлених відрізків ланцюгів, розташованих на однаковій відстані і паралельно один одному, тобто має місце кристалографічний порядок.

В результаті утворюється найпростіший (первинний) елемент надмолекулярної структури полімерів, що кристалізуються - кристалографічний (елементарний) осередок. Розміри елементарної комірки малі - від одиниць до декількох десятків ангстрем, тому кожна макромолекула може «проходити» через кілька елементарних комірок. В утворенні елементарної комірки зазвичай беруть участь кілька макромолекул. Довжина відрізка (складки) молекулярного ланцюга складається з декількох десятків сегментів (у поліетилену приблизно 20 сегментів).

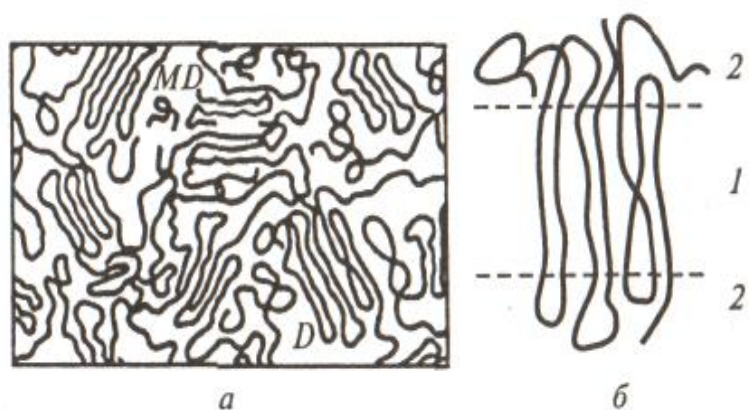


Рисунок 2.2 – Модель будови аморфного полімеру (а) і його домену (б): а) D - домен; MD- міждоменна область; б) 1 - домен; 2 - істинно невпорядковані області

Для елементарних комірок полімерів типовою є орторомбічна форма. Однак оскільки полімери, так само як і прості речовини, володіють поліморфізмом, елементарні комірки можуть мати й інші форми. Наприклад, поліпропілен може утворювати моноклінну, гексагональну або триклинну форму симетрії.

Якщо полімерне тіло повністю побудовано з елементарних осередків, які всі поєднані один з одним суворо паралельно своїм ребрам і розташовані на відстанях, рівних періодам решітки, то утворюється монокристал, який може мати порівняно великі розміри. В дійсності елементарні комірки, як правило, утворюють моношарові пласкі пластини - пластинчасті монокристали, звані кристалітами, товщина яких близько 100-200 А, а розміри сторін здатні досягати до 1 мкм. Кристаліти можуть мати різну конфігурацію. Атоми молекулярних ланцюгів в пластинчастих монокристалах розташовуються в суворому тривимірному порядку, як в кристалах низькомолекулярних речовин. Кожна макромолекула може не тільки «проходити» через безліч елементарних осередків, але і брати участь в створенні декількох кристалітів.

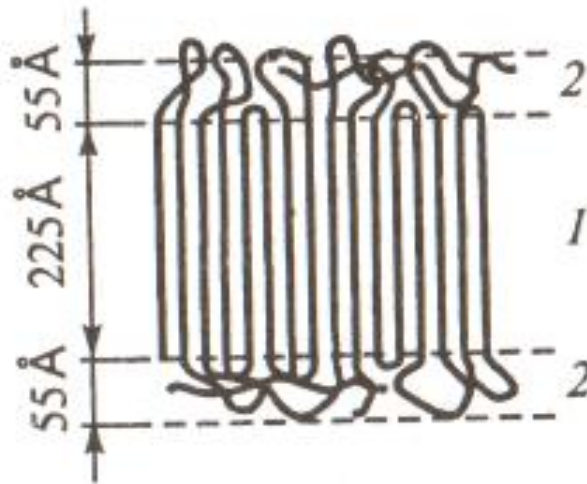


Рисунок 2.3 – Схематичне двовимірне зображення кристаліта поліетилену: 1 - пластинчастий монокристал; 2 - аморфна область

Фізичні стани полімерів

Аморфні полімери (на відміну від кристалічних) при зміні температури аж до температури хімічного руйнування не піддаються фазовим перетворенням. В залежності від температури вони можуть знаходитися в одному з трьох фізичних станів - склоподібному, високоеластичному або в'язкотекучому - відповідають одному і тому ж фазовому стану - аморфному. Області переходу полімеру зі склоподібного стану у високоеластичний і з високоеластичного у в'язкотекучий (і назад) характеризуються середніми значеннями температур які відповідно називають температурою склування T_c і температурою текучості T_m . Чим більше ММР полімеру, тим більше області T_c і T_m .

У мономеру М і олігомеру М2 T_c і T_m мають одне і те ж значення ($T_c = T_m = T_{розм'якшення}$), високоеластичний стан і сегментальна рухливість у них відсутні. З подальшим збільшенням молекулярної маси, коли утворюється полімерне тіло, в молекулярних ланцюгах з'являється сегментальна рухливість. При цьому T_c залишається постійною, а T_m зростає.

На відміну від низькомолекулярних сполук полімери мають новий станом речовини - високоеластичний. Кожному фізичному стану відповідає певний комплекс фізичних властивостей, у тому числі електричних, і перехід полімеру з одного фізичного стану в інший пов'язаний із зміною цього комплексу властивостей. Вироби з полімерів експлуатують, коли вони знаходяться в склоподібному

стані (наприклад, ізолятори, каркаси котушок індуктивності, корпуси електровимірювальних приладів) або високоеластичному (наприклад, ізоляція проводів і кабелів). Переробляють полімери у виробі у в'язкотекучому стані. Не всі полімери можуть виявляти всі три фізичні стани. Багато з них, наприклад целюлоза і її деякі похідні, через високі значення T_c і T_m , що перевищують значення температури хімічного руйнування, знаходяться тільки в склоподібному стані, політетрафторетилен - в склоподібному і високоеластичному станах.

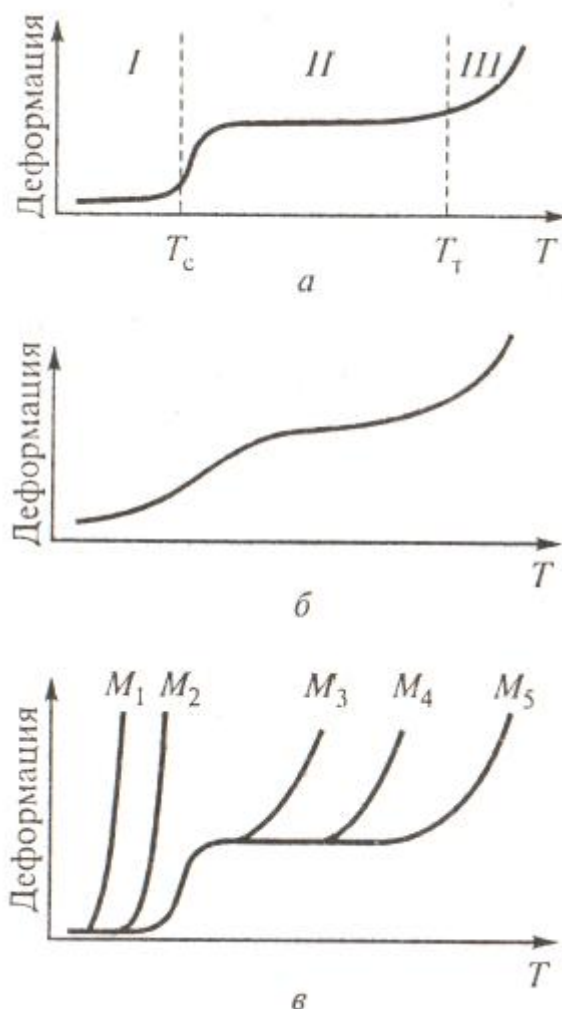


Рисунок 2.4 – Термомеханічні криві аморфних полімерів

У склоподібному стані полімери тверді і крихкі подібно неорганічному склу, мають повністю оборотну деформацію, яка дуже мала і відбувається при великих зусиллях. Сегментальна рухливість повністю відсутня, якщо полімер полярний, то має місце групова рухливість. У цьому стані щільність упаковки полімерного тіла зростає, а всі види молекулярної рухливості зведені до мінімуму, що,

в свою чергу, призводить до збільшення електричної міцності, електричного опору та зменшення діелектричних втрат.

У високоеластичному стані полімери мають повністю оборотну (пружну) деформацію, яка при невеликих зусиллях на 3-4 логарифмічних порядки більше, ніж у низькомолекулярних твердих тіл. У цьому стані макромолекули полімеру, так само як і в склоподібному стані, як і раніше знаходяться у фіксованих положеннях. Однак у результаті зменшення міжмолекулярної взаємодії в молекулярних ланцюгах з'являється сегментальна рухливість; полімер стає еластичним і гнучким. Еластичність є важливою технічною властивістю для багатьох електроізоляційних і конструкційних матеріалів. Електропровідність і діелектричні втрати полімерів у високоеластичному стані, як правило, вище, ніж в склоподібному.

У в'язкотекучому стані полімери під впливом малих зусиль піддаються незворотній (пластичній) деформації. У цьому стані міжмолекулярні зв'язки настільки ослаблені, що молекулярний ланцюг здатний переміщатися як одне ціле. Електричні властивості полімерів у в'язкотекучому стані різко погіршуються.

Кристалізуються полімери, як і прості тверді тіла, і характеризуються температурою плавлення $T_{пл}$. Полімери, які мають аморфно-кристалічну будову, поряд з температурою склування T_c і температурою текучості T_m аморфної фази мають і температуру плавлення $T_{пл}$ кристалічних утворень. Поряд з T_c і T_m (а також $T_{кр}$ для полімерів, що кристалізуються) нижньою експлуатаційною характеристикою полімерів є температура крихкості $T_{хр}$.

При $T < T_{хр}$ у полімерів істотно погіршуються механоміцнісні властивості і настає крихке руйнування зразка. Температура крихкості завжди нижче температури склування.

2.3 ВЛАСТИВОСТІ І ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРІВ

Полістирол - твердий прозорий матеріал, неполярний діелектрик з високими електроізоляційними властивостями. Полістирол має властивості: температура розм'якшення $T_{розм} = 110 - 120$ °С; низька гігроскопічність, водостійкість, має мале значення тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta$, стійкий до впливу нейтронів і γ - променів, не розчиняється в спиртах, парафінових вуглеводнях, стійкий до дії лугів і ряду кислот. До недоліків полістиролу

відносять: крихкість при знижених температурах, схильність до старіння з утворенням тріщин, розчинність в ароматичних вуглеводнях (бензолі, толуолі), хлороформі, концентрованій сірчаній кислоті, невисоку нагрівостійкість.

Теплостійкість підвищують сополімеризацією з іншими мономерами і суміщенням з каучуком. Полістирол - один з кращих високочастотних діелектриків. Він застосовується для виготовлення каркасів індуктивних котушок, корпусів радіоприймачів і телевізорів, плат перемикачів, для ізоляції кабелів і конденсаторів. Деталі отримують литтям під тиском, пресуванням і механічною обробкою.

Поліетилен - твердий білий або світло-сірий матеріал без запаху, неполярний діелектрик, отриманий в результаті реакції полімеризації газу етилену. Електроізоляційні властивості так само високі, як і у полістиролів, але відрізняються високою стабільністю. На відміну від полістиролу поліетилени містять значну кількість кристалічної фази.

Властивості поліетилену: висока морозостійкість (зберігає гнучкість при температурі - 70 °С); висока вологостійкість, не гігроскопічний; стійкий до дії сильних кислот (крім азотної), лугів і багатьох розчинників; при кімнатній температурі не розчиняється; стійкий до цвілі; газонепроникний; стійкий до стирання і вібрацій; горить в полум'ї; гранична робоча температура 100 °С (міцність починає зменшуватися тільки при нагріванні вище 60 °С).

Недоліками поліетилену є: теплове старіння, що призводить до утворення тріщин на поверхні виробів; при нагріванні розчиняється в ароматичних і хлорованих вуглеводнях; під дією концентрованої сірчаної кислоти чорніє, а в концентрованій азотній набухає; під впливом тепла, ультрафіолетового випромінювання, кисню повітря старіє; в сильних електричних полях відбуваються структурні зміни, що знижують його електроізоляційні властивості.

Для отримання матеріалу з необхідними властивостями змішують поліетилен трьох різновидів один з одним або з іншими полімерами, а також піддають іонізуючому опроміненню. Завдяки високим електроізоляційним властивостям поліетилен широко застосовується як конструкційний матеріал для виготовлення каркасів котушок, деталей, що працюють в колах високої частоти.

Поліетилен отримують за трьома методами: при високому, середньому і низькому тиску. Основним методом виготовлення виробів з поліетилену є лиття під тиском при температурі 150 – 180 °С. Пластини, блоки, листи і стрижні з поліетилену легко

піддаються механічній обробці різанням, свердлінням, фрезеруванням на верстатах, застосовуваних для обробки металів.

Поліпропілен - лінійний неполярний полімер, отриманий полімеризацією газу пропілену аналогічно полімеризації етилену низького тиску. Він володіє такими ж електроізоляційними властивостями, як поліетилен. Має температуру розм'якшення 160 - 170 °С (вище, ніж у поліетилену); підвищену температуру плавлення $T_{пл}$ до 200 °С; водостійкість, хороші механічні властивості, більш хорошу холодостійкість гнучкість, ніж поліетилен; еластичність (подовження при розриві 500 - 700%).

Поліпропілен застосовують як комбінований паперово-плівковий діелектрик в силових конденсаторах, як плівковий діелектрик в обмотувальних проводах. Поліпропілен переробляється у виробі тими ж способами, що і поліетилен; його випускають у вигляді порошку, гранул, з нього можуть бути отримані плівки, волокна, тканини і фасонні вироби.

Полівінілхлорид (ПВХ) - білий дрібнодисперсний порошок. Лінійний полярний полімер, отриманий в результаті полімеризації газоподібного мономера вінілхлориду в присутності емульгаторів (желатину, полівінілового спирту) та ініціаторів (перекису водню, перекису ацетилену). Внаслідок полярної будови полівінілхлорид має знижені електричні властивості в порівнянні з неполярними, але питомий електричний опір майже не змінюється при підвищенні температури до 90 °С. ПВХ не розчиняється у воді, бензині, спирті; розчиняється в дихлоритані і метиленхлориді; набухає в ацетоні і бензолі. При нагріванні вище 140 °С під дією світла ПВХ розкладається з виділенням хлористого водню, що призводить до зміни фізико-механічних властивостей: знижується міцність, відносно подовження при розриві, підвищується крихкість, змінюється колір. Залежно від способу полімеризації виготовляють суспензійний і латексний ПВХ і використовують для кабельної світлотермостійкої ізоляції, для кабельного пластикату і для виготовлення вініпласту.

Вініпласт - твердий полімер, який не містить пластифікатора і отримують гарячим пресуванням порошкоподібного або плівкового полівінілхлориду. Плівки з вініпласту застосовують для ізоляції водопогружених електродвигунів, поділу катодних і анодних пластин, в акумуляторних батареях та іншої електричної апаратури, що працює в умовах підвищеної вологості і впливу кислот. Латексний ПВХ використовують для виготовлення міцних пластиків, м'якої плівки, технічної пасти і ізоляційних виробів.

ПВХ пластикат застосовують для виготовлення плівок, ізоляційних стрічок, монтажних і телефонних проводів, трубок, у якості спеціальних світлотермостійких ізоляційних і шлангових матеріалів. При впливі електричної дуги ПВХ виділяє велику кількість газоподібних продуктів, що сприяє гасінню дуги.

Поліметилметакрилат (оргскло, плексиглаза) - прозорий безбарвний матеріал, полярний діелектрик, який отримують в результаті полімеризації ефірів метакрилової кислоти. Має малу гігроскопічність, високу хімічну стійкість; легко зварюється у спеціальних пристроях при температурі 140 - 150 °С із застосуванням тиску на зварюваній поверхні 0,5-1,0 МПа, склеюється полярними розчинниками. Застосовують оргскло для виготовлення корпусів приладів, шкал, лінз, а також в якості дугогасного матеріалу, оскільки воно має властивість виділяти при впливі електричної дуги велику кількість газів (СО, Н₂, СО₂ пари води).

Фторорганічні полімери

Одним з істотних недоліків органічних синтетичних полімерів є знижена теплостійкість. Для більшості органічних полімерів допустимі робочі температури від -60 до + 120 °С. Вуглець, що становить основу органічних полімерів, на повітрі, а тим більше при нагріванні, може окислюватися, що призводить до його руйнування. Для підвищення теплостійкості в якості основи для органічних полімерів використовують крім вуглецю фтор, кремній, титан і ін. Найбільшого поширення набули фторорганічні (фторопласти) і кремнійорганічні полімери (полісілоксани).

Фторопласти - кристалічні полімери фторпохідні етилену, де атоми водню заміщені фтором. Введення в молекулу полімеру фтору підвищує теплостійкість і хімічну стійкість одержуваного матеріалу. Їх отримують в автоклавах полімеризацією газоподібних низькокиплячих мономерів при підвищеному тиску.

Фторопласт - 4 (фторлон - 4, тефлон) - білий або сіруватий матеріал з більш високою щільністю, ніж у інших органічних полімерів. Має такі властивості: робочий діапазон температур від - 250 до +250 °С; висока діелектрична проникність, що мало залежить від температури; хороші вакуумні властивості; найбільш хімічно стійкий матеріал з усіх відомих полімерів (його стійкість до хімічного впливу вище, ніж у золота, платини, скла, порцеляни, емалі, тобто тих матеріалів, які застосовують для захисту від корозії в найбільш сильнодіючих агресивних середовищах; не змочується водою і не

набухає в ній, не розчиняється ні в одному розчиннику; не горить, за електроізоляційними властивостями належить до кращих із відомих діелектриків; абсолютно стійкий в тропічних умовах і не піддається дії грибків.

Недоліки фторопласту - 4: виділення отруйного газоподібного фтору в результаті розкладання при температурі вище 400 °С, низька радіаційна стійкість, складна технологія переробки, висока вартість, порівняна м'якість і схильність до хладотекучості. З фторопласту - 4 виготовляють тонкі конденсаторні та електроізоляційні плівки товщиною 5 ... 200 мкм. В радіоелектроніці - для хімічного посуду для реакцій з агресивними середовищами; в оснащенні для температурних випробувань, так як він добре переносить різку зміну температур в широкому діапазоні; вакуумних вентилях.

Фторопласт - 3 (фторлон - 3 - політріфторхлоретілен) - полярний діелектрик, має такі властивості у порівнянні з фторопластом - 4: нижня межа робочої температури 195 °С; більш високі механічні властивості; вологостійкість вище; нагрівостійкість нижче і становить 125 °С; поступається за електричними властивостями; висока хімічна стійкість; вологостійкий; висока дугостійкість; технологія отримання простіше; дешевше. Випускають у вигляді порошку білого кольору або напівпрозорого рогоподібного матеріалу.

Застосовується у вигляді суспензій для антикорозійних покриттів. Спиртові суспензії фторопласту - 3 використовують для отримання покриттів на металах (у тому числі і на міді) та кераміці (зберігаються вище 100 °С). Ізоляція проводів та кабелів з фторопласту - 3 дозволяє експлуатувати їх при температурі 150 °С у вологих і агресивних середовищах.

Кремнійорганічні полімери (полісілоксани) - матеріали, які є проміжною ланкою між органічними і неорганічними матеріалами. Можуть бути термопластичними з лінійною будовою і термореактивними з утворенням просторових структур. Мають більш високу нагрівостійкість, ніж органічні полімери, а також характерні властивості: високі електроізоляційні властивості; дугостійкість, теплостійкість, водостійкість (гідрофобність), не змочуються водою, стійкість до дії грибкової цвілі; морозостійкість; низька олієстійкість, висока вартість.

Поліконденсаційні полімери - В результаті поліконденсації утворюються полімери просторової структури, з яких отримують міцні і теплостійкі термореактивні матеріали.

Фенолформальдегідні смоли (ФФС) - отримують поліконденсацією фенолу у водному розчині формальдегіду при температурі 70 ... 90 °С в присутності каталізатора (кислоти або лугу). Вони можуть бути термопластичними і термореактивними. Головне застосування - утворювати з різними наповнювачами фенопласти, які мають властивості: висока міцність, хороші електроізоляційні властивості, здатність тривало функціонувати при високих температурах, здатність функціонувати в будь-яких кліматичних умовах; здатні поєднуватися з багатьма полімерами і утворювати сополімери.

ФФС поділяються на резольні і новолачні. Резольні смоли (бакеліти) отримують з надлишком формальдегіду в присутності лугу. Є термореактивними матеріалами, полярними діелектриками. Застосовуються для виготовлення шаруватих пластиків, таких як текстоліт, гетинакс; для композиційних прес-матеріалів (фенопластів); трубок, клеїв та ін.

Новолаки - отримують в надлишку фенолу в присутності кислих каталізаторів (соляної або щавлевої кислоти) - це тверді, крихкі, прозорі термопластичні смоли. Плавляться при нагріванні до температури 100 - 120 °С; розчиняються в спирті, ацетоні та ін. розчинниках; мають невисокі електроізоляційні властивості, низьку стійкість до іскрових розрядів.

Новолаки відрізняються вмістом фенолу (від 2 до 9%). При додаванні 10 ... 15% уротропіну вони переходять у термореактивний резит. Застосовують для виготовлення корпусів приладів, плат, різних кнопок і ручок управління радіоапаратури, лаку і як заміник лугу.

Поліефірні смоли (ПЕС) - отримують в результаті реакції поліконденсації різних багатоатомних спиртів (гліколю, гліцерину тощо) і багатоосновних органічних кислот (фталевої, малеїнової та ін.) або їх ангедридів. За фізичними властивостями вони близькі до природних смол (каніфоль). Найбільшого поширення отримала лавсанова смола (поліетилентерефталат), гліфталева смола, полікарбонати.

Лавсанову смолу отримують поліконденсацією терефталевої кислоти та етиленгліколю, це термопластичний діелектрик кристалічної або аморфної будови. Кристалічний лавсан має високу температуру плавлення 265 °С; високу механічну міцність; добрі електроізоляційні властивості; стійкий до дії слабких лугів, соляної кислоти, ефірів, масел, жирів, цвілі і грибків; не стійкий до дії міцної азотної та сірчаної кислот, а також має малу гігроскопічність і

газопроникність; старіє під дією сонячних променів. Застосовують для виготовлення волокон, пряжі, тканин, плівок і ін. Волокна і плівки використовуються для ізоляції проводів та кабелів. Плівка з лавсану володіє високою електричною міцністю і підвищеною нагрівостійкістю.

Аморфний лавсан використовують при виготовленні емальованих проводів, виробництві електроізоляційних лаків. Плівки лавсанових лаків термореактивні, тобто не розм'якшуються при нагріванні.

Гліфталеву смолу отримують з гліцерину і фталевого ангідриду при 150 ... 200 °С в алюмінієвих котлах. Це термореактивні смоли з яскраво вираженими дипольно-релаксаційними втратами. Мають властивості: висока нагрівостійкість (до 130 °С), висока гнучкість, твердість, клеюча здатність, розчинність в органічних розчинниках, підвищена гігроскопічність, стійкість до поверхневих розрядів. Застосовують як основу для просочувальних і покривних лаків, для виготовлення пластмас, клеїв.

Полікарбонати - поліефіри вугільної кислоти. Мають хороші електричні і механічні властивості, відносно високу температуру розм'якшення (140 °С), гарну хімічну стійкість, невисоку гігроскопічність. Застосовують для виготовлення шаруватих пластиків, компаундів, плівок для ізоляції в електричних машинах.

Кремнійорганічні смоли (КОС) - з просторовою структурою, є термореактивними. Мають високу нагрівостійкість до температури +250 °С, високу холодостійкість до температури - 60 °С; хороші діелектричні властивості, малу гігроскопічність; хімічну інертність. У промисловості КОС застосовують для виготовлення електроізоляційних матеріалів, таких як склотекстоліти, слюдяна ізоляція, компаунди, лаки, емалі, гумосклотканини та ін.

Епоксидні смоли (ЕПСМ) - отримують в результаті хлорування гліцерином з двохатомними або багатоатомними фенолами в лужному середовищі. У структурі ЕПСМ міститься не менше двох епоксидних груп, в результаті зв'язування яких відбувається їх затвердіння. Чисті ЕПСМ – термопластичні, низкоплавкі рідкі матеріали, які легко розчиняються (в ацетоні, толуолі, хлорованих вуглеводнях та ін.), не розчиняються у воді, мало розчиняються в спиртах, тривало зберігаються, не змінюючи властивостей.

Після додавання затверджувчів епоксидні смоли швидко твердіють, набуваючи просторовою будови. Затверджування відбувається в результаті полімеризації без виділення побічних

продуктів (води та інших речовин). Затверділі епоксидні смоли є термореактивними і можуть утворювати товстий шар монолітної водонепроникної ізоляції. Залежно від затверджувача ЕПСМ можуть тверднути як при кімнатній температурі, так і при 80 - 150 °С, а також при атмосферному або підвищеному тиску.

Затверділі ЕПСМ володіють невеликою усадкою, високою адгезією до пластмас, скла, порцеляни, металів; більшою нагрівостійкістю; значними механічними властивостями, меншою вартістю, ніж КОС. Застосовують для виготовлення лаків, клеїв, заливальних компаундів.

Поліаміди (ПА) - термопластичні полярні діелектрики з лінійною структурою. ПА мають високу механічну міцність, високу еластичність, високу хімічну міцність, високі електричні параметри, високу гігроскопічність, малу радіаційну стійкість. Серед ПА найбільш поширені капрон і нейлон. Випускають ПА у вигляді порошків, гранул жовтуватого і сіруватого кольорів, які переробляють у вироби литтям під тиском.

Полііміди (ПІ) - органічні полімери, що володіють високою нагрівостійкістю (до 300 °С, короткочасно до 500 °С), дуже високою холодостійкістю (до - 269 °С), хорошими діелектричними властивостями. ПІ плівки застосовують в конденсаторах, в нагрівостійких кабелях, в якості підкладок в мікросхемах, в лаках, емалях.

Поліуретани (ПУ) - лінійні термопластичні матеріали, які після затвердіння перетворюються на термореактивні полімери. ПУ мають температуру плавлення нижче, ніж ПА, більш стійкі до окислення, дії кислот, вологи і морозу, кращі електроізоляційні властивості в умовах підвищеної вологості і після тривалого впливу киплячої води; стійкі до дії розчинників (бензину, бензолу, олій, спиртів). Застосовують ПУ для виготовлення тканин, пряжі, ниток, емалей, лаків, компаундів, пінопластів, каучуків, клеїв, плівок, антикорозійних покриттів. Пінополіуретани використовують для герметизації радіоблоків і малогабаритних приладів, а також для їх захисту від вібрації, тепла і механічних перевантажень.

2.4 ІНШІ ВИДИ ІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Пластмаси

Пластмаси поєднують групу твердих або пружних матеріалів, які складаються повністю або частково з полімерних сполук і формуються у виробі методами, заснованими на використанні їх пластичних деформацій.

Пластмаси одержують на основі різних натуральних і штучних смол, вони успішно замінюють метали, фарфор, каучук, скло, шовк, шкіру та інші матеріали. Основні їх характеристики:

- порівняно високі механічні властивості, достатні для виготовлення виробів, які не піддаються значним динамічним навантаженням;
- добрі електроізоляційні властивості;
- висока стійкість до корозії;
- висока хімічна стійкість;
- низька гігроскопічність;
- легкість (щільність пластмас зазвичай становить 900 ... 1800 кг/м³);
- широкий діапазон коефіцієнтів тертя і високий опір стиранню;
- хороші оптичні властивості та прозорість.

Основна сировина для виробництва пластмас - недорогі і доступні (продукти переробки нафти, газу, кухонної солі, вапно, пісок та ін.) Отримання виробів - нескладний і дешевий процес.

Недоліки пластмас - повзучість, невисока теплостійкість, знижена міцність при змінних навантаженнях; швидке старіння. Пластмаси найчастіше складаються з сполучної речовини і наповнювача. До їх складу входять пластифікатори, стабілізатори і барвники.

Сполучні речовини визначають в основному властивості деталей із пластмас і являють собою складні хімічні сполуки органічного та неорганічного походження, які отримали в промисловості загальну назву «смоли». Вміст сполучного речовини в пластмасах коливається в межах 30 ... 60%. Наповнювачі мають здатність міцно зчіплюється з речовиною, надають пластмасам необхідні властивості - механічну міцність (деревне борошно, азбест), теплопровідність (мелений мармур, кварц), діелектричні властивості (мелена слюда або кварц), нагрівостійкість (азбест, скловолокно).

Введення наповнювачів зменшує об'ємну усадку пластмас, однак підвищує гігроскопічність і погіршує їх електроізоляційні властивості. Зазвичай пластмаси містять 40 ... 70% наповнювача.

Пластифікатори вводять в пластмаси для підвищення пластичності, холодостійкості, попередження прилипання виробу до стінок пресформи при пресуванні.

Стабілізатори сприяють тривалому збереженню пластмасами своїх основних властивостей.

Барвники надають пластмасам забарвлення. Жовто-коричневе забарвлення виходить введенням охри і кропа, червоне - додаліном, чорне - нігрозину, зелене - зелений діамант.

Пластмаси класифікують за різними властивостями: застосуванням, нагрівостійкістю, хімічними властивостями, способами переробки, використовуваним сполучним смолам.

Шаруваті пластики і фольговані матеріали

Шаруваті пластики є різновидом пластмас, які отримують гарячим пресуванням листових волокнистих матеріалів, попередньо просочених синтетичними смолами. Зв'язувальними речовинами в цьому випадку служать синтетичні фенолформальдегідні, кремнійорганічні і епоксидні смоли, а наповнювачами - полотна тканини, паперу або деревної шпони.

Гетинакс - шаруватий листовий матеріал, виготовлений методом гарячого пресування двох або більше шарів паперу, просоченого терморективною смолою (фенолформальдегідною або епоксидною). Вироби з гетинаксу виготовляють механічною обробкою, штампуванням і витяжкою. Для підвищення вологостійкості вироби з гетинаксу просочують в бакелітовій смолі, розведеної в спирті, з наступним сушінням. Випускають гетинакс у вигляді листів і плит, трубок і циліндрів, з яких виготовляють каркаси котушок та ізоляційні трубки, як підставку для друкованих плат.

Текстоліт - шаруватий матеріал, виготовлений методом гарячого пресування бавовняної тканини, просоченої фенолформальдегідною смолою. Випускається конструкційний і електротехнічний текстоліт на різних зв'язках. Текстоліт електротехнічний випускають у вигляді листів товщиною 0,5 ... 8 мм і плит товщиною 0,5 ... 50 мм. Цей матеріал використовують в інтервалі температур про - 60 до + 105 ° С.

Листовий текстоліт застосовують як конструкційно-ізоляційний матеріал для виготовлення виробів, які піддаються ударним

навантаженням, стирання (деталі перемикачів), не вимагають високих електроізоляційних властивостей (панелі, каркаси, щити, кріпильні планки), а також в якості підстав для друкованих плат.

Деталі з текстоліту виготовляють за такою ж технологією, як і деталі з гетинаксу, піддаючи їх бакелізації. Текстоліт значно дорожче гетинаксу, оскільки вартість тканини значно вище вартості паперу.

Різновиди текстоліту: склотекстоліт (володіє підвищеною вологостійкістю і кращими електричними і механічними параметрами в порівнянні з гетинаксом і текстолітом, але гірше обробляється механічно), асботекстоліт (застосовується для виготовлення деталей з підвищеною теплостійкістю).

Фольговані шаруваті матеріали являють собою шаруваті пластики або синтетичні плівки, облицьовані з одного або двох сторін металевою фольгою (гетинакс, склотекстоліт, армований фторопласт) і використовують в якості підстав для друкованих плат.

Плівкові, фольговані матеріали

Плівки являють собою цінний діелектричний матеріал завдяки підвищеній електричній міцності, достатній механічній міцності і малій товщині, а також часто високій вологостійкості. Властивості плівок обумовлені властивостями вихідних полімерів, тому їх можна розділити на полярні і неполярні.

Неполярні плівки.

Полістирольна плівка (ПС) випускається товщиною 0,03 мм і шириною 20 ... 100 мм.

Орієнтована ПС плівка володіє високою вологостійкістю і малими діелектричними втратами. Недолік - порівняно невисока температура розм'якшення і низька механічна міцність при нагріванні. Застосовують для виготовлення високочастотних конденсаторів і кабелів.

Поліетиленова плівка (ПЕ) - відрізняється високою морозостійкістю, зберігає основні властивості до температури $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, низькою вологопроникністю, при нагріванні до температури вище $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ дає усадку, що забезпечує додаткове ущільнення ізоляції обмоток, піддається впливу нафтової олії, що обмежує їх застосування в конденсаторах, кабелях і монтажних дротах, найбільш дешеві.

Поліпропіленова плівка (ПП) - схожа з ПЕ, застосовують для виготовлення високовольтних конденсаторів в якості комбінованої паперово-плівковим ізоляції.

Політетрафторетіленова плівка (ПТФЕ) - випускають декількох видів. Застосовується для ізоляції проводів, що працюють при температурах -60 до +250 °С, для міжшарової ізоляції, як конденсаторна плівка.

Полярні плівки.

Поліетилентерефталева (лавсанова) - має високу міцність на розрив, хороші електричні властивості, хімічну стійкість, стійкість до дії органічних розчинників, підвищену нагрівостійкість, вологостійкість. Недолік - зайва жорсткість і пружність. Застосовують для виготовлення конденсаторів і кабелів, а також для ізоляції обмоток низьковольтних електричних приладів.

Полівінілхлоридна (ПВХ) - володіє невисокими електричними властивостями і низькою нагрівостійкістю, що обмежує її застосування.

Вініпластова - застосовують як вологостійкий і хімічно стійкий матеріал для ізоляції водозанурених електродвигунів.

Поліамідна (ПАМ) - володіє високою механічною міцністю, невисокими електричними параметрами, малою газопроникністю, високою вартістю. Застосовують як бензо- та маслостійкий герметизуючий матеріал в основному в кабельній техніці для ізоляції проводів із зовнішнім покриттям з полівінілхлориду або поліетилену.

Полікарбонатна (ПК) - застосовується при виготовленні конденсаторів низької напруги, а також для високовольтної ізоляції.

Плівку з ефірів целюлози - застосовують для виготовлення малогабаритних намотувальних конденсаторів низької напруги.

Еластомери (матеріали на основі каучуків)

Еластомерами називають полімери, які при нормальній температурі піддаються великим зворотним деформацій розтягування (до багатьох сотень відсотків). Еластомерами є всі каучуки та гуми. Каучуки бувають натуральні та штучні (синтетичні).

Натуральний каучук (НК) отримують з латексу-молочного соку тропічних рослин гевеї і ін. Він неполярний, легко розчиняється в ефірі, бензині, мінеральних оліях, не розчиняється у воді, при нагріванні до температури 90 °С розм'якшується, а при температурі нижче нуля стає твердим і крихким.

Синтетичні каучуки (СК) - сировиною служать спирт, попутні продукти нафтовидобутку, природного газу і нафтопереробки. Синтетичні каучуки поділяються на каучуки загального призначення

(універсальні) і спеціального призначення (теплостійкі, морозостійкі, олієстійкі, кислототривкі та ін.)

Бутадієновий каучук (СКБ) отримують полімеризацією бутадієну в присутності каталізатора (металевого натрію) - це каучук загального призначення. Застосовують для виготовлення ебонітових виробів і оболонок кабелів.

Бутадієнстірольний каучук (СКС) - має добрі діелектричні властивості, добре пручається теплового старіння і дії багаторазових деформацій.

Бутилкаучук отримують спільної полімеризацією ізобутілену і ізопрену, володіє високою механічною міцністю, хімічною стійкістю, газонепроникністю, стійкістю до теплового старіння, озоностійкістю. Використовують для виготовлення електроізоляційних гум.

Ізопреновий каучук (СКІ) - володіє високою механічною міцністю і еластичністю, але меншою клейкістю, ніж натуральний каучук.

Поліхлоропреновий каучук володіє високою механічною міцністю, стійкістю до дії нафтових масел і технічних розчинників, високою стійкістю до впливу світла, озоностійкість, за електричними властивостями поступається іншим синтетичним каучукам. Застосовують для захисних оболонок кабелів, які по вологостійкості не поступаються свинцевим.

Полісілоксановий каучук має добрі діелектричні властивості, високі термо- і морозостійкість, світлостійкість і озоностійкість, розчиняється в концентрованих кислотах і лугах. Застосовують для виготовлення прокладок та ізоляції.

Натуральні і синтетичні каучуки в чистому вигляді не використовуються, їх вулканізують при нагріванні в присутності вулканізаторів (сірки, металевого натрію, перекису бензолу та ін.).

Для отримання гуми в каучуки крім вулканізаторів додають прискорювачі полімеризації (дифеніл, оксид цинку та ін.), наповнювачі (сажу, крейду, вуглекислий марганець та ін.), пластифікатори (стеаринову, олеїнову кислоти, парафіни та ін.), барвники (охру, ультрамарин та ін.). Гумі властиві хороша вібростійкість, висока еластичність, підвищена хімічна стійкість, достатня механічна міцність, добрі електроізоляційні властивості, стійкість до зношення.

Недоліки гуми: низька нагрівостійкість, погана стійкість до дії нафтових олій і інших неполярних рідин (бензину, бензолу та ін.), нестійкість до впливу світла. Гуми застосовують для ізоляції проводів

і кабелів, виготовлення прокладок, шайб, ізолюючих трубок, діелектричних рукавичок, електроізоляційних килимків.

Пластмаси на основі каучуку.

Ебоніт - тверда гума, яку отримують при вулканізації натурального і синтетичних каучуків при додаванні 25 ... 30% сірки і наповнювача. Ебоніт має високі електроізоляційні властивості, стійкий до дії кислот і лугів, не розчиняється в органічних розчинниках, має високу дугостійкість і стійкість до ударних навантажень. Ебоніт добре обробляється різанням і полірується. Недолік ебоніту - низька теплостійкість (до 80 °С), схильність до холодної текучості, старіє під дією тепла і світла.

Ескапон - отримують при полімеризації синтетичного бутадієнового каучуку при підвищеному тиску і температурі (270 °С) в прес-формах. Він не містить сірки. За механічним і хімічним властивостям близький до ебоніту, але володіє меншими діелектричними втратами, підвищеною нагрівостійкістю, не схильний до старіння.

Асбодін - композиція на основі каучуку, азбестового волокна і залізного сурику з вулканізуючими добавками. Він має підвищені нагрівостійкість і дугостійкість, стійкий до дії цвілі, тропікостійкий, має низьку плинність. Застосовують як низьковольтний ізоляційний матеріал.

Хлоркаучук - отримують при хлоруванні каучуку, володіє хорошими електроізоляційними властивостями, стійкістю до дії кислот, лугів, хлору, але розчиняється в ароматичних вуглеводнях; негорючий і має низьку нагрівостійкість.

Ізомеризований каучук - отримують при обробці каучуку в присутності кислого каталізатора - сірчаної кислоти, електроізоляційні властивості вище, ніж у хлоркаучуку, стійкий до дії кислот, лугів і розчинників.

Лаки, емалі, компаунди

Лаки - колоїдні розчини плівкоутворюючих речовин у відповідних летучих розчинниках. Лаки складаються з плівкоутворювальних речовин (масла, смоли, бітуми, ефіри целюлози та ін.), розчинників (бензол, толуол, спирт та ін.), пластифікаторів (касторова олія), сикативів (для прискорення висихання), барвників, розріджувачів. Лаки бувають холодної та гарячої сушки.

Просочувальні лаки служать для просочення пористої і волокнистої ізоляції. До просочувальних лаків відносяться кремнійорганічні, бітумно-масляні, олійно-алкідні і ін.

Покривні лаки служать для захисту виробів від впливу атмосферної вологи і пари агресивних речовин. До них відносять кремнійорганічні лаки, лаки на полівінілацетатній основі, лаки на поліуретановій основі, масляні лаки, поліамідний і поліїмідні лаки, целюлозні лаки. Лаки використовують для виготовлення різних покриттів проводів.

Емалі - представляють собою різновид лаків, до складу яких вводиться неорганічний наповнювач - пігмент. Пігменти підвищують твердість, теплопровідність, вологостійкість покриттів і надають їм відповідний колір. В якості наповнювачів використовують залізний сурик, оксиди цинку, титану та ін. Емалі використовують в основному в якості захисних покриттів поверхонь різних деталей і елементів радіоелектроніки та для декоративного оздоблення корпусів електрорадіотехнічних приладів.

Лакофарбові покриття. Нанесення рідких лаків, компаундів та емалей з подальшим їх отвердінням є одним з перших методів захисту поверхні і відноситься до найбільш простих і широко поширеним способів захисту при складанні виробів електронної техніки.

Компаунди являють собою механічні суміші з електроізоляційних матеріалів, що не містять розчинників. У порівнянні з лаками компаунди забезпечують кращу вологостійкість і вологонепроникність ізоляції, так як при охолодженні після просочення повністю тверднуть без слідів розчинника; забезпечують підвищення потужності апарату за рахунок кращих умов відведення тепла.

Компаунди можуть бути рідкими або твердими. У рідкі перед використанням вводять затверджувач, в результаті чого вони поступово тверднуть, перетворюючись на монолітний твердий діелектрик. Твердий компаунд попередньо нагрівають при відповідній температурі для отримання маси з певною в'язкістю.

В залежності від застосовуваних смол компаунди можуть бути термопластичними або термореактивними. За призначенням компаунди поділяють на просочувальні і заливальні. Найбільшого поширення набули синтетичні компаунди - епоксидні, кремнійорганічні, поліефірні.

Флюси

Флюси є допоміжними матеріалами для отримання якісної і надійної пайки. По дії на поверхні, що сполучаються, флюси поділяють на активні (кислотні), безкислотні, активовані та антикорозійні.

Активовані (кислотні) флюси інтенсивно розчиняють оксидні плівки на поверхнях деталей, що з'єднуються, забезпечуючи гарну адгезію та механічну міцність пайки. Виготовляють на основі каніфолі з добавкою активаторів (невеликої кількості саліцилової кислоти, солянокислого діетиламін, солянокислого або фосфорнокислого сніліна та ін.).

Безкислотні флюси - це каніфоль і флюси, виготовлені на її основі з додаванням неактивних компонентів (спирту, гліцерину).

Антикорозійні флюси готують на основі органічних кислот, фосфорної кислоти з додаванням різних органічних сполук і розчинників.

Тверді неорганічні діелектрики

До твердих неорганічних діелектриків відносять скла, склокристалічні матеріали, оксидні електроізоляційні плівки, кераміку, слюду та матеріали на її основі.

Скла - тверді неорганічні аморфні речовини, що представляють собою складні системи різних оксидів, атоми яких не можуть вільно переміщатися один відносно одного. Такий стан речовини називають склоподібним. За положенням у структурі скла і по ролі в процесі склоутворення оксиди поділяють на оксиди-склоутворювачі, оксиди - модифікатори, проміжні оксиди.

Оксиди – склоутворювачі, здатні утворювати скло в чистому вигляді (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , GeO_2 та ін.). Скла часто називають за назвою оксиду - силікатні.

Оксиди - модифікатори вводять до складу скла з технологічних причин (для підвищення в'язкості та ін.). До них відносяться лужні оксиди Na_2O , K_2O , лужно-земельні оксиди CaO , BaO .

Проміжні оксиди не утворюють скла, але можуть надати їм різні властивості. Наприклад, CoO - синю, UO_2 - жовту, Cr_2O_3 - зелену.

До основних параметрів, що характеризують скла, відносять щільність, механічну міцність, твердість, електричні і теплові властивості, хімічну стійкість.

Електричні властивості скла залежать від хімічного складу і термообробки. При нормальній температурі питомий електричний

опір скла змінюється від 10^6 до 10^{15} Ом·м, але у деяких воно може становити 10^3 Ом·м. Великий вміст оксидів лужних металів у складі скломаси істотно знижує об'ємний опір скляних деталей. Діелектрична проникність скла залежить від її складу та температури.

Скло є поганим провідником тепла. Теплопровідність його змінюється зі зміною температури. При підвищенні температури теплопровідність скла підвищується і при температурі розм'якшення збільшується приблизно в два рази в порівнянні з теплопровідністю, якою володіє скло при кімнатній температурі.

Хімічна стійкість скла також залежить від його складу. Скло має порівняно високу хімічної стійкість. Але вода, луки та кислоти поступово руйнують його поверхню.

По застосуванню в радіоелектроніці розрізняють електровакуумні скла, ізоляторні, скломалі, скловолокно та скловоди.

Зі скляних ниток виготовляють світловоди, ізоляцію монтажних, обмотувальних та мікропроводів, скляні тканини, які використовують у виробництві нагрівостійких склолакотканин і склотекстолітів. Прес-порошок з коротких скловолокон застосовують як наповнювач для пластмас.

Світловоди являють собою волокно, що складається з жили з високим показником заломлення світла. Світловоди широко застосовують для передачі різної інформації в обчислювальній техніці, телебаченні, фототелеграфії і т.д.

Ситалли - (скорочення від слів «силікат» і «кристал») - продукт часткової кристалізації скломаси, в яку крім звичайних оксидів вводять тонкодисперсні домішки, що використовуються для утворення центрів кристалізації. У різні марки ситалів входять оксиди: кремнію – від 30 до 90%, титану - від 10 до 20%, бору - від 15 до 30%, алюмінію - від 12 до 28%, магнію - від 5 - до 20%, калію - від 2 до 4%, літію - від 5 до 10%.

В якості стимуляторів кристалізації застосовують оксид титану TiO_2 , сірчане залізо FeS , фториди і фосфати деяких металів та інші речовини. Від скла ситалли відрізняються дещо іншим хімічним складом і будовою та займають проміжне місце між звичайними склами і керамікою. Вони складаються з рівномірно розподілених по всьому об'єму дрібних кристаликів, зрощених один з одним або з'єднаних тонкими прошарками залишкового скла. Вміст кристалічної

фази в ситаллів досягає 95%, а розміри оптимально розвинених кристаликів 01 ... 2мкм. На відміну від скла ситалли не прозорі, але деякі з них частково пропускають світло.

Формування кристалічної будови в ситаллів може проводитися фотохімічним, термічним способами. Розроблено сегнето- і пьезоситалли, які використовують в якості активних діелектриків. Властивості ситаллів: висока механічна міцність, твердість, термічна і хімічна стійкість, інтервал робочих температур від - 50 до + 700 °С, більш високі електроізоляційні властивості, невисока вартість виробів завдяки доступності сировини і простоті технології виготовлення, малі діелектричні втрати.

Кераміка - твердий щільний полікристалічний матеріал, який одержують спіканням неорганічних солей з мінералами і оксидами металів. У якості вихідних матеріалів використовують непластичні кристалоутворюючі і пластичні компоненти.

До кристалоутворюючих компонентів відносять неорганічні солі (хлористий алюміній, хлористе залізо, хлористий магній та ін.), мінерали (кварц, глинозем і тальк), а також карбонати. До пластичних компонентів відносять різні глинисті матеріали. Глина є необхідним компонентом при виготовленні більшості виробів з кераміки. Загальна назва всіх видів виробів з випаленої глини походить від грецького слова «keramos» - глина. Керамічні матеріали являють собою багатофазну систему, що складається з кристалічної, аморфної або склоподібної і газової фаз.

Кристалична фаза є основною; склоподібна являє собою прошарок скла, який пов'язує кристалічну фазу; газова присутня в кераміці у вигляді пор, мікротріщин, які призводять до зниження механічних і електричних властивостей матеріалу. Для забезпечення високих ізоляційних властивостей бажано мати тільки кристалічну фазу. Аморфна фаза забезпечує матеріалу необхідну механічну міцність.

Електричні властивості керамічних матеріалів залежать від числа і ступеня закріплення слабо зв'язаних іонів, наприклад калію і натрію, які під дією зовнішніх факторів (температури, електричного поля) можуть покидати місця закріплення і переміщатися. В результаті цього електропровідність кераміки підвищується.

Процес виробництва керамічних виробів складається з наступних основних етапів: приготування керамічної маси, формування виробів, сушіння, випалювання. У деяких випадках

обпалені вироби можуть піддаватися додатковій механічній обробці і металізації.

Керамічні матеріали володіють нагрівостійкістю, вологостійкістю, механічною міцністю, високими діелектричними властивостями, стабільністю і надійністю параметрів при експлуатації, можливістю отримання наперед заданих електрофізичних параметрів матеріалу.

Керамічні матеріали різноманітні за властивостями і областями застосування: конденсаторна кераміка (високочастотна і низькочастотна), настановна кераміка (високочастотна і низькочастотна).

Кожен тип кераміки підрозділяють на 10 класів.

Конденсаторна кераміка повинна мати високу діелектричну проникність, малий тангенс кута діелектричних втрат, електричну і механічну міцність, високу термостабільність і малий температурний коефіцієнт діелектричної проникності, від'ємне значення температурного коефіцієнта діелектричної проникності.

Властивості керамічних виробів можна змінювати, змінюючи склад вихідної сировини, технологічні режими виготовлення і вводячи різні добавки. Основними компонентами вихідної сировини для виготовлення конденсаторної кераміки є кристалоутворюючі оксиди титану, олова, цирконію, стронцію, кальцію, магнію, алюмінію та ін. Вихідна сировина конденсаторної кераміки малопластична, оскільки глина в ньому відсутня або наявна в незначній кількості. Тому при виготовленні виробів з неї для забезпечення необхідної пластичності часто вводять органічну зв'язку, що вигоряє при випаленні.

Високочастотна конденсаторна кераміка відрізняється високим вмістом кристалічної фази і невеликим вмістом аморфної, підрозділяється на I, II, III класи.

I клас - на основі титанату стронцію SrTiO_3 або титанату кальцію CaTiO_3 .

II клас - на основі цирконату кальцію CaZrO_3 і титанату кальцію CaTiO_3 або нітратів алюмінію і кальцію.

III клас - на основі станата кальцію CaSnO_3 , титанату кальцію, цирконату кальцію, а також нітратів алюмінію і кальцію.

Кераміка відрізняється високою термостабільністю і застосовується для контурних конденсаторів високої стабільності.

Низькочастотна конденсаторна кераміка характеризується високим значенням діелектричної проникності і відносно великим

тангенсом кута діелектричних втрат. Низькочастотну кераміку ділять на IV, V класи.

IV клас - на основі титанату стронцію SrTiO_3 і вісмуту $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}$.

V клас - на основі титанату і цирконату барію, титанату вісмуту, ніобіту свинцю, стронцію та кальцію.

Установча кераміка застосовується для виготовлення виробів, які піддаються механічному навантаженні (опорні й підвісні ізолятори), або деталей для композитних конструкцій.

Високочастотна настановна кераміка використовується для виготовлення різних настановних деталей радіоелектронної апаратури, які піддаються механічному навантаженні, працюючи в полі високої частоти. Ця кераміка характеризується низьким тангенсом кута діелектричних втрат в області високих частот, малою залежністю тангенса кута діелектричних втрат від температури і частоти, високою механічною міцністю.

Високочастотну кераміку підрозділяють на VI, VII, VIII класи.

VI клас відрізняється високою нагрівостійкістю і складається з трьох груп: форстеритові (з форстерита 2MgO , SiO_2), яка застосовується для металокерамічних спаїв в радіолампах, ізоляторів корпусів напівпровідникових приладів з підвищеним коефіцієнтом лінійного розширення; шпінельно-форстеритова кераміка містить кристали форстериту і шпінелі MgO , Al_2O_3 ; цельзіанова - з цельзіана BaO , Al_2O_3 , 2SiO_2 з глиноземом, аморфним кварцом, вуглекислим барієм, каоліном, глиною; віллемітова кераміка - на основі віллеміта 2ZnO , SiO_2 .

З цельзіанової і віллемітової кераміки виготовляють каркаси для котушок зі стабільною індуктивністю і конденсатори малої потужності.

VII клас - на основі природної магнезіальної (силікатної) сировини, переважно тальку 3MgO , 4SiO_2 , H_2O . Різновидом цього класу є стеатітова кераміка. В залежності від складу вихідних компонентів і технології виготовлення отримують непластичну і пластичну стеатітову кераміку, яку використовують для виготовлення ізолюючих кілець, прохідних ізоляторів, опорних плит і підкладок, елементів корпусів напівпровідникових приладів та інтегральних схем.

VIII клас - це глиноземиста кераміка з корунду Al_2O_3 . Глиноземиста кераміка володіє найбільшою механічною міцністю, високою твердістю, високою хімічною стійкістю, підвищеним значенням теплопровідності і високою електроізоляцією.

Кераміку цього класу називають в залежності від вмісту оксиду алюмінію: ультрафарфор - це високоякісна кераміка з великим вмістом корунду, яка має підвищену механічну міцність і теплопровідність, найменший тангенс кута діелектричних втрат до частот 10^{10} Гц, застосовується для настановних деталей складної форми, високовольтних конденсаторів, плат і радіотехнічних підкладок; алюмооксидна (високоглиноземиста) кераміка - непластична, дуже тверда, має високу нагрівостійкість (до 1600 °С). Вихідна сировина алюмооксид містить 95 ... 98% глинозему і 5 ... 2% мінералізатора (мармур, глина). Вироби використовуються в якості ізоляції для електронних ламп, виготовлення вакуум-щільних перехідних ізоляторів корпусів напівпровідникових приладів та радіотехнічних антенних ізоляторів, що зазнають великі механічні навантаження.

Полікор відноситься до високоглиноземистої кераміки, його щільність близька до теоретичної щільності корунду. Полікор прозорий, його використовують в якості підкладок для гібридноплівкових інтегральних мікросхем.

Низькочастотна настановна кераміка в порівнянні з високочастотною має гірші електричні характеристики і, як правило, більш низьку механічну міцність, але відрізняється високою пластичністю вихідної сировини і більш простою технологією виготовлення виробів.

Низькочастотна настановна кераміка включає в себе IX, X класи.

IX клас - це стеатіти зі значним вмістом глинистих матеріалів і оксиду барію BaO, отримують із спеціальних сортів глин і мінералів: кварцу і польового шпату. Фарфор - основний матеріал для виробництва маловідповідальних настановних деталей (розеток, патронів електричних ламп та ін.) Радіофарфор являє собою фарфор, в склоподібній фазі, до якого вводять важкий оксид барію BaO. Радіофарфор застосовують для виготовлення каркасів котушок індуктивності, лампових панелей, ізоляції статорних пластин повітряних конденсаторів, антенних ізоляторів.

Безоксидні керамічні матеріали - нітриди, карбіди, силіциди, бориди і їх композиції. У мікроелектроніці широко застосовують нітрид бору BN (боразон), який є електроізоляційним матеріалом високої нагрівостійкості. Він може функціонувати при дуже високих

температурах, але в нейтральній чи відновлювальній атмосфері. Кипляча вода і слабкі кислоти руйнують його.

Неорганічні електроізоляційні плівки

Неорганічні електроізоляційні плівки являють собою хімічні покриття, які отримують в процесі створення на поверхні деталей тонких оксидних плівок або плівок важкорозчинних солей за допомогою спеціальних розчинів. Хімічні покриття застосовують для захисту від корозії, підвищення зносостійкості і декоративної обробки різних виробів.

Для ізоляції алюмінієвих проводів та стрічок, плівкових електролітичних конденсаторів, елементів інтегральних схем використовують плівки оксидів алюмінію Al_2O_3 , танталу Ta_2O_5 , титану TiO_2 , ніобію Nb_2O_5 , кремнію SiO_2 , германію GeO та ін.

Для оцінки здатності металу до утворення суцільного оксидного шару використовують об'ємний коефіцієнт оксидування K , який визначається як відношення обсягу отриманого оксиду до об'єму металу, що перейшов в оксид:

$$K = MD_m / nAD_o \quad (2.1)$$

де M - молекулярна маса оксиду; D_m - щільність металу; n - число атомів металу, що входять в молекулу оксиду; D_o - щільність оксиду.

Якщо $K > 1$, то на поверхні металу утворюється суцільний оксидний шар. Якщо $K < 1$, то на поверхні такого металу не можна отримати суцільне покриття. Наприклад, для заліза $K < 1$, отже, на залізі можна отримати суцільний оксидний шар, а для алюмінію $K > 1$, тому алюміній навіть на повітрі покритий плівкою оксиду алюмінію. Найбільшого поширення в радіоелектроніці отримали оксидування, фосфатування і азотування.

Оксидування - це процес отримання на поверхні деталей тонких оксидних плівок. Йому піддають деталі з чавуну, сталі, кольорових металів і сплавів. Оксидні покриття одержують хімічним і електрохімічним (анодуванням) способами.

Фосфатування - це процес нанесення на поверхню деталей покриттів у вигляді важкорозчинних солей. Отримані плівки служать захисним покриттям від корозії, електроізоляційним шаром і підшаром від корозії, електроізоляційним шаром і підшаром для подальшого лакофарбового покриття. Фосфатування застосовують

для захисту від корозії чорних металів, магнію, цинку (трансформаторні, роторні та стартові пластини); для зменшення тертя при отриманні виробів витяжкою (отримання плівки проводиться після обробки, зняття задирок та відпалу пластин), а також для ізоляції поверхні при лудінні, цинкуванні. Хімічне фосфатування проводиться при зануренні деталей в ванну, що містить фосфорно-кислі солі заліза і марганцю.

Азотування - це процес насичення поверхневого шару сталевих виробів азотом при температурі 500 ... 600 °С. Азотування проводять для додання виробам більшої твердості, зносостійкості, підвищення межі втоми і корозійної стійкості.

Слюда - природний кристалічний електроізоляційний матеріал, який легко розщеплюється на тонкі пластинки по паралельних один до одного площинах. Ці площини називаються площинами спайності. Слюда володіє високими електроізоляційними властивостями, нагрівостійкістю, механічною міцністю, гнучкістю, прозорістю (у тонких шарах багатьох видів слюди), різко вираженою анізотропією (властивості слюди поперек і вздовж площини спайності істотно розрізняються).

Слюда зустрічається в природі у вигляді кристалів, включених в гірські породи, і становить 3,8% маси земної кори. Відомо більше 30 різновидів слюди, однак для діелектричної ізоляції застосовують тільки мусковіт і флогопіт.

Мусковіт - це алюмосилікат калію, який можна наближено виразити формулою $K_2O \cdot 3 Al_2O_3 \cdot 6 SiO_2 \cdot 2H_2O$. Він прозорий, домішки забарвлюють його в світлі тони (зелений, рожевий). Мусковіт має добрі електроізоляційні властивості (краще, ніж у флогопіту), високу механічну міцність, твердість, гнучкість, пружність, стабільність властивостей у часі, температуру початку зневоднення і різкого погіршення властивостей при 500 ... 600 °С. З кращих сортів мусковіту виробляють конденсаторну слюду і телевізійну слюду, яку застосовують у вигляді діелектричної основи для фотокатодів і мішеней в передавальних телевізійних трубках.

Флогопіт - це магнезійний силікат калію, який можна наближено виразити формулою $K_2O \cdot 6MgO \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. Він має темний колір і більш високу нагрівостійкість (до 1000 °С), але за ізоляційними властивостями поступається мусковіту.

Слюда застосовують також у вигляді штампованих фасонних виробів для кріплення і електричної ізоляції внутрішньої арматури в електронних лампах, в якості теплового захисту цоколів потужних електричних ламп розжарювання, в якості наповнювача в нагрівостійких органічних пластмасах.

Крім мінеральної (природної) застосовується синтетична слюда фторфлогопіт $KMg_3 \cdot Si_3AlO_{10} \cdot F_2$, в якому атоми води заміщені фтором. Цю слюду отримують в результаті вирощування кристалів з розплавленої шихти, що містить кварцовий пісок, оксиди алюмінію та магнію, фтористі сполуки калію і магнію. Фторфлогопіт володіє більш високими електричними параметрами, ніж природна слюда, більш нагрівостійкий, хімічно стійкіший звичайного флогопіту, не спучується при нагріванні і витримує зміну температури від -70 до $+1000$ °С.

За порівняно високої вартості синтетична слюда обмежена в застосуванні. Її використовують для виготовлення вікон хвилеводів, лічильників часток високої енергії, конденсаторів з високою робочою температурою. Слюдяні електроізоляційні матеріали виготовляють на основі пластинок природної або синтетичної слюди. До них відносяться міканіти, слюдинати, слюдокераміку, прессміку, мікалексу.

Міканіти - шаруваті матеріали, в яких окремі пластинки слюди склеюють між собою лаком або органічною речовиною. Іноді ці матеріали пресуються. Розрізняють міканіти: колекторний, прокладочний, формувальний, гнучкий, жаротривкий, мікафолій. Гнучкий міканіт повинен формуватися і згинатися на відміну від формувального при нормальній температурі (випускають в рулонах та аркушах), застосовується для міжвиткової і пазової ізоляції електричних машин. Жаротривкий міканіт отримують на основі слюди флогопіт і зв'язувальної речовини (їдкового скла, фосфорнокислого амонію). Застосовується для ізоляції нагрівальних приладів.

Мікафолій відрізняється від гнучкого міканіту тим, що він набуває гнучкість тільки в нагрітому стані. Його отримують наклеюванням одного і більше шарів слюди на папір або склотканину. Застосовують для виготовлення різних ізоляційних шпильок і стрижней.

Слюдімати в порівнянні з міканіти більш монолітні і однорідні по товщині, мають більш високу робочу температуру і електричну міцність. Для виготовлення слюдиніту використовують слюдянитовий папір. Сфери застосування ті ж, що у міканітів.

Слюдокераміку отримують в процесі випалення спресованої дрібнокристалічної слюди (мусковіту і фторфлогопіта) зі сполучним компонентом (85%-й розчин фосфорної кислоти в кількості 5% до 15% маси). Готові вироби сушать і обпалюють. Застосовують як термостійку ізоляцію настановних і вакуумщільних деталей, елементів корпусів напівпровідникових приладів та інтегральних схем, ізоляторів радіоламп.

3.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОВІДНИКИ

Провідниками називаються речовини, всередині яких у разі електростатичної рівноваги електричне поле дорівнює нулю, тобто некомпенсовані заряди провідників локалізуються в нескінченно тонкому поверхневому шарі, а якщо електричне поле відмінне від нуля, то в провіднику виникає електричний струм. Провідникові властивості проявляють як тверді тіла, так і рідини, а при відповідних умовах і газу.

В електротехніці з твердих провідників найбільш широко використовуються метали та їх сплави, різні модифікації провідного вуглецю і композиції на їх основі. Металеві провідникові матеріали підрозділяються на матеріали високої провідності та сплави високого опору. Метали високої провідності використовуються в тих випадках, коли необхідно забезпечити мінімальні втрати переданої по ним електричної енергії, а сплави високого опору, навпаки, в тих випадках, коли необхідна трансформація електричної енергії в теплову.

До рідких провідників відносяться розплави і електроліти. Якщо при проходженні струму через рідкі провідники на електродах не відбувається виділення продуктів електролізу, то вони відносяться до провідників першого роду. Розплави іонних кристалів і електроліти відносяться до провідників другого роду, так як при проходженні через них струму відбувається перенесення речовини, а на електродах виділяються продукти електролізу.

Газу і пароподібні речовини стають провідниками лише в певних діапазонах значень тиску, температури та напруженості електричного поля. Близька до газів за своїм агрегатним станом особливе провідне середовище - плазма.

До особливої групи провідних матеріалів відносяться надпровідники. Сучасна теорія провідників ґрунтується на постулатах квантової механіки. В рамках цієї теорії передбачається, що при відсутності зовнішніх впливів (електричні і магнітні поля, градієнт температури) система рухливих електричних зарядів у провідниках описується рівноважною функцією розподілу. Реакція на будь-який зовнішній вплив, що порушує рівноважний стан рухомих

зарядів, може бути описаний за допомогою нерівноважної функції розподілу, конкретний вид якої залежить від типу впливу і визначається на основі рішення кінетичного рівняння Больцмана.

Кількісний зв'язок між зовнішнім впливом і реакцією на нього рухомих носіїв заряду описується за допомогою кінетичних коефіцієнтів, з яких найбільш важливу практичну роль відіграють коефіцієнт електричної провідності (виражає зв'язок між напруженістю електричного поля в провіднику і щільністю струму) і коефіцієнт теплової провідності (виражає зв'язок між різницею температур на одиницю довжини провідника і тепловим потоком). Математично ці явища описуються законами Ома і Фур'є.

При наявності градієнтів температури і потенціалу в одному або декількох з'єднаних провідниках виникає ряд термоелектричних ефектів. Якщо градієнт температури вздовж провідника не дорівнює нулю, то на його кінцях з'являється різниця потенціалів, звана термоелектричною різницею потенціалів, або термоелектрорушійною силою. При різниці температур в 1 К ця різниця потенціалів називається питомою (диференційною) або термоелектрорушійною силою.

У розімкнутого кола з декількох різнорідних провідників, що знаходяться при однаковій температурі, з'являється контактна різниця потенціалів, рівна алгебраїчної сумі різниць робіт виходу електронів з провідників. При замиканні такого кола струм не виникає, так як контактні різниці потенціалів компенсують один одного. Якщо ж підтримувати контакти при різних температурах, виникає відмінна від нуля або термоелектрорушійною сила, звана (при різниці температур в 1 К) відносною питомою. За іменем фізика, який вивчав це явище, воно отримало назву ефекту Зеебека. Цей ефект, покладений в основу роботи промислових термопар. Ефект Пельт'є полягає у виділенні оборотного тепла на контакті двох різних провідників, коли через контакт проходить струм. Ефект Томсона полягає у виділенні оборотної теплоти, коли в провіднику протікає струм при наявності градієнта температури.

При одночасному впливі на провідник електричного і магнітного полів виникають гальваноманітні ефекти. Найбільш повно до теперішнього часу розвинена теорія металевих провідників. Ще на рубежі XIX - XX ст. теоретично і експериментально було показано, що якщо метал перебуває в твердому або рідкому стані, то частина електронів делокалізується, і позитивно заряджені іони, що виникають у результаті цього, утворюють (якщо метал перебуває у

твердому стані) кристалічну решітку. Взаємодія позитивно зарядженого остова кристалічної решітки з делокалізованими електронами забезпечує стабільність і стійкість структури металів, а наявність електронів, що належать не окремим атомам, а всій їх сукупності, забезпечує високу електричну провідність металів. Однак найбільш точні розрахунки кінетичних коефіцієнтів отримані на основі сучасної теорії металів, в якій сукупність делокалізованих електронів розглядається як «Фермі-рідина», що підкоряється статистиці Фермі. Найбільшу практичну цінність представляють результати теоретичного дослідження електричної провідності металів.

У сучасній теорії електропровідності показано, що в ідеальній кристалічній решітці електричний або тепловий потік, один раз виникнувши, підтримувався б нескінченно довго, тобто делокалізовані електрони створювали б нескінченну провідність, а час релаксації (середній час вільного пробігу електронів) виявився б нескінченним. Той факт, що питома електрична провідність кінечна, обумовлено нерегулярністю решітки. Ці нерегулярності діляться на дві основні категорії. Одні пов'язані з тепловими коливаннями, інші є статистичними. Теплові коливання решітки порушують ідеальну періодичність кристалів. Спотворення решітки розсіюють електрони, обмежуючи довжину вільного пробігу кінцевим значенням. Зі зменшенням температури інтенсивність розсіювання зменшується, і так як обмеження, що накладаються статистикою Фермі, перешкоджають розсіюванню на нульових коливаннях, то в області температур, близьких до абсолютного нуля, провідність обмежується статичними дефектами. Зазвичай існує цілий ряд статичних дефектів. Вакансії, міжвузлові атоми і домішки заміщення складають групу точкових дефектів. Дислокації є лінійними дефектами. Існують і двовимірні нерегулярності, такі як дефекти упаковки і границі двійників і кристалітів.

У підсумку теорія пророкує, а експеримент підтверджує, що в області низьких температур (менших температури Дебая Θ) питома електропровідність γ пропорційна T^5 , а при $T > \Theta$ $\gamma \sim T^1$, де T - температура переходу.

На практиці проведення електротехнічних розрахунків часто використовується не питома провідність, а величина, їй зворотна, ρ (Ом \cdot м). Враховуючи це, $\rho \sim T$ при $T > \Theta$. Для більшості металів температура Дебая лежить в області від 100 до 400 К.

У технічних розрахунках вплив температури на опір характеризують температурним коефіцієнтом питомого опору α . Найбільш широко в електротехніці використовуються мідь і алюміній. Будучи матеріалами високої провідності, ці метали допускають всі види механічної обробки, що дозволяє виготовляти струмопровідні елементи практично будь-якої форми і протяжності. Їх безсумнівним достоїнством є достатньо висока міцність і стійкість по відношенню до навантажень. Переваги цих металів настільки великі, що вибір матеріалів для струмопровідних елементів зазвичай обмежується або ними самими, або їх модифікаціями. Конкретний же вибір між міддю і алюмінієм здійснюється на основі технічної необхідності та економічною ефективністю.

При виборі провідних матеріалів для струмопровідних кіл, що працюють в змінних електромагнітних полях, необхідно враховувати поверхневий ефект. Для виготовлення різних струмопровідних деталей електроустаткування, стрижнів короткозамкнутих роторів асинхронних електродвигунів, притискних контактів електричних апаратів широко використовуються проста латунь або багатокомпонентні сплави на основі міді, в яких основною легуючою добавкою є цинк-мідно-цинкові сплави, які в порівнянні з міддю володіють більш високою механічною міцністю і підвищеним значенням питомого електричного опору. Латунь підрозділяється на оброблювану тиском і литтям.

В електротехніці більш широке застосування знаходить латунь, що обробляється тиском. Для виготовлення тролейних проводів, колекторних пластин, контактних ножів, ковзних контактів, струмоведучих пружин, пружних контактів і т. ін. широко використовується бронза. Вона представляє собою мідний сплав і в порівнянні з міддю відрізняється високою механічною міцністю, твердістю, пружністю і стійкістю до стирання. Поділяється на групи: олов'яна, оброблювана тиском; ливарна; безолов'яна ливарна.

Для виготовлення струмопровідних шин, фольги, роторів асинхронних електродвигунів та інших подібних виробів широко використовуються сплави на основі алюмінію, причому їх електричні, механічні та технологічні властивості легко регулюються легуючими добавками. За способом виготовлення виробів алюмінієві сплави діляться на деформовані і ливарні.

Струмопровідні шини та електротехнічний дріт виготовляються з алюмінієвих сплавів з домішками магнію і кремнію АД0 і АД31. Короткозамкнені ротори асинхронних електродвигунів загального

призначення зазвичай виготовляються з алюмінію марок А5 або А7. Високими ливарними властивостями володіють сплави марок АК-10, АКМ10-2, АКМ12-4 і АКЦ11-12. Обмеженими ливарними властивостями володіють чистий алюміній і сплави марок АК3, АКМ2-1 і АКМ4. Сплави АМ7 і АКМ1-9 мають невисокі ливарні властивості і застосовуються лише в спеціальних випадках.

За умовами роботи контакти поділяються на два типи: комутуючі, ковзні. Комутуючі контакти служать для керованого замикання і розмикання електричного ланцюга. До ковзаючих відносяться контакти, поверхня яких ковзає одна відносно іншої, щітка-колектор, щітка-контактне кільце і щітка-резистивний елемент.

Матеріали для комутуючих і ковзних контактів повинні бути стійкими до корозії, електричної ерозії та зносу, не зварюватися, мати високу механічну міцність і зносостійкість, особливо на стирання, і, природно, володіти високою провідністю і теплопровідністю. Слабкострумові контакти виготовляються переважно зі срібла, платини, паладію, золота, вольфраму і сплавів на їх основі.

Кращими з цих матеріалів є метали і сплави платинової групи. Контакти з платини не покриваються діелектричними плівками, що забезпечує стабільний перехідний опір. Найчастіше платина використовується в якості основи для контактних сплавів. Причому, якщо Ni, Ag, Ir, Os, Ru і W сильно підвищують твердість і питомий електричний опір сплавів, то в меншій мірі це відноситься до радію і паладію. Із сплавів платина-нікель найбільш відомий сплав ПЛН-4, 5. Іридій і радій утворюють з платиною безперервний ряд розчинів. У нашій країні найбільш поширені Pt-Ir контактні сплави плі-10 і плі-25. За своїми властивостями паладій поступається платині, але має меншу вартість і його сплави широко застосовуються.

Золото і срібло відрізняються невисокою міцністю і твердістю. Основною перевагою цих матеріалів є їх висока електрична провідність і теплопровідність, що забезпечує мінімальний розігрів контактної зони. Оксиди срібла електропровідні, проте в атмосфері сірководню і вологи на контактах утворюються непровідні плівки сульфідів срібла. Золото застосовується для виготовлення прецизійних контактів, що працюють при малому зусиллі здавлючому і низькій напрузі. Поширені контактні сплави золота з сріблом, нікелем і платиною. Достоїнствами вольфрамових і молібденових контактів є стійкість до появи дугових розрядів, електричної ерозії і зварювання. Для роботи у вакуумі та середовищі інертних газів застосовуються контакти зі сплавом W-Mo.

Сильнострумові комутуючі контакти виготовляються найчастіше з металокерамічних композицій, одержуваних методом порошкової металургії. Композиційний матеріал являє собою суміш інгредієнтів, один з яких має значно більшу тугоплавкістю, ніж інші. Тому при переході одного з інгредієнтів в рідкий стан він утримується силами поверхневого натягу в порах тугоплавкої матриці. В умовах високих струмових і механічних навантажень, коли матеріал контактів з чистих металів розплавляється, композиційні матеріали незамінні. Контакти з композицій на основі срібла Ag-CdO найбільш широко використовуються в низьковольтних апаратах. Вони надійні в роботі при підвищених струмових навантаженнях, мають підвищену зносостійкість.

Композиція Ag-Ni також використовуються при виготовленні контактів для низьковольтних апаратів. Контакти з композицій срібло-графіт стійки до зварювання та механічного зносу. Композиції срібло-нікель-графіт застосовуються в контактах низьковольтних апаратів зі значними струмовими навантаженнями і перевантаженнями. Надійність контактів підвищується, якщо матрицю композиції виконувати з дрібнодисперсною структурою. Для контактів, що відключають струми 30 - 100 кА, використовуються композиції мідь-графіт, мідь-вольфрам. Чиста мідь через схильність до атмосферної корозії з утворенням оксидних і сульфідних плівок непридатна для слабкострумових контактів, однак застосовується в сильнострумових апаратах.

У електродвигунах і генераторах колектор і струмоприймальні кільця виготовляють з міді і її сплавів - хромонікелева нержавіюча сталь (X18H9T) або сірий чавун (СЧ18-36).

Типовим сплавом для виготовлення еталонних резисторів є манганін, що складається з Cu (85%), Mn (12%) і Ni (3%). Цей сплав випускається двох марок: МНМц3-12 і МНМцАЖ33-12-0 ,3-0, 3. Свою назву манганін отримав від латинського слова *manganum* (марганець). Внаслідок присутності в сплаві марганцю залежність електричного опору манганіну від температури має максимум поблизу кімнатних температур та його питомий опір в діапазоні температур від -100 до 100 °С змінюється дуже мало.

При виготовленні реостатів і електронагрівальних елементів, що працюють при температурах, що не перевищують 450 °С, використовується сплав, який містить близько 60% міді і 40% нікелю. У робочому діапазоні температур він відрізняється надзвичайно високою стабільністю питомого опору, з чим і пов'язана його назва -

константан. Характерною особливістю цього сплаву є висока термоелектрорушійна сила в контакті з міддю.

Для виготовлення контактних пружин знаходить застосування нейзильбер. Це мідно-нікелевий сплав, що відрізняється великим вмістом свинцю, що додає нейзильберу (після холодної деформації) досить високу пружність.

3.2 ПРОВІДНИКИ З ВЕЛИКИМ ОПОРОМ

Для резисторів з великою потужністю розсіювання, що застосовуються в електронагрівальних елементах, використовуються сплави високого опору з робочими температурами, що перевищують 1000 °С. З призначення сплавів випливає, що їх інгредієнти підібрані таким чином, щоб забезпечити високе значення об'ємного коефіцієнта оксидзації, що означає, що при нагріванні на повітрі поверхня сплавів покривається суцільною оксидною плівкою. Такими інгредієнтами є хром, нікель і алюміній, однак з метою зниження вартості сплавів в їх склад часто вводять залізо. З малим вмістом заліза сплави Fe-Ni-Cr називають ніхромом, а з підвищеним - ферроніхромом. Сплави Fe-Cr-Al називають відповідно фехраль і хромаль.

Карбіди і силіциди широко використовуються для виготовлення електронагрівальних елементів високотемпературних нагрівачів. З цих матеріалів найбільше поширення одержали сіліт і глобар. Ці матеріали виготовляються на основі карбіду кремнію, і їх максимальна робоча температура 1450 °С. При експлуатації сілітових і глобарових електронагрівальних елементів необхідно враховувати критичність терміну служби по відношенню до температури перегріву: навіть при невеликому перевищенні температури над максимально допустимою термін служби елементів різко зменшується. При досягненні температури 900 °С опір нагрівальних елементів зменшується приблизно в 5 разів. Однак при температурі 1400 °С їх опір уже на 20% перевищує максимальний.

Більш високі робочі температури мають нагрівальні елементи на основі дисилициду молібдену, стрижні з якого допускають нагрів до 1700°С.

3.3 НАДПРОВІДНИКИ

Деякі метали володіють чудовими властивостями: при охолодженні їх електроопір знижується звичайним чином, але при досягненні певної температури цей опір зникає повністю. Тоді кажуть, що відбувся перехід в надпровідний стан. Температура, при якій надпровідник втрачає опір, називається його критичною температурою. Застосування надпровідників відкриває шляхи поліпшення технічних і економічних параметрів сучасних приладів і пристроїв або дає принципово нові рішення проблем, які не можуть бути реалізовані за допомогою звичайної техніки.

Одна з перших і найбільш освоєних областей застосування надпровідників - створення високих магнітних полів, аж до 20 кА / м. Такі поля використовуються у фізиці плазми і високих енергій, ядерній фізиці (прискорювачі), в накопичувачах енергії, при створенні швидкісного транспорту на магнітній подушці. Використання надпровідників в енергетиці і електротехніці дозволить різко скоротити втрати електроенергії. Явище надпровідності було відкрито Камерлінг Опессом. Перший надпровідник - ртуть втрачав свій опір при охолодженні його до 4 К (-269 °С). Надпровідними властивостями можуть володіти метали, сплави і металеві з'єднання, а також неметалеві хімічні речовини в металевому стані, органічні сполуки та іонні кристали.

Чисті елементи, що володіють надпровідністю, можна класифікувати за такими групами;

1) неперехідні метали Si, Ge, As, Sb, Bi, Se, Te, які володіють надпровідністю при високому тиску;

2) перехідні метали груп 3d, 4d і 5d, у яких із збільшенням порядкового номера відбувається заповнення внутрішніх рівнів;

3) тонкоплівкові структури на основі Li, Cs, Gr, Pr, Nd, Eu. Критична температура чистих елементів не перевищує 10 К.

При сплаві чистих елементів можливе утворення твердих розчинів і упорядкованих сплавів типу інтерметалевих з'єднань. Найбільш висока температура надпровідного переходу для цієї групи матеріалів була виявлена в інтерметалевих з'єднань Nb₃Ge (23,3 К).

Надпровідний стан може руйнуватися не тільки при підвищенні температури матеріалу до T_c , але і за певних (критичних) значеннях щільності електричного струму I_c і напруженості магнітного поля. Випускається промисловістю ніобій у вигляді дроту, прутків і смуг з домішкою Ta (0,2%), C (0,01%), N₂ (0,01%), W і Mo (0,02%) і володіє

критичною густиною струму $J_c - 8 \cdot 10^8$ А/м² при впливі магнітного поля індукцією 0,5 Тл.

Молібден-ренієві сплави, виготовлені у вигляді тонкого дроту діаметром 0,01 мм дозволили отримати щільність струму $J_c = 10^8$ А/м² в магнітному полі індукції 1,5 Тл. Ніобій-титанові сплави в порівнянні з Мо-Re володіють більш високими значеннями густини струму в аналогічних умовах. Сплави Nb₃Sn у вигляді надпровідників застосовуються шляхом осадження олова шаром товщиною 20 – 50 мкм на провід з ніобію або стрічки з нержавіючої сталі товщиною 20 - 50 мкм і шунтуючого шару 25 - 50 мкм з міді. У 1986 р. Беднорцем і Мюллером була відкрита високотемпературна надпровідність в системі Ва - La - Cu при температурі 30 - 35 К.

В системі YBa₂Cu₃O_{7-d} була досягнута критична температура переходу в надпровідний стан $T_c = 92$ К. Таким чином був подоланий азотний бар'єр, що дозволило використовувати для охолодження керамічного зразка рідкий азот ($T_{кип} = 77$ К) замість дорогого гелію.

В одному випадку при досягненні критичного значення напруженості зовнішнього магнітного поля H_c надпровідний стан руйнується. В іншому випадку при досягненні напруженості магнітного поля H_{C1} магнітний потік проникає в надпровідник, але нормальний стан його повністю не відновлюється до тих пір, поки напруженість не досягне H_{C2} .

Область між H_{C1} і H_{C2} називається змішаним станом. Надпровідники, на кривих намагнічення яких є область змішаного стану, називають надпровідниками II роду (рис. 3.1).

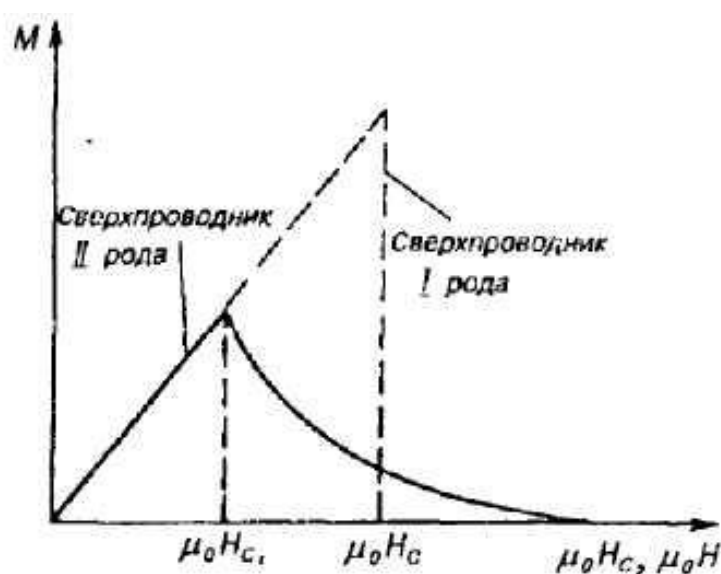


Рисунок 3.1 – Залежність намагнічування зразка від напруженості зовнішнього магнітного поля

Для надпровідників II роду, які неоднорідні вже тому, що містять включення іншої фази, криві намагнічування насичення необоротні. Багато з нових високотемпературних надпровідників відносяться до класу керамічних матеріалів, названих перовскитами. Їх структура легко піддається змінам, що дозволяє отримати матеріали, які володіють широкою різноманітністю електричних властивостей.

Ідеальна структура перовскитів, які описуються загальною формулою ABX - кубічна. Кожен куб складається з трьох різних хімічних елементів (A, B і X) у відношенні 1:1:3. A і B - це металеві катіони (іони з позитивним зарядом), X - неметалеві аніони (іони з негативним зарядом). Можна припустити, що такий перовскит (різновид титану кальцію $CaTiO_3$, що утворюється при високих температурах) має ідеальну структуру. Такий кристал часто має форму куба або октаедра, що відображає симетрію атомної структури.

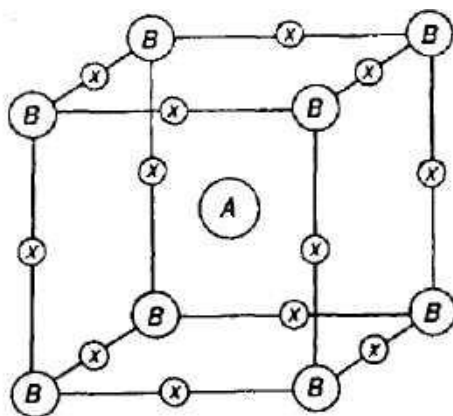


Рисунок 3.2 – Кристалічна структура перовскиту

Безліч хімічних елементів може з'єднуватися і утворювати сотні ідеальних і модифікованих перовскитів, добре відомих в даний час. Барій, калій і рідкоземельні елементи - найбільш типові з 24 елементів, які можуть займати положення A. Серед десятків з'єднань, з ідеальною структурою перовскиту, існують такі, як фторид срібла і цинку $AgZnF_3$, бромід цезію та кадмію $CsCdBr_3$, фторид літію і барію $LiBaF_3$. На сьогоднішній день відомо безліч перовскитів з розгорнутими октаедрами.

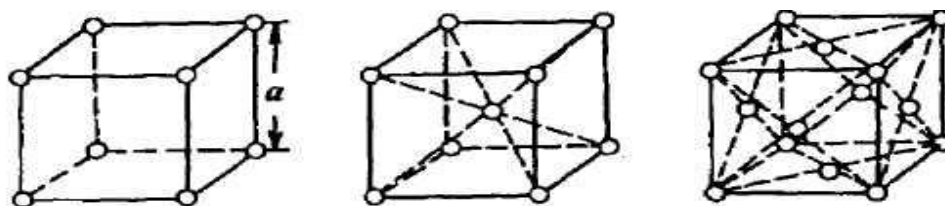
4.1. БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Інтенсивно розширюється коло напівпровідникових матеріалів, що розрізняються не тільки природою хімічних зв'язків, хімічним і фазовим станом, але і структурним станом. Якщо раніше це були монокристалічні напівпровідникові матеріали, то пізніше поряд з монокристалами різного ступеня досконалості стали застосовуватися полікристалічні матеріали, а потім і аморфні. Викликаний спочатку чисто економічними міркуваннями (низькою вартістю) інтерес до аморфних напівпровідників все посилюється завдяки ряду їх інших достоїнств.

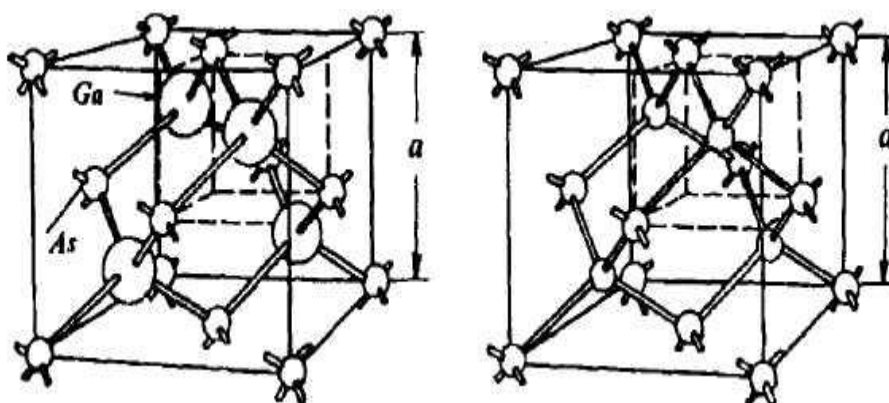
Більшість найважливіших напівпровідників мають кристалічну структуру типу алмаза чи цинкової обманки, які відносяться до тетраедричних фаз, де кожен атом оточений чотирма найближчими сусідами, розташованими у вершинах відповідного тетраедра. Зв'язок між двома найближчими сусідами обумовлений парою електронів з протилежними спинами. Гратки алмазу і цинкової обманки можна представити як дві гранецентровані кубічні решітки, зсунуті одна відносно іншої на чверть об'ємної діагоналі елементарної комірки. У алмазоподібних напівпровідниках (таких, як кремній) у вузлах тієї та іншої підгратки знаходяться ядра кремнію. У гратках типу цинкової обманки (наприклад, в арсеніді галію) одну підгратку складають ядра галію, а іншу - миш'яку. Арсенід галію є з'єднанням типу $A^{III}B^V$, оскільки утворений елементами III і V груп періодичної системи Менделєєва. Багато напівпровідників, кристалізуються в решітці типу вюрциту або кам'яної солі. Решітку вюрцит можна представити як дві вставлені одна в іншу щільно упаковані гексагональні підгратки (наприклад, кадмію і сірки в разі CdS). Як і в гратках типу цинкової обманки, в структурі вюрциту окремий атом також знаходиться в тетраедричному оточенні чотирьох найближчих сусідів. Гратки кам'яної солі можна розглядати як дві гранецентровані кубічні решітки, вставлені одна в іншу. У цій структурі кожен атом оточений шістьма найближчими сусідами.

Зонна структура напівпровідників, тобто зв'язок енергії з хвильовим числом, звичайно визначається з рівняння Шредінгера в одноелектронному наближенні. Однією з найбільш важливих теорем, на якій заснована зонна теорія, є теорема Блоха. З теореми Блоха випливає, що енергія W є періодичною в просторі оберненої ґратки.

Таким чином, для однозначного визначення енергії достатньо використовувати значення хвильового вектора в елементарній комірці простору оберненої ґратки. Такий осередок називається зоною Бріллюена.



Проста кубічна (P і т. ін.)	об'ємноцентрована кубічна (Na, W і т. ін.)	гранецентрована Кубічна (Al, Au і т. ін.)
--------------------------------	---	--



Осередок цинкової обманки (GaAs, GaP і т. ін.) Осередок алмазу (C, Ge, Si і т. ін.)

Рисунок 4.1 – Основні елементарні комірки прямих ґраток і кристалічна структура ряду елементарних напівпровідників і напівпровідникових сполук (a - постійна ґратки)

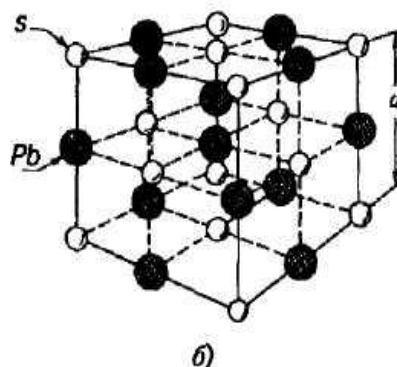
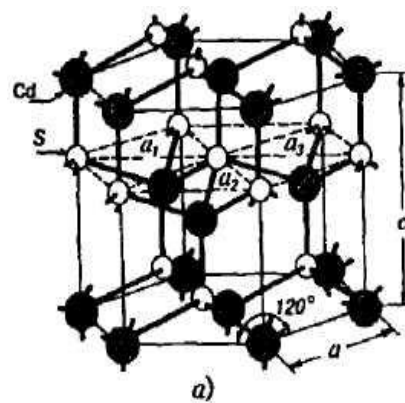


Рисунок 4.2 – Елементарні комірки ґраток напівпровідникових сполук (а, с - постійні ґратки): а - осередок ґраток вюрциту CdS, ZnS і т.д.); б - осередок ґраток кам'яної солі (PbS, PbTe і т.д.)

Форма і розміри зон Бріллюена визначаються симетрією кристала і його міжатомними відстанями (рис. 4.3).

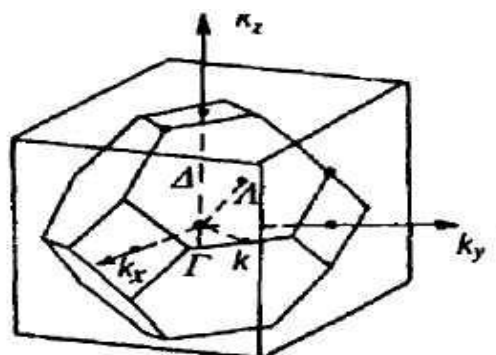


Рисунок 4.3 – Зони Бріллюена для ґратки алмазу

У спектрах кожного з напівпровідників є зона заборонених енергій, в якій не існує електронних станів. Ці стани утворюють дозволені зони з енергіями вище і нижче цієї енергетичної щілини. Верхню дозовану енергетичну називають зоною провідності, а

нижню - валентною. Відстань між дном області провідності і межею валентної називають шириною забороненої зони.

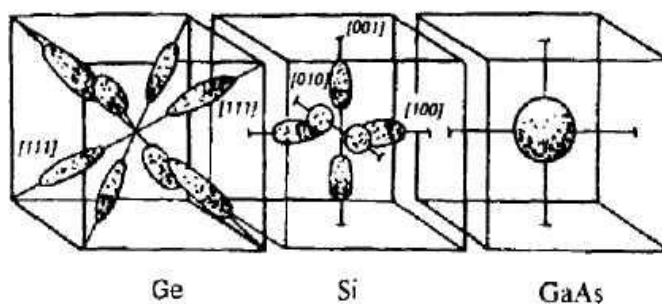


Рисунок 4.4 – Форма і розташування ізоенергетичних поверхонь в Ge, Si і GaAs

До елементарних напівпровідників відносяться речовини, розташовані в IV - VII підгрупах таблиці Менделєєва - вуглець (алмаз), кремній, германій, олово. Валентні оболонки вільних атомів цих елементів складаються з $(ns)^2 (np)^2$ електронів. Зв'язки sp^3 - гібридні тетраедричні з кутом $109^{\circ}28'$.

Кремній є другим за поширеністю елементом земної кори - його вміст в ній по масі становить 27,6%. Через свою хімічну активність у вільному стані не зустрічається. Вміст германію в земній корі становить $7 \cdot 10^{-4}\%$. При цьому він є розсіяним у природі елементом і у вигляді рудних родовищ майже не зустрічається. В даний час одним з основних джерел отримання германію є кам'яне вугілля, з якого германій витягують як відхід при згорянні.

Олово володіє поліморфним перетворенням. Низькотемпературна напівпровідникова модифікація (a-Sn) зі структурою алмазу при нагріванні переходить у високотемпературну металеву модифікацію (b-Sn) зі структурою тетрагональної ґратки.

Кремній і германій є найпоширенішими матеріалами напівпровідникової електроніки і мікроелектроніки. З цих речовин, особливо кремнію, виготовляють різні електронні напівпровідникові прилади: діоди, транзистори, тиристори, фотоприймачі, сонячні батареї, а також інтегральні схеми - основу мікроелектронних і мікропроцесорних пристроїв. Однак відсутність прямих оптичних переходів у кремнії і германії виключає можливість виготовлення на їх основі світлодіодів та оптичних квантових генераторів.

Елементи V підгрупи - фосфор, миш'як, сурма і вісмут. У цих елементів реалізуються хімічні зв'язки за рахунок утворення p^3 -орбіт,

які призводять до структур з координаційним числом $Z_k = 3$, що належать до ромбоедричної сингонії. Елементи V підгрупи знаходять широке застосування в напівпровідниковій електроніці, з одного боку, в якості донорних домішок в кремнії і германії, а з іншого - як основні компоненти напівпровідникових сполук $A^{III}B^V$ і ряду інших.

Елементи VI підгрупи - сірка, селен, телур. Хімічні зв'язки цих елементів реалізуються за рахунок утворення p^2 -орбіт, $Z_k = 2$. Кристали цих елементів складаються зі спіральних ланцюжків або кілець, в яких кожен атом має ковалентні зв'язки з атомами того ж ланцюжка. Між собою ланцюжки пов'язані силами Ван-дер-Ваальса. Зв'язку в цих кристалах набагато слабкіші, ніж в кристалах елементів IV і V підгруп. Елементи VI підгрупи входять в якості основних компонентів в численні напівпровідникові сполуки $A^{II}B^{VI}$, АВ і ін. Крім того, вони використовуються в якості донорних домішок у з'єднаннях $A^{III}B^V$.

Елементом VII підгрупи, що належать до напівпровідників, є йод. У твердому стані він має напівпровідникові властивості, в ньому реалізуються p -зв'язки. Йод знаходить застосування в якості легуючої донорної домішки в напівпровідникових сполуках, а також входить в якості компонента до складу з'єднань A^IVB^{VII} .

Найбільшого поширення набула класифікація напівпровідникових сполук, заснована на об'єднанні в один клас матеріалів, що мають однакову стехіометричну формулу і утворених із елементів, розташованих в одних групах періодичної системи елементів. Хімічні зв'язки в напівпровідникових сполуках змішані, з переважанням ковалентного складової.

Хімічні зв'язки і структури кристалічної та зворотної ґраток визначають будову валентної зони і зони провідності сполук типу $A^{III}B^V$.

Напівпровідникові сполуки використовують для створення приладів і пристроїв різного призначення. Широкий спектр застосування напівпровідникових сполук обумовлений вдалим поєднанням комплексу фізико-хімічних та електрофізичних властивостей даних матеріалів.

Концентрація носіїв заряду у напівпровідниках зазвичай на 5 - 7 порядків менше, ніж у металах, і приблизно на стільки ж більше, ніж в діелектриках. Отже, саме її значення визначає приналежність матеріалу до класу напівпровідників. Власне концентрація n_i є фундаментальним параметром і розраховується виходячи з

ефективних мас електронів і дірок, ширини забороненої зони та температури.

Власна концентрація тим нижче, чим більше ширина забороненої зони. Вимірювання концентрації носіїв заряду найчастіше виконується за схемою Холла. Сутність методу Холла полягає в тому, що якщо помістити однорідний прямокутний зразок напівпровідника в магнітне поле, то на його бічних гранях А і В виникає поперечна різниця потенціалів, яка називається ЕРС Холла (рис. 4.5) і обчислюється за формулами (4.1-4.3), з яких визначається коефіцієнт Холла, де $U_a - U_b$ - ЕРС Холла, В; I - струм через зразок, А; B - магнітна індукція, Тл; d - товщина пластинки в напрямку магнітного поля, мм.

$$U_a - U_b = R \cdot I \cdot B / d \quad (4.1)$$

$$U_a - U_b = \rho \cdot \mu \cdot I \cdot B / d \quad (4.2)$$

$$R = \frac{(U_a - U_b) \cdot d}{I \cdot B} \quad (4.3)$$

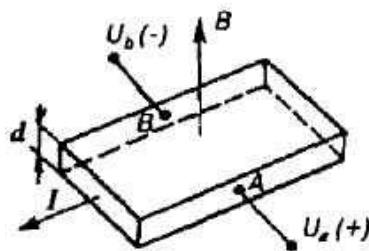


Рисунок 4.5 – Поперечне поле, обумовлене ефектом Холла

Метод Холла дозволяє визначити тип провідності напівпровідника, концентрацію і рухливість носіїв заряду.

Провідність напівпровідників, як і інших матеріалів, залежить від концентрації вільних носіїв заряду (електронів і дірок) при даній температурі і їх рухливості. В даний час є багато методів вимірювання питомого опору напівпровідника: двохзондовий, тризондових, чотиризондовий, безконтактний та ін. Найбільшого поширення набули двохзондовий і чотиризондовий методи.

При розрахунку і конструюванні напівпровідникових приладів та інтегральних схем використовується параметр - час життя неосновних носіїв заряду, який пов'язаний з дифузійною довжиною

зразка. Найбільш поширений метод вимірювання часу життя пов'язаний зі зміною фотопровідності кристала під час припинення дії світла на напівпровідник.

Аморфні напівпровідники - це речовини, що володіють у твердому аморфному стані властивостями напівпровідників. Під аморфним тілом прийнято розуміти таку речовину, в якому відсутня тривимірна періодичність в розташуванні атомів. Завдяки такому визначенню терміни «неупорядкований», «некристалічний», «аморфний», «склообразний» є синонімами.

Матеріал вважається аморфним, якщо на його електронограмах і рентгенограмах спостерігаються дифузні кільця, а не різкі береговські кільця або окремі плями, характерні для полікристалічних чи монокристалічних твердих тіл. Некристалічні матеріали, одержувані охолодженням розплаву, називаються склами. Більшість з них є широкозонними напівпровідниками, в яких ширина забороненої зони перевершує 1 еВ. Прикладами можуть служити селен Se, тріселенід миш'яку As_2Se_3 і подібні з ними халькогенідні напівпровідники і багатокомпонентні системи.

Такі речовини, як телур Ti , германій Ge , кремній Si , бор B і антимонід індію $InSb$, які не можна отримати звичайним загартуванням розплаву, можуть бути отримані в аморфному стані шляхом напилення. Ширина забороненої зони в них зазвичай менше, ніж у стабільних склах. З існуючих в даний час класифікацій некристалічних напівпровідників найбільш поширеною є систематизація, заснована на зіставленні структурних особливостей матеріалів в межах ближнього порядку.

Ковалентні аморфні напівпровідники надалі поділяються ще на два класи. До першого класу відносяться матеріали з тетраедричною спрямованістю зв'язків, такі як елементи Si , Ge і з'єднання $A^{III}B^V$. Ці матеріали можуть бути приготовлені в аморфній фазі лише вакуумним напиленням тонких плівок. Другий клас складається з халькогенідного скла на основі елементів S , Se і Ti , до яких можуть додаватися інші елементи, такі як Si , Ge і As .

Практичне використання некристалічних напівпровідників визначається особливостями їх структури, хімічною стійкістю і механічною міцністю, а також технологічністю їх обробки і можливістю отримання матеріалів із заданими властивостями. Деякі пристрої реєстрації оптичних зображень вдалося створити тільки завдяки використанню некристалічних напівпровідників. До таких пристроїв відносяться, наприклад, телевізійні трубки типу «видикон»,

електрофотографічні прилади та реєструючі середовища типу «халькогенідних склоподібних напівпровідників (ХСП) - термопластиків».

Напівпровідникові матеріали, використовувані для зазначених цілей, повинні володіти одночасно високим питомим темновим опором ($R_m > 10^{11}$ Ом · см) і високою фоточутливістю (змінювати свій питомий опір при освітленні на кілька порядків). Зазначені вимоги суперечливі і можуть бути задоволені одночасно лише при низьких значеннях рухливості носіїв заряду, що характерно для аморфних напівпровідників.

При створенні елементів оптичної та електричної пам'яті і приладів на основі аморфних напівпровідників використовуються також такі їх властивості, як фотостимульована зміна оптичного поглинання і коефіцієнта заломлення, фотокристалізація і висока радіаційна стійкість (наприклад, термістори на основі ХСП в керуючих схемах ядерних реакторів не зазнають помітних змін провідності навіть при дозах опромінення 10^{20} нейтрон / см²).

З використанням шарів гідрогенізованого аморфного кремнію, отриманих розкладанням силанів в тліючому розряді, шляхом послідовних добавок таких газів, як фосфін PH_3 і диборан B_2H_6 , можна отримати р-п-перехід. Перевага шарів на основі аморфного кремнію полягає в можливості здійснення безперервного технологічного виробництва, наприклад, сонячних елементів великої площі, істотно більш дешевих, ніж монокристалічні фотоперетворювачі.

Синтез склоподібних напівпровідників проводиться у вакуумованих (10^{-3} - 10^{-4} мм рт. ст.) кварцових ампулах з елементарних матеріалів. Аморфний кремній і германій отримують шляхом їх випаровування та конденсації в глибокому вакуумі або катодного розпилення в аргонівій плазмі. Аморфні шари в системах Si - Z, Si - Ge та Ge - Sn можна отримати тими ж методами, що і для Si і Ge.

Різниця між енергіями країв рухливості в зоні провідності і валентній зоні називають «забороненою зоною по рухливості» («щільною по рухливості»). Край зони рухливості визначається як енергія, що відокремлює стан, який є локалізованим від станів, які є нелокалізованими. У склоподібних напівпровідниках домішки не роблять такого впливу на провідність, як це має місце в кристалах. Проте експериментально показано, що деякі домішки здатні сильно змінювати електричні властивості склоподібних напівпровідників.

Температурна залежність фотопровідності більшості аморфних напівпровідників змінюється так: в області високих температур фотопровідність експоненціально зростає з $1 / T$, виявляючи певну енергію активації. Крім того, є лінійна залежність від інтенсивності збуджуючого світла. При більш низьких температурах фотопровідність зменшується з $1 / T$ і пропорційна квадратному кореню з інтенсивності світла. При ще більш низьких температурах криві фотопровідності досягають насичення. Максимум температурної залежності зазвичай має місце поблизу температури, при якій струм перевищує фотострум.

5.1. БУДОВА І ВЛАСТИВОСТІ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Магнітні матеріали мають в техніці широке застосування. В основному вони і відіграють роль концентраторів, провідників і джерел магнітних потоків. Магнітні матеріали є основою для виробництва сучасних генераторів і двигунів, трансформаторів, різних типів апаратів та приладів автоматики, обчислювальної та виміральної техніки, електромагнітів і дроселів, постійних магнітів і т.ін.

У загальному випадку всі магнітні матеріали прийнято ділити на дві великі групи: магнітом'які, використовувані в основному як провідники магнітного потоку; магнітотверді, використовувані як джерела магнітного поля. Необхідні характеристики магнітних матеріалів визначаються в процесі перемагнічування, описуваного при циклічній зміні магнітного поля в координатах магнітної індукції (намагніченості і напруженості поля петлею гистерезису (рис. 5.1).

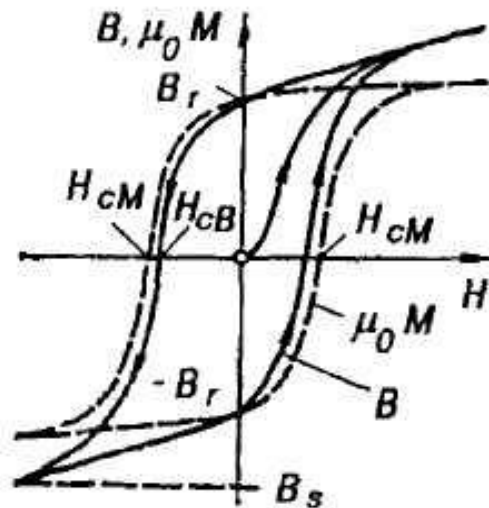


Рисунок 5.1 – Залежність магнітної індукції і намагніченості ферромагнітного матеріалу від напруженості поля

По петлі магнітного гистерезису визначаються основні параметри магнітних матеріалів: індукція насичення B_s , максимальна напруженість поля H_{max} , залишкова індукція B_r , коерцитивна сила H_c .

Площа, укладена всередині петлі магнітного гістерезису, є мірою енергії, перетвореної в теплоту при перемагнічуванні.

Крива $B(H)$ може бути перетворена в криву $M(H)$. Тому, слід розрізнити поняття коерцитивної сили по індукції H_{CB} і коерцитивної сили по намагніченості H_{CM} . Залежність $B(H)$ при монотонній зміні напруженості поля від нуля до максимального значення називається первісною кривою намагнічування. Для розрахунків користуються основною кривою намагнічування, одержуваною з'єднанням вершин симетричних петель гістерезису при різних максимальних значеннях напруженості поля.

Зв'язок напруженості магнітного поля H і намагніченості магнітного матеріалу M виражається через коефіцієнт пропорційності, званий магнітною сприйнятливістю, який дорівнює M/H .

Відношення магнітної індукції B до напруженості поля H в матеріалі визначається абсолютною магнітною проникністю $\mu_a = B/H$.

У загальному випадку, якщо магнітна індукція і напруженість поля є векторами, то проникність - тензор. Чисельно проникність характеризується відносною проникністю $\mu_r = \mu_a/\mu_0$.

Відношення зміни ΔB до відповідної зміни ΔH на кривій намагнічування дає відносну диференціальну магнітну проникність, яка обчислюється за формулою (5.1).

$$\mu_{rd} = \frac{dB}{\mu_0 dH} \quad (5.1)$$

Отримана таким чином величина в полях з напруженістю, близькою до нуля, носить назву відносної початкової проникності μ_{rn} , а максимальне її значення на всій кривій намагнічування - відносної максимальної проникності μ_{rmax} .

Для характеристики магнітотвердих матеріалів користуються поняттям розмагнічуючої частини петлі гістерезису, що знаходиться у другому квадранті координатної площини $B(H)$. За наявності у постійного магніту повітряного зазору залишкова індукція його B_d менше залишкової індукції матеріалу B_s , виміряній в замкнутому магнітному колі. Тому якість постійних магнітів характеризується, як правило, максимальним значенням добутку $(BH)_{max}$, яке визначає максимальну магнітну енергію W_{max} . Найбільша енергія, що віддається магнітом, виходить тоді, коли для даної форми магніту підібраний матеріал, що має максимальне значення добутку BH . У

цьому випадку залишкова індукція магніту B_d в сильному ступені залежить від форми розмагнічуючої частини кривої $B(H)$ і розмагнічуючого фактора N , що визначається геометричними співвідношеннями магніту і повітряного зазору. Для оцінки стабільності постійних магнітів користуються поняттям відносної проникності повернення $\mu_{rнов}$, яка є мірою чутливості магнітотвердого матеріалу до впливу зовнішніх магнітних полів (рис. 5.2) і визначається з виразу (5.2).

$$\mu_{rнов} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \cdot \Delta H} \quad (5.2)$$

Всі перераховані параметри можуть бути визначені з статичної петлі гістерезисе, отриманої при відносно повільній зміні зовнішнього магнітного поля.

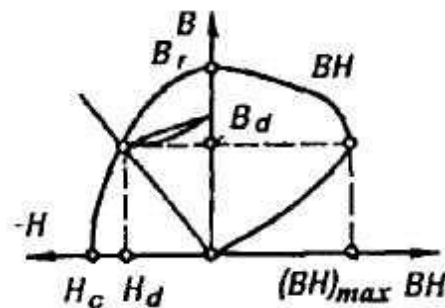


Рисунок 5.2 – Крива розмагнічування і залежність енергії магнітного матеріалу від напруженості поля

Якщо ж час встановлення напруженості поля порівняно з часом перемагнічування матеріалу, то магнітні параметри визначаються динамічними характеристиками (петлями гістерезису), на характер яких впливають такі фактори, як вихрові струми, магнітна в'язкість. Основними характеристиками є: динамічна крива намагнічування - залежність максимального значення індукції від максимального значення напруженості поля для сімейства симетричних динамічних петель гістерезису; динамічна магнітна проникність μ_{ra} (часто звана амплітудною) - відношення індукції до напруженості поля на динамічній кривій намагнічування. Найчастіше амплітудна проникність визначається співвідношенням (5.3), B_{max} і H_{max} - відповідно максимальні значення магнітної індукції і напруженості поля:

$$\mu_{ra} = B_{max} / \mu_0 \cdot H_{max} \quad (5.3)$$

Для багатьох матеріалів в якості довідкових характеристик приводять питомі втрати потужності на частотах 50, 400 Гц при різних значеннях індукції; значення тангенса кута втрат. При цьому обов'язковим є вказівка товщини стрічки або пластини з даного магнітного матеріалу.

Особливої уваги заслуговує чутливість магнітних матеріалів до зміни температури. Тут слід розрізняти оборотні зміни властивостей матеріалів в діапазоні незначних змін температури і незворотні зміни в широкому діапазоні температури, звані старінням. Для обліку стабільності в першому випадку користуються значеннями температурних коефіцієнтів a_μ , що наводяться в довідкових даних на матеріал і визначаються з виразу (5.4):

$$a_\mu = \frac{\Delta B}{B \cdot \Delta T}, \quad (5.4)$$

де ΔB - зміна індукції, що викликана зміною температури на ΔT ; B - магнітна індукція при початковій температурі.

Температурну стабільність магнітних властивостей магнітних матеріалів часто характеризують температурними коефіцієнтами проникності, обумовленими зі співвідношення (5.5):

$$a_\mu = \frac{\mu_{r2} - \mu_{r1}}{\mu_{r1}(T_2 - T_1)}, \quad (5.5)$$

де T_2 і T_1 - значення температури, при якій виміряні μ_{r2} и μ_{r1} .

Необоротні процеси характеризуються температурою Кюрі і полягають в зникненні мимовільної намагніченості, зменшенні магнітної проникності.

Розподіл магнітних матеріалів на магнітом'які і магнітотверді не дає повного уявлення про їх магнітні властивості, чутливість до різних впливів, можливість використання для конкретних цілей. Зазвичай з поняттям чутливості властивостей магнітних матеріалів до різного роду впливів пов'язують уявлення про чинники, які справляють на них негативний вплив. Найбільш істотним в цьому плані є хімічний склад матеріалу (процентний вміст легуючих компонентів або наявність домішок). Так, наприклад, в залізо-нікелевих сплавах різна частка присадки нікелю веде до зміни намагніченості насичення, рівній 75% насичення чистого заліза (рис. 5.3). Змінюються також температура Кюрі Θ , константи

магнітострикції і анізотропії, магнітна проникність, залишкова індукція, коерцитивної сила, втрати на гістерезис. Це відкриває великі можливості для отримання матеріалів з необхідними властивостями.

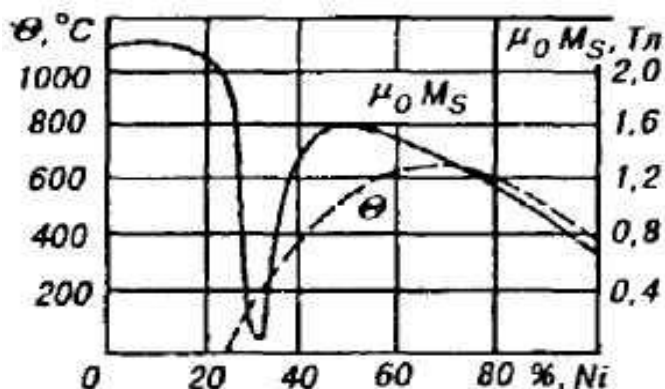


Рисунок 5.3 – Залежність намагніченості насичення і точки Кюрі від вмісту присадок нікелю в залізо-нікелевих сплавах

Для отримання магнітних матеріалів з великими питомими електричним опором і магнітною проникністю використовують добавку до заліза кремнію, що виводить вуглець. Це призводить до зниження втрат на вихрові струми при роботі матеріалу у змінних полях (рис. 5.4). Цю групу матеріалів складають в основному марки електротехнічної сталі, в тому числі і нелегованої.

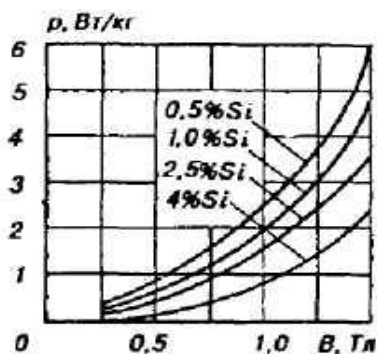


Рисунок 5.4 – Залежність питомих втрат від індукції при різному вмісті кремнію

Марки нелегованої електротехнічної сталі розшифровуються за наступним принципом: перша цифра позначає вид обробки (1 - горячекатана; 2 - холоднокатана); друга цифра - тип за вмістом кремнію (0 - сталь нелегована без нормування коефіцієнта старіння; 1

- сталь нелегована із заданим коефіцієнтом старіння); третя цифра - нормований параметр (8 - коерцитивна сила); четверта та п'ята цифри - значення нормованого параметра в цілих одиницях $< H_c, A / m$).

Найвигіднішим сплавом для забезпечення високого значення магнітної проникності є сплав заліза з нікелем (пермалой). Високі магнітні властивості пермалоя пояснюються малими значеннями констант анізотропії і магнітострикції. При цьому значення константи анізотропії може міняти знак в залежності від вмісту нікелю. Подальше поліпшення властивостей цих сплавів досягається спеціальними видами термічної обробки (рис. 5.5). Велика початкова і максимальна проникність, висока індукція насичення і мала коерцитивна сила забезпечуються використанням сплавів з 45 і 50% вмістом нікелю (45Н і 50Н). Велика прямокутність гистерезисного циклу досягається використанням сплавів з кристалічною і магнітною текстурами, а підвищення чутливості до слабких магнітних полів - легуванням пермалоевих сплавів молібденом, хромом і кремнієм, хромом і міддю.

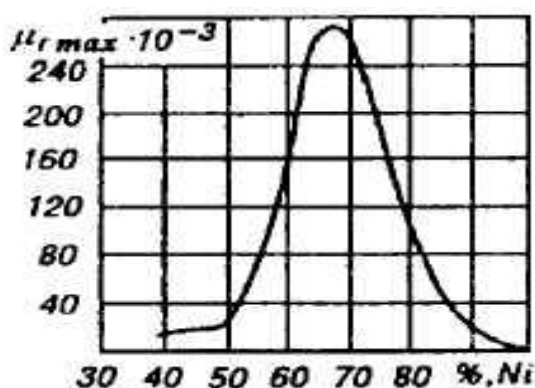


Рисунок 5.5 – Залежність максимальної магнітної проникності пермалоя від вмісту нікелю при термічній обробці в магнітному полі

При розшифровці пермалоевих сплавів перша цифра позначення вказує на вміст нікелю, %, буква П позначає прямокутність петлі гістерезису, середні літери вказують на наявність легуючих елементів (М - молібден, К - кобальт, Х - хром і т. д.).

Матеріали, що працюють в динамічному режимі, повинні володіти великим електричним опором для отримання мінімальних втрат на вихрові струми в широкому частотному діапазоні. Велике поширення тут набули неметалеві магнітні матеріали - ферити, електричні і магнітні властивості яких в сильно мірі залежать від

складу і структури сплаву. Найбільше значення початкової магнітної проникності мають нікель-цинкові і марганці під-цинкові сплави. При розшифровці марки феритів нікель-цинковим сплавам відповідають букви ПН; марганцево-цинковим НМ; число початку позначення визначає значення початкової магнітної проникності.

Набагато раніше феритів промислове впровадження отримали магнітодіелектрики. Вихідним матеріалом для них служило карбонільне залізо-порошок. Велике поширення отримали магнітодіелектрики на основі порошку зі сплаву альсифера (85% Fe; 9,5% Si; 5,5% Al).

Для отримання постійних магнітних полів великої напруженості використовують постійні магніти, виконані з магнітотвердих матеріалів. Раніше для їх виготовлення використовувалися вуглецеві сталі з вмістом вуглецю до 1%. Поліпшення властивостей магнітотвердих матеріалів досягалося додаванням легуючих елементів (вольфрам, хром молібден, кобальт). Прагнення до здешевлення магнітотвердих матеріалів призвело до створення сплавів (ЮНД) на основі заліза, нікелю та алюмінію (12% Al; 25% Ni). Додавання до цих сплавів кобальту (ЮНДК) збільшує H_c , але одночасно зменшує B_c . Охолодження сплавів від точки Кюрі в магнітному полі робить матеріал анізотропним (текстурованим). При цьому збільшується B_c , петля гістерезису стає прямокутною, збільшується магнітна енергія. Подальше поліпшення магнітних властивостей магнітотвердих матеріалів (збільшення H_c і w_{max}) досягається використанням компонентів з дорогоцінних металів (ПЛК) та рідкоземельних матеріалів (КС). При розшифровці магнітотвердих матеріалів букви вказують на наявність компонентів сплаву (К - кобальт, М - нікель; Пл - платина; С - самарій; Ю - алюміній і т. д.). Рекордний рівень магнітної енергії та залишкової індукції мають в даний час магнітотверді матеріали на основі сплаву Nd - Fe - В, однак, поступаються самарій-кобальтовим магнітотвердим матеріалам за температурною стабільністю.

Великі значення констант анізотропії і розмірів однодомених частинок призвели до дуже широкого використання для виготовлення постійних магнітів барієвих феритів. Поліпшені характеристики спостерігаються у магнітотекстурованих зразків (пресування в магнітному полі). Нетекстуровані магніти з барієвих феритів позначаються БИ, а текстуровані - БА.

Одним з класифікуючих критеріїв застосовності матеріалу для тих чи інших цілей є робоча ділянка кривої перемагнічування на

петлі магнітного гістерезису. На рис. 5.6 представлені галузі роботи основних груп магнітних матеріалів в залежності від їх використання.

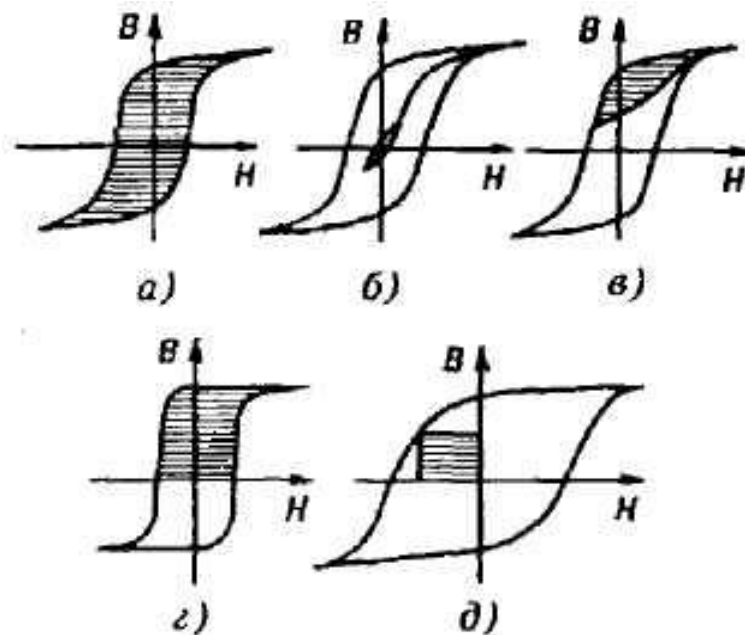


Рисунок 5.6 – Галузі роботи основних груп магнітних матеріалів в залежності від їх використання

Області роботи основних груп магнітних матеріалів: а - матеріали для роботи в широкому діапазоні зміни індукції; б - матеріали для роботи в слабких полях; в - матеріали для магнітопроводів релейних і імпульсних пристроїв; г - матеріали для запам'ятовуючих пристроїв і магнітних підсилювачів; д - матеріали для постійних магнітів

В обчислювальній техніці велике поширення набуває спосіб запам'ятовування інформації на магнітних елементах. Для забезпечення надійності запису і відтворення інформації потрібні матеріали з високою намагніченістю. Це дозволяє отримати велику різницю індукцій між B_2 при одному напрямку поля і B_{max} при протилежному. Крива переходу від B_2 до B_{max} повинна бути крутою для забезпечення значної швидкості зміни індукції dB / dt . З цією ж метою електропровідність матеріалу по можливості повинна бути низькою. Широко використовуються для елементів запам'ятовуючих пристроїв і магнітних підсилювачів пермалой і ферити з прямокутною петлею гістерезису.

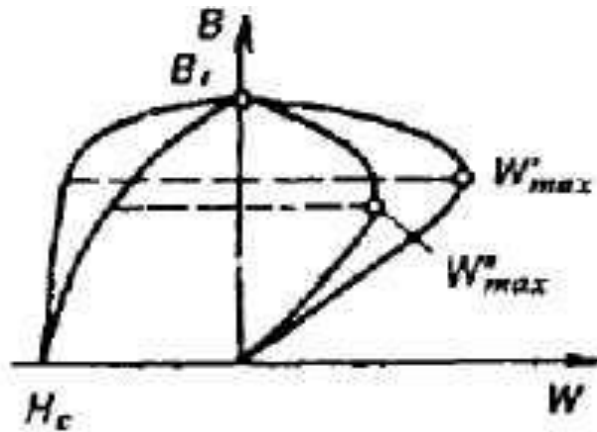


Рисунок 5.7 – До оцінки впливу ступеня опуклості розмагнічучої ділянки магнітотвердих матеріалів на магнітну енергію

Великий обсяг виробництва магнітних матеріалів припадає на магнітотверді матеріали, що служать первинною сировиною для виготовлення постійних магнітів. Робоча ділянка у них знаходиться у другому квадранті магнітного гістерезису. Оскільки основне цільове призначення постійних магнітів полягає у створенні постійних магнітних полів, магнітотверді матеріали характеризуються магнітною енергією, яку можна розвинути в заданій магнітній системі. Магнітна енергія визначається залишковою індукцією, коерцитивною силою і ступенем опуклості розмагнічування матеріалу. Розглянута група магнітних матеріалів знайшла широке застосування при побудові різної силової і комутуючої апаратури, електричних машин, апаратури засобів зв'язку і ін.

Для виготовлення сердечників електромагнітів постійного струму і ряду інших пристроїв, що працюють в постійних низькочастотних магнітних полях практично на всіх ділянках петлі магнітного гістерезису, поширення набуло технічно чисте залізо (низьковуглецева електротехнічна сталь). У нашій країні тонколистова низьковуглецева сталь випускається згідно з ГОСТ 3836-83 гарячекатаною і холоднокатаною. Вміст вуглецю в ній не перевищує 0,04%, а інших домішок - 0,6%. ГОСТ 11036-75 регламентує магнітні властивості сортової низьковуглецевої сталі з утримання вуглецю до 0,035% та інших домішок до 0,95%.

Для виготовлення магнітопроводів асинхронних двигунів потужністю до 100 кВт використовують електротехнічну сталь з вмістом кремені до 0,4% марок 2011, 2012, 2013 і товщиною стрічки 0,5 і 0,65 мм. Для виготовлення магнітопроводів силових

трансформаторів застосовують гарячекатану електротехнічну сталь марок 1511 - 1514 і холоднокатану текстуровану марок 3411 - 3415.

У магнітних системах, що працюють на змінному струмі частотою від 50 до декількох тисяч герц в широкому діапазоні зміни індукції (0,01 - 1,5 Тл), використовується, як правило, гарячекатана сталь марок 1571, 1572.

При роботі магнітних матеріалів в діапазоні частот 50 - 5000 Гц можуть бути використані більш дорогі залізонікелеві сплави марок 50Н, 45Н. Магнітні матеріали для елементів апаратури прийому та передачі інформації, магнітопроводів малогабаритних трансформаторів, дроселів, дефектоскопів, магнітних екранів і багатьох інших елементів високочутливої апаратури, що працює в змінних полях високої частоти, виготовляються з гарячекатаної сталі марок 1561, 1562, що працюють в звуковому діапазоні частот з амплітудою індукції 10^{-4} - 10^{-3} Тл. Асортимент магнітних матеріалів, що працюють на початковій ділянці технічної кривої намагнічування, не обмежується листовою електротехнічною сталлю. Широке поширення набув тут пермалой марок 79НМ, 80НХС, 76НХД, 77НДМ, що містить відповідно 79, 80, 76 і 77% нікелю, легований молібденом, ванадієм, вольфрамом, хромом і міддю.

У ряді пристроїв, наприклад в магнітних підсилювачах, безконтактних реле, комутаційних дроселях, елементах обчислювальної техніки, потрібні матеріали з дуже вузьким гистерезисним циклом (50НП, 47НМП, 65НП, 68НМП, 37НКДП, 34НКМП). Значно пізніше металевих матеріалів з'явилися ферити з прямокутною петлею гистерезису марок 0.9ВТ; 1.3ВТ; 1.5ВТ; 1,75 ВТ; 2Вт (число на початку позначення відповідає коерцитивній силі в ерстедах). Пояснюється це прагненням підвищити швидкодію запам'ятовуючих пристроїв за рахунок зменшення часу перемагнічування t_s .

В останні роки розроблені нові термостабільні ферити з прямокутною петлею гистерезису для мікромагнітопроводів, практично не змінюють свої параметри в інтервалі температур -60 + 80 °С.

Велике поширення для виготовлення імпульсних і широкосмугових трансформаторів отримали ферити марок 1500НМ1, 1000НМ3, 1100НМ1, 1000НН1, 350НН1 і сплави типів 79НЗМ і 68НМ, що володіють високими значеннями проникності і збільшеною індукцією при однополярному намагнічуванні. Великий обсяг випуску постійних магнітів припадає на виробництво магнітів з

барієвих феритів. Впровадження нових матеріалів в значній мірі визначає науково-технічний прогрес. Саме із застосуванням аморфних магнітомягких сплавів (АММС) пов'язують майбутнє магнітних компонентів і різних пристроїв електротехніки та електроніки. Саме тому АММС характеризуються високою магнітною проникністю, досить високою індукцією насичення, а також малим значенням H_c , що не настільки значно залежить від частоти перемагнічування, як аналогічні за складом кристалічні сплави. Основною характерною особливістю АММС є те, що їх питомі втрати при перемагнічуванні аж до десятків кілогерц вкрай малі через високе значення питомого опору, малого значення H_c і товщини стрічки.

До основних недоліків АММС відноситься недостатня термічна і тимчасова стабільність, пов'язана з можливим спонтанним розвитком кристалізації сплавів. Крім того, індукція насичення і температура Кюрі у аморфних сплавах, як правило, нижче, ніж у кристалічних, що пов'язано з наявністю у складах АММС так званих амортизаторів - немагнітних металів і металоїдів типу В, Si, Р, С та ін. Так як аморфна структура є термодинамічно нерівноважною, то вона більшою мірою, ніж кристалічна, чутлива до таких зовнішніх впливів, як температура, тиск, механічні деформації.

Залежно від хімічного складу АММС поділяють на три групи: сплави на основі заліза (аморфні сталі); залізонікелеві сплави; залізокобальтові сплави. Крім того, АММС часто підрозділяють на матеріали з високою магнітною індукцією (як правило, аморфні сталі) і матеріали з високою магнітною проникністю. До сплавів на основі заліза відносяться аморфна сталь марок 7421, 7411, сплави 2НСР і 2ХСР. Ці сплави розроблялися для серійного випуску трансформаторів середньої потужності промислової і підвищеної частоти. Вони відрізняються високими значеннями B_s і низькими питомими втратами P у порівнянні з кристалічною електротехнічною сталлю. Залізонікелеві сплави марок 10НСР, Амага 212, АМГ 225 володіють досить високим значенням B_s , проникності та коефіцієнта прямокутності, а також відносно малою H_c . Їх властивості порівнянні з властивостями кращих марок пермалоя типу 50 НП.

Залізокобальтові сплави - найбільш великий підклас АММС. У ньому, в свою чергу, розрізняють дві підгрупи - сплави з великим вмістом заліза (24КСР, 30КСР, 9КСР, Амага 325), сплави, близькі за властивостями до АММС з залізонікелевих сплавів. Застосовуються в тих же цілях і в тому ж діапазоні частот, що і залізонікелеві сплави.

Залізокобальтові АММС - з великим вмістом кобальту (71КНСР, 84КСР, 84КХСР, 86КГСР, 82К2ХСР, 823ХСР. Амага 176, Амага 183).

5.2 ФЕРОМАГНЕТИКИ. ПРОЦЕСИ ПРИ НАМАГНІЧУВАННІ ФЕРОМАГНЕТИКІВ

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

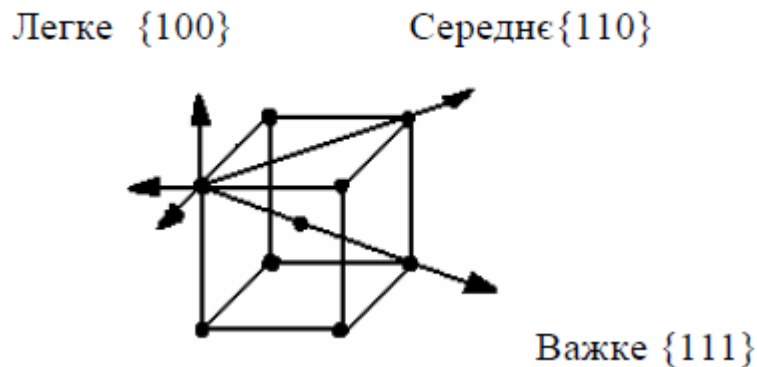


Рисунок 5.8 – Напрямки легкого, середнього й важкого намагнічування в монокристалі заліза

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

Залежність магнітної індукції макрооб'єму феромагнетика від напруженості зовнішнього магнітного поля називають *кривою намагнічування* (рис. 5.9). Зростання індукції під дією зовнішнього поля обумовлено двома основними процесами: зсувом доменних границь і поворотом магнітних моментів доменів.

Початковій ділянці кривої (область 1) відповідає оборотне (пружне) зміщення границь доменів. При цьому відбувається

збільшення об'єму тих доменів, магнітні моменти яких утворюють найменший кут з напрямком зовнішнього поля і зменшення розмірів доменів з несприятливою орієнтацією вектора спонтанної намагніченості. Після зняття слабкого поля границі доменні повертаються в колишнє положення.

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

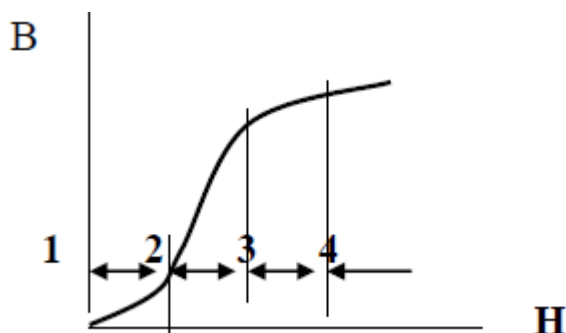


Рисунок 5.9 – Крива намагнічування феромагнетика

При подальшому збільшенні напруженості магнітного поля зростає роль другого механізму намагнічування - механізму обертання, при якому магнітні моменти доменів з напрямку легкого намагнічування поступово повертаються в напрямку поля (область 3). Коли всі магнітні моменти доменів орієнтуються уздовж поля, настає технічне насичення намагніченості (область 4). Незначне зростання індукції на ділянці насичення обумовлено складовою частиною $\mu_0 H$ (4.2) і збільшенням намагніченості самого домену. Це явище одержало назву *парапроцесу* або *істинного намагнічування*. Строго паралельне розташування спінових моментів у домені можливе тільки при температурах, близьких до абсолютного нуля. При підвищенні температури за рахунок теплової енергії впорядкованість у розташуванні спінів порушується. Зовнішнє поле повертає спіни до паралельної орієнтації. Цим досягається ефект збільшення намагніченості.

На відміну від істинного намагнічування, зростання індукції за рахунок зсуву доменних границь і обертання магнітних моментів називають *технічним намагнічуванням*. Із кривої намагнічування можна визначити статичну (відносну) магнітну проникність. Вона

пропорційна тангенсу кута нахилу січної, проведеної з початку координат через відповідну точку на основній кривій намагнічування.

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (5.6)$$

Граничне значення магнітної проникності при напруженості магнітного поля, що прагне до нуля називають *початковою магнітною проникністю* μ_H . Експериментально її визначають у слабких магнітних полях з напруженістю порядку 0,1 А/м.

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

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (5.7)$$

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

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

5.3 МАГНІТНІ ВТРАТИ

В змінних магнітних полях перемагнічування феромагнетика супроводжується втратами, що викликають нагрівання матеріалу. У загальному випадку втрати на перемагнічування складаються із *втрат на гістерезис, на вихрові струми й магнітну післядію*. Як правило, у нагрівання феромагнетика внеском останнього механізму втрат можна знехтувати. Втрати на гістерезис за один цикл перемагнічування, віднесені до одиниці об'єму речовини, визначаються площею статичної петлі гістерезису, тобто петлі, яка була одержана при повільній зміні магнітного потоку

$$\mathcal{E}_r = \int H dB \quad (5.8)$$

Оцінити дані втрати можна за емпіричною формулою

$$\mathcal{E}_r = \eta B_m^n \quad (5.9)$$

де η - коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу; B_m – максимальна індукція, що досягається в даному циклі; n – показник ступеня, що приймає значення від 1,6 до 2,0 залежно від B_m .

Вихрові струми виникають у провідному середовищі за рахунок е.р.с. самоіндукції, пропорційній швидкості зміни магнітного потоку. Звідси впливає відмінність статичних петель гістерезису від динамічних: якщо статичні петлі характеризують лише втрати на гістерезис, то динамічні включають сумарні втрати на гістерезис і вихрові струми, тобто при намагнічуванні змінним полем петля гістерезису розширюється. Причому втрати на гістерезис за один період зміни зовнішнього поля залишаються постійними в досить широкому діапазоні частот, а втрати на вихрові струми зростають пропорційно частоті.

Важливою характеристикою є потужність, що виділяється в зразку при його перемагнічуванні, тобто енергія, що витрачається в одиницю часу. Потужність витрачається на вихрові струми і визначається за емпіричною формулою:

$$P_T = \mathcal{E}_T f V = \xi f^2 B_m^2 V \quad (5.10)$$

де V – об'єм зразка; ξ – коефіцієнт, пропорційний питомої провідності речовини й залежний від геометричної форми й розмірів поперечного перерізу зразка, що намагнічується.

Потужність, обумовлена втратами на гістерезис, визначається за наступною формулою:

$$P_r = \eta B_m^n f V \quad (5.11)$$

Для зменшення втрат на вихрові струми необхідно використовувати матеріал з підвищеним питомим опором або збирати осердя з тонких листків, ізольованих один від одного. Потужність, що витрачається на вихрові струми в одиниці маси й виражена у Вт/кг, пов'язана з товщиною листа:

$$p_T = p_T(Vd) = 1.64 \gamma h^2 f^2 B_m^2 / d \quad (5.12)$$

де d - щільність матеріалу.

Втрати на магнітну післядію обумовлені відставанням магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля. Дослідження показують, що спад намагніченості феромагнетиків відбувається не миттєво, а за деякий проміжок часу - від часток мілісекунд до декількох хвилин. Час установаження стабільного магнітного стану істотно зростає зі зниженням температури. Однієї з основних причин магнітної післядії є теплова енергія, що допомагає слабо закріпленим доменним границям долати енергетичні перешкоди, які заважають їхньому вільному зсуву при зміні поля. Це явище називають магнітною в'язкістю.

Розглянемо еквівалентну схему й векторну діаграму індуктивної котушки з магнітним осердям у вигляді послідовного ланцюжка з індуктивності L і активного опору r , еквівалентного всім видам втрат на перемагнічування (рис. 4.4). Власною ємністю й опором обмотки індуктивної котушки зневажаємо.

Кут δ_μ називається кутом магнітних втрат. З векторної діаграми виходить, що тангенс кута магнітних втрат дорівнює:

$$\operatorname{tg} \delta = r / \omega L \quad (5.13)$$

З урахуванням цього активну потужність можна визначити за формулою:

$$P_a = I^2 w L t g \delta \quad (5.14)$$

Величина, зворотна $t g \delta$ називається *добротністю* осердя. Найбільш повне поведження феромагнетиків у змінних магнітних полях описує комплексна магнітна проникність:

$$\tilde{\mu} = \tilde{\mu}' - j\mu'' \quad (5.15)$$

де $\mu' = B_m / \mu_o H$ - називається пружною магнітною проникністю, що збігається з відносною магнітною проникністю; $B_{m1} = B_m \cos \delta_\mu$ складова магнітної індукції, що збігається з напруженістю поля; $\mu'' = B_{m2} / \mu_o H$ - називається в'язкою магнітною проникністю μ ; $B_{m2} = B_m \sin \delta_\mu$ складова магнітної індукції, що відстає по фазі від напруженості поля на кут $\pi / 2$.

5.4 ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ ФЕРОМАГНЕТИКІВ

При нагріванні феромагнетика відбувається поступова теплова дезорієнтація спінових магнітних моментів і зменшення спонтанної намагніченості. Вище деякої температури відбувається розпад доменної структури, тобто спонтанна намагніченість зникає й феромагнетик переходить у парамагнітний стан. Температура такого фазового переходу називається магнітною точкою Кюрі. Залежність намагніченості насичення від температури показана на рис.2.5. Намагніченість різко падає в міру наближення до точки Кюрі, де виконується співвідношення

$$\frac{J_{ms}}{J_{m0}} = \alpha \sqrt{1 - T/T_k} \quad (5.16)$$

де α -постійна для даного матеріалу.

Прийнято визначати точку Кюрі перетинанням лінійного продовження найбільш крутої ділянки спаду кривої намагніченості з віссю температур. При температурі Кюрі магнітна проникність феромагнетика стає приблизно рівною одиниці. Вище точки Кюрі

магнітна сприйнятливість змінюється відповідно до закону Кюрі-Вейса:

$$k_M = 3/(T - T_K) \quad (5.17)$$

де 3 - постійна Кюрі-Вейса.

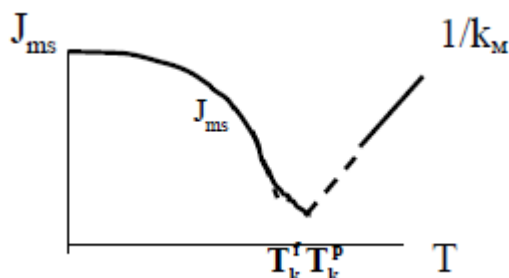


Рисунок 5.10 – Залежність намагніченості насичення і парамагнітної сприйнятливості феромагнетика від температури

Практичний інтерес становить температурна залежність магнітної проникності феромагнетика.

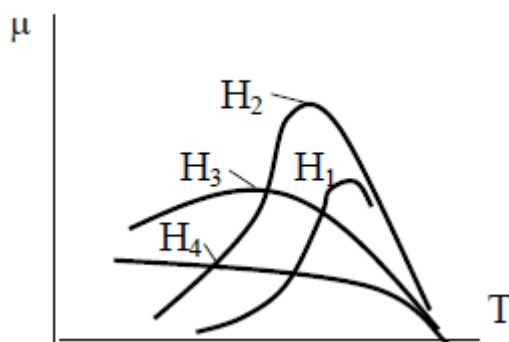


Рисунок 5.11 – Температурна залежність магнітної проникності феромагнетика при різних напруженостях зовнішнього поля

Характер цієї залежності виявляється не однаковим для магнітної проникності, обмірюваної в слабкому й сильному магнітних полях. Зростання магнітної проникності при підвищенні температури обумовлено, головним чином тим, що при нагріванні феромагнетика слабшають сили, що перешкоджають зсуву доменних границь і повороту магнітних моментів доменів. Високотемпературний спад магнітної проникності пов'язаний з різким зменшенням спонтанної намагніченості доменів.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х т. / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. / -М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В. и др. Электротехнические материалы. –Л.: Энергоатомиздат, 1985. -304 с.
3. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. –М.: Энергия, 1982. -320 с.
4. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. Магнитные материалы и элементы. –М.: Высш. шк., 1986. -350 с.
5. Электротехнические материалы. Справочник. / Сост. В.В. Березник, Н.С. Прохоров и др. М.: Энергоатомиздат, 1963. -804 с.
6. В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. материалы электронной техники. -М.: Высшая школа, 1966. -365 с.
7. ГОСТ 2155-80 Материалы диэлектрические. Термины и определения.
8. ГОСТ 19880-80 Электротехника. Основные понятия. Термины и определения.
9. ГОСТ 2265-76 Материалы проводниковые. Термины и определения.
10. ГОСТ 22622-77 Материалы полупроводниковые. Термины и определения.
11. ГОСТ 19693-81 Материалы магнитные. Термины и определения.
12. Колесов С. Н., Колесов И. С. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов – М.: Высшая шк., 2004.
13. Богородицкий Н.П. и др. Электротехнические материалы: Учебник для электротехн. и энерг. спец. вузов / Н.П.Богородицкий, В.В.Пасынков, Б.М.Тареев. - 7-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. - 304 с
14. Справочник по электротехническим материалам: в 3-х т. / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. - 3-е изд., перераб. - М.: Энергоатомиздат, Том 1. - 1986. - 368 с., Том 2. - 1987. - 464 с
15. Колесов С.Н, Колесов И.С. Электротехнические и конструкционные материалы. — Киев: Транспорт, 2003. 384 с.
16. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 2007. — 535 с: ил. ISBN 978-5-06-005817-8

17.Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов.- М.:Энергия, 1982.-320 с.

18.Борисова М.Э., Койков С.Н. Физика диэлектриков. — Л.: Ленинград. ун-тет, 1979. 240 с.

19.Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло.-3-е изд.-М.: Энергоатомиздат, 1983.-296 с.

Методичне видання

КОВАЛЕНКО Віктор Леонідович

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчально-методичний посібник

Підписано до друку . . . 2013 р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.
Ум. печ. л. 18.6. Наклад 50 пр.
Замовлення № _____

Видруковано типографією
Запорізької державної інженерної академії

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226
РВВ ЗДІА, тел. 2238-240