

ЛІТЕРАТУРА

1. Алиев И.И., Калганова С.Г. Электротехнические материалы и изделия. Справ очник. – М.: ИП РадиоСофт, 2005. – 352 с.
2. Арзамасов В.Н. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. Б.Н. Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф. Косолапов и др.; Под общ. Ред. Б.Н. Арзамасова. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
3. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоиздат, 1985. – 304 с.
4. Василенко І.І., Широков В.В., Василенко Ю.І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: Навч. посібник. Львів: «Магнолія - 2006», 2007 – 242 с.
5. Казарновский Д.М., Тареев Б.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий: Учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1980. – 216с.
6. Колесов С.Н., Колесов И.С. Электротехнические и конструкционные материалы: Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей вузов. – К.: Транспорт Украины, 2002. – 384 с.
7. Конструкционные и электротехнические материалы: Учеб. Для учащихся электротехн. спец. техникумов / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, С.Я. Попов и др.; Под ред. В.А. Филикова. – М.: Высш. шк., 1990. – 296 с.
8. Коханівський С.П. Електроматеріалознавство з основами слюсарної справи – К.: Урожай, 1991. – 134 с.

9. Пястолов А.А., Мешков А.А., Вахромеев А.П. Монтаж, эксплуатация и ремонт электрооборудования. М.: Колос, 1981. – 335 с.

10. Сена Л.А. Единицы физических величин и их размерности. – М.: Наука, 1977. – 336 с.

11. Справочник по элементарной математике, механике и физике.: ИЦ «Аркаис», 1995. – 215 с.

12. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 1. Изд. 3-е переаб. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 386 с.

13. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 2. Изд. 3-е переаб. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.

14. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. Т. 3. Изд. 3-е переаб. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 728 с.

15. Электротехнический справочник: В 3- т. Т. 1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.И. Герасимова и др. – 7-е изд. испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.

16. Электротехнический справочник. Т.1. Составитель И.И. Алиев. М.: ИП РадиоСофт, 2006. – 480 с.

17. Электротехнические и конструкционные материалы: учебн. пособие для студ. сред. проф. образования/ В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюхин и др.; под ред. В.А. Филикова. – 3-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 280 с.

18. Электрорадиоматериалы/ Б.М. Тареев, Н.В. Короткова, В.М. Петров, А.А. Преображенский; под ред. Б.М. Тареева: Учебное пособие для студентов втузов. – М.: Висш. школа, 1978, – 336 с.

ЗМІСТ

Передмова.....	3
Введення в дисципліну.....	4
Розділ 1. Загальні відомості про будову матеріалів.....	9
1.1 Види зв'язків	10
1.2 Будова твердих тіл.....	14
1.3 Фазовий склад матеріалів	17
Запитання для самоконтролю	19
Розділ 2. Класифікація електротехнічних матеріалів....	20
2.1 Класифікація матеріалів за електричними властивостями.....	22
2.2 Класифікація матеріалів за магнітними властивостями.....	25
Запитання для самоконтролю.....	29
Розділ 3. Діелектричні матеріали.....	30
3.1 Основні властивості діелектричних матеріалів.....	31
3.1.1 Електричні властивості діелектриків.....	31
3.1.2 Фізико-хімічні властивості діелектриків.....	55
3.1.3 Теплові властивості діелектриків.....	57
3.1.4 Механічні властивості діелектриків.....	60
3.2 Газоподібні діелектрики.....	62
3.3 Рідкі діелектрики.....	65
3.3.1 Природні рідкі діелектрики.....	65
3.3.2 Синтетичні рідкі діелектрики	69

3.4	Тверді органічні діелектрики	72
3.4.1	Природні смоли.....	75
3.4.2	Полімеризаційні синтетичні полімери	76
3.4.3	Поліконденсаційні синтетичні полімери	83
3.4.4	Електроізоляційні пластичні маси	87
3.4.5	Плівкові електроізоляційні матеріали.....	88
3.4.6	Електроізоляційні матеріали на основі каучуку..	91
3.4.7	Електроізоляційні лаки та емалі	94
3.4.8	Електроізоляційні компаунди	97
3.4.9	Волокнисті електроізоляційні матеріали органічного походження.....	99
3.5	Тверді неорганічні діелектрики.....	103
3.5.1	Електроізоляційне скло	104
3.5.2	Електроізоляційна кераміка.....	106
3.5.3	Слюда та матеріали на її основі.....	110
3.5.4	Азбест та матеріали на його основі.....	113
3.6	Комбіновані електроізоляційні матеріали.....	114
	Запитання для самоконтролю	118
	Розділ 4. Провідникові матеріали	120
4.1	Класифікація провідникових матеріалів	120
4.2	Основні властивості провідникових матеріалів.....	122
4.2.1	Електричні властивості провідників.....	123
4.2.2	Механічні властивості провідників.....	128
4.2.3	Теплові та фізико-хімічні властивості провідників.....	131

4.3	Матеріали високої провідності.....	134
4.4	Матеріали високого опору	141
4.4.1	Сплави для вимірювальних приладів.....	141
4.4.2	Сплави для реостатів	144
4.4.3	Сплави для нагрівальних приладів.....	144
4.5	Металокерамічні матеріали та вироби	148
4.6	Електровугільні матеріали та вироби.....	150
4.7	Провідникові вироби.....	152
4.7.1	Обмотувальні проводи.....	152
4.7.2	Встановлювальні та монтажні проводи.....	155
4.7.3	Ізольовані проводи для повітряних ліній електропередачі	157
4.7.4	Кабелі.....	159
4.7.5	Не ізольовані проводи.....	160
4.8	Припої та флюси.....	161
	Запитання для самоконтролю.....	164

Розділ 5. Напівпровідникові матеріали

5.1	Основні властивості напівпровідників	167
5.1.1	Власна і домішкова електропровідність напівпровідників.....	167
5.1.2	Оптичні та фотоелектричні явища в напівпровідниках.....	180
5.1.3	Термоелектричні явища в напівпровідниках....	182
5.1.4	Електронно-дірковий перехід напівпровідників	183

5.2 Прості напівпровідники.....	189
5.3 Напівпровідникові сполуки.....	193
Запитання для самоконтролю	198
 Розділ 6. Магнітні матеріали	199
6.1 Класифікація матеріалів за магнітними властивостями.....	199
6.2 Основні властивості магнітних матеріалів.....	202
6.3 Магнітом'які матеріали	211
6.4 Магнітотверді матеріали.....	218
6.5 Ферити.....	224
Запитання для самоконтролю	228
 Додатки	229
Література.....	240

Навчальне видання

Коваленко Олександр Іванович

Коваленко Любов Рафаїлівна

Мунтян Володимир Олексійович

Радько Іван Петрович

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник

Підписано до друку 03.07.2008 р. Формат 30×42/4

Папір офсетний. Друк RISO. Ум. др.. арк. 12

Тираж 100 прим. Зам №

Надруковано ПП Верескун В.М.

св.-во ДК №1125, друкарня «Люкс»

7312, м. Мелітополь,

вул.. К.Маркса, 10

т/ф (06192) 6-88-38

**О.І. Коваленко, Л.Р. Коваленко, В.О. Мунтян
І.П. Радько**

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки
України*

Мелітополь
«Люкс»
2008

УДК 631.371:621.31(075)

ББК 31.2:40.71

E45

*Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(лист №1.4/18 – Г – 1546 від 03.07.08)*

Рецензенти: Дідур В. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри «Гідравліка і теплотехніка» Таврійського державного агротехнологічного університету;

Лут М. Т., к.т.н., професор, завідувач кафедри «Електричні машини і експлуатація електрообладнання» Національного аграрного університету.

Коваленко О.І., Коваленко Л.Р., Мунтян В.О., Радько І.П.

E45 Електротехнічні матеріали: Навчальний посібник. – Мелітополь: «Люкс», 2008 – 246 с.

Викладено фізичні основи електроматеріалознавства та відомості про основні класи електротехнічних матеріалів – діелектрики, напівпровідники, провідники та магнітні матеріали. Розглянуто їх властивості. Наведено основні марки електротехнічних матеріалів які використовуються при виготовленні, монтажі, експлуатації та ремонті електротехнічного обладнання.

Навчальний посібник призначається для студентів енергетичних спеціальностей аграрних та інших вищих навчальних закладів II-IV рівнів акредитації, які вивчають однойменну або споріднену за змістом дисципліну.

УДК 631.371:621.31(075)

ББК 31.2:40.71

© Коваленко О.І., Коваленко Л.Р.,
Мунтян В.О., Радько І.П., 2008.

ISBN 000-000-00-0

© «Люкс», 2005.

ПЕРЕДМОВА

Необхідною умовою розвитку будь-якої технічної галузі, і електротехніки та енергетики в тому числі, є наявність та доступність якісних матеріалів із заданими властивостями.

В навчальному посібнику розглядається будова та властивості електротехнічних матеріалів, які використовуються при виготовленні, монтажі, ремонті та експлуатації електротехнічного та енергетичного обладнання.

В посібнику також приділено увагу фізиці процесів, які мають місце в провідникових, напівпровідникових, діелектричних та магнітних матеріалах при внесенні їх в електричне або в магнітне поле.

Дисципліна «Електротехнічні матеріали», із одного боку, базується на фундаментальних науках таких як: фізика, хімія та електротехніка. А з іншого боку – вона є їх логічним продовженням та базою для вивчення спеціальних електроенергетичних дисциплін.

Авторський колектив при написанні навчального посібника намагався викласти відомості про будову та властивості електротехнічних матеріалів в простій та доступній формі із використанням сучасних фізико-хімічних та електрофізичних наукових уявлень.

Відомості, які викладені в навчальному посібнику стануть в нагоді інженеру-енергетику в його практичній діяльності.

ВВЕДЕННЯ В ДИСЦИПЛІНУ

Мета і задачі дисципліни «Електротехнічні матеріали»

У сільськогосподарському виробництві застосовується велика кількість установок водопостачання та зрошення, агрегатів для сушіння та сортування зерна, цехів для приготування кормів, птахофабрик, ферм по відгодівлі свиней і великої рогатої худоби та багато інших підприємств із комплексною механізацією та електрифікацією технологічних процесів.

Комплекси промислового типу обладнані установками мікроклімату, кормоприготування, штучного освітлення та обігріву. Для надійності електропостачання передбачено живлення цих комплексів від декількох трансформаторних підстанцій, що приєднані лініями електропередач до різних районів електричних мереж.

На сільськогосподарських комплексах промислового типу встановлено сотні і навіть тисячі електродвигунів, значна кількість пускової та захисної апаратури, а також апаратури автоматики.

Експлуатація згаданого вище електрообладнання в умовах сільського господарства має наступні особливості:

- специфічні умови середовища та режиму роботи електрообладнання;
- сезонність використання електрообладнання;
- низька якість напруги живлення споживачів;

- значна віддаленість струмоприймачів один від одного та від джерела живлення;
- неукomплектованість господарств електротехнічним персоналом та низька його кваліфікація;
- відсутність коштів на придбання нового електрообладнання і запасних частин.

Підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання в сільському господарстві може бути забезпечено наступними заходами:

- правильним вибором електрообладнання з урахуванням специфічних умов сільськогосподарського виробництва;
- правильним вибором і застосуванням **електротехнічних матеріалів** при виготовленні електрообладнання, його монтажі, експлуатації та ремонті;
- застосуванням нових **електротехнічних матеріалів** із покращеними характеристиками.

Метою дисципліни «Електротехнічні матеріали» є вивчення основних властивостей та області застосування електротехнічних матеріалів, які використовуються при виготовленні, монтажі, експлуатації та ремонті електротехнічного обладнання. Дисципліна також формує знання принципів та особливостей застосування електротехнічних матеріалів на практиці та вміння використовувати їх основні характеристики.

При вивченні курсу «Електротехнічні матеріали» необхідно:

1) розглянути теоретичні основи будови та фізико-хімічної природи електротехнічних матеріалів (ЕТМ), які визначають їх електричні, магнітні, фізико-хімічні та механічні властивості;

2) вивчити класифікацію ЕТМ за поведінкою в електричному та магнітному полі, за призначенням, за складом, за агрегатним станом, за походженням та за властивостями;

3) вивчити основні електричні, магнітні, теплові, фізико-хімічні та механічні властивості (характеристики) матеріалів, для їх оцінки при використанні в електричних та магнітних полях;

4) одержати відомості про ізоляційні, провідникові, напівпровідникові та магнітні матеріали, які використовуються в електротехніці та енергетиці;

5) вивчити маркування та область застосування основних електротехнічних матеріалів та виробів із них.

Загальні відомості про електротехнічні матеріали

Для виготовлення, монтажу та експлуатації будь-якого електричного апарату або електротехнічного виробу використовується цілий ряд матеріалів, різних за своїми властивостями та призначенням – це ***електротехнічні та конструкційні матеріали***.

Для підтвердження сказаного вище розглянемо, наприклад, відому всім лампу розжарювання, яка виготовлена із наступних матеріалів:

- колба лампи та арматура, на якій закріплене тіло розжарення виготовлені із скла – це електроізоляційний матеріал;
- тіло розжарення виконане у вигляді спіралі (біспіралі) із вольфрамового дроту – це провідниковий матеріал;
- цоколь лампи, контакти та провідники, що підводять струм до спіралі виготовлені із заліза, алюмінію та міді – це провідникові матеріали;
- колба лампи заповнена криптоном, галогенними газами, або там створюється вакуум – це ізоляційні газоподібні матеріали.

Далі наведемо більш складний приклад використання електротехнічних матеріалів – розглянемо електричний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, що широко застосовується як на виробництві так і у побуті.

У загальному вигляді електродвигун складається із таких основних елементів (частин), які, в свою чергу, виготовлені із певних електротехнічних та конструкційних матеріалів:

- корпус двигуна виготовляється із сталі, чавуну, алюмінію, силуміну та інших матеріалів – це конструкційні матеріали;
- «залізо» статора і ротора (магнітопровід) виготовляють із спеціальних електротехнічних сталей (леговані сталі) – це магнітні матеріали;
- в пази статора закладена обмотка із міді – це провідниковий матеріал;
- короткозамкнена обмотка ротора (стержні з'єднані по торцям кільцями) виготовляється із алюмінію – це також провідниковий матеріал;

- один від одного та від корпусу витки обмоток захищені ізоляцією (лак, емаль, лакотканина та ін.) – це діелектричні (електроізоляційні) матеріали;

- в пазах статора обмотка фіксуються за допомогою клинів, виготовлених із дерева або із шаруватих пластиків – це також електроізоляційні матеріали;

- фланці, підшипники та вал електродвигуна виготовлені із сталі, сплавів алюмінію та інших матеріалів – це конструкційні матеріали;

- у зазорі між ротором та статором електродвигуна знаходиться повітря – це газоподібний електроізоляційний матеріал.

Із наведених вище прикладів видно, що матеріали, із яких виготовленні вузли та деталі електричних машин та електротехнічних виробів характеризуються різноманітними властивостями, завдяки яким їх і застосовують для певних цілей. Ці матеріали виділяють в окрему групу і називають **електротехнічними**.

Від властивостей електротехнічних матеріалів залежать процеси, що протікають в електричних машинах, апаратах та електротехнічних виробках, такі як: генерація, передача, розподілення та перетворення електричної енергії в інші види енергії.

Раціональне застосування якісних електротехнічних матеріалів із заданими характеристиками дозволяє одержати надійні в експлуатації електричні машини, апарати та електротехнічні вироби малих габаритів і маси, із високою стійкістю до впливів середовища що їх оточує.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО БУДОВУ МАТЕРІАЛІВ

Для правильного вибору та ефективного використання електротехнічних матеріалів необхідно знати не лише їх властивості, але і причини їх різноманітності, які пов'язані із будовою речовини.

Речовина – це вид матерії, яка складається із елементарних частинок, які мають масу спокою. В техніці замість поняття «*речовина*» використовують поняття «*матеріал*». Технічне значення матеріалів залежить від їх будови або структури.

Структура – це сукупність стійких зв'язків у матеріалі, які забезпечують його цілісність та зберігання основних властивостей при внутрішніх і зовнішніх змінах. Особливості матеріалів виражаються у їх властивостях.

Властивість – філософська категорія, яка відображує відмінність або спільність матеріалів та визначається при їх порівнянні. Зв'язок між структурою (будовою) та властивостями є предметом вивчення матеріалознавства.

Величини, за допомогою яких оцінюють ті чи інші властивості матеріалів, називають **характеристиками**. Для повної оцінки властивостей того чи іншого електротехнічного матеріалу необхідно знати його механічні, електричні, теплові і фізико-хімічні характеристики. Для магнітних матеріалів також необхідно знати магнітні характеристики.

1.1 Види зв'язків

Всі речовини складаються із атомів. **Атом** – найменша частинка хімічного елементу, яка має його властивості. Атом в свою чергу складається із позитивно зарядженого ядра, навколо якого обертаються негативно заряджені електрони. Електрони притягуються до ядра і відштовхуються один від одного.

Зовнішні електрони можуть відриватися від атому та приєднуватися до іншого атома, змінюючи при цьому кількість його зовнішніх електронів. Такі електрони називаються **валентними**.

Атом, який втратив один або декілька електронів стає позитивно зарядженим. Атом, який приєднав до себе вільні електрони стає негативно зарядженим. Утворені таким чином частинки називаються позитивними та негативними **іонами**, або **катионами** та **аніонами** відповідно.

Із атомів будуються молекули. **Молекула** – це найменша частинка речовини, яка зберігає її хімічні властивості. До складу молекули може входити від двох до декількох тисяч атомів.

Зв'язки, завдяки яким відбувається об'єднання атомів називаються **хімічними**, вони підрозділяються на **ковалентні, іонні, металічні та молекулярні**.

Ковалентні (атомні) зв'язки виникають між атомами за рахунок утворення між ними стійких пар валентних електронів (рисунок 1.1). Ці пари є спільними для атомів, які входять до складу молекули.

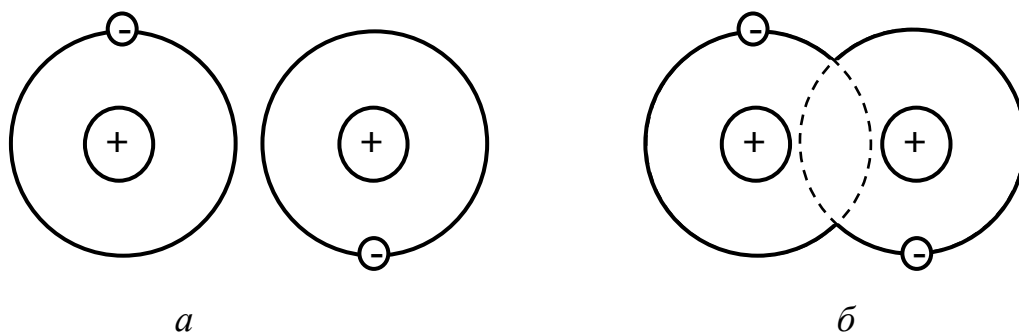


Рисунок 1.1 – Ковалентний (атомний) зв’язок в молекулі водню: *a* – ізольовані атоми; *б* – молекула із ковалентним зв’язком

Якщо двоатомна молекула складається із атомів одного елементу то таку молекулу називають **неполярною**, або **нейтральною**. В такій молекулі центри позитивних і негативних зарядів співпадають.

Якщо двоатомна молекула складається із атомів різних елементів, то електронна пара може бути зміщеною до одного із елементів. В цьому випадку молекулу називають **полярною**, або **дипольною**. У полярної молекули центри позитивних і негативних зарядів не співпадають, вона характеризується **дипольним моментом m** :

$$m = q \cdot l, \quad (1.1)$$

де q – абсолютне значення заряду, Кл;

l – відстань між центрами позитивних і негативних зарядів, м.

Якщо у багатоатомних молекул атоми розміщені симетрично, то вони неполярні (рисунок 1.2, *a*), а якщо не симетрично – полярні (рисунок 1.2, *б*).

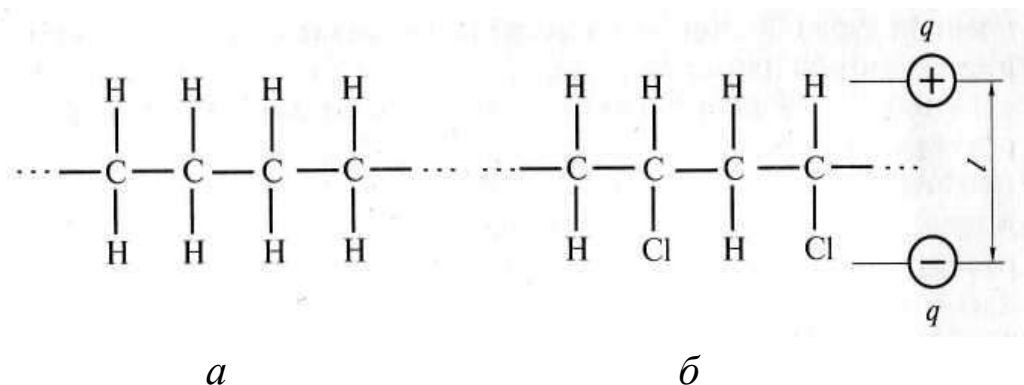


Рисунок 1.2 – Схеми молекул: *a* – поліетилену; *b* – полівінілхлориду

Речовини із ковалентними зв'язками характеризуються значною твердістю, крихкістю, тугоплавкістю та хімічною інертністю. До них відносяться кристали германію, кристали кремнію, кристали алмазу, водень, кисень, поліетилен, полівінілхлорид, арсенід галію, арсенід індію та ін.

Іонні зв'язки обумовлені силами електростатичного тяжіння між позитивними та негативними іонами (рисунок 1.3).

Іонні зв'язки слабкіші за ковалентні. Речовини із іонними зв'язками мають меншу механічну міцність та хімічну стійкість в порівнянні із речовинами із ковалентними зв'язками. До них відносяться неорганічні діелектрики, більшість солей (галоїдні солі лужних металів), деякі оксиди (ZnO, CdO, NiO та ін.).

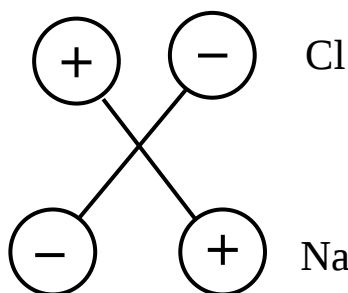


Рисунок 1.3 – Елементарна частка іонного кристалу NaCl

Металічні зв'язки утворюються в металах і обумовлені особливостями поведінки їх зовнішніх (валентних) електронів. Атоми металів мають здатність віддавати валентні електрони, перетворюючись при цьому в позитивний іон, або приєднувати їх знову, перетворюючись в нейтральний атом.

Метал представляє собою кристалічну систему, яка складається із розміщених у вузлах решітки позитивних іонів, які знаходяться в середовищі вільних (колективізованих) електронів.

Метали виділяються монолітністю, пластичністю та значною міцністю. Завдяки наявності великої кількості вільних електронів вони мають високу електро- та теплопровідність. Металічний зв'язок, на відміну від ковалентного, не має направленого характеру. Це надає металам підвищеної пластичності.

Молекулярні зв'язки утворюються між окремими молекулами внаслідок електростатичного тяжіння між зарядами протилежних знаків, які є в молекулах. Таке електростатичне тяжіння називається силами **Ван-дер-Ваальса** (рисунок 1.4).

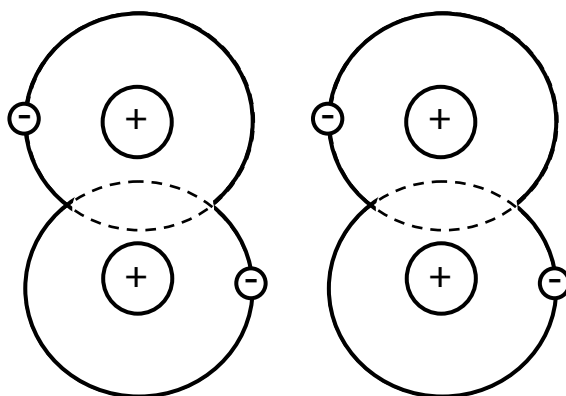


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення взаємодії двох молекул

До речовин із молекулярними зв'язками відносяться вода, парафін, поліетилен, фторопласт, твердий водень, твердий азот та інші (рисунок 1.2).

1.2 Будова твердих тіл

Речовини із упорядкованим розташуванням атомів або молекул називаються **кристалічними**, а речовини із хаотичним розташуванням атомів або молекул – **аморфними**.

Кристалічні матеріали

Кристалічний стан матеріалу характеризується упорядкованим (закономірним) розташуванням елементарних частинок, що утворюють речовину.

Кристалічні речовини можуть мати ковалентну, іонну, металічну та молекулярну кристалічну решітку. Порядок розташування атомів (іонів або молекул) в кристалі може бути різним. Найбільш типовими для кристалічних речовин є об'ємно-центрована кубічна (рисунок 1.5, *а*), гранецентрована кубічна (рисунок 1.5, *б*), та гексагональна (рисунок 1.5, *в*) кристалічні решітки.

До кристалічних матеріалів відносяться метали та їх сплави, алмаз, графіт, кремній, германій, вісмут, солі, нітроанілін та інші.

Упорядковане розміщення атомів (іонів, молекул) в кристалах веде до різної щільності атомів в різних напрямках. Цим спричиняються різні властивості кристалів, наприклад, металів, в різних напрямках – це **анізотропія**.

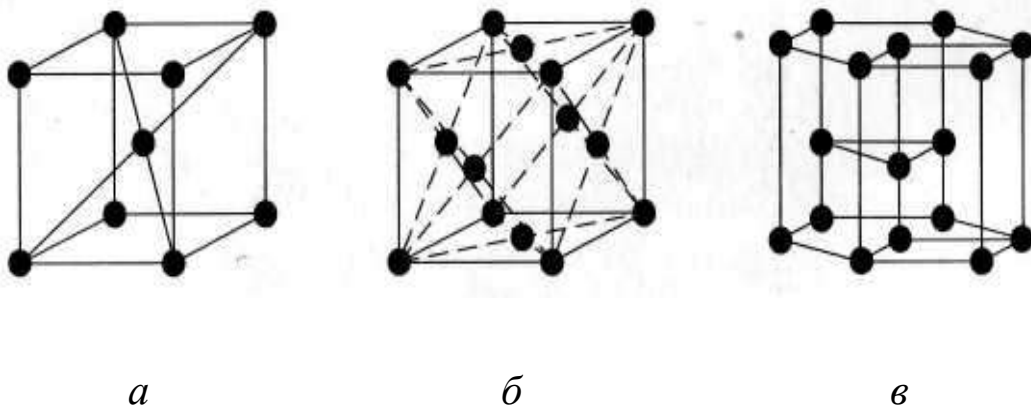


Рисунок 1.5 – Основні типи кристалічних решіток: *a* – об’ємноцентрована кубічна; *б* – гранецентрована кубічна; *в* – гексагональна

При нагріванні всі кристалічні речовини зберігають твердий агрегатний стан до певної температури. Атоми, які знаходяться у вузлах решітки, здійснюють безперервні коливальні рухи, амплітуда яких зростає із підвищенням температури. При досягненні певної температури відбувається руйнування кристалічної решітки – атоми (іони, молекули) переходять до хаотичного стану, а речовина переходить в рідкий стан. Температура такого переходу називається **температурою плавлення** $T_{\text{пл}}$.

Зворотний перехід кристалічних речовин із рідкого стану в твердий називається **кристалізацією**. Температура такого переходу називається **температурою кристалізації** $T_{\text{кр}}$.

Будова кристалічної речовини, при якій елементарні частинки утворюють геометрично правильну структуру, може бути лише в ідеальному випадку. В реальних умовах кристали мають велику кількість дефектів, які суттєво впливають на властивості матеріалу.

Нанокристалічними матеріалами називають матеріали із розміром кристалів (зерен) менше $100 \cdot 10^{-9}$ м. Такі матеріали значно відрізняються за властивостями від матеріалів із дрібнозернистою структурою (розмір зерен – не більше $(5 \dots 10) \cdot 10^{-6}$ м) такого ж хімічного складу.

Властивості нанокристалічних матеріалів визначаються розміром зерен, властивостями граничного шару і взаємодією основної складової структури матеріалу із поверхневими шарами.

Нанокристалічні матеріали мають покращені механічні, електричні та магнітні властивості в порівнянні із мікрокристалічними аналогами. Такі матеріали є новими і перспективними у використанні.

Аморфні матеріали

На відміну від кристалічних в аморфних матеріалах атоми (іони, молекули) розташовані хаотично. Аморфні матеріали на мають чітко визначеної температури переходу із твердого в рідкий агрегатний стан, і навпаки. Ці переходи здійснюються в діапазоні температур. Аморфні речовини **ізотропні** – їх властивості не залежать від напрямку.

Аморфні матеріали можна розділити на дві групи:

- прості аморфні матеріали: неорганічні стекла, плавленний кварц;
- високополімерні аморфні з'єднання: каучук, гума, пластмаси, смоли, органічне скло.

Аморфно-кристалічні матеріали

Деякі матеріали можуть перебувати як в аморфному, так і в кристалічному стані. Аморфний стан таких матеріалів менш стійкий, ніж кристалічний, і тому можливим є довільний перехід речовини із аморфного стану в кристалічний.

Прикладом аморфно-кристалічних речовин є ситали, оксид кремнію (кристали кварцу та мінерал опал) та ін.

1.3 Фазовий склад матеріалів

В промисловості використовують переважно не чисті метали та неметали, а сплави металів із металами або металів із неметалами. Компоненти сплавів можуть по-різному взаємодіяти між собою, утворюючи при цьому різні за складом, типом зв'язку і будовою кристалічні фази.

Розрізняють наступні кристалічні фази сплавів: ***рідкі розчини, тверді розчини та хімічні сполуки.***

Рідкі розчини – однорідна маса двох і більше компонентів, які рівномірно розподілені у вигляді окремих атомів, молекул або іонів.

Тверді розчини – фаза, яка складається із двох і більше компонентів, один із яких є розчинником, але при цьому він зберігає кристалічну решітку, а інший (інші) розподіляються в решітці розчинника не змінюючи його типу. Розрізняють тверді розчини ***проникнення*** (рисунок 1.6, а) та тверді розчини ***заміщення*** (рисунок 1.6, б).

В твердому розчині **проникнення** атоми компонента, що розчинився розміщуються між вузлами компонента розчинника.

В твердих розчинах **заміщення** частина атомів розчинника заміщується атомами компонента, що розчиняється.

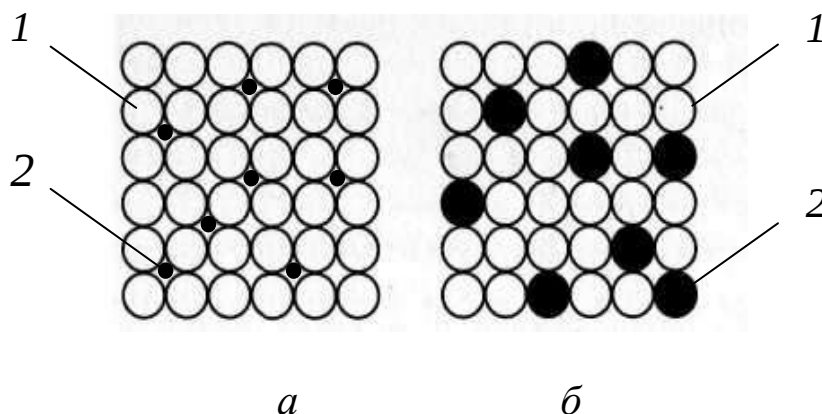


Рисунок 1.6 – Структура твердого розчину: *a* – проникнення; *б* – заміщення; 1 – атоми розчинника; 2 – атоми компонента, що розчиняється

Тверді розчини менш пластичні, більш тверді, більш міцні і мають підвищений електричний опір в порівнянні із чистими металами.

Хімічними сполуками називають сплави, які утворюють фази постійного складу, співвідношення компонентів у яких підпорядковується правилу валентності. Кристалічні решітки хімічних сполук відрізняються від решіток компонентів які їх утворюють, співвідношення компонентів в них кратне цілим числам.

Для визначення складу сплаву і кількості фаз у ньому використовують діаграми фазової рівноваги. Діаграми фазової рівноваги (**діаграми стану**) – це графічне зображення фазового складу сплаву в стані рівноваги, або в близькому до нього.

Запитання для самоконтролю

1. Із чого складаються речовини?
2. Які види зв'язків між атомами ви знаєте?
3. Що таке полярна та неполярна молекула?
4. Що таке просторова кристалічна решітка? Види решіток.
5. Що називається температурою плавлення речовини? Від чого вона залежить?
6. Що називається температурою кристалізації речовини?
7. Чим відрізняються кристалічні тіла від аморфних?
8. Які матеріали відносяться до аморфно-кристалічних?
9. Які матеріали відносяться до нанокристалічних?
10. Які кристалічні фази утворюють компоненти в сплавах?

РОЗДІЛ 2

КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Електротехнічними матеріалами називають матеріали, котрі характеризуються певними властивостями по відношенню до електричного та магнітного полів і застосовуються в електротехніці з урахуванням цих властивостей для виготовлення електричних машин, апаратів та інших електротехнічних виробів.

Під час експлуатації на електротехнічні матеріали впливають електричні та магнітні поля, окремо або в сукупності. За поведінкою в електричному полі матеріали ділять на *провідникові, напівпровідникові та діелектричні*, а за поведінкою в магнітному полі – на *сильномагнітні та слабномагнітні*.

Наведена класифікація електротехнічних матеріалів є загальною і дуже приблизною. У зв'язку із цим матеріали, в межах вказаних груп додатково систематизують і ділять на підгрупи.

В якості *провідникових матеріалів* використовуються тверді тіла (метали, сплави металів, металокерамічні та вуглецеві композиції), рідини (електроліти, розплави солей та кислот, розплавлені метали), а при певних умовах і гази (іонізовані гази та іонізовані пари металів).

Металеві провідникові матеріали підрозділяють на матеріали високої електричної провідності і сплави високого опору.

Матеріали високої провідності використовують тоді, коли необхідно забезпечити якнайменші втрати електричної енергії, що передається ними. Сплави високого опору використовують тоді, коли необхідно забезпечити перетворення електричної енергії в теплову, або для виготовлення резисторів.

Окрім того серед провідникових матеріалів виділяють групи матеріалів, які за певних умов (при дуже низьких температурах) виявляють властивості надпровідників та кріопровідників.

Напівпровідникові матеріали ділять: за складом – на органічні та неорганічні; за характером електропровідності – на електронні та іонні, за типом електропровідності – на *n*-типу та *p*-типу. За структурою матеріалу розрізняють кристалічні та аморфні напівпровідники.

Діелектричні матеріали підрозділяють: за агрегатним станом – на тверді, рідкі та газоподібні; за походженням – на природні і синтетичні; за хімічним складом – на органічні та неорганічні; за станом молекул – на полярні та неполярні. Органічні діелектрики також додатково розділяють за розміром молекул на низькомолекулярні та високомолекулярні.

Магнітні матеріали за фізичними властивостями ділять на феромагнітні та феримагнітні. За застосуванням їх умовно розділяють на магнітотверді та магнітом'які. Серед магнітних матеріалів також виділяють в окремі групи матеріали із спеціальними властивостями: матеріали із прямокутною петлею гістерезису, матеріали із постійною магнітною проникністю та ін.

2.1 Класифікація матеріалів за електричними властивостями

Як зазначалося вище, за поведінкою в електричному полі електротехнічні матеріали ділять на провідникові, напівпровідникові та діелектричні. Така класифікація матеріалів за їх електричними властивостями базується на уявленнях *зонної теорії* електропровідності твердих тіл.

Різницю між провідниками, напівпровідниками та діелектриками найбільш наочно можна пояснити за допомогою *енергетичних діаграм* зонної теорії твердого тіла (рисунок 2.1).

Розглянемо основні положення зонної теорії. В ізольованому атомі електрони обертаються навколо ядра на певних орбітах. Кожній орбіті відповідає значення енергії, яку може мати електрон – кожна орбіта являє собою певний *енергетичний рівень* (рисунок 2.1, 1).

Частина енергетичних рівнів заповнена електронами в нормальному, не збудженому, стані атома. Це пояснюється впливом тяжіння позитивно зарядженого ядра атома, коли електрони намагаються зайняти найближчі до ядра рівні із мінімальним значенням енергії. Нижні енергетичні рівні виявляються заповненими електронами, а верхні – вільними.

На інших енергетичних рівнях електрони можуть знаходитися лише тоді, коли на атом буде здійснюватися зовнішній енергетичний вплив. Електрон може стрибкоподібно перейти із нижнього енергетичного рівня W_1 на інший вільний енергетичний рівень W_2 . Для цього йому необхідно надати додаткову енергію ΔW .

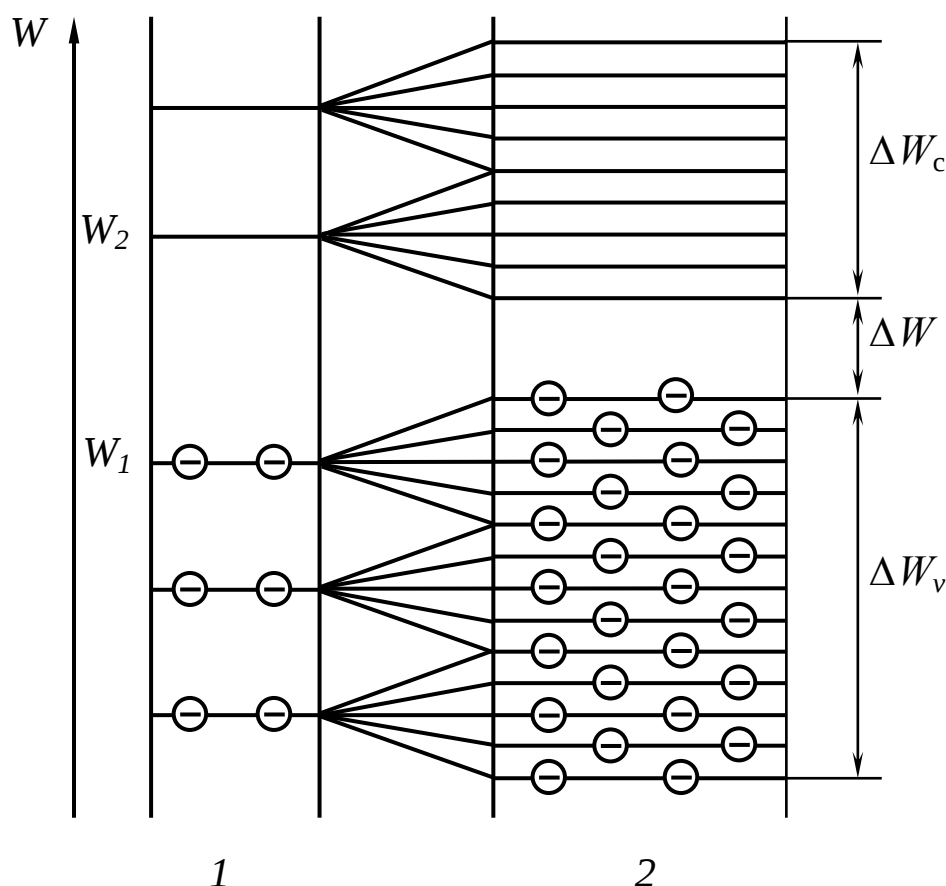


Рисунок 2.1 – Діаграма енергетичних рівнів: 1 – ізольованого атома; 2 – твердого тіла: W – енергія електрона; W_1 – нижній енергетичний рівень; W_2 – вільний енергетичний рівень; ΔW_c – зона провідності (вільна зона); ΔW – заборонена зона; ΔW_v – валентна зона

При утворенні кристалічної решітки твердого тіла всі електронні рівні (як заповнені так і незаповнені), які є у даного типу атомів, дещо зміщуються внаслідок впливу сусідніх атомів один на одного. Таким чином із окремих енергетичних рівнів в твердому тілі утворюються цілі смуги – **зони енергетичних рівнів**, або **енергетичні зони** (рисунок 2.1, 2).

Зона яка заповнена електронами називається **валентною зоною** (ΔW_v). Вільна зона називається **зоною провідності**

(ΔW_c). Зона між валентною та вільною зонами називається **забороненою зоною** (ΔW). Розмір забороненої зони ΔW суттєво впливає на властивості матеріалів.

Якщо заборонена зона ΔW настільки велика, що для переходу електронів із валентної зони в зону провідності потребується значна енергія (рисунок 2.2, *а*), то такі речовини (матеріали) відносяться до **діелектриків**.

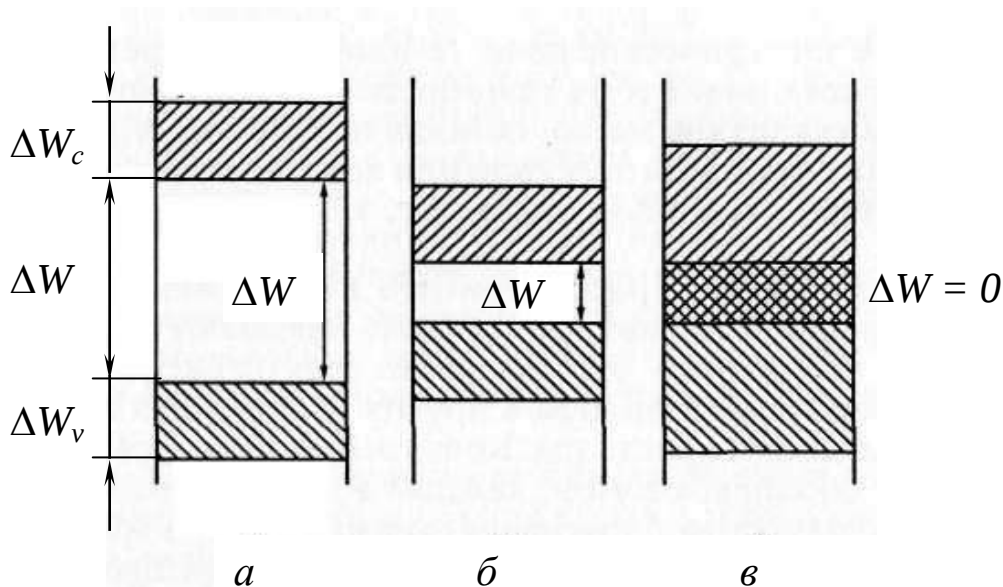


Рисунок 2.2 – Енергетичні зони: *а* – діелектрика; *б* – напівпровідника; *в* – провідника

Електронної провідності, в звичайних умовах, у діелектриків не спостерігається. Діелектрики мають високий електричний питомий опір $\rho > 10^7$ Ом·м, завдяки чому в електротехніці їх використовують в якості ізоляційних матеріалів.

До *напівпровідників* відносяться матеріали із більш вузькою забороненою зоною ΔW , яка може бути подолана електроном за рахунок зовнішніх енергетичних впливів (освітлення, нагрівання та ін.) (рисунок 2.2, б). Питомий електричний опір напівпровідників знаходиться в межах: $\rho = 10^{-6} \dots 10^9$ Ом·м. Напівпровідники мають електропровідність, яку можна змінювати за допомогою напруги, температури, тиску, освітленості та ін.

Якщо заборонена зона ΔW дорівнює, або наближається до 0 (рисунок 2.2, в), то електрони можуть перейти на вільні рівні завдяки власній тепловій енергії і підвищити провідність речовини (матеріалу). Речовини із такою структурою енергетичних зон відносяться до *провідників*. До провідників відносяться речовини із питомим електричним опором $\rho < 10^{-5}$ Ом·м. Типовими провідниками є метали та сплави металів.

2.2 Класифікація матеріалів за магнітними властивостями

Всі матеріали в природі, при внесенні їх в зовнішнє магнітне поле, володіють магнітними властивостями, які зумовлені внутрішніми формами руху електричних зарядів.

Магнітне поле в речовині (матеріалі) створюють рухомі електричні заряди (електрони). В ізольованому атомі електрони обертаються одночасно навколо ядра і навколо своєї осі. Рух електрона по орбіті навколо атомного ядра приводить до виникнення *орбітального магнітного моменту*. Рух електрона навколо своєї

осі, який називається «*спіном електрона*» приводить до виникнення *спінового магнітного моменту*. Орбітальний та спіновий магнітні моменти в сумі утворюють *магнітний момент атома*. Магнітні властивості атома визначаються, в значній мірі магнітними властивостями електрона.

Орбітальні магнітні моменти практично не приймають участі в явищі намагнічування. Елементарними носіями магнетизму є спінові магнітні моменти.

Так як електрони із правим і лівим обертанням мають різний напрям магнітних моментів, то сумарний магнітний момент атома може бути рівний нулю або відрізнятися від нього. Матеріали із різною електронною структурою атомів мають різні магнітні властивості.

За магнітними властивостями і характером взаємодії із зовнішнім магнітним полем матеріали підрозділяються на *сильномагнітні* та *слабомагнітні*.

Сила взаємодії речовини із магнітним полем оцінюється магнітною сприйнятливістю речовини k_m :

$$k_m = \frac{M}{H}, \quad (2.1)$$

де M – намагніченість речовини, А/м;

H – напруженість магнітного поля, А/м.

До слабомагнітних матеріалів відносяться:

– *діамагнетики* ($k_m < 0$) – водень, вісмут, кремній, мідь, срібло, золото, свинець, цинк та ін.;

– **парамагнетики** ($k_m > 0$) – повітря, натрій, калій, алюміній, платина, титан та ін.;

– **антиферромагнетики** ($k_m > 0$) – церій, самарій, марганець, хром, солі та окиси деяких металів.

До сильномагнітних, які в подальшому ми будемо називати **магнітними** матеріалами, відносяться:

– **ферромагнетики** ($k_m \gg 1$) – залізо, нікель, кобальт та їх сплави;

– **феримагнетики** ($k_m \gg 1$) – ферити – це комплексні окиси заліза із окисами інших металів ($\text{NiO Fe}_2\text{O}_3$, $\text{ZnO Fe}_2\text{O}_3$, $\text{CoO Fe}_2\text{O}_3$, та ін).

Практичне застосування в техніці одержали сильномагнітні матеріали – ферромагнетики та феримагнетики, які відрізняються спроможністю намагнічуватися у зовнішньому магнітному полі. Вироби із магнітних матеріалів слугують для створення, підсилення та концентрації магнітного поля.

Явище феромагнетизму пов’язано із утворенням всередині матеріалу нижче певної температури (точка Кюрі) таких кристалічних структур, при яких в межах макроскопічних областей (доменів), електронні спіни орієнтовані паралельно один до одного і мають однаковий напрямок. Тобто, у феромагнітних речовин, без прикладання зовнішнього магнітного поля, існують спонтанно намагнічені області (рисунок 2.3). Ці намагнічені області мають різні напрямки магнітних моментів. Магнітний потік такого тіла у просторі буде дорівнювати нулю.

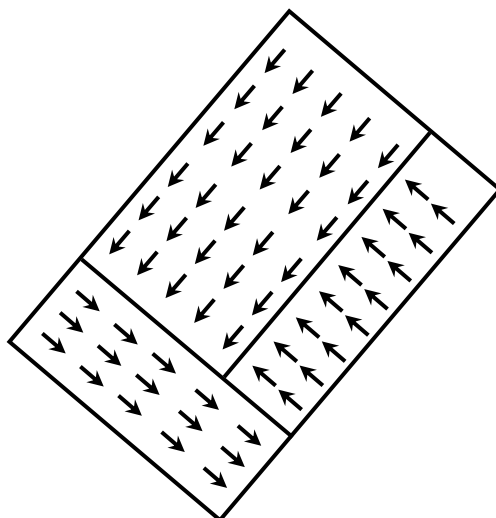


Рисунок 2.3 – Фрагмент феромагнетика із спонтанно намагніченими областями (доменами)

Особливістю феромагнітних матеріалів є також те, що їх кристали характеризуються магнітною анізотропією, яка проявляється у тому, що вони по різному намагнічуються упродовж різних осей.

У випадках, коли анізотропія в полікристалічних магнетиках виражена досить сильно, говорять, що феромагнетик має *магнітну текстуру*. Одержання заданої магнітної текстури матеріалу має велике значення і широко використовується в електротехніці для створення магнітних виробів із підвищеними магнітними характеристиками у заданому напрямі.

Запитання для самоконтролю

1. Як класифікуються електротехнічні матеріали за поведінкою в електричному полі?
2. Які енергетичні зони утворюються в твердих тілах?
3. Які матеріали відносяться до провідникових?
4. Які матеріали відносяться до напівпровідникових?
5. Які матеріали відносяться до діелектричних?
6. Як класифікуються матеріали за поведінкою в магнітному полі?
7. Чим оцінюється сила взаємодії речовин із магнітним полем?
8. Яка природа орбітального і спінового магнітних моментів?
9. Чим відрізняються сильномагнітні матеріали від слабомагнітних?
10. Що таке магнітна текстура матеріалу?

РОДІЛ 3

ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Згідно із зонною теорією твердого тіла, *діелектрики* – це речовини, у яких ширина забороненої зони настільки велика (рисунк 2.2, а), що за нормальних умов електропровідність у них повністю відсутня.

Діелектричні матеріали складають найбільш численну групу електротехнічних матеріалів як за різноманітністю та властивостями, так і за їх застосуванням в електротехніці.

Характерною особливістю діелектриків є те, що вони мають високий питомий електричний опір ($\rho > 10^7$ Ом·м) і здатні поляризуватися в електричному полі.

За призначенням діелектричні матеріали ділять на *електроізоляційні матеріали* і *активні діелектрики*.

За хімічним складом діелектрики ділять на матеріали *органічного* та *неорганічного* походження.

За агрегатним станом діелектричні матеріали ділять на *тверді*, *рідкі* та *газоподібні*. Окремою групою виділяють діелектричні *матеріали що твердіють*, які у вихідному стані – рідини, а після застосування, в період експлуатації, вони є твердими речовинами. До цієї групи матеріалів входять лаки, емалі та компаунди.

3.1 Основні властивості діелектричних матеріалів

Для оцінки експлуатаційних властивостей діелектриків та можливих областей їх застосування необхідно вивчити фізичні явища, які відбуваються в матеріалах під час впливу на них електричного поля, та визначити основні їх властивості.

Для діелектричних матеріалів головними властивостями, які визначають їх застосування в електротехніці є *електричні властивості* – поляризація, електропровідність, діелектричні втрати, електрична міцність.

Окрім наведених електричних властивостей, під час експлуатації діелектрики повинні володіти певними механічними, фізико-хімічними, тепловими та іншими властивостями.

Властивості електроізоляційних матеріалів залежать від їх агрегатного стану та структури; температури, вологості, тиску навколишнього середовища та його хімічного складу; прикладеної напруги та її частоти; від забрудненості матеріалу та від інших факторів.

3.1.1 Електричні властивості діелектриків

До характеристик, що описують електричні властивості діелектриків відносяться: діелектрична проникність, питомий об'ємний опір, питомий поверхневий опір, тангенс кута діелектричних втрат, електрична міцність та ін.

Поляризація діелектриків

В робочому режимі електрообладнання електроізоляційні матеріали є середовищем електричного поля. Під дією електричного поля діелектрик поляризується.

Поляризація – це процес при якому зв’язані заряди в атомах, іонах або молекулах матеріалу обмежено зміщуються або орієнтуються під впливом електричного поля. Позитивні заряди зміщуються в напрямку негативного електроду, а негативні – в напрямку позитивного (рисунок 3.1, *а*).

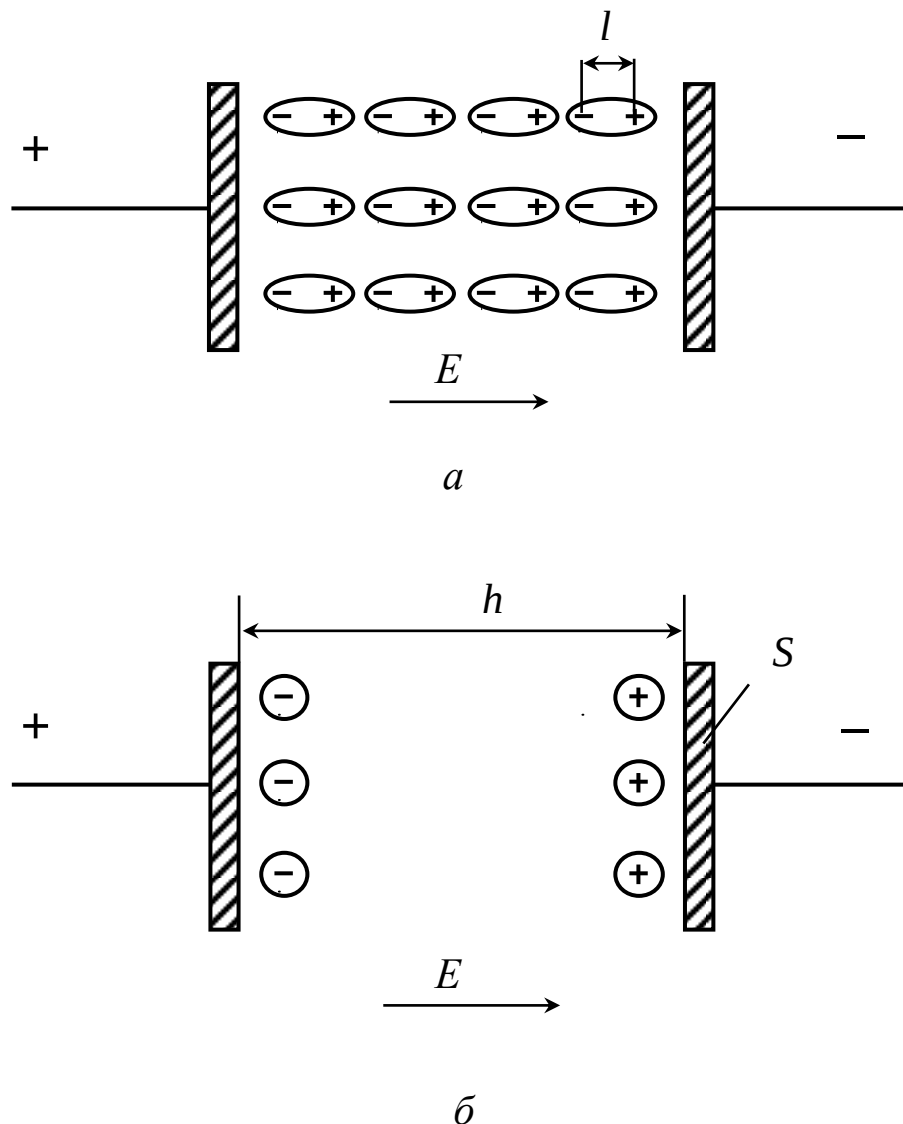


Рисунок 3.1 – Схема розташування зарядів в поляризованому діелектрику: *а* – повна; *б* – спрощена

Так як всередині діелектрика позитивні та негативні заряди взаємно компенсуються, то не скомпенсовані електричні заряди залишаються лише на поверхні діелектрика, поблизу електродів (рисунок 3.1, б).

Діелектрик розташований поміж двома струмоведучими частинами, що знаходяться під різними електричними потенціалами утворює електричний конденсатор (рисунок 3.1, б). Ємність конденсатора залежить від його геометричних розмірів (S – площа електроду, h – відстань між електродами) і від матеріалу діелектрика, що знаходиться між обкладинками.

Якщо до електродів конденсатора прикласти напругу U , то напруженість електричного поля визначається із виразу:

$$E = \frac{U}{h}. \quad (3.1)$$

де U – прикладена до діелектрика напруга, В;
 h – відстань між електродами, м.

У випадку, коли між електродами конденсатора знаходиться вакуум, то на електродах накопичується заряд Q_0 , який називається **вільним**.

Якщо між електродами конденсатора помістити діелектричний матеріал, то під час поляризації в матеріалі утворюються електричні диполі із електричним моментом m_n :

$$m_n = q \cdot l, \quad (3.2)$$

де q – сумарний заряд елементарної частинки, Кл;
 l – відстань між центрами позитивного і негативного зарядів, м.

Внаслідок цього на поверхні діелектрика, біля електродів конденсатора (рисунок 3.1, б) утворюються поляризовані заряди: негативні біля позитивного електроду, і позитивні, відповідно, біля негативного електроду. Для компенсації цих зарядів джерелом електричної напруги створюється додатковий заряд Q_D .

Сумарний (повний) заряд в конденсаторі із діелектриком дорівнює:

$$Q = Q_0 + Q_D = \varepsilon Q_0, \quad (3.3)$$

де ε – відносна діелектрична проникність.

Електрична ємність конденсатора із вакуумом між електродами:

$$C_0 = \frac{Q_0}{U}. \quad (3.4)$$

Ємність цього ж конденсатора із діелектриком між електродами:

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (3.5)$$

Із виразів (3.3 – 3.5) випливає, що відносна діелектрична проникність діелектрика ε дорівнює відношенню ємності конденсатора із діелектриком до ємності того ж конденсатора, в якому між електродами знаходиться вакуум:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}. \quad (3.6)$$

Відносна діелектрична проникність ε вказує у скільки разів збільшується ємність вакуумного конденсатора, якщо

не змінюючи його розмірів і форми, між електродами помістити заданий діелектрик.

Діелектричну проникність матеріалу можна визначити із вимірної ємності конденсатора із заданим діелектриком. Відомо, що ємність конденсатора із вакуумом:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{h}, \quad (3.7)$$

де ε_0 – електрична постійна, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Тоді ємність плоского конденсатора із заданим діелектриком визначається із виразу:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}. \quad (3.8)$$

Відносна діелектрична проникність, або просто діелектрична проникність ε кількісно характеризую процес поляризації діелектрика і є одним із основних його параметрів. Чим більше значення ε , тим сильніше поляризується діелектрик.

Так, наприклад, ємність слюдяного конденсатора з тими ж значеннями S та h буде у 6 разів більшою ніж вакуумного, тому що у слюди $\varepsilon = 6$.

Поляризація газоподібних речовин внаслідок великих відстаней між молекулами незначна, і їх діелектрична проникність близька до одиниці. Діелектрична проникність газів пропорційна тиску і обернено пропорційна абсолютній температурі, так як вона визначається зміною числа молекул в одиниці об'єму.

Для рідких діелектриків діелектрична проникність тим більша чим більше значення електричного моменту диполів та чим більше число молекул в одиниці об'єму. Діелектрична проникність нейтральних рідких діелектриків не перевищує 2,5 (трансформаторне масло, бензол, толуол). Діелектрична проникність полярних рідких діелектриків більш висока і дорівнює 3...4,5 (пентахлордифеніл, трихлордифеніл).

Діелектрична проникність твердих тіл може приймати різні значення, в залежності від різноманітності структурних особливостей твердих діелектриків. Найменші значення діелектричної проникності мають нейтральні тверді діелектрики, які мають лише електронну поляризацію, наприклад парафін ($\varepsilon = 1,9...2,2$). Із підвищенням температури таких діелектриків їх діелектрична проникність зростає майже лінійно за рахунок зростання поляризованості іонів, незважаючи на зменшення густини речовини.

Діелектрична проникність таких матеріалів, як скло може знаходитись в межах від 4 до 20. Діелектрична проникність деяких видів кераміки (конденсаторна кераміка, ультрафарфор) може досягати декількох сотень.

В залежності від агрегатного стану і структури діелектрика розрізняють два види поляризації.

Поляризація першого виду – це поляризація діелектрика під впливом електричного поля, яка протікає майже миттєво, без виділення теплоти і називається ще швидкою або пружною поляризацією. До цього виду відносяться *електронна* та *іонна* поляризація діелектриків.

Поляризація другого виду протікає сповільнено і супроводжується розсіюванням енергії в діелектрику, тобто його нагрівом. Така поляризація називається не пружною, або релаксаційною (повільною). До цього виду поляризації відносяться: **дипольна, іонно-релаксаційна, електронно-релаксаційна, міграційна, спонтанна** та інші види поляризації.

Електронна поляризація – це пружне зміщення і деформація електронних оболонок (орбіт) атомів відносно позитивно зарядженого ядра під дією зовнішнього електричного поля (рисунок 3.2).

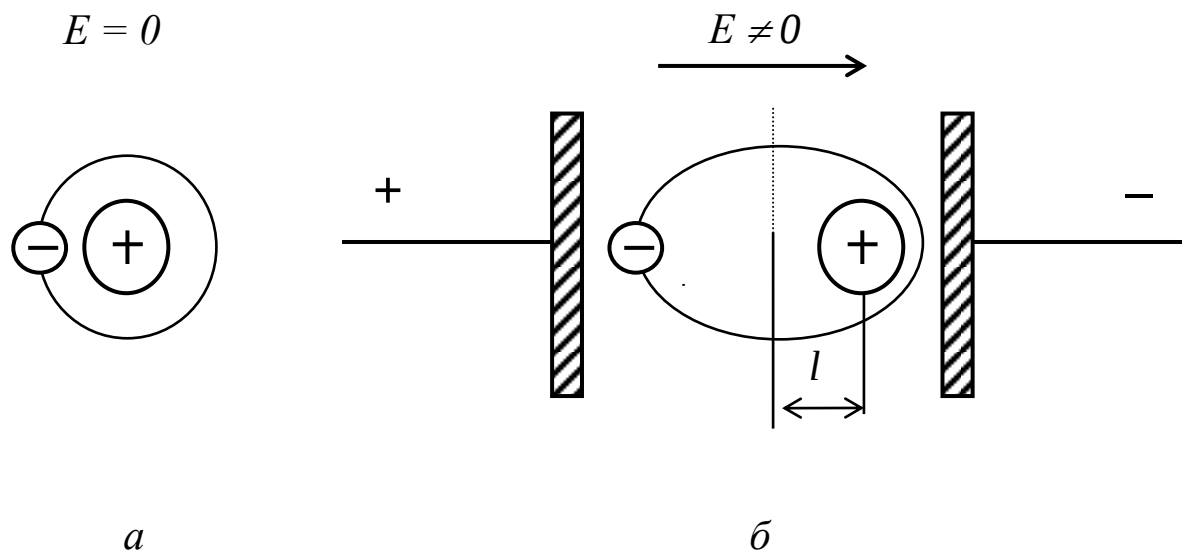


Рисунок 3.2 – Атом водню: *a* – до поляризації; *б* – в момент поляризації

Під час електронної поляризації кожен атом перетворюється в пружний електричний диполь, так як між центрами позитивного та негативного зарядів з'являється деяка відстань l . Поляри-

зована частинка буде мати елементарний електричний момент (рисунок 3.2, б).

Утворення таких диполів відбувається майже миттєво ($t_{\pi} = 10^{-15} \dots 10^{-14}$ с), і зникає після зняття напруги. Утворені електричним полем диполі в діелектрику розташовуються у вигляді ланцюгів (рисунок 3.1, а). Електронна поляризація спостерігається в усіх атомах будь-якої речовини і, відповідно, у всіх видів діелектриків незалежно від їх фізичного стану та структури, та від наявності інших видів поляризації. Ця поляризація є достатньо пружною, не супроводжується втратою енергії і не залежить від частоти прикладеної напруги.

Іонна поляризація – це зміщення один відносно одного різнойменно заряджених іонів у сумішах з іонними зв'язками під дією зовнішнього електричного поля. Центри іонів зміщуються на деяку відстань l , яка не перевищує постійної кристалічної решітки. На рисунку 3.3 схематично показано поляризацію елементарної частинки кристалу типу NaCl. Негативні іони зміщуються до позитивного електрода, а позитивні – до негативного. Внаслідок цього з'являється електричний момент.

Іонна поляризація, як і електронна, встановлюється за дуже короткий час ($t_{\pi} = 10^{-14} \dots 10^{-13}$ с), вона створює суто реактивний електричний струм, що доповнює струм електронної поляризації. Це призводить до збільшення поляризованості діелектрика і збільшення ємнісного струму, та відповідно, до збільшення діелектричної проникності, тобто до збільшення ємності. Іонна поляризація також не залежить від частоти прикладеної напруги.

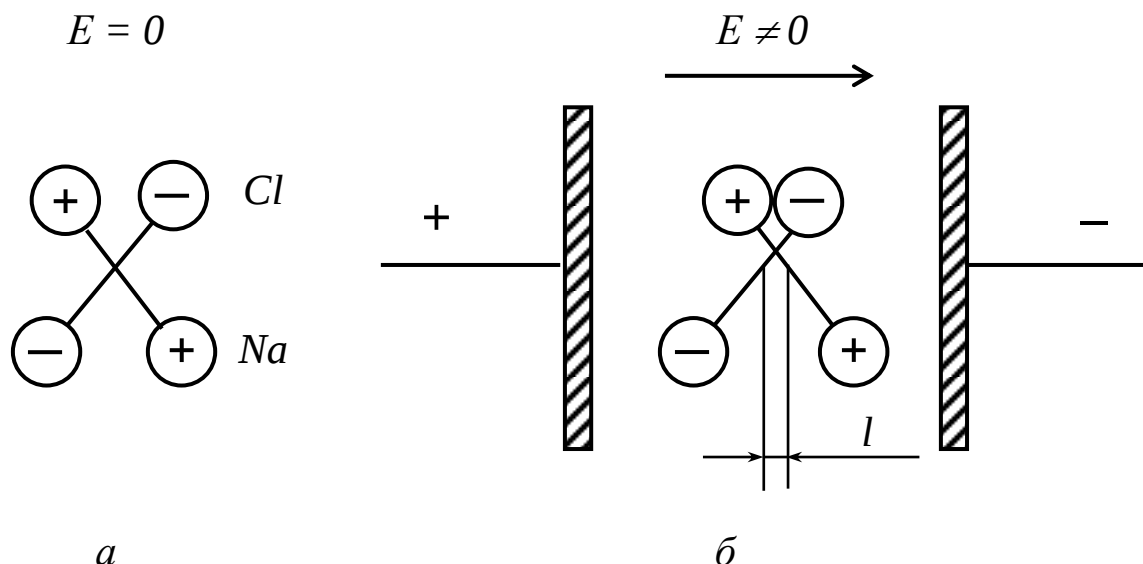


Рисунок 3.3 – Елементарна частинка іонного кристалу NaCl: *а* – до поляризації; *б* – в момент поляризації.

Дипольна поляризація полягає в повороті (орієнтації) дипольних (полярних) молекул в напрямку зовнішнього електричного поля і належить до другого виду поляризації. На відміну від розглянутих електронної та іонної поляризації вона пов'язана з тепловим рухом часток, що приводить до розсіювання (втрати) енергії.

У багатьох діелектриків, в різних агрегатних станах (газоподібний, рідкий, твердий), молекули, якщо вони мають несиметричну структуру, володіють електричним дипольним моментом при відсутності зовнішнього електричного поля. Полярні молекули поляризовані спонтанно, без впливу електричного поля. Такі молекули знаходяться у хаотичному тепловому русі і частково орієнтуються під впливом електричного поля – що і є причиною поляризації. Дипольна поляризація можлива, якщо молекулярні сили не заважають молекулам орієнтуватися вздовж електричного поля.

Дипольна поляризація діелектриків в значній мірі залежить від температури діелектрика і від частоти прикладеної напруги.

Із підвищенням температури молекулярні сили слабнуть, що повинно підсилювати дипольну поляризацію, але в цей же час зростає енергія теплового руху молекул. Коли тепловий рух стає інтенсивнішим – ступінь дипольної поляризації із ростом температури починає зменшуватися.

Поворот диполів в напрямку поля потребує певного часу навіть при газоподібному стані речовини. Тому при швидко перемінних полях диполі не встигають орієнтуватися і дипольна поляризація зменшується із підвищенням частоти прикладеної напруги. Також, час дипольної поляризації визначається розміром молекули – він тим більший, чим більша молекула.

В залежності від будови діелектрика час дипольної поляризації знаходиться в межах $t_{\pi} = 10^{-8} \dots 10^{-1}$ с. Дипольна поляризація супроводжується розсіюванням енергії. Прикладом матеріалу із дипольною поляризацією є целюлоза.

Спонтанна поляризація спостерігається у діелектриків із доменною будовою – у сегнетодіелектриків (сегнетова сіль, титанат барію, титанат свинцю та ін.). У таких речовин є окремі області (домени), які мають електричний момент (поляризовані) при відсутності зовнішнього електричного поля. Накладення зовнішнього поля сприяє орієнтації електричних моментів доменів у напрямку поля, що дає ефект сильної поляризації.

В змінних електричних полях матеріали із спонтанною поляризацією характеризуються значним розсіюванням енергії.

Для сегнетодіелектриків характерна висока діелектрична проникність (декілька тисяч) та її значна залежність від температури.

Міграційна поляризація обумовлена наявністю в діелектриках провідникових та напівпровідникових домішок та шарів із різною провідністю. При внесенні неоднорідних матеріалів в електричне поле утворюються поляризовані області. Ця поляризація можлива лише на низьких частотах і пов'язана із втратами енергії. Процеси міграційної поляризації є найповільнішими ($t_{\pi} = 10^{-3} \dots 1$ с).

Іонно-релаксаційна поляризація обумовлена зсувом слабо зв'язаних іонів під впливом зовнішнього електричного поля на відстань, яка перевищує постійну кристалічної решітки. Із підвищенням температури іонно-релаксаційна поляризація значно підвищується. Характерна для неорганічних кристалічних діелектриків з іонною структурою та із нещільною упаковкою іонів (натрієво-силікатне скло, фарфор, кераміка).

Електронно-релаксаційна поляризація виникає в матеріалах, які мають дефекти в електронній будові, внаслідок збудження тепловою енергією надлишкових електронів або дірок. Електронно-релаксаційна поляризація є характерною для діелектриків з високим показником заломлення, великим внутрішнім полем і електронною електропровідністю (кераміка із вмістом титану).

Електропровідність діелектриків

Всі діелектричні матеріали під дією прикладеної постійної напруги пропускають деякий, дуже незначний струм – **струм витоку**. Електропровідність діелектриків в більшості випадків має іонний характер – носіями зарядів є іони.

Електропровідність діелектриків має дві характерні особливості. Перша особливість полягає в тому, що струм витоку має об'ємну та поверхневу складову. Струм, що протікає через об'єм діелектрика називається **об'ємним**, а струм, що протікає по поверхні діелектрика називається **поверхневим**. Так як ці струми сумірні за величиною, то при вивченні електропровідності діелектриків необхідно враховувати як об'ємну так і поверхневу складову струму витоку, тобто:

$$I = I_v + I_s, \quad (3.9)$$

де I_s – поверхнева складова струму витоку, А;

I_v – об'ємна складова струму витоку, А.

Другою характерною особливістю електропровідності діелектриків є спадання струму із плином часу, після прикладення постійної напруги до діелектрика. При підключенні постійної напруги струм в діелектрику спочатку стрімко зростає, а потім поступово зменшується до усталеного значення (рисунок 3.4).

Струм, що спадає з плином часу, з моменту прикладення постійної напруги до значення струму крізної провідності, називається **струмом зміщення** $I_{зм}$.

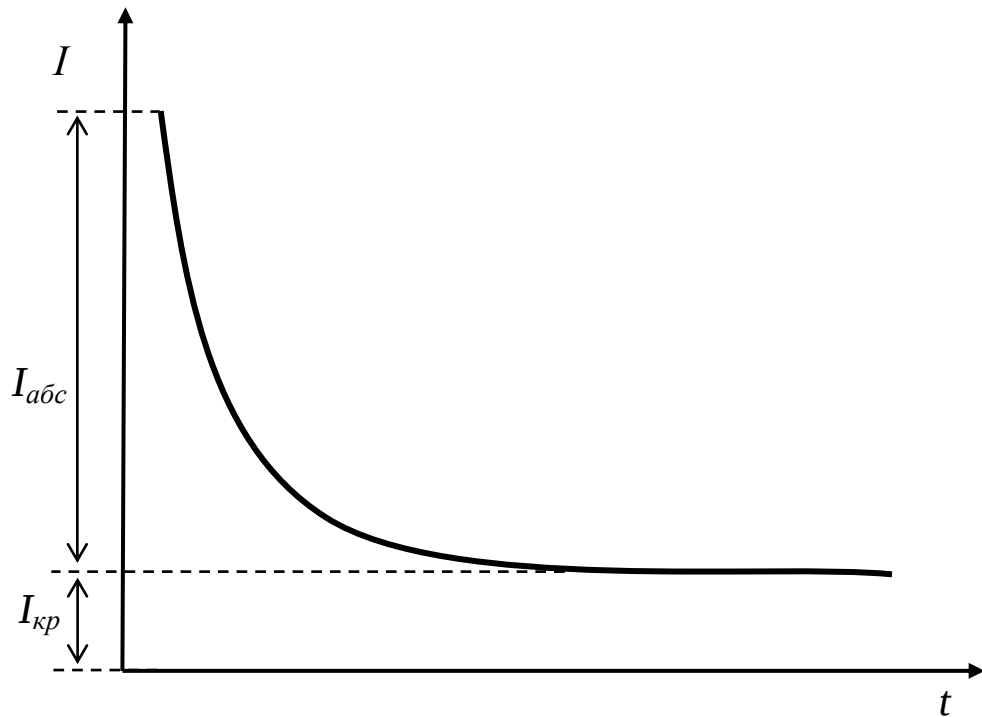


Рисунок 3.4 – Залежність струму I , що протікає в діелектрику від часу прикладення постійної напруги t

Струм зміщення викликаний як миттєвими, так і уповільненими видами поляризації. В першому випадку, із-за миттєвого протікання електронної та іонної поляризації $I_{зм}$ не вдається зареєструвати. В другому випадку струм зміщення, викликаний уповільненими видами поляризації спостерігається у технічних діелектриків на протязі декількох хвилин і називається **струмом абсорбції** $I_{абс}$ (абсолютна різниця між початковим та кінцевим струмом витоку) (рисунок 3.4).

Значення струму, що встановився з часом після прикладення постійної напруги називається **струмом крізної провідності** – **крізним струмом** (рисунок 3.4). Цей струм спричи-

няється зарядами, які рухаються через увесь діелектрик і іонізуються біля електродів.

За струмом крізної провідності оцінюють провідність діелектрика. Опір діелектрика визначається за формулою:

$$R_{кр} = \frac{U}{I - \sum I_n} = \frac{U}{I - I_{абс}} = \frac{U}{I_{кр}}, \quad (3.10)$$

де U – прикладена напруга, В;

I – струм в момент прикладення до діелектрика постійної напруги, А;

$\sum I_n = I_{абс}$ – сума струмів (струм абсорбції), що викликані поляризаціями різного виду, А;

$I_{кр}$ – струм крізної провідності, А.

На практиці опір діелектрика $R_{кр}$ визначається як частка від ділення значення прикладеної до діелектрика напруги U на силу струму $I_{(60)}$, виміряну через 60 с після включення діелектрика під напругу:

$$R_{кр} = \frac{U}{I_{(60)}}. \quad (3.11)$$

Для порівняльної оцінки електроізоляційних матеріалів у відношенні їх електропровідності використовують значення питомого опору постійному струму ρ (об'ємного та поверхневого) та питомої провідності γ (об'ємної та поверхневої).

Питомим об'ємним опором ρ_v називається опір зразка діелектричного матеріалу у вигляді куба з ребром одиничних розмірів (рисунок 3.5), коли напругу прикладено до його двох протилежних граней:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h}, \quad R_v = \rho_v \frac{h}{S}, \quad (3.12)$$

де R_v – об'ємний опір зразка матеріалу постійному струму, Ом;
 S – площа електродів, що знаходяться в контакті із зразком, м²;
 h – товщина зразка, м.

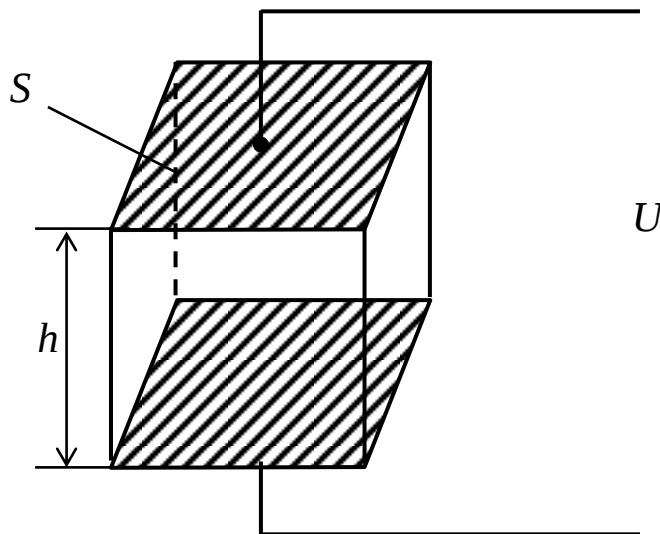


Рисунок 3.5 – Визначення питомого об'ємного опору діелектрика

Питомий об'ємний опір ρ_v вимірюється в Ом·м, він відображає властивості матеріалу і особливості його структури та будови .

Питомим поверхневим опором ρ_s називається опір квадрата будь-якої величини, на поверхні матеріалу (рисунок 3.6), причому струм проходить через дві протилежні сторони квадрата:

$$\rho_s = R_s \frac{l}{h}, \quad R_s = \rho_s \frac{h}{l}, \quad (3.13)$$

де R_s – поверхневий опір зразка матеріалу, Ом;

h – відстань між електродами, м;

l – довжина електроду, м.

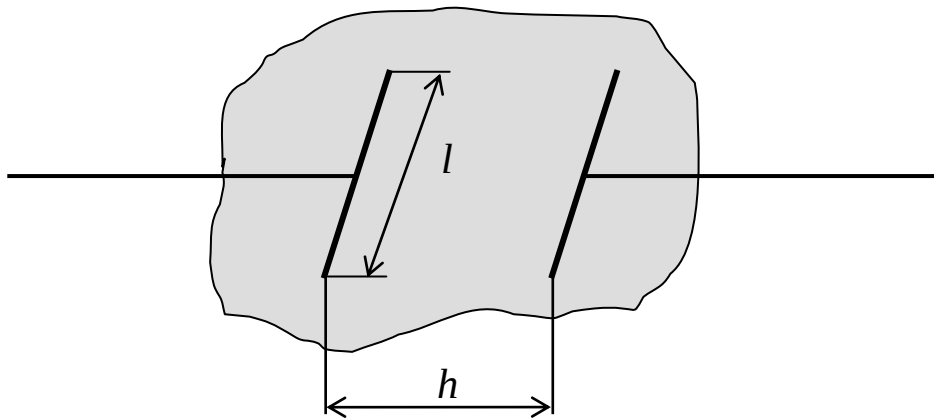


Рисунок 3.6 – Визначення питомого поверхневого опору діелектрика

Питомий поверхневий опір ρ_s вимірюється в омах (Ом), і залежить від стану поверхні матеріалу (зволоження, утворення плівок, забрудненості та інших факторів).

Питомі опори ρ_v та ρ_s залежать від зміни вологості матеріалу. При підвищенні вологості вони зменшуються.

Також питомий опір діелектриків залежить від температури. Для більшості діелектриків він зменшується із підвищенням температури. Ця залежність характеризується температурним коефіцієнтом питомого опору TK_ρ (α_ρ):

$$TK_\rho = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 (t_2 - t_1)} \quad (3.14)$$

де ρ_2, ρ_1 – питомі електричні опори матеріалу відповідно при температурах t_2 та t_1 .

Електропровідність діелектричних матеріалів також залежить від їх агрегатного стану.

Електропровідність газів пояснюється кінетичною теорією газів, за якою усі вільні електрони та іони знаходяться у безперервному хаотичному тепловому русі. Прикладення напруги створює направлений рух вільних зарядів – електричний струм, або струм витоку. На рисунку 3.7 показано залежність струму витоку від прикладеної напруги.

На першій ділянці кривої, від 0 до напруги насичення U_n , яка відповідає слабким електричним полям, струм витоку дуже малий і пропорційний напруженості – число направлених зарядів зростає із зростанням прикладеної напруги.

По мірі зростання прикладеної напруги настає насичення – усі утворені заряди досягають своїх електродів і струм перестає залежати від напруги (ділянка $U_n - U_k$).

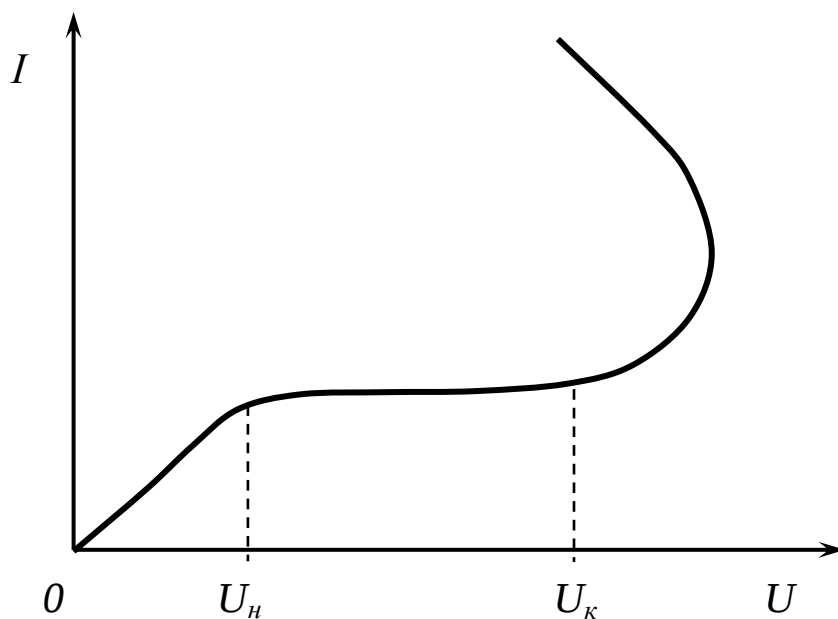


Рисунок 3.7 – Залежність струму витоку у газах від прикладеної напруги

Значне збільшення прикладеної напруги до критичного значення U_k приводить до появи великої кількості вільних зарядів (явище ударної іонізації), що супроводжується різким збільшенням струму витоку, який продовжує зростати навіть при зменшенні напруги на електродах. Для повітря при нормальних умовах $U_k = 10 \cdot 10^6$ В/м.

Електропровідність рідких діелектриків пов'язана із будовою молекул і в значній мірі залежить від домішок що присутні в діелектрику. Струм в рідині обумовлюється не тільки рухом іонів, а й рухом великих колоїдних часток. Полярні рідини мають підвищену електропровідність в порівнянні із неполярними, а сильно полярні рідини можуть розглядатися як провідники. Очищення діелектриків знижує їх електропровідність.

Залежність струму витоку від напруженості поля для чистих діелектричних рідин така ж як і у газів (рисунок 3.7). Для рідин з домішками відсутня ділянка насичення ($U_n - U_k$). При значному підвищенні напруженості поля в рідинах, зростання струму відбувається за рахунок ударної іонізації газу, що розчинений в рідині.

Питома електропровідність будь-якої рідини значно залежить від температури. Так при підвищенні температури, у зв'язку із зменшенням в'язкості, зростає рухомість іонів, що веде до підвищення провідності.

Електропровідність твердих тіл обумовлюється переміщенням іонів як самого діелектрика так і домішок. У деяких твердих діелектриків електропровідність може бути викликана наявністю вільних електронів.

В твердих діелектриках іонної будови при низьких температурах електропровідність обумовлена рухом слабо закріплених іонів домішок, а при високих температурах звільняються і деякі іони із вузлів кристалічної решітки основної речовини.

В діелектриках із атомною або молекулярною решіткою електропровідність пов'язана лише із наявністю домішок, питома електропровідність таких матеріалів дуже мала.

Як відмічалось вище, тверді діелектрики характеризуються додатково поверхневою електропровідністю, яка пов'язана із зволоженням поверхні матеріалу, або із її забрудненістю.

Адсорбція вологи на поверхні діелектрика тісно пов'язана із відносною вологістю оточуючого середовища. З цього слідує,

що відносна вологість повітря є важливим фактором, який визначає значення питомої поверхневої електропровідності діелектрика. При відносній вологості 70...80 % і більше спостерігається різке зменшення питомого поверхневого електричного опору матеріалу.

Для твердих діелектриків характерним також є спадання струму із плином часу, після прикладення до них постійної напруги (рисунок 3.4).

Діелектричні втрати

Діелектричні втрати – це втрати електричної потужності в діелектрику під дією прикладеної напруги, які ведуть до нагрівання діелектрика. Діелектричні втрати в діелектрику викликані електропровідністю та повільними видами поляризації.

При постійній напрузі діелектричні втрати визначаються лише силою крізного струму. При змінній напрузі до цих втрат додаються втрати, обумовлені поляризаціями різного виду та наявністю домішок в матеріалі.

Втрати потужності у простому діелектрику під впливом змінної напруги можна визначити за формулою:

$$P_a = UI_a, \quad (3.15)$$

де U – прикладена до діелектрика напруга, В;

I_a – активна складова струму, що протікає через діелектрик, А.

Відомо, що при змінній напрузі, вектор струму, що протікає через діелектрик, випереджає вектор прикладеної напруги на кут φ , цей струм має дві складові (рисунок 3.8) – активну I_a та реактивну I_p .

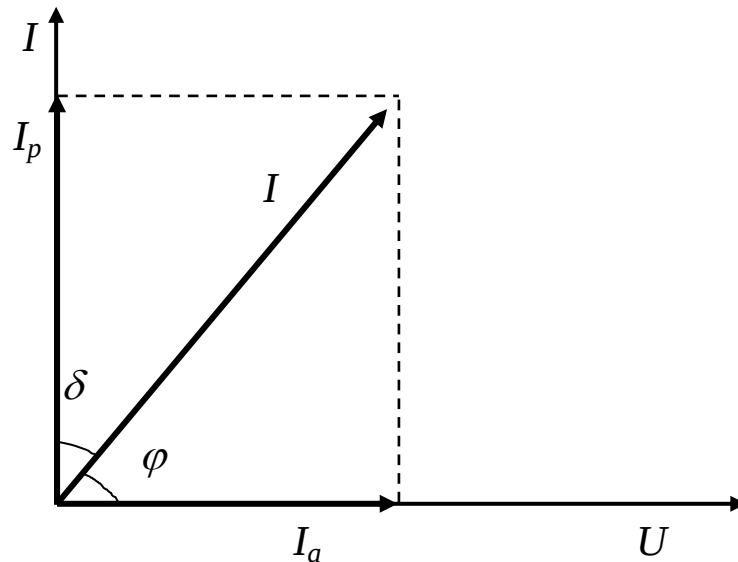


Рисунок 3.8 – Векторна діаграма струмів у діелектрику

Із векторної діаграми слідує:

$$I_a = I_p \operatorname{tg} \delta, \quad (3.16)$$

де δ – кут між вектором струму I та його реактивною складовою I_p .

Тоді вираз (3.15) прийме наступний вигляд:

$$P_a = UI_p \operatorname{tg} \delta. \quad (3.17)$$

$$I_p = I_c = \frac{U}{X_c} = U\omega C, \quad (3.18)$$

де ω – кутова частота, рад/с;

C – ємність конденсатора при кутовій частоті ω , Ф.

Остаточно формула для визначення діелектричних втрат в діелектрику прийме вигляд:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (3.19)$$

Як видно із виразу (3.19) втрати потужності в діелектрику пропорційні тангенсу кута δ , який називається кутом діелектричних втрат, або просто кутом втрат.

Кутом діелектричних втрат називається кут δ , який доповнює до 90° кут зсуву фаз φ між струмом та напругою в колі із електричною ємністю.

У випадку ідеального діелектрика, вектор струму у такому колі буде випереджувати вектор напруги на 90° , при цьому $\operatorname{tg} \delta$ буде дорівнювати нулю.

Повні втрати в діелектрику залежать від його розмірів, тому при випробуванні зручно вимірювати не самі втрати, а $\operatorname{tg} \delta$, який не залежить від розмірів і форми діелектрика, а визначається лише властивостями матеріалу.

Із виразів (3.16) та (3.19) можна записати:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p}, \quad \text{або} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{P_a}{U^2 \omega C}. \quad (3.20)$$

Чим більше значення $\operatorname{tg} \delta$, тим нижча якість діелектрика і нижчі його діелектричні властивості. У кращих твердих і рідких діелектриків $\operatorname{tg} \delta$ – величина порядку тисячних і десятитисячних часток одиниці (для конденсаторного масла $\operatorname{tg} \delta = 0,0002$). Для діелектриків нижчої якості $\operatorname{tg} \delta = 0,01 \dots 0,1$.

Величина $\operatorname{tg} \delta$ залежить від температури (у більшості випадків зростає із збільшенням температури). При зволоженні ізоляції $\operatorname{tg} \delta$ зростає. Також він може залежати від частоти.

Велике значення має залежність $\operatorname{tg} \delta$ від напруги. Аналізуючи вираз (3.20) можна зробити висновок, що діелектричні втрати набувають серйозного значення для матеріалів які використовуються у високовольтних установках, у високочастотних апаратах і, особливо, у високовольтних високочастотних пристроях, так як діелектричні втрати в діелектриках пропорційні квадрату прикладеної напруги до діелектрика і її частоті.

За зростанням $\operatorname{tg} \delta$ із підвищенням температури можна судити про наявність газових включень у твердій ізоляції, які значно погіршують властивості діелектриків.

Електрична міцність діелектриків

Електрична ізоляція не може витримувати без пошкодження необмежено велику напругу. При поступовому збільшенні напруги до критичного значення відбувається пробій ізоляції. Напругу при якій відбувається пробій називають **пробивною напругою**, а відповідну напруженість поля називають **пробивною напруженістю**, або **електричною міцністю** матеріалу.

Під час пробою в газоподібному діелектрику утворюється канал газорозрядної плазми. В рідких діелектриках у місці пробою відбувається закипання рідини і активне виділення газів. В твердих діелектриках відбувається пропікання отвору в місці пробою із утворенням продуктів руйнування матеріалу, які мають високу електропровідність.

Пробивну напруженість поля, що припадає на одиницю товщини електроізоляційного матеріалу, визначають за формулою:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \quad (3.21)$$

де U_{np} – величина прикладеної до діелектрика напруги при якій відбувся пробій, В;

h – товщина діелектрика в місці пробою, м.

Електричну міцність діелектриків зручно виражати в кВ/мм, або в МВ/м ($1\text{кВ/мм} = 1\text{МВ/м}$).

Пробивна напруга U_{np} є характеристикою шару ізоляції певної товщини, або всієї електроізоляційної конструкції.

Електрична міцність E_{np} характеризує безпосередньо ізоляційний матеріал, а не електроізоляційну конструкцію.

Виходячи із сказаного вище, високу пробивну напругу ізоляції можна отримати:

- збільшенням товщини ізоляції;
- вибором більш якісного діелектрика.

У твердих діелектриків окрім пробою через об'єм матеріалу можливий пробій (перекриття) по поверхні – поверхневий пробій.

Механізми пробою діелектричних матеріалів різного агрегатного стану суттєво відрізняються.

Робоча напруга, прикладена до ізоляції, завжди повинна бути меншою за пробивну напругу. Електрична ізоляція повинна мати запас електричної міцності.

3.1.2 Фізико-хімічні властивості діелектриків

До характеристик, що описують фізико-хімічні властивості діелектриків відносяться: кислотність (кислотне число), в'язкість, гігроскопічність, водопоглинання, хімоустійкість, тропікоустійкість та ін.

Кислотність (кислотне число K_m) – характеристика рідких діелектриків, вона визначається кількістю їдкого калію (KOH), яка необхідна для нейтралізації усіх вільних кислих з'єднань (кислот), що входять до складу 1 граму електроізоляційної рідини.

Наявність вільних кислот в діелектрику підвищує його електропровідність і приводить до руйнування матеріалів, з якими контактує діелектрик. Чим менше кислотне число, тим вища якість діелектрика. Наприклад, для свіжого (сухого) трансформаторного масла кислотне число повинно бути не більше $0,05 \cdot 10^{-3}$ гKOH/г.

Гігроскопічність – здатність матеріалу поглинати пари води із оточуючого середовища. Гігроскопічність матеріалу визначається за формулою:

$$W_r = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%, \quad (3.22)$$

де m_1 – маса сухого зразка матеріалу, кг;

m_2 – маса зразка після витримання його в умовах відносної вологості 96...98% на протязі 24...48 годин, кг.

Підвищення вологості погіршує електричні властивості діелектриків.

Водопоглинання – здатність ізоляції вбирати (поглинати) воду. Водопоглинання матеріалу визначається за виразом:

$$W_B = \frac{m_3 - m_1}{m_1} \cdot 100\% \quad (3.23)$$

де m_1 – маса сухого зразка матеріалу, кг;

m_3 – маса зразка після витримувannya його у воді на протязі 24 годин, кг.

Зволоження діелектриків зменшує їх діелектричні властивості. Пористі матеріали більш гігроскопічні ніж щільні матеріали. Гігроскопічність анізотропних матеріалів залежить від їх структури.

В'язкість (внутрішнє тертя) – це властивість газів та рідин чинити опір переміщенню однієї їх частини відносно іншої.

Призначення рідкого діелектрика визначається його в'язкістю. В залежності від рівня в'язкості рідкі діелектрики можуть використовуватись в якості матеріалу для просочування, в якості середовища для охолодження, або в якості середовища для гасіння дуги. В'язкість рідини в значній мірі залежить від температури, тому правила технічної експлуатації регламентують значення в'язкості рідких діелектриків при певній температурі.

Для оцінки коефіцієнта внутрішнього тертя рідини визначають кінематичну і умовну в'язкість рідких діелектриків.

Кінематична в'язкість – це відношення динамічної в'язкості до густини електроізоляційної рідини:

$$\nu = \frac{\eta}{D}, \quad (3.24)$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с;
 D – густина рідини, кг/м³.

Умовна в'язкість – відношення часу витікання рідини, що досліджується до часу витікання такого ж об'єму дистильованої води при температурі 20 °С.

Кінематична в'язкість вимірюється в м²/с, а умовна в'язкість – в умовних одиницях. Кінематична в'язкість трансформаторного масла при 20°С повинна дорівнювати 17...18,5·10⁻⁶ м²/с.

У всіх рідин зі зростанням температури в'язкість зменшується. Це пояснюється зменшенням сил взаємозв'язку між частинками рідини.

Хімоустійкість – здатність матеріалів протистояти хімічно активним речовинам. Для визначення хімоустійкості матеріали поміщують в агресивне середовище, а потім визначають зміну їх маси, зовнішнього вигляду та інших показників.

3.1.3 Теплові властивості діелектриків

До характеристик, що описують теплові властивості діелектриків відносяться: температура застигання (морозостійкість), температура спалаху, нагрівостійкість, теплоємність та ін.

Температура застигання (морозостійкість) – це здатність електричної ізоляції працювати при низьких температурах без значного погіршення своїх експлуатаційних характеристик.

За морозостійкість приймають температуру при якій ізоляційна рідина застигає настільки, що при нахилі пробірки із охолодженою рідиною на кут 45° її рівень залишається незмінним на протязі 1 хвилини. Для трансформаторного масла вона становить -45 та -35°C , відповідно, для північних та для південних широт.

Температура спалаху рідкого діелектрика – температура при якій суміш його парів з повітрям спалахує при піднесенні невеликого полум'я. Чим вища температура спалаху тим краще діелектрик. Для трансформаторного масла вона повинна бути не нижче 135°C . Температура спалаху визначається приладом ПВНЕ. До виміряної під час досліду температури додається поправка на барометричний тиск:

$$\Delta T = 0,91(0,1 - P) \cdot (273 + T), \quad (3.25)$$

де P – атмосферний тиск, МПа ($1\text{мм.рт.ст.} = 1,333 \cdot 10^{-4}$ МПа; $760\text{ мм рт. ст.} \approx 0,1$ МПа);

T – температура рідини, виміряна під час досліду, $^{\circ}\text{C}$.

Нагрівостійкість – здатність матеріалів та виробів із них тривало витримувати гранично допустиму високу температуру без ознак руйнування.

Нагрівостійкість визначається температурою, при якій відбуваються недопустимі зміни експлуатаційних характеристик діелектрика.

Матеріали, які використовують для ізоляції електричних машин та апаратів за нагрівостійкістю розділяють на сім класів. Класифікація електроізоляційних матеріалів за нагрівостійкістю наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Класи нагрівостійкості електроізоляційних матеріалів

Клас нагрівостійкості	Допустима робоча температура $T_{роб}, ^\circ\text{C}$	Діелектрики
У	90	Не просочені органічні волокнисті матеріали на основі целюлози та шовку (папір, картон, тканини), полістирол, поліетилен
А	105	Просочені лаками або іншими діелектричними сумішами органічні діелектрики, бавовняні та шовкові тканини, папір, картон а також поліамідні смоли та плівки
Е	120	Епоксидні, поліефірні та поліуретанові смоли, фенольно-формальдегідні пластмаси із органічними наповнювачами, лавсанові електроізоляційні плівки, гетинакс, текстоліт
В	130	Матеріали на основі слюди, склотканини, азбестові матеріали, компаунди із неорганічними наповнювачами
F	155	Матеріали на основі слюди, азбесту і скловолокна, просочені лаками підвищеної теплостійкості (епоксидними, поліефірними та кремнійорганічними)
Н	180	Кремнійорганічні лаки, а також композиційні матеріали, які складаються із слюди, азбесту, скляних волокон, склеєних за допомогою кремнійорганічних смол і лаків підвищеної нагрівостійкості
С	>180	Діелектрики неорганічного походження (кераміка, слюда, скло, азбест) без речовин що зв'язують. Органічні високо полімерні діелектрики (поліаміди та фторопласт-4)

3.1.4 Механічні властивості діелектриків

До основних механічних характеристик матеріалу відносяться: границя міцності при розтягуванні σ_p , границя міцності при стисненні σ_c , границя міцності при статичному згині $\sigma_{зг}$ і ударна в'язкість α .

Границю міцності при розтягуванні (σ_p , Па/м²) визначають на зразках матеріалу відповідної форми, при якій забезпечується рівномірний розподіл зусилля розтягування по площі перерізу в середній частині зразка. Зразок матеріалу потовщеними кінцями закріплюють у сталених затискачах випробувальної машини.

Нижній затискач машини нерухомий, а до другого докладають руйнівне (розтягуюче) зусилля F_p , яке плавно зростає із відповідною швидкістю до моменту розривання зразка. Границя міцності матеріалу при розтягуванні, обчислюється за формулою:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S_0}, \quad (3.26)$$

де F_p – руйнівне зусилля при розриві зразка матеріалу, Па;

S_0 – площа поперечного перерізу зразка до випробування, м².

Границя міцності матеріалу при стисненні (σ_c , Па/м²) визначається на зразках, які мають форму циліндра або куба. У формованих і пресованих пластмас ця характеристика визнача-

ється на зразках, виготовлених у вигляді циліндра, висотою $15 \cdot 10^{-3}$ м і діаметром $10 \cdot 10^{-3}$ м.

Зразок розташовують між сталйними плитами випробувального преса, до яких прикладають стягуюче навантаження. Навантаження підвищують з відповідною швидкістю до моменту руйнування зразка.

Границя міцності матеріалу при стисненні обчислюється за формулою:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{S_0}, \quad (3.27)$$

де F_c – руйнівне зусилля при стисненні зразка матеріалу, Па;
 S_0 – площа поперечного перерізу зразка до випробування, м².

Границю міцності матеріалу при статичному згині ($\sigma_{зг}$, Па/м²) визначають на зразках, які мають форму бруска прямокутного перерізу. Зразок матеріалу розміщують в випробувальній машині, де він своїми кінцями вільно спирається на дві сталеві опори. Згинальне зусилля $\sigma_{зг}$ прикладається до середини зразка крізь сталевий наконечник. Його плавно збільшують і доводять до величини, при якій зразок руйнується. Границя міцності матеріалу при статичному згині обчислюється за формулою:

$$\sigma_{зг} = 1,5 \frac{F_{зг} L}{bh^2}, \quad (3.28)$$

де $F_{зг}$ – зусилля згинання, Па;
 L – відстань між опорами у випробувальній машині, м;
 b – ширина зразка, м;
 h – товщина зразка, м.

Для більшості матеріалів (пластмаси) використовують бруски перерізом $10 \cdot 10^{-3} \times 15 \cdot 10^{-3}$ м, довжиною $120 \cdot 10^{-3}$ м.

Ударна в'язкість α (Дж/м²) – це відношення роботи ΔA , втраченої маятником на руйнування зразка, до площі його поперечного перерізу S_0 :

$$\alpha = \frac{\Delta A}{S_0} \quad (3.29)$$

Чим менша величина ударної в'язкості, тим більш крихкий матеріал.

Ударна в'язкість визначається на зразках матеріалу у вигляді брусків довжиною $120 \cdot 10^{-3}$ м та перерізом $15 \cdot 10^{-3} \times 10 \cdot 10^{-3}$ м (пластмаси), і у вигляді суцільних циліндрів. Зразок матеріалу укладають на дві сталі опори приладу для випробувань. По центру випробувального зразка наноситься удар сталевим наконечником, який падає з висоти сталевого маятника – відбувається згин.

3.2 Газоподібні діелектрики

Основними перевагами газів у порівнянні із іншими видами діелектричних матеріалів є: високий питомий опір, малий тангенс кута діелектричних втрат, низька діелектрична проникність.

Основним недоліком газоподібних діелектриків є порівняно низька електрична міцність.

До газоподібних діелектриків відноситься повітря, азот, вуглекислий газ, водень, гелій, неон, фреон, елєгаз та ін. Характеристики газоподібних діелектриків наведені в додатку (таблиця Д1).

Повітря – найбільш поширений газоподібний діелектрик. Повітря представляє собою суміш із: азоту N_2 (78,084 %), кисню O_2 (20,948 %), вуглекислого газу CO_2 (0,031 %), аргону Ar (0,934 %) інертних газів (0,1 %) та ін. Повітря використовується в сухих трансформаторах, електродвигунах, кабелях, конденсаторах, висовольтних вимикачах, повітряних лініях електропередачі. При напрузі в декілька кіловольт повітря є добрим електроізоляційним матеріалом.

Основні характеристики повітря: густина при $t = 0\text{ }^{\circ}C$ $D = 1,29\text{ кг/м}^3$; діелектрична проникність $\epsilon = 1$; електрична міцність $E_{пр} = 2...3\text{ МВ/м}$ ($2...3\text{ кВ/мм}$).

При зменшенні електричної міцності повітря, на проводах ліній електропередачі може виникати “корона” (пробій газу). “Корона” має вигляд голубуватого світіння і супроводжується потріскуванням, вона може переходити у іскровий розряд, а потім і в дугу. Явище “корони” пов’язане із значними втратами енергії.

Азот (N_2) – газ без кольору та запаху, має однакову із повітрям електричну міцність та діелектричну проникність ($E_{пр} = 2...3\text{ МВ/м}$, $\epsilon = 1$). Густина азоту при температурі $0\text{ }^{\circ}C$ $D = 1,25\text{ кг/м}^3$. Азот має меншу хімічну активність у порівнянні із повітрям. Завдяки цьому він часто застосовується для заповнення газових конденсаторів. Також азот використовується в маслонаповнених трансформаторах для захисту трансформаторного масла від контакту з киснем і вологою (азотний захист).

Водень (H_2) – дуже легкий газ без кольору та запаху, має високу питому теплопровідність і теплоємність. Густина водню

при температурі 0°C $D = 0,09 \text{ кг/м}^3$. Електрична міцність водню становить 60% від міцності повітря (1,2...1,8 МВ/м), діелектрична проникність $\varepsilon = 1$. Використовується водень в якості середовища для охолодження в електричних машинах великої потужності. При використанні водню, також, помітно зменшуються втрати енергії на тертя ротору машини в газі, та уповільнюється старіння органічної ізоляції обмоток машини. Водень також використовується в якості відновлювального середовища при паянні та термічній обробці металів.

Гелій (He) – інертний газ. Густина гелію при температурі 0°C становить $D = 0,18 \text{ кг/м}^3$. Гелій не горить та не підтримує горіння. Електрична міцність гелію в 17 разів менша міцності повітря (0,1...0,2 МВ/м). Застосовується в якості низькотемпературного хладогену.

Елегаз (SF_6 , гексафторид сірки) – штучний газ. Назва походить від виразу «електричний газ». Елегаз не токсичний, хімічно стійкий газ, не розкладається при нагріванні до 800°C , має в 2,5 рази більшу електричну міцність у порівнянні із повітрям ($E_{\text{пр}} = 6...9 \text{ МВ/м}$). Діелектрична проникність елегазу $\varepsilon = 1$, густина елегазу $D = 6,39 \text{ кг/м}^3$.

Використовується елегаз у газонаповнених конденсаторах, кабелях та у високовольтних вимикачах. Має значні переваги при підвищеному тиску. Основний недолік – висока вартість. Для зменшення вартості елегаз часто використовують у суміші із азотом.

Для заповнення електровакуумних приладів та ламп застосовуються інертні гази такі як: аргон, неон, ксенон та інші.

3.3 Рідкі діелектрики

Рідкі діелектрики використовуються в якості: просочувального середовища для волокнистої ізоляції, з метою підвищення її електричної міцності та теплопровідності; складової частини електроізоляційних лаків; середовища для охолодження та середовища для гасіння електричної дуги.

Рідкі діелектрики ділять на природні і синтетичні. Природні рідкі діелектрики в свою чергу ділять на рослинні олії та нафтові масла. Рослинні олії розділяють на олії, що висихають та на олії, що не висихають.

3.3.1 Природні рідкі діелектрики

Рослинні олії – це в'язкі рідини, які одержують при віджиманні насіння різних рослин. До олій, що висихають відносять *лляну* та *тунгову* олії. Густина лляної олії $D = 930 \dots 940 \text{ кг/м}^3$, тунгової – $D = 940 \text{ кг/м}^3$. Ці олії під впливом освітлення, нагрівання, або взаємодії із повітрям переходять у твердий стан. При цьому вони утворюють тверду ізоляційну плівку із високими ізоляційними властивостями. Для прискорення процесу висихання олій застосовують сикативи (речовини, що прискорюють процес висихання).

Перелічені вище олії використовуються для виготовлення ізоляційних лаків та лакотканин, вони міцні та вологостійкі. Недолік цих олій – здатність до старіння та низька стійкість до ароматичних вуглеводнів (бензолу).

До олій що не висихають відноситься **рицинова** олія. Густина рицинової олії $D = 950 \dots 970 \text{ кг/м}^3$, діелектрична проникність

$\varepsilon = 4 \dots 4,5$; $\operatorname{tg} \delta = 0,01 \dots 0,03$. Вона не розчиняється в бензині, але розчиняється в етиловому спирті, не викликає набухання гуми. Недоліком рицинової олії є низька термічна стабільність і здатність до загусання.

Рицинова олія використовується для просочування паперових конденсаторів.

Нафтові масла розділяють на **трансформаторні**, **кабельні** та **конденсаторні**. Останні відрізняються більш якісним очищенням та поліпшеними характеристиками. Нафтові масла одержують внаслідок перегонки нафти із наступним їх очищенням. Характеристики нафтових ізоляційних масел наведені в додатку (таблиця Д2).

Трансформаторне масло розділяють на чисте (сухе, свіже) та на експлуатаційне – те, що знаходиться у роботі. На сьогодні існують наступні марки трансформаторного масла: ТКп, ТАп, ТСП, Т-750, Т-1500, ГК. Вказані марки трансформаторного масла відрізняються за способом очищення.

Трансформаторне масло забезпечує надійну ізоляцію, поліпшує охолодження обмоток і магнітопроводу силових трансформаторів.

У масляних вимикачах масло охолоджує дугу і сприяє її швидкому гасінню. У кабелях із паперово-масляною ізоляцією і паперових конденсаторах масло поліпшує ізоляцію та збільшує ємність конденсаторів.

Розглянемо основні характеристики свіжого трансформаторного масла.

– Свіже трансформаторне масло має світло-жовтий колір, має легкий запах гасу. Під час експлуатації воно темніє. Сильне потемніння масла під час експлуатації зумовлене його перегріванням.

– Присутність сірки в маслі не допустима – сірка сприяє корозії металів.

– Густина трансформаторного масла повинна бути якомога меншою ($D = 850 \dots 900 \text{ кг/м}^3$), якщо це не впливає на інші його характеристики. При зменшенні густини, домішки, що присутні в маслі опускаються на дно баку трансформатора, виходячи при цьому із зони електромагнітного поля. При збільшенні густини домішки піднімаються на поверхню масла, при цьому можуть утворюватися струмопровідні містки, що в свою чергу може призвести до аварійного режиму роботи трансформатора.

– Кислотність свіжого масла (кислотне число) $K_m \leq 0,02 \text{ мгКОН/г}$.

– Діелектрична проникність при температурі 20°C та частоті 50 Гц $\varepsilon = 2,2 \dots 2,3$.

– Тангенс кута діелектричних втрат при температурі 20°C та частоті 50 Гц $\text{tg}\delta \geq 0,003$.

– Питомий об'ємний опір $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

– Електрична міцність $E_{\text{пр}} = 25 \dots 30 \text{ МВ/м}$.

– Температура спалаху $T_{\text{сп}} \geq 135 \dots 140^\circ\text{C}$.

– Температура застигання $T_{\text{заст}} \leq -35 \dots -45^\circ\text{C}$.

– Кінематична в'язкість при 20°C $\nu \leq 17 \dots 18,5 \text{ м}^2/\text{с}$.

Кабельні масла розділяють по в'язкості: масла малої в'язкості (МН-2; МН-4), масла середньої в'язкості (С-110) та в'язкі масла (С-220; КМ-25).

Малов'язкі масла МН-2 та МН-4 використовують в маслонаповнених кабелях низького і середнього тиску (до $3 \cdot 10^5$ Па), мала в'язкість масла для таких кабелів необхідна для того, щоб забезпечити підживлення кабелю маслом через порівняно невеликі канали при експлуатаційних температурах.

Середньов'язке масло С-110 призначається для просочування і заповнення маслонаповнених високовольтних кабелів напругою 110 кВ і вище при тиску біля $P = 14 \cdot 10^5$ Па. Ці масла не мають в своєму складі ні ароматичних вуглеводнів, ні смолистих речовин. Вони являють собою технічно чисту суміш нафтових і парафінових вуглеводнів, тому володіють стійкими електричними характеристиками.

Кабельне масло марки С-220 використовується в маслонаповнених кабелях високого тиску.

Найбільш в'язке масло КМ-25 використовують для силових кабелів з паперовою ізоляцією напругою до 35 кВ, в яких просочувальною рідкою речовиною є нафтове масло з розчиненою в ньому каніфоллю.

В цих кабелях рідка ізоляція не перебуває під надмірним тиском, і висока в'язкість просочувального масла дає змогу уникнути перетікання його в кабелі при похилому і вертикальному прокладанні кабелю.

Основні параметри кабельних нафтових масел наступні: густина $D = 840 \dots 900 \text{ кг/м}^3$; кінематична в'язкість при $t = 20^\circ\text{C}$ $\nu = 40 \text{ м}^2/\text{с}$ (МН-4), $\nu = 800 \text{ м}^2/\text{с}$ (С-220); кислотне число $K_M = 0,02 \dots 0,07 \text{ мгКОН/г}$; тангенс кута діелектричних втрат при $t = 20^\circ\text{C}$ та $f = 50 \text{ Гц}$ $\text{tg}\delta = 0,002 \dots 0,005$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 15 \dots 21 \text{ МВ/м}$.

Конденсаторне масло одержують із трансформаторного нафтового масла шляхом додаткового очищення у вакуумі з метою видалення із нього розчиненого повітря. Конденсаторне масло характеризується підвищеними діелектричними характеристиками та меншими діелектричними втратами ($\text{tg}\delta = 0,0002 \dots 0,0015$). Його використовують для просочування ізоляції в паперових та плівкових конденсаторах, що дозволяє зменшити їх габаритні розміри, масу та вартість.

Основні недоліки нафтових масел це низька температура спалаху, висока горючість та низька діелектрична проникність. При роботі в електричних апаратах, внаслідок окислення масло старіє. Властивості експлуатаційного масла відновлюють шляхом його очищення (регенерації).

3.3.2 Синтетичні рідкі діелектрики

Синтетичні рідкі діелектрики застосовують в тих випадках, коли необхідно забезпечити тривалу роботу електричних апаратів при підвищених теплових навантаженнях та високій напруженості електричного поля в пожежо- та вибухонебезпечному середовищі. До синтетичних рідких діелектриків відносяться рідини на основі хлорованих вуглеводнів, кремнійорганічних та фторорганічних з'єднань. Їх характеристики наведені в додатку (таблиця ДЗ).

Хлоровані вуглеводні одержують шляхом заміщення деяких, або навіть усіх атомів водню атомами хлору в різних вуглеводнів. До цієї групи входять: совол, совтол, гексол та ін.

Совол ($C_{12}H_5Cl_5$, пентахлордифеніл) – це негорюча, полярна, в'язка, прозора, безбарвна, токсична та біологічно шкідлива рідина з діелектричною проникністю $\varepsilon = 5,2$. Широко застосовується для просочування паперових низьковольтних конденсаторів, ємність останніх підвищується на 50 % у порівнянні із масляними.

Основні характеристики: густина $D = 1500 \dots 1560 \text{ кг/м}^3$; електрична міцність при температурі 20°C $E_{\text{пр}} \geq 18 \dots 20 \text{ МВ/м}$; $\text{tg } \delta = 0,002 \dots 0,0004$; питомий об'ємний опір $\rho = 10^9 \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; кислотне число $K_{\text{м}} = 0,02 \text{ мгКОН/г}$; кінематична в'язкість при температурі 20°C $\nu = 40 \dots 70 \text{ м}^2/\text{с}$.

Переваги: не горючий, не окислюється на повітрі.

Недоліки: совол відноситься до **високо токсичних** та **біологічно шкідливих** сполук, має високу в'язкість та відносно велику вартість.

Совтол (совтол-2, совтол-10) – це суміш соволу із трихлорбензолом. За діелектричними властивостями та в'язкістю він наближається до трансформаторного масла. Совтол вибухо- та пожежобезпечний, допускає робочу температуру до 150°C . Основні характеристики совтолу-10: густина $D = 1510 \dots 1530 \text{ кг/м}^3$; електрична міцність при 20°C $E_{\text{пр}} = 20 \dots 22 \text{ МВ/м}$; діелектрична проникність $\varepsilon = 4,3$.

Совтол застосовується в силових трансформаторах. Об'єм таких трансформаторів на 30...50 % менший ніж масляних, вони пожежо- та вибухобезпечні, не потребують додаткових огорожень.

Недоліки: висока **токсичність**; совтол активно розчиняє органічні матеріали, тому може застосовуватись лише в комплексі з неорганічною ізоляцією із скла або слюди.

У зв'язку із високою токсичністю хлорованих вуглеводнів їх застосування спочатку обмежувалося, а потім було повністю заборонено, але на даний час значна їх кількість ще знаходиться в експлуатації.

Кремнійорганічні рідкі діелектрики (ПЕСЖ, ПЕС-Д та ін) – полімери із низьким ступенем полімеризації, в молекулах яких є сілоксанна група (Si_2O). Ці рідини не токсичні та екологічно безпечні. До них відносяться поліметилсилоксанові (ПМС-10, ПМС-20, ПМС-50, ПМС-60), поліетиленсилоксанові (ПЭС-Д, ПЭС-3), поліметилфенилсилоксанові (ФМ-5, ФМ-1322) та поліхлор(фтор)органосилоксанові (ФС-5, ХС-2-1, ФС-56) рідини.

Кремнійорганічні рідини не горючі, хімічно інертні, мають низьку температуру застигання ($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$), низьку гігроскопічність та підвищену нагрівостійкість (можуть довго працювати при температурі $T_{\text{роб}} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ і короткочасно при $T_{\text{роб}} = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$). Вони характеризуються незначною залежністю в'язкості від температури. Ці рідини мають наступні характеристики: густина $D = 940 \dots 1145\text{ кг/м}^3$; температура спалаху $T_{\text{сп}} = 150 \dots 320\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура застигання $T_{\text{заст}} = -60 \dots -110\text{ }^{\circ}\text{C}$; питомий об'ємний опір $\rho = 10^{10} \dots 10^{12}\text{ Ом}\cdot\text{м}$; діелектрична проникність при частоті 50 Гц та температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\epsilon = 2,4 \dots 5,8$; $\text{tg}\delta = 0,0002 \dots 0,002$ (при 100 Гц і $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), електрична міцність $E_{\text{пр}} = 15 \dots 20\text{ МВ/м}$.

Кремнійорганічні рідини застосовуються в імпульсних трансформаторах та конденсаторах, які працюють при низьких та високих температурах.

Фторорганічні рідкі діелектрики (фреони) – це похідні вуглеводнів у яких атоми водню, частково, або повністю заміщені фтором (хладон 112, хладон 114 та ін).

Фторорганічні рідини мають підвищену нагрівостійкість (до 300 °C), не горючі, хімічно стабільні, не гігроскопічні, пожежо- та вибухо безпечні.

Застосовуються для просочування та заливки конденсаторів, трансформаторів. Характеристики фторорганічних рідин: $\operatorname{tg} \delta = 0,0001 \dots 0,0002$; $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\varepsilon = 2,2 \dots 2,5$; $E_{\text{пр}} = 15 \dots 20 \text{ МВ/м}$.

Фторорганічні рідини здатні значно підвищити відвід тепла силових трансформаторів. При заміні трансформаторного масла на фторорганічну рідину відвід тепла покращується в декілька разів.

Недолік: при високих температурах вони токсичні, а це потребує додаткової герметизації апаратів в яких використовуються ці рідини.

3.4 Тверді органічні діелектрики

Органічні матеріали – це матеріали до складу яких входить вуглець. В якості органічних твердих діелектриків використовуються як натуральні (природні) так і синтетичні (штучні) полімери, які одержують методом хімічного синтезу. Вказані матеріали іноді ще називають **смолами**.

Смоли – це складні суміші органічних речовин, головним чином високомолекулярних. При досить низьких температурах смоли представляють собою аморфні склоподібні матеріали, які в більшій або меншій мірі крихкі. При нагріванні смоли стають пластичними і в подальшому – рідкими. Смоли, в своїй більшості, не розчиняються у воді, але добре розчиняються в органічних розчинниках. Смоли володіють властивістю склеювання, і при охолодженні, або при випаровуванні розчинника вони міцно пристають до твердих тіл, які знаходяться із ними в контакті.

Деякі тверді органічні діелектрики – **низькомолекулярні речовини**. До складу молекули таких речовин входить декілька десятків або сотень атомів. До низькомолекулярних органічних речовинам відноситься, наприклад, парафін.

Більшість органічних твердих діелектриків – це **високомолекулярні речовини** до складу яких входять тисячі, сотні тисяч атомів або простих молекул. Основу багатьох високомолекулярних діелектриків становлять полімерні з'єднання, які одержують із мономерів (низькомолекулярних з'єднань) в процесі хімічної реакції **полімеризації** або **поліконденсації**.

Полімеризація – процес з'єднання великої кількості мономерів із утворенням нової високомолекулярної речовини (полімеру) без виділення побічних продуктів реакції.

Поліконденсація – процес з'єднання різнорідних мономерів із утворення полімеру та виділенням побічних продуктів реакції.

Властивості полімерів визначаються їх хімічним складом, взаємним розташуванням атомів та будовою молекул.

За будовою молекул полімери розділяються на *лінійні* (ниткоподібні) та *просторові* (сітчасті).

Лінійні полімери представляють собою поєднання ланцюгів якоїсь однієї певної структури. Поєднання двох або трьох хімічно різних ланцюгів утворюють полімери, які називаються *суміщеними*, або *співполімерами*.

Лінійні полімери відносяться до термопластичних матеріалів. Вони мають аморфну структуру, при нагріванні плавно переходять в рідкий стан.

Просторові полімери – це полімери в яких макромолекули пов'язані між собою поперечними хімічними зв'язками. Просторові полімери відносяться до термопластичних матеріалів. Вони більш жорсткі, при нагріванні не пом'якшуються, не здатні утворювати плівки та волокна, не розчиняються в розчинниках.

Як відмічалось вище за тепловими властивостями полімери розділяються на *термопластичні* та *термореактивні*.

Термопластичні полімери (смоли) характеризуються двома стадіями стану – вихідним, та під час нагрівання. При нагріванні вони розплавляються, їх хімічний склад при цьому не змінюється, вони легко розчиняються в розчинниках, їх можна використовувати неодноразово. При подальшому значному нагріванні вони випаровуються і руйнуються.

Термореактивні полімери при нагріванні розплавляються, а потім зазнають незворотних змін – вони запікаються і набувають значної механічної міцності. При цьому вони втрачають

властивість плавитися і розчинятися в розчинниках. Вони не піддаються повторній обробці.

Полімери (смоли) широко застосовують у вигляді основи, або складової частини лаків, емалей, компаундів, пластичних мас, шаруватих пластиків, плівок, електроізоляційних стрічок, ізоляційних оболонок, синтетичних волокнистих матеріалів та ін.

За походженням смоли розділяють на природні та синтетичні.

3.4.1 Природні смоли

Природні смоли – це продукт життєдіяльності рослин та живих організмів. До них відносяться каніфоль, шелак та копали.

Каніфоль – це суміш органічних кислот, яку одержують шляхом відгонки рідких фракцій живиці (смоли хвойних дерев).

Електроізоляційні властивості каніфолі: $\rho = 10^{13} \dots 10^{14}$ Ом·м; $E_{\text{пр}} = 10 \dots 15$ МВ/м; $\text{tg}\delta = 0,003$; $\varepsilon = 2,4 \dots 5,8$; температура розм'якшення $T_{\text{розм}} = 70$ °С.

Каніфоль застосовується у складі покривних лаків та заливних компаундів з метою уповільнення їх старіння, прискорення висихання та підвищення діелектричних характеристик. Каніфоль добре розчиняє окис міді при підвищеній температурі, тому вона широко застосовується у якості флюсу для паяння міді.

Шелак – матеріал, який одержують шляхом очищення гумілаку (виділення деяких тропічних комах на деревах).

Шелак добре розчиняється у спирті, частково розчиняється в ацетоні, майже не розчиняється в бензині. Розплавлений шелак сумісний із каніфоллю, копалами, гліфталями та бітумами.

Шелак має наступні характеристики: $D = 1000 \dots 1040 \text{ кг/м}^3$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 20 \dots 30 \text{ МВ/м}$; $\text{tg } \delta = 0,001 \dots 0,01$; питомий об'ємний опір $\rho = 10^{13} \dots 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 2,4 \dots 5,8$; температура розм'якшення $T_{\text{розм}} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Шелак застосовують у складі лаків для склеювання, для виготовлення ізоляції на основі слюди.

Копали (бурштин) – викопна смола рослин, які існували десятки тисяч років тому. Основною перевагою полірованого бурштину є те, що його поверхневий опір майже не залежить від вологості. Він практично не розчиняється в будь-яких розчинниках. Температура плавлення $T_{\text{пл}} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$.

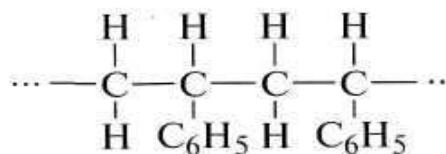
Застосовують бурштин в якості добавки до лаків, його застосування дуже обмежене із-за високої вартості.

3.4.2 Полімеризаційні синтетичні полімери

Полімеризаційні синтетичні полімери одержують в процесі полімеризації під дією теплоти, тиску, ультрафіолетового проміння, а також під дією ініціаторів і каталізаторів. Найбільш поширеними є блочний, емульсійний, лаковий та газовий способи полімеризації.

До полімеризаційних синтетичних полімерів відносяться полімерні вуглеводи (полістирол, поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид, вініпласт, поліметилметакрилат), фторорганічні полімери, кремнійорганічні полімери (полісілоксани).

Полістирол – твердий прозорий, неполярний діелектричний матеріал із високими електроізоляційними властивостями – продукт полімеризації мономерного стиролу:

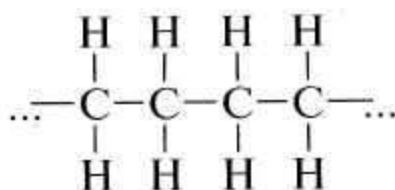


Основні характеристики полістиролу: густина $D = 1050 \dots 1080 \text{ кг/м}^3$; температура розм'якшення $T_{\text{розм}} = 110 \dots 120 \text{ }^\circ\text{C}$; теплостійкість за Мартенсом становить $75 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$; низьке значення тангенса кута діелектричних втрат (при частоті $50 \dots 10^7 \text{ Гц}$ $\text{tg}\delta = 0,002 \dots 0,0006$); діелектрична проникність $\varepsilon = 2,5 \dots 3,0$; питомий об'ємний опір $\rho = 10^{13} \dots 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; питомий поверхневий опір $\rho = 10^{16} \text{ Ом}$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 25 \dots 30 \text{ МВ/м}$; низька гігроскопічність; не розчиняється у спиртах; стійкий до дії лугів та деяких кислот. Тривало допустима робоча температура до $105 \text{ }^\circ\text{C}$.

До недоліків полістиролу можна віднести крихкість при низьких температурах, схильність до старіння, розчинність в ароматичних вуглеводнях та хлороформі, низька нагрівостійкість.

Полістирол застосовують для виготовлення каркасів котушок індуктивності, корпусів радіоапаратури, ізоляції кабелів та конденсаторів, для виготовлення електроізоляційних плівок.

Поліетилен – твердий білий (світло-сірий) матеріал без запаху, неполярний діелектрик, який одержують шляхом полімеризації етилену:



Електроізоляційні властивості поліетилену аналогічні властивостям полістиролу, але він відрізняється високою стабільністю. Розрізняють поліетилен високого, середнього та низького тиску.

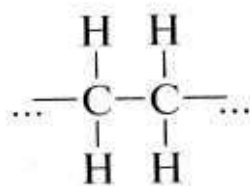
Основні характеристики поліетилену: густина $D = 1110 \dots 1150 \text{ кг/м}^3$; тангенс кута діелектричних втрат при частоті 10^3 Гц $\text{tg}\delta = 0,0002$; діелектрична проникність $\epsilon = 2,3 \dots 2,4$ при 10^3 Гц ; питомий об'ємний опір $\rho_v = 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; питомий поверхневий опір $\rho_s = 10^{15} \text{ Ом}$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 45 \dots 55 \text{ МВ/м}$; тривало допустима робоча температура $T_{\text{роб}} = 90^\circ\text{C}$.

Поліетилен має високу морозостійкість (до -70°C), високу вологостійкість, стійкий до дії кислот, не розчиняється в розчинниках при кімнатній температурі, стійкий до стирання та до вібрацій.

До недоліків поліетилену відносять: теплове старіння та старіння під впливом ультрафіолетового випромінювання. Під впливом сильних електричних полів в поліетилені відбуваються структурні зміни.

Поліетилен використовують в якості конструкційного матеріалу для електротехнічних виробів, для виготовлення ізоляції проводів та кабелів.

Поліпропілен – лінійний неполярний полімер, який одержують шляхом полімеризації газу пропілену:

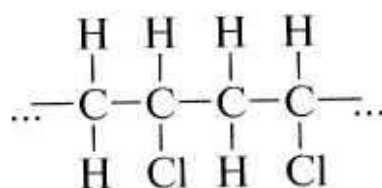


Поліпропілен має більш високу температуру розм'якшення $T_{\text{розм}} = 160 \dots 170^\circ\text{C}$, високу водостійкість, високі механічні влас-

тивості, більшу холодостійкість в порівнянні із поліетиленом, еластичний.

Поліпропілен використовують для виготовлення комбінованих паперово-плівкових матеріалів, для виготовлення ізоляційних плівок для конденсаторів, для виготовлення ізоляції проводів.

Полівінілхлорид – лінійний полярний полімер білого кольору, який одержують шляхом полімеризації газоподібного мономера вінілхлориду:



В порівнянні із неполярними полімерами полівінілхлорид має дещо нижчі діелектричні характеристики. Він не розчиняється у воді, бензині та спирті. Розчиняється полівінілхлорид в дихлоретані.

В залежності від кількості введеного пластифікатора та характеру переробки із полівінілхлориду отримують електроізоляційні матеріали: вініласти, пластикати, пінопласти та лаки.

Основні властивості полівінілхлориду: густина $D = 1350 \dots 1430 \text{ кг/м}^3$; тангенс кута діелектричних втрат при частоті 50 Гц $\text{tg}\delta = 0,02$; діелектрична проникність при частоті 50 Гц $\epsilon = 3,2$; питомий об'ємний опір $\rho_v = 10^{13} \dots 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; питомий поверхневий опір $\rho_s = 10^{13} \dots 10^{15} \text{ Ом}$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 35 \dots 45 \text{ МВ/м}$; тривало допустима робоча температура $T_{\text{роб}} = 90^\circ\text{C}$.

При нагріванні полівінілхлориду вище 140°C він розкладається із виділенням хлористого водню, який викликає корозію

апаратури та негативно впливає на організм людини. Під дією електричної дуги полівінілхлорид виділяє велику кількість газів, які сприяють швидкому гасінню дуги.

Поліметилакрилат (органічне скло, плексиглас) – прозорий матеріал без кольору, полярний діелектрик, який одержують в результаті полімеризації ефірів метилакрилової кислоти.

Основні властивості поліметилакрилату: густина $D = 1180 \dots 1190 \text{ кг/м}^3$; тангенс кута діелектричних втрат при частоті 50 Гц $\text{tg}\delta = 0,06$; діелектрична проникність при частоті 50 Гц $\epsilon = 3,6$; питомий об'ємний опір $\rho_v = 10^{10} \dots 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; питомий поверхневий опір $\rho_s = 10^{12} \dots 10^{13} \text{ Ом}$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 15 \dots 25 \text{ МВ/м}$.

Поліметилакрилат має низьку гігроскопічність, високу хімічну стійкість, легко зварюється при температурі $140 \dots 150^\circ\text{C}$ із застосуванням тиску на поверхні, що зварюються до 1 МПа; склеюється полярними розчинниками.

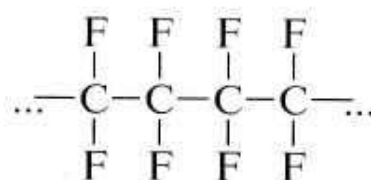
Застосовують поліметилакрилат для виготовлення корпусів електричних приладів, шкал, лінз, а також в якості дугогасного матеріалу в електричних апаратах (при нагріванні виділяє CO , H_2 , CO_2 , H_2O у вигляді пару).

Одним із суттєвих недоліків розглянутих вище органічних синтетичних полімерів є їх низька нагрівостійкість. Для більшості органічних полімерів робочі температури знаходяться в межах $-60 \dots +120^\circ\text{C}$. Окрім того, вуглець, який становить основу органічних полімерів, на повітрі, а тим більше при нагріванні, може окислюватися, що веде до руйнування полімеру. Для підвищення теплостійкості в якості основи для органічних полімерів використо-

вують окрім вуглецю фтор, кремній, титан та ін. Найбільш поширеними із вказаних матеріалів є фторорганічні (фторопласти) та кремнійорганічні полімери (полісілоксани).

Фторопласти – кристалічні полімери фторпохідних етилену, в яких атоми водню заміщені фтором. Введення в молекулу полімеру фтору підвищує тепло- та хімістійкість матеріалу.

Фторопласт-4 (політетрафторетилен) – неполярний матеріал білого або сірого кольору із більш високою густиною ($D = 2110...2300 \text{ кг/м}^3$) у порівнянні з іншими органічними полімерами:



Фторопласт - 4 – це найбільш хімічно стійкий матеріал серед полімерів. Його стійкість до хімічних впливів вища ніж у золота, платини, скла та ін.

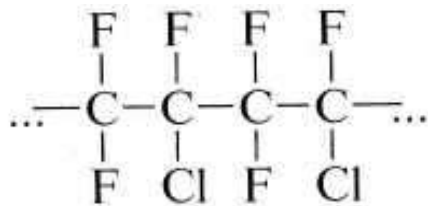
Фторопласт - 4 має наступні властивості: діапазон робочих температур від -250 до $+250$ $^{\circ}\text{C}$; високі діелектричні властивості, які майже не залежать від температури ($\rho = 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\text{tg}\delta = 0,0001...0,0003$; $\epsilon = 1,9...2,2$ при частоті $50...10^{10} \text{ Гц}$ відповідно; $E_{\text{пр}} = 27...40 \text{ МВ/м}$); не розчиняється в розчинниках; не горючий, повністю не гігроскопічний.

До недоліків фторопласта-4 відносяться: низька радіаційна стійкість, складна технологія переробки, висока вартість, відносна м'якість, виділення токсичних речовин при температурі вище 400 $^{\circ}\text{C}$.

Із фторопласту-4 виготовляють конденсаторні і електроізоляційні плівки, ізоляцію кабельних виробів, хімічний посуд та ін.

Промисловість випускає також різновиди фторопласта-4: фторопласт-4Д, фторопласт-40 та ін. Вони відрізняються від фторопласту-4 формою та розміром частинок порошкоподібної маси і більш широкими можливостями переробки цих типів фторопласту у вироби. Значення механічних і електричних характеристик фторопласту-4Д і фторопласту-40 дуже мало відрізняються від значень відповідних характеристик фторопласту-4.

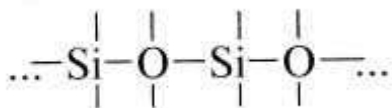
Фторопласт-3 (політрифторхлоретилен) – полімер трифторхлоретилену. Внаслідок заміни в елементарній ланці одного атому фтору на атом хлору він перетворюється в полярний діелектрик:



Фторопласт-3 має наступні властивості: густина $D = 2100 \dots 2180 \text{ кг/м}^3$; верхня межа робочої температури $t_p = 195 \text{ }^\circ\text{C}$; нагрівостійкість близько $125 \text{ }^\circ\text{C}$; діелектрична проникність $\varepsilon = 3,3 \dots 2,5$ при частоті $50 \dots 10^6 \text{ Гц}$; тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg } \delta = 0,015 \dots 0,01$ при частоті $50 \dots 10^6 \text{ Гц}$; питомий об'ємний опір $\rho = 10^{14} \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 15 \dots 20 \text{ МВ/м}$; має високу хімічну стійкість.

Фторопласт-3 застосовується в якості ізоляції проводів та кабелів та для антикорозійного покриття металів та кераміки.

Кремнійорганічні полімери (полісілоксани) – матеріали, які є проміжною ланкою між органічними і неорганічними матеріалами, до їх складу входить кремній. Основу будови їх молекул утворює сілоксанний ланцюг в якому атоми кремнію переважаються із атомами кисню:



Атоми вуглецю знаходяться лише в бокових ланцюгах молекул. Такі речовини мають підвищену нагрівостійкість.

Кремнійорганічні полімери володіють наступними характеристиками: густина $D = 1700 \text{ кг/м}^3$; високі діелектричні властивості (питомий об'ємний опір $\rho = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\varepsilon = 3,5$ при частоті 50 Гц; тангенс кута діелектричних втрат при частоті $50 \dots 10^4$ Гц $\text{tg } \delta = 0,01 \dots 0,03$) висока дугостійкість та теплостійкість.

Полісілоксани використовують для виробництва пластмас, лаків, компаундів та клеїв.

3.4.3 Поліконденсаційні синтетичні полімери

В реакції поліконденсації приймають участь не менше ніж дві хімічні речовини. В результаті реакції утворюються полімери просторової структури. Продуктами поліконденсації є фенолформальдегідні, кремнійорганічні, епоксидні та поліефірні смоли, поліаміди, полііміди та поліуретани.

Фенолформальдегідні смоли – це продукт поліконденсації фенолу у водному розчині формальдегіду. Основною особливістю цих смол є їх здатність разом із наповнювачами утворювати

фенопласти які мають високу міцність ($\sigma_p = 49 \dots 56$ МПа) та добрі електроізоляційні властивості ($\rho = 10^{10} \dots 10^{12}$ Ом·м; $\epsilon = 5,0 \dots 6,5$ при 50 Гц; $\operatorname{tg} \delta = 0,001 \dots 0,01$, відповідно при частоті 50 та 10^4 Гц). Густина фенопласту $D = 1250 \dots 1300$ кг/м³; тривала робоча температура $T_{\text{роб}} = 120$ °С.

Фенолформальдегідні смоли мають здатність поєднуватися із іншими полімерами, утворюючи при цьому співполімери. Із найбільш відомих таких співполімерів є резольні (бакеліт) та новолачні (новолаки) смоли.

Фенолформальдегідні смоли застосовують для виготовлення шаруватих пластиків (гетинакс, текстоліт), корпусів електротехнічних виробів, лаків, клеїв, для заміни шелаку.

Кремнійорганічні смоли – термореактивні полімери із просторовою структурою. Вони мають високу нагрівостійкість (до 200°С), високу дуго- та короностійкість, високу холодостійкість (до –60°С), хімічно інертні.

До недоліків кремнійорганічних смол можна відноситися не високі механічні характеристики та низька стійкість до органічних розчинників.

Кремнійорганічні смоли використовують для виготовлення сломяного паперу, компаундів, лаків, покривних емалей, лакотканин, склотекстоліту та ін.

Епоксидні смоли представляють собою термопластичні низько плавкі рідкі матеріали, які легко розчиняються у розчинниках, не розчиняються у воді, мало розчиняються у спирті, мають високу адгезію і високі механічні характеристики, мають значний

термін зберігання без втрати властивостей. Після додавання отверджувачів вони швидко твердіють та стають термореактивними. Епоксидні смоли в рідкому стані токсичні.

Ці смоли використовують для виготовлення лаків, клеїв, компаундів, для виготовлення литої ізоляції трансформаторів струму та напруги, високовольтних прохідних ізоляторів.

Поліефірні смоли за властивостями близькі до природних смол, їх одержують в результаті реакції поліконденсації багатоатомних спиртів (гліколь, гліцерин) та багатоосновних органічних кислот (фталева, малеїнова та ін). До поліефірних смол відносяться гліфталева смола, поліетилентерефталат, полікарбонати, поліефіракрилати.

Питомий електричний опір поліефірних смол $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{15}$ Ом·м, $\rho_s = 10^{12} \dots 10^{15}$ Ом·м; діелектрична проникність $\epsilon = 3 \dots 5$; тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta = 0,002 \dots 0,02$ відповідно при частоті 50 та 10^4 Гц; густина $D = 1000 \dots 1320$ кг/м³.

Поліетилентерефталат (лавсан) використовують для виготовлення волокон, тканин та плівок. Гліфталеву смолу використовують в якості основи для лаків пластмас та клеїв. Полікарбонати використовують для виготовлення шаруватих пластиків, лаків, компаундів, плівок.

Поліаміди – термопластичні полярні діелектрики із лінійною структурою. Густина поліамідів $D = 1130 \dots 1150$ кг/м³. Вони мають високу механічну міцність, малий коефіцієнт тертя, високу еластичність, хімічно стійкі. Але вони мають не високі діелектри-

чні властивості, які сильно залежать від підвищення температури ($\rho = 10^{11} \dots 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 3,5$; $E_{\text{пр}} = 20 \dots 25 \text{ МВ/м}$).

Найбільш поширені поліаміди – капрон, найлон. Їх застосовують для виготовлення волокон, текстилю, гвинтів, шайб та ін.

Полііміди – органічні полімери із високою нагрівостійкістю (300°C , та 500°C короткочасно), високою холодостійкістю (до -269°C) та високими діелектричними властивостями ($\rho = 10^{15} \dots 10^{18} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 3,5$; $E_{\text{пр}} = 16 \dots 20 \text{ МВ/м}$). Густина поліімідів $D = 1280 \dots 1480 \text{ кг/м}^3$

Особливостями поліімідних пластмас є легкість переробки їх у вироби (через велику плинність), мала об'ємна усадка і стабільність властивостей при переробці.

Полііміди використовують в якості пазової ізоляції в електричних машинах теплостійкого виконання, для виготовлення лаків та емалей, ізоляції нагрівостійких кабелів.

Поліуретани – лінійні термопластичні матеріали, які після затвердіння перетворюються в термореактивні полімери. Стійкі до окислення, впливу кислот, розчинників, вологи та морозу, мають високі механічні характеристики. Густина поліуретанів становить $D = 1130 \dots 1150 \text{ кг/м}^3$. Діелектричні характеристики дещо вищі ніж у поліамідів ($\rho = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\varepsilon = 4,5$; $\text{tg } \delta = 0,014 \dots 0,02$; $E_{\text{пр}} = 20 \dots 25 \text{ МВ/м}$).

Поліуретани застосовуються для виготовлення тканин, покриттів лаків, компаундів, клеїв, плівок, каучуку, пінопластів.

3.4.4 Електроізоляційні пластичні маси

Пластичними масами (пластмасами) називають групу твердих матеріалів, які складаються повністю або частково із полімерних сполук. Вони пластичні в процесі переробки і здатні набувати потрібної форми.

Пластичні маси застосовують як в якості електроізоляційних, так і в якості конструкційних матеріалів.

Пластмаси одержують на основі натуральних та штучних смол. В залежності від типу смоли розрізняють термореактивні та термопластичні пластмаси. До термопластичних належать пластмаси на основі полівінілових і поліамідних смол, ефірів целюлози та ін. До термореактивних належать пластмаси на основі епоксидних, поліефірних, кремнійорганічних, фенолформальдегідних та інших смол.

Окрім смоли, яка є речовиною, що зв'язує (30...60%), до складу пластмас входять: наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори та барвники.

Пластмаси мають високі механічні характеристики, високі електроізоляційні властивості, вони стійкі до корозії, мають високу хімічну стійкість, не гігроскопічні, легкі (густина $D = 900...1800 \text{ кг/м}^3$). Пластмаси мають широкий діапазон коефіцієнта тертя та високий опір до стирання.

Порівняно із чистими полімерами (поліетилен, полівінілхлорид та ін.) пластмаси на їх основі володіють дещо зниженими електроізоляційними властивостями. Це спричинено додаванням у полімери барвників, наповнювачів та інших речовин з метою під-

вищення механічної міцності і температуростійкості пластмас. Електричні характеристики пластмас такі: $\rho_v = 10^8 \dots 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\varepsilon = 5 \dots 8$; $\text{tg} \delta = 0,002 \dots 0,08$; $E_{\text{пр}} = 5 \dots 25 \text{ МВ/м}$. Кращими характеристиками володіють пластмаси на основі кремнійорганічних зв'язуючих.

До основних недоліків пластмас відносяться: повзучість (здатність деформуватися під впливом навантаження), низька теплостійкість, низька міцність при змінних навантаженнях, порівняно швидке старіння.

Із пластмас виготовляють електроізоляційні шайби, дугогасні камери та корпуси вимикачів, розетки, патрони ламп розжарення, корпуси електричних апаратів складної конфігурації та ін. Із пластмас виготовляють також армовані вироби (із запресованими металевими деталями).

3.4.5 Плівкові електроізоляційні матеріали

Плівковими вважаються матеріали у яких товщина значно менша їх довжини. Вони мають підвищену електричну міцність, підвищені електроізоляційні властивості, достатню механічну міцність, високу вологостійкість. Властивості плівок обумовлені властивостями вихідних полімерів. У зв'язку із цим плівки розділяють на полярні та неполярні.

До плівкової ізоляції відносяться наступні електроізоляційні плівки: триацетатцелюлозна, поліетилентерафталатна, полікарбонатна, триацетатна, полістирольна, поліакрилатна, поліамідна, по-

ліетиленова, поліпропіленова, політетрафторетиленова (фторопластова), полівінілхлоридна, вініпластова та інші.

Для підвищення механічних характеристик плівок молекули полімерів орієнтують і закріплюють у певному напрямі. Неорієнтовані плівки мають ізотропну структуру, а орієнтовані – анізотропну.

До **неполярних** синтетичних плівок відносяться полістирольна, поліетиленова, поліпропіленова та політетрафторетиленова плівки.

Полістирольна (ПС) орієнтована плівка має високу вологостійкість та малі діелектричні втрати. Недоліки полістирольної плівки: невисока температура розм'якшення та низькі механічні характеристики при нагріванні. Виготовляються ПС плівки товщиною $h = (0,02 \dots 0,1) \cdot 10^{-3}$ м. Застосовують для виготовлення високочастотних конденсаторів та кабелів.

Поліетиленова (ПЕ) орієнтована плівка має високу морозостійкість (-60°C), підвищену нагрівостійкість (допускають короткочасне нагрівання до 250°C), низьку вологопроникність.

Недоліки: піддається впливу трансформаторного масла, при нагріванні розчиняється в ньому, що обмежує її застосування. Виготовляється ПЕ плівки товщиною $h = (0,03 \dots 0,2) \cdot 10^{-3}$ м. Застосовують в якості ізоляції кабелів та монтажних проводів.

Поліпропіленова (ПП) орієнтована плівка має близькі властивості до поліетиленової плівки. Вона має більш високу нагрівостійкість (до 130°C), низьку паро- та газопроникність. Виготовляється товщиною до $h = 5 \cdot 10^{-6}$ м. Застосовують ПП для виго-

товлення високочастотних конденсаторів та для виготовлення комбінованої паперово-плівкової ізоляції.

Політетрафторетиленова (ПТФЕ) орієнтована плівка має підвищені механічні характеристики, високу морозо- та нагрівостійкість, характеризується усіданням при нагріванні.

ПТФЕ виготовляється товщиною $h = (0,005 \dots 0,2) \cdot 10^{-3}$ м. Застосовують для ізоляції проводів, міжшарової ізоляції, для виготовлення конденсаторів. Допускає роботу в інтервалі температур - 60...+250 °С.

До **полярних** синтетичних плівок відноситься поліетилен-терефталатна, полівінілхлоридна, вініпластова, поліамідна, полікарбонатна та ін.

Поліетилентерефталатна (ПЕТ, лавсанова) плівка має високу міцність на розривання та на надрив, високі електроізоляційні властивості, хімічно стійка, не розчиняється в органічних розчинниках, має високу вологостійкість та нагрівостійкість.

Недолік – значна жорсткість та пружність.

Застосовують для виготовлення конденсаторів та кабелів, та для виготовлення ізоляції низьковольтних електричних приладів.

Полівінілхлоридна (ПВХ) плівка має низькі діелектричні властивості, низьку нагрівостійкість, що обмежує її застосування в якості електроізоляційного матеріалу.

Вініпластову електроізоляційну плівку виготовляють товщиною $h = (0,02 \dots 0,7) \cdot 10^{-3}$ м. Її застосовують в якості вологостійкого та хімічностійкого матеріалу для електричної ізоляції заглиблених електродвигунів.

Поліамідна (ПAM) плівка має високу механічну міцність і не високі електричні параметри, які значно погіршуються при нагріванні та під впливом вологи. Її виготовляють товщиною $h = (0,05 \dots 0,12) \cdot 10^{-3}$ м. Використовують для виготовлення корпусної ізоляції електродвигунів, призначених для роботи в тяжких умовах та для ізоляції проводів і кабелів які мають захисну оболонку.

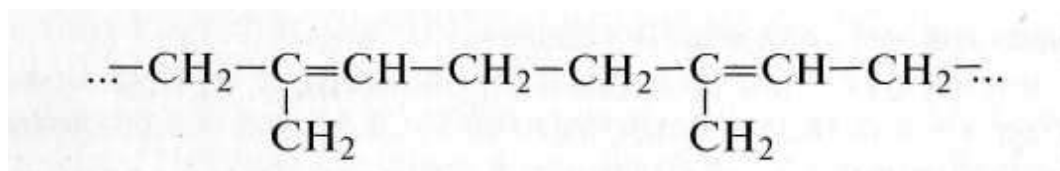
Полікарбонатна (ПК) плівка застосовується для ізоляції обмоткових та монтажних проводів, високовольтних кабелів, для виготовлення пазової ізоляції, для виготовлення конденсаторів низької напруги.

3.4.6 Електроізоляційні матеріали на основі каучуку

Матеріали на основі каучуку (еластомери, гума) – матеріали, які одержані на основі натурального та синтетичного каучуку шляхом додавання до них відповідних наповнювачів. Вулканізований каучук називають **гумою**.

Для виготовлення гуми використовують натуральний та синтетичний каучук (бутадієновий, бутадієнстирольний, бутилкаучук, ізопреновий, поліхлоропреновий, полісілоксановий та ін.).

Натуральний каучук одержують із соку (латексу) тропічних рослин. За хімічним складом це полімерний вуглеводень, який має структуру із подвійними зв'язками:



Синтетичний каучук одержують шляхом полімеризації відповідних вуглеводнів. Сировиною для синтетичного канчуку є спирти, природний газ, продукти переробки нафти та газу.

Натуральний та синтетичний каучук в чистому вигляді не використовують, так як вони мають ряд недоліків: мала стійкість до підвищених та знижених температур, низька міцність при розтягуванні, значне водопоглинання, низька стійкість до розчинників.

Для позбавлення вказаних недоліків каучук **вулканізують** (нагрівають із додаванням сірки, металічного натрію та ін.), і одержують таким чином гуму.

Окрім каучуку та вулканізаторів до складу гум входять: наповнювачі (сажа, вуглекислий марганець, крейда), пластифікатори (парафін, стеаринова та олеїнова кислоти), фарбники (ультрамарин, охра та ін.).

В залежності від вмісту сірки розрізняють **м'яку** та **тверду** гуму. При вмісті сірки 1...3% – м'яка гума, а при 30...40% – тверда.

М'яка гума має високу вібраційну стійкість; високу еластичність; підвищену хімічну стійкість; достатню механічну міцність; добрі електроізоляційні характеристики; гума стійка до зносу.

Основні характеристики електроізоляційної гуми: густина $D = 910...930 \text{ кг/м}^3$; тангенс кута діелектричних втрат при частоті 50 Гц $\text{tg}\delta = 0,003...0,009$; діелектрична проникність при частоті 50 Гц $\varepsilon = 2,4...8$; питомий об'ємний опір $\rho_v = 10^{11}...10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; діелектрична міцність $E_{\text{пр}} = 20...40 \text{ МВ/м}$.

До недоліків гуми відносять: низька нагрівостійкість (при підвищенні температури і вологості погіршуються діелектричні і механічні властивості гуми, вона висихає і розтріскується); низька стійкість до дії нафтових масел і інших неполярних рідин (бензину, бензолу та ін.); нестійка до дії світла, особливо ультрафіолетового; у присутності озону швидко старіє і тріскається.

З м'якої гуми виготовляють ізоляційні та захисні оболонки проводів та кабелів, ізоляційні шайби та трубки, захисні рукавиці, боти, електроізоляційні килимки. М'які гуми виділяються значною еластичністю.

Тверда гума має порівняно високі електроізоляційні властивості, високу дугостійкість, стійка до ударних навантажень, стійка до дії кислот та лугів, не розчиняється в органічних розчинниках, стійка до старіння.

Основні характеристики твердих гум (ескапон, ебоніт): густина $D = 1000 \dots 1250 \text{ кг/м}^3$; тангенс кута діелектричних втрат при частоті 50 Гц $\text{tg}\delta = 0,0005 \dots 0,01$; діелектрична проникність при частоті 50 Гц $\epsilon = 2,8 \dots 3,5$; питомий об'ємний опір $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 15 \dots 35 \text{ МВ/м}$.

Недоліки: відносно низька нагрівостійкість, здатність до теплового та світлового старіння та низька.

Тверду гуму (ебоніт, ескапон, асбодин) застосовують для виготовлення баків акумуляторів, ізоляційних втулок, прокладок, трубок та ін.

3.4.7 Електроізоляційні лаки та емалі

Електроізоляційні лаки, емалі та компаунди займають проміжне положення між рідкими та твердими ізоляційними матеріалами, вони складають групу матеріалів, які рідкі у вихідному стані (під час застосування) і тверді після застосування. Основою лаків, емалей та компаундів є рослинні олії та смоли (природні або синтетичні). Ці матеріали іноді називають матеріалами що твердіють.

Лаки – це колоїдні розчини смол, бітумів або олій, що становлять їх основу (лакооснова) і летких розчинників. Крім цього до складу лаків можуть входити сикативи (речовини, що прискорюють процес отвердіння лакооснови), пластифікатори, інгібітори та розріджувачі.

Лаки класифікують за рядом ознак:

- за застосуванням: для склеювання, покривні, просочувальні та спеціальні;
- за складом: олійні, олійно-бітумні, олійно-смоляні, олійно-гліфталеві, гліфталеві та ін.;
- за умовами експлуатації: нормальні, маслостійкі, бензостійкі, вологостійкі та кислотостійкі;
- за нагрівостійкістю: нормальної (до 105 °С), підвищеної (до 135 °С) та високої нагрівостійкості (до 180 °С);
- за впливом температури: термопластичні та термореактивні;
- за режимом сушіння: холодного (на повітрі) та гарячого (пічного) сушіння.

Електроізоляційні лаки застосовуються при виготовленні електричних машин та апаратів, під час їх експлуатації та ремонту.

Лаки для склеювання застосовують для склеювання твердих електроізоляційних матеріалів між собою (наприклад пелюстків слюди), або для приклеювання їх до металу.

До цих лаків відносяться поліуретанові та епоксидні клеї, клеї на основі фенолформальдегідної смоли, гліфталеві лаки (ГФ-932, ГФ-957), кремнійорганічні лаки (К)-991-6, КО-919, КО-946), епоксидні лаки (ЕП-934) та інші.

Покривні лаки служать для утворення механічно міцної, гладенької та вологостійкої плівки на поверхні твердої ізоляції. Ця плівка підвищує напругу поверхневого розряду та поверхневий опір ізоляції, захищає лакований виріб від впливу вологи, розчинників та хімічно активних речовин.

До покривних лаків відносять кремнійорганічні лаки (КО-916, КО-940, КО-990), епоксидні лаки (ЕП-96, ЕП-730), олійні (КФ-965), поліефірні (ПЕ-9131), целюлозні (ЕЦ-959) та інші.

Основні характеристики плівки із покривних лаків: $\rho = 10^{10} \dots 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $E_{\text{пр}} = 50 \dots 75 \text{ МВ/м}$ при температурі 20°C .

Просочувальні лаки служать для просочування пористої та волокнистої ізоляції. Після просочування пори в ізоляції виявляються заповненими не повітрям а висушеним лаком. В результаті просочування підвищується електрична та механічна міцність, теплопровідність, нагрівостійкість та зменшується гігроскопічність матеріалу.

До просочувальних лаків відносяться олійні, бітумно-олійні, олійно-алкідні, кремнійорганічні та інші лаки. Основні характеристики лакової плівки: $\rho = 10^{11} \dots 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, електрична міцність при 20°C $E_{\text{пр}} = 55 \dots 80 \text{ МВ/м}$.

В якості просочувальних використовуються наступні лаки: бітумно-олійні (БТ-980, БТ-988), олійно-алкідні (ГФ-95, ГФ-9140), олійно-фенольні (ФЛ-947), поліуретанові (УР-9144), кремній-органічні (КО-91-1, КО-916К, КО-926), олійні (МА-595А, МА-585Б, МА-972), фенольні (ФЛ-9107) та багато інших.

Олійні лаки утворюють після висихання гнучкі еластичні плівки, стійкі проти вологи та нагрітого трансформаторного масла. Для виробництва цих лаків використовують лляну та тунгову олії. Олійні лаки виготовляють таких марок: КФ-965, МА-972, МА-595А, МА-585Б та ін.

Олійні лаки застосовують для виготовлення світлих лакотканин та лакопаперів, а також для просочування обмоток маслозаповнених трансформаторів.

Олійно-бітумні лаки утворюють гнучкі плівки чорного кольору, стійкі проти вологи, але легкорозчинні в мінеральних маслах. Такі лаки широко застосовують для просочування обмоток електричних машин, сухих трансформаторів та інших апаратів. Олійно-бітумні лаки виготовляють наступних марок: БТ-963, БТ-980, БТ-988, БТ-95, БТ-99.

Гліфталеві та олійно-гліфталеві лаки мають підвищену нагрівостійкість та маслостійкість, але вимагають гарячого сушіння (100...130 °С). Їх використовують для склеювання слюди, паперу, тканин та пластмас. Основні представники даної групи лаків: ГФ-9140, ГФ-936, ГФ-913, Г-627, ГФ-95, та ін.

Кремнійорганічні лаки характеризуються високими електроізоляційними властивостями, підвищеною вологостійкістю та значною нагрівостійкістю (180 °С). Їх використовують у поєднанні

із скловолокнистою, слюдяною та азбестовою ізоляцією. Виготовляють такі кремнійорганічні лаки: КО-921, КО-922, КО-919Т, КО-916, КО-991 та ін.

Емалі – це спеціальні лаки, до складу яких введені пігменти (окиси цинку, титану та ін.). Введення пігментів збільшує міцність, теплопровідність, нагріво- та дугостійкість лакового покриття. Емалі частіше за все призначені для захисту поверхонь різних електротехнічних виробів, електричних машин та електричних апаратів.

Із електроізоляційних емалей широко використовують гліфталево-олійні (ГФ-92ХС, ГФ-937, ГФ-952, ГФ-913), нітрогліфталеві (НЦ-929) та кремнійорганічні емалі (КО-959, КО-911, КО-935 та ін), епоксидні (ЕП-91, ЕП-919), пентафталеві (ПФ-954, ПФ-939, ПФ-910) та інші.

Основні характеристики електроізоляційних лаків та емалей наведені в додатку (таблиці Д4 та Д5).

3.4.7 Електроізоляційні компаунди

Електроізоляційні компаунди – це просочувальні та заливні суміші, які не мають у своєму складі розчинників, знаходяться у момент застосування, при нормальній або підвищеній температурі, в рідкому стані та твердіють після застосування внаслідок охолодження, або хімічних процесів. Внаслідок відсутності розчинників компаунди краще за лаки забезпечують герметизацію вузлів електричних машин та апаратів.

В залежності від складу розрізняють термопластичними та термореактивними компаунди. До термопластичних належать компаунди на основі бітумів, воскоподібних речовин та термопла-

стичних смол. Термореактивні компаунди виготовляють на основі епоксидних, поліефірних та інших синтетичних смол. За призначенням компаунди поділяють на **просочувальні**, та **заливні**.

Просочувальні компаунди, як і аналогічні за призначенням лаки, призначені для просочування пористих та волокнистих електроізоляційних матеріалів. Просочування може виконуватися при атмосферному тиску, під тиском або у вакуумі.

Заливні компаунди призначені для заповнення порівняно великих порожнин та проміжків різних деталей, кабельних муфт, а також для нанесення на деталі та вузли порівняно товстих покриттів. Найбільш розповсюджені епоксидні, кремнійорганічні та поліефірні заливні компаунди.

Бітумні компаунди – це найбільш старий клас діелектриків. Основною складовою частиною їх є бітуми (природні, або одержані при перегонці нафти). Бітумні компаунди розм'якшуються при нагріванні і твердіють при охолодженні, вони володіють високою вологостійкістю та добрими електроізоляційними властивостями. Ці компаунди застосовують для просочування з метою отримання монолітної ізоляції обмоток високовольтних електричних машин та машин вологостійкого виконання. Приклад компаунду – бітумний компаунд 225Д.

Епоксидні компаунди представляють собою епоксидну смолу, до якої додаються наповнювачі та пластифікатори. Безпосередньо перед застосуванням компаунду до нього додається отверджувач. Епоксидні компаунди мають високу еластичність, можуть використовуватись при вологості 95% та при температурі

від -60 до $+180$ $^{\circ}\text{C}$. Основні марки епоксидних компаундів: Д, УП, ПК, ЭПК, ЭКА, ЭКС, ЭЗК, КФ та ін.

Епоксидні компаунди використовують для просочування обмоток трансформаторів, дроселів, електричних машин, для виготовлення склослюдинтових стрічок, для напилення на обмотки та на метал (пази електродвигунів).

Поліефірні компаунди виготовляють на основі насичених поліефірних смол з додаванням розбавлювачів (стирол, метилметакрилат) та каталізаторів. Їх застосовують для просочування обмоток електричних машин та апаратів вологостійкого та тропічного виконання. Поліефірні компаунди після затвердіння дають значну усадку. Основні марки поліефірних компаундів: КП, КГСМ, Б-ПЭ, Б-ИД та ін.

Окрім розглянутих вище в електротехніці застосовують значну кількість інших компаундів.

3.4.9 Волокнисті електроізоляційні матеріали органічного походження

Волокнисті матеріали складаються переважно із часточок видовженої форми – волокон, проміжки між якими, у не просочених матеріалів, заповнені повітрям, а у просочених – заповнені натуральним або синтетичним мастилом, оліями, смолами або лаками.

Переваги волокнистих матеріалів: не висока вартість, достатньо висока механічна міцність, гнучкість та зручність обробки.

Недоліки волокнистих матеріалів: низька електрична міцність, низька теплопровідність, висока гігроскопічність.

Просочування волокнистих матеріалів покращує їх властивості. До волокнистих матеріалів органічного походження відносяться:

- натуральні: деревина, папір, картон, бавовняна пряжа, шовк;
- синтетичні: ацетатний шовк, капрон, лавсан та ін.

Деревина – дуб, бук, граб, ясень, клен, береза. Основою цих матеріалів, як і будь-якого рослинного волокна, є органічна речовина – целюлоза (полімерний вуглеводень).

Целюлоза – полярна речовина, її діелектрична проникність $\varepsilon = 6,5 \dots 7$, тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta = 0,005 \dots 0,01$.

До недавнього часу деревина широко використовувались в електротехніці для виготовлення: ярмових балок, прокладок, клинів, стержнів в масляних трансформаторах; пазових клинів та прокладок в електричних машинах; штанг масляних вимикачів та роз'єднувачів; опор та траверс ліній електропередач, та ін.

Останнім часом деревину майже повністю витіснили більш якісні матеріали на основі скла, тканин, паперу та ін. Це пояснюється тим, що її механічні та електричні характеристики не високі і сильно залежать від напрямку зрізу. Також деревина має високу гігроскопічність, низьку нагрівостійкість, високу горючість.

Для поліпшення властивостей електроізоляційних виробів із деревини їх обробляють лаками, мастилами та рослинними оліями. Для захисту деревини від горіння на поверхню наносять вогнетривкі покриття.

Електротехнічний папір – це листовий або рулонний матеріал коротковолокнистої структури, для його виготовлення використовують целюлозу. За призначенням розрізняють папір: **конденсаторний, кабельний, трансформаторний, просочувальний, мікастрічковий та бавовняний.**

Конденсаторний папір у просоченому вигляді використовується в якості діелектрика для паперових конденсаторів. Він буває двох типів: звичайний конденсаторний папір (КОН) та папір для силових конденсаторів (силкон). Сучасні марки електроізоляційних паперів: КОН (звичайний), СКОН (спеціальний із покращеними властивостями), МКОН (із малими діелектричними втратами), ЭМКОН (із високою електричною міцністю та малими діелектричними втратами).

Товщина різних марок конденсаторного паперу коливається в межах $h = (4...40) \cdot 10^{-6}$ м, густина $D = 800...1300$ кг/м³, електрична міцність $E_{пр} = 12...15$ МВ/м, діелектрична проникність $\varepsilon = 3,7$.

Кабельний папір розділяють на три види: **кабельний** (для ізоляції струмопровідних жил силових кабелів), **телефонний** (для ізоляції телефонних кабелів) та **напівпровідний папір** (для екранування силових кабелів).

Кабельний папір виготовляють наступних марок: К, КВ, КМ, КВУ, КВМ, КВМУ, КВМС, КТ, КТУ, КПУ та ін. К – кабельний, Т – телефонний, В – високовольтний, М – багатошаровий, У – ущільнений, С – стабілізований, П – напівпровідниковий папір. Цифрою біля літер позначають товщину паперу в мікрометрах (10^{-6} м). Товщина кабельних паперів знаходиться в межах $h = (15...240) \cdot 10^{-6}$ м, густина $D = 770...1100$ кг/м³.

Трансформаторний папір – різновид кабельного паперу який виготовляють із 100 % сульфатної целюлози. Застосовується для ізоляції обмоткових проводів трансформаторів. Трансформаторний папір виготовляють наступних марок: Т, ТМ, ТМП, ТВ та ТВУ.

Просочувальний папір (ЭИП-55, ЭИП-120, ЭИПХ-120 та ін.) використовується для виготовлення листового та фольгованого гетинаксу. Цей папір має підвищену вбираючу здатність за рахунок меншої густини ($D = 500 \dots 750 \text{ кг/м}^3$). Товщина просочувального паперу $h = 120 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, електрична міцність $E_{\text{пр}} = 5 \dots 8 \text{ МВ/м}$.

Мікастрічковий папір використовується в якості підкладки при виготовленні слюдяних матеріалів – мікафолію та мікастрічки. Його виготовляють із довговолокнистої бавовни. Він має товщину $h = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Електрокартон – найстаріший електроізоляційний матеріал, який виготовляється також на основі целюлози. Електрокартон виготовляють двох типів: ЭВМ, рихлої та м'якої структури, для роботи в трансформаторному маслі; ЭВ – більш твердий та пружний, призначений для роботи на повітрі. Електрокартон – єдиний матеріал, який при роботі у трансформаторному маслі забезпечує належні електричні характеристики.

Трансформаторний картон для роботи в маслі виготовляють п'яти марок (АМ, А, Б, В, Г) товщиною $h = (1 \dots 6) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Картон для роботи на повітрі виготовляється також п'яти марок (ЭВС, ЭВП, ЭВТ, ЭВ та ЭВА) товщиною $h = (0,1 \dots 3) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Для зменшення гігроскопічності та покращення діелектричних властивостей картон просочують лаком, або емаллю.

Фібра – багатошаровий пергаментований папір (оброблений сірчаною кислотою), оброблений у гарячому хлористому цин-

ку та спресований. Під дією електричної дуги фібра розкладається і виділяє велику кількість газів, які сприяють гасінню дуги. Густина фібри $D = 1100 \dots 1200 \text{ кг/м}^3$. Електричні характеристики: $\rho_v = 10^6 \dots 10^7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $E_{np} = 3,5 \dots 7,0 \text{ МВ/м}$.

Із фібрових трубок виготовляють корпуси плавких запобіжників, стріляючих розрядників, пазові клини та прокладки для електричних машин та ін.

Недоліки: фібра дуже гігроскопічна та становиться крихкою при роботі в гарячому трансформаторному маслі. На сьогодні фібра витісняється більш сучасними матеріалами, такими як органічне скло, вініпласт та ін.

Волокнисті текстильні матеріали органічного походження – це текстильні матеріали (пряжа, стрічки, тканини) із натуральних волокон (бавовна та натуральний шовк) та із штучних волокон (віскозне, ацетатне, триацетатне, поліамідне, лавсанове, поліетиленове, поліуретанове, полівінілхлоридне та ін.).

Найгірші властивості мають бавовняне та віскозне волокно. Найкращі властивості у ацетатного шовку, капрону та лавсану. Ці матеріали застосовують у вигляді пряжі, стрічок та тканин. Найбільш поширені – тафтяна та кіперна стрічки. Вони мають велику механічну міцність, але у них низькі діелектричні характеристики та висока гігроскопічність.

3.5 Тверді неорганічні діелектрики

До твердих неорганічних діелектриків відносяться: електроізоляційні стекла, кераміка, слюда та матеріали на її основі, матеріали на основі азбесту.

3.5.1 Електроізоляційне скло

Стеклами називають тверді аморфні тіла, одержані шляхом охолодження розплаву системи окисів (незалежно від їх хімічного складу), які набувають внаслідок поступового підвищення в'язкості механічних властивостей твердих тіл. Процес переходу із рідкого стану в твердий є оборотним.

За хімічним складом розрізняють такі основні типи стекол: оксидні, галогенідні, халькогенідні (на основі сульфідів, селенідів та телуридів).

Найбільше поширення знайшли оксидні стекла, їх ділять:

– за типом оксиду, що утворює скло: силікатні (SiO_2), боратні (B_2O_3), фосфатні (P_2O_5), германатні (GeO_2), алюмосилікатні (Al_2O_3 , SiO_2) та ін.;

– за вмістом лужних оксидів: безлужні, малолужні та лужні.

Властивості стекол дуже різноманітні і залежать від складу.

Найбільш високі показники механічних властивостей мають кварцове та безлужне скло, а найбільш низькі у стеклах із підвищеним вмістом оксидів свинцю, натрію, калію та бору. Густина стекол знаходиться в межах $220 \dots 8000 \text{ кг/м}^3$. Найбільшу стійкість до впливу вологи має кварцове скло.

Електричні властивості стекол також в значній мірі залежать від їх складу. Більшість стекол мають іонну провідність. Найменшу електропровідність має кварцове скло ($\rho_v = 10^6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), а найбільшу високолужні стекла ($\rho_v = 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$). Найменшу діелектричну проникність ($\epsilon = 3,1 \dots 3,8$) мають кварцове скло та склоподібний борний ангідрид. При наявності в складі стекол оксидів сви-

нцю та барію їх діелектрична проникність значно підвищується (до 20). Електрична міцність стекол майже не залежить від їх складу і становить 17...80 МВ/м. Температура пом'якшення стекол $T_{\text{пом}} = 400 \dots 1700 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кварцове скло виплавляють із чистого кварцового піску або із гірського кришталю. Кварцове скло має високу оптичну прозорість, високу механічну міцність при високих температурах (до $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$), хімічно стійке. При нормальній температурі: $D = 2200 \text{ кг/м}^3$; $\text{tg } \delta = 0,0002$; $\varepsilon = 3,8$; $\rho_v = 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $E_{\text{пр}} = 35 \dots 44 \text{ МВ/м}$ при $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Застосовується кварцове скло для виготовлення високовольтних ізоляторів повітряних ліній електропередач, ламп, котушок, деталей електровакуумних приладів та ін.

Підвісні ізолятори повітряних ліній напругою 35, 110 та 220 кВ виготовляють із загартованого лужного або малолужного скла. За цією технологією скломаса, яка поступає з печі, подається в чавунну прес-форму автоматичного преса. За допомогою пуансона відбувається пресування ізолятора. Потім нагрітий ізолятор витягується з форми і рівномірно обдувається з усіх сторін холодним повітрям, крізь сопла.

Механічна міцність загартованих скляних ізоляторів в 2-3 рази вища, ніж у незагартованих, і вища, ніж у фарфорових ізоляторів. Тому габарити скляних ізоляторів менші (на 10-20%) в порівнянні із фарфоровими.

Скляні ізолятори малих габаритів (напругою до 10 кВ і деякі інші) виготовляють із незагартованого, а із випаленого скла.

В цьому випадку ізолятори, відпресовані на прес-автоматах, випаляють в печах. При цьому температура ізоляторів повільно підвищується, а потім повільно зменшується до кімнатної температури.

В процесі випалювання в скляних ізоляторах видаляються всі внутрішні напруження, які виникають за рахунок нерівномірного охолодження при пресуванні.

Виготовляються також напівпровідникові стекла, які застосовують при виготовленні терморезисторів, фоторезисторів, світлофільтрів та ін.

Скломалі – це легкоплавкі стекла, які призначені для покриття поверхні різних виробів із металу або скла. В електроапаратобудівництві вони використовуються для одержання міцного та нагрівостійкого електроізоляційного покриття на металі, а також для обладнання введів в металеві вакуумні прилади. Також вони використовуються для покриття трубчатих резисторів та як діелектрик в деяких типах конденсаторів.

3.5.2 Електроізоляційна кераміка

Керамікою називають матеріали, які одержують шляхом обпалювання формовочної маси із порошків різних мінеральних речовин (каоліну, кварцу, гіпсу, крейди та ін.) та оксидів металів. При нагріванні, матеріали, що входять в формовочну масу взаємодіють між собою (спікаються), утворюючи при цьому кристалічну, аморфну та газову фазу.

Для забезпечення високих електроізоляційних властивостей бажано щоб у керамічному виробі була лише кристалічна фаза. Але аморфна складова відіграє важливу роль в процесі виготовлення кераміки, а також вона забезпечує матеріалу необхідну механічну міцність.

Газова фаза присутня у кераміці у вигляді пор та мікротріщин, які знижують механічні та діелектричні властивості матеріалу.

Керамічні матеріали мають високу нагрівостійкість, вологостійкість, механічну міцність, високі діелектричні характеристики. Кераміка вирізняється стабільністю і надійністю параметрів при експлуатації та можливістю одержання попередньо заданих електрофізичних параметрів матеріалу.

З керамічних електроізоляційних матеріалів в електротехніці широко застосовують **фарфор**. Він складається із глини, каоліну, кварцу і польового шпату.

Складові частини фарфору подрібнюють, перемішують з водою. З одержаної маси різними способами виготовляють вироби необхідної форми, потім їх сушать, глазурують і обпалюють.

Глазурування – це покриття поверхні виробу тонким шаром глазури (речовина за складом подібна до скла), яка після обпалювання перетворюється у блискуче склоподібне покриття. Глазур покращує механічні та електроізоляційні якості фарфору, знижує його гігроскопічність.

Так як при обпалюванні виробів із фарфору їх розміри зменшуються (усадка) то їх виготовляють приблизної форми.

Електротехнічний фарфор має густину $D = 2500 \dots 3300 \text{ кг/м}^3$; границю міцності фарфору при стисненні $\sigma_{\text{ст}} = 400 \dots 700 \cdot 10^6 \text{ Па}$, границю міцності при розтягуванні $\sigma_{\text{р.}} = 50 \dots 70 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Електротехнічний фарфор при нормальній температурі і низькій частоті має наступні діелектричні властивості: питомий об'ємний опір $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13} \text{ Ом/м}$; діелектрична проникність $\varepsilon = 6 \dots 7$; тангенс кута діелектричних втрат при 50 Гц $\text{tg}\delta = 0,02 \dots 0,03$; електрична міцність $E_{\text{пр}} = 23 \dots 33 \text{ МВ/м}$.

Основним недоліком фарфору є порівняно високий $\text{tg}\delta$, який може значно збільшуватися при підвищенні температури та частоти. Це перешкоджає застосуванню фарфору в якості ізоляції на високих частотах та при високих температурах.

Призначення фарфору – виготовлення низько- та високовольтних ізоляторів, установчої кераміки (розеток, патронів ламп та ін.).

На сьогоднішній день існують як поліпшені сорти фарфору так і зовсім нові керамічні матеріали, відмінні від фарфору за складом та із поліпшеними властивостями.

Стеатитова кераміка (радіофарфор) – виготовляється на основі природного мінералу тальку ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) і вуглекислого барію (BaCO_3) або вуглекислого кальцію (CaCO_3). Для забезпечення пластичності в стеатитові маси вводять 15...20 % глиняних речовин (бентонітові та інші глини). Для стеатитів використовують найбільш чисті сорти природного талькового каменю, який містить окислів заліза не більше 0,5 %. Процес виготовлення вихідних стеатитових пластичних мас не відрізняється від виготовлення електрофарфорових мас.

Із пластичної стеатитової маси виготовляють стеатитові ізолятори й електроізоляційні вироби методом пресування в гіпсових формах.

Стеатитові вироби, отримані методом гарячого лиття під тиском, мають щільну й гладку поверхню. Найменшою об'ємною усадкою (5 %) володіють вироби, виготовлені з ливарної маси, в яку попередньо вводять мінерали, які складають вихідну стеатитову масу (стеатитовий спек). Основу стеатиту складають кристали клиноенстатиту ($\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$). їх утримується у стеатиті біля 70 %, а решта, біля 30 % – становить скло.

Застосовують стеатитову кераміку для виготовлення котушок індуктивності, лампових панелей, антенних ізоляторів та ізоляторів електронної техніки.

Ультрафарфор – поліпшений радіофарфор із великим вмістом корунду (Al_2O_3). Він має менший $\text{tg}\delta$, підвищену механічну міцність, твердість та крихкість, а також високу теплопровідність. Застосовується для виготовлення відповідальних установчих деталей, високовольтних конденсаторів, плат, вакуум-щільних спаїв.

Високоглиноземиста кераміка в основному складається із корунду. Вона має значну нагрівостійкість (до 1600°C), високу механічну міцність і теплопровідність. Діелектрична проникність такої кераміки наближається до 10, вона має значно менший $\text{tg}\delta$ порівняно із фарфором, навіть при підвищених температурах.

Основні характеристики електроізоляційної кераміки наведені в додатку (таблиці Д.8, Д.9).

3.5.3 Слюда та матеріали на її основі

Природна слюда – мінерал, який видобувають із гірських порід у вигляді кристалів. Характерна особливість слюди – її власність розшаровуватись на дуже тонкі пластинки.

За хімічним складом слюда представляє собою водяний алюмосилікат. Основні види природної слюди – **мусковіт** (алюмосилікат калію – $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$) та **флогопіт** (магнезійний алюмосилікат калію – $K_2O \cdot 6MgO \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$). Вони мають високі електричні та механічні характеристики, негорючі, нагріво- та хімічностійкі. Слюда є анізотропним матеріалом.

Мусковіт – одним із кращих електроізоляційних матеріалів за електричними властивостями, він перевершує в цьому відношенні флогопіт. Окрім цього він має більшу механічну міцність та твердість, більш гнучкий та пружний ніж флогопіт.

Основні характеристики мусковіту: густина $D = 2700 \dots 2900$ кг/м³, $\rho_v = 10^{12} \dots 10^{14}$ Ом·м при 20 °С; $\varepsilon = 6 \dots 8$; $\text{tg} \delta = 0,0004 \dots 0,008$ при 50 Гц; $E_{\text{пр}} = 100 \dots 250$ МВ/м.

Температура плавлення мусковіту знаходиться в межах 1260...1300 °С, нагрівостійкість – 500...900 °С. Розплавлена слюда при застиганні не утворює кристалів попереднього складу.

Мусковіт високої якості (конденсаторну та телевізійну слюду) застосовують у виробництві еталонних конденсаторів, у виробництві телевізійних трубок (основа фотокатодів та мішеней), для ізоляції колекторів в електричних машинах малої потужності.

Флогопіт має більш високу нагрівостійкість у порівнянні із мусковітом (до 1000 °С, $T_{\text{пл}} = 1270 \dots 1330$ °С), але має гірші еле-

ктроізоляційні властивості ($\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12}$ Ом·м при 20°C ; $\varepsilon = 5 \dots 7$; $\text{tg}\delta = 0,004 \dots 0,015$ при 50 Гц; $E_{\text{пр}} = 70 \dots 160$ МВ/м).

Флогопіт використовують для виробництва фасонних штампованих шайб, в якості теплової ізоляції цоколів електричних ламп розжарювання, в якості наповнювача пластмас та для інших цілей.

Фторфлогопіт (синтетична слюда) одержують шляхом розплавляння в печі шихти спеціально складу (кварцовий пісок, окиси алюмінію та магнію, фтористі з'єднання калію та магнію) із наступним повільним охолодженням. Фторфлогопіт має підвищену хімо- та нагрівостійкість (до 1100°C). Синтетична слюда гірше розділяється на пластинки. Фторфлогопіт має наступні діелектричні характеристики: ($\rho_v = 10^{12} \dots 10^{14}$ Ом·м при 20°C ; $\varepsilon = 6,1 \dots 7,5$; $\text{tg}\delta = 0,0004 \dots 0,0006$ при 50 Гц; $E_{\text{пр}} = 100 \dots 400$ МВ/м (залежить від товщини пластинок).

Фторфлогопіт використовують для виготовлення слюдопластового паперу, в електронних лампах, конденсаторах, що працюють при температурі $600 \dots 700^\circ\text{C}$.

Міканіти – матеріали виготовлені із пластинок (листочків) слюди, склеєних поміж собою за допомогою лаків.

Розрізняють колекторний, формувальний, прокладковий, гнучкий та термотривкий міканіти.

Колекторний міканіт (КФА) – пресована слюда флогопіт із додаванням лаку. Застосовують для ізоляції колекторних пластин електричних машин. При виготовленні до його складу вводять 4 ... 6 % зв'язуючих речовин – гліфталъ або шелак. Електрична міцність колекторного міканіту становить $E_{\text{пр}} = 14 \dots 20$ МВ/м, питомий опір $\rho_v \geq 10^{11}$ Ом·м.

Формувальний міканіт (ФМГ, ФФП, ФФГА, ФМК) застосовують для виготовлення колекторних манжет, фланців, каркасів котушок, трубок та інших фасонних виробів. Електрична міцність $E_{\text{пр}} = 25...40 \text{ МВ/м}$.

Слюдиніт – це теплостійкий формувальний міканіт, одержаний склеюванням пластинок слюди кремнійорганічним лаком із наступним сушінням та пресуванням. Електрична міцність слюдиніту $E_{\text{пр}} = 30...35 \text{ МВ/м}$.

Мікафолій – різновидність формувального міканіту, який з одного боку має підкладку із паперу. Його використовують для ізоляції стержнів якірних обмоток електричних машин високої напруги.

Прокладковий міканіт (ПФК) відрізняється від колекторного більшим вмістом зв'язуючих речовин (до 25%) і меншою густиною. Випускається товщиною від $0,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ до $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. З прокладкового міканіту виготовляють шайби та прокладки для електричних машинах нагрівостійкого виконання. Електрична міцність прокладного міканіту $E_{\text{пр}} = 15...34 \text{ МВ/м}$.

Гнучкий міканіт одержують застосуванням спеціальних лаків. Він використовується для шарової ізоляції, для ізоляції міжкатушкових з'єднань у машинах високої напруги. Електрична міцність $E_{\text{пр}} = 15...28 \text{ МВ/м}$.

Термостійкий (жаростійкий) міканіт виготовляють із флогопіту, склеєного неорганічним розчином фосфорного амонію (амофосом). Його використовують для ізоляції в електронагрівальних приладах.

Окрім розглянутих вище в електротехніці також використовують наступні матеріали на основі слюди: слюдопласт (колекторний, формувальний, прокладковий, гнучкий), мікастрічки, плівко-сюдєніт, плівкослюдопласт та ін.

3.5.4 Азбест та матеріали на його основі

Азбест (гірський льон) – це природний мінерал, характерними властивостями якого є його волокниста будова. Волокна азбесту легко розщеплюються на тонкі окремі волоски діаметром в тисячні долі міліметра і довжиною до декількох сантиметрів. Для виготовлення різних електроізоляційних матеріалів (паперу, пряжі, стрічки, картону) використовується переважно хризолітовий азбест, який являє собою силікат маґнію ($3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Густина азбесту $D = 2500 \text{ кг/м}^3$.

Волокна азбесту не поглинають воду, але покриваються плівкою із води. Внаслідок гігроскопічності і наявності в азбесті різних домішок електричні властивості азбестових матеріалів (азбестовий папір і тканини) невисокі ($\rho_v = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $E_{\text{пр}} = 1 \dots 2 \text{ МВ/м}$).

Основною особливістю азбесту є його висока нагрівостійкість (до 400°), еластичність та прядильна здатність. Недоліки: відносно велика товщина волокон, висока гігроскопічність та низька механічна міцність.

Із азбестових волокон виготовляють нитки, пряжу, шнури, плетені трубки, стрічки, папір та картон та інші вироби.

3.6 Комбіновані електроізоляційні матеріали

Просочені волокнисті матеріали

Просочені волокнисті матеріали – волокнисті матеріали (папір, тканини), які додатково просочені електроізоляційними лаками, емалями, оліями. До цієї групи ізоляційних матеріалів відносяться лакотканини (бавовняна та шовкова, склолакотканини, склолакотканини на основі фторопластів), лакопапери та лаковані трубки.

Ці матеріали вирізняються підвищеною нагрівостійкістю, електричною міцністю, теплопровідністю та механічною міцністю, а також зниженим вологопоглинанням.

В залежності від типу лаку, який використовується для просочування матеріалів лакотканини підрозділяють на світлі (із використанням олійних лаків) та чорні (із використанням олійно-бітумних лаків).

Світлі лакотканини більш стійкі до впливу нафтових масел, бензину, води, але вони більше схильні до теплового старіння.

Чорні лакотканини мають підвищені електроізоляційні характеристики, але не стійкі до впливу масел та бензину.

Питомий об'ємний опір лакотканин $\rho = 10^7 \dots 10^{11}$ Ом·м; тангенс кута втрат $\operatorname{tg} \delta = 0,04 \dots 0,18$ при 50 Гц; діелектрична проникність $\epsilon = 3,9 \dots 4,6$ при 50 Гц; електрична міцність лакотканин знаходиться в межах від 18 МВ/м (капронова світла лакотканина) до 90 МВ/м (шовкова світла лакотканина).

Характеристики основних лакотканин наведені в додатку (таблиця Д.6).

Шаруваті пластики

Шаруваті пластики – це матеріали, виготовлені шляхом спресовування або намотування просочених або лакованих волокнистих наповнювачів. Шаруваті матеріали анізотропні, а тому їх властивості вздовж та поперек шарів різні. До цієї групи відносяться: гетинакс, текстоліт, склотекстоліт, азбогетинакс та ін.

Гетинакс – одержують пресуванням паперу (сульфатцелюозного або лавсанового), просоченого бакелітом. Гетинакс виготовляють у вигляді листів і дошок товщиною від $0,2 \cdot 10^{-3}$ до $50 \cdot 10^{-3}$ м марок I, II, III, та V – для роботи в електрообладнанні промислової частоти (50 Гц) і VI, VII, VIII, X – для роботи на високій частоті. Основні електричні характеристики гетинаксу: $\rho_v = 10^{10} \dots 10^{14}$ Ом·м при 20°C ; $\varepsilon = 3,0 \dots 5,5$ при 50 Гц; $\text{tg}\delta = 0,001 \dots 0,1$ при 50 Гц; $E_{\text{пр}} = 20 \dots 40$ МВ/м. Електричні властивості гетинаксу вздовж шарів в декілька разів, а деякі і в десятки разів, менші ніж поперек шарів.

Гетинакс марок V-1 і V-2 відрізняється підвищеною електричною міцністю, гетинакс марки VIII має підвищену стійкість до вологи, а гетинакс марок I і II – підвищену механічну міцність.

Гетинакс має недостатню дугостійкість та вологостійкість.

Із гетинаксу виготовляють листи, плити, трубки, корпуси котушок, печатні плати, панелі розподільчих пристроїв та щитів.

Текстоліт – пластик аналогічний гетинаксу, який виготовляють із просоченої бакелітом (фенолформальдегідом) бавовняної або лавсанової тканини. Марки текстоліту: А, Б, Г, Вч, АСТ-А, АСТ-Б, ЛТ.

Електричні характеристики текстоліту трохи нижчі в порівнянні з гетинаксом, але він має підвищену стійкість до стирання та підвищену питому ударну в'язкість ($\alpha = 20 \dots 30 \text{ кДж/м}^2$).

Недоліки: висока вартість в порівнянні із гетинаксом; текстоліт, як і гетинакс, володіє низькою лугостійкістю, так як його зв'язуюча бакелітова смола легко науглецьовується під дією електричної дуги.

Текстоліт використовують в якості конструкційно-ізоляційного матеріалу для виготовлення ізоляційних панелей, щитів, планок, в якості основи для печатних плат.

Склотекстоліт – пластик, який виготовляють із просоченого скловолокна, має підвищену нагрівостійкість, вологостійкість та механічну міцність. Використовується для закріплення нагрітих електродів, а також для трансформаторів, залитих совтолом.

Склотекстоліт володіє підвищеною вологостійкістю і нагрівостійкістю та кращими електричними і механічними характеристиками в порівнянні з текстолітом і гетинаксом, але гірше обробляється.

Склотекстоліт виготовляють декількох марок: СТ, СТБ – на основі безлужних склотканин із зв'язуючою фенолформальдегідною смолою; СТЕФ і СТЕФ1 – на суміші епоксидної і кремнієорганічної смол, СТК і СТК-41/V на кремнієорганічному зв'язуючому.

Основні характеристики шаруватих пластиків наведені в додатку (таблиця Д.7).

Окрім перелічених також використовуються такі пластики як азбогетинакс, азбоцемент, азботекстоліт, текстогетинакс та інші.

Питомий об'ємний опір шаруватих пластиків знаходиться в межах $10^6 \dots 10^{12}$ Ом·м, діелектрична проникність $\epsilon = 5 \dots 8$. Електрична міцність азботекстоліту $E_{\text{пр}} = 2$ МВ/м, а гетинаксу – $E_{\text{пр}} = 35$ МВ/м. Нагрівостійкість таких пластиків становить $150 \dots 200$ °С.

Композиційні електроізоляційні матеріали

Плівкоелектрокартон – рулонний матеріал, який одержують шляхом склеювання електроізоляційного картону з поліетилентерефталатною плівкою. Пробивна напруга $U_{\text{пр}} = 7 \dots 11$ кВ при товщині матеріалу $(0,17 \dots 0,32) \cdot 10^{-3}$ м.

Плівкоазбокартон – гнучкий матеріал, що складається із поліетилентерафталатної плівки на яку з двох сторін наклеєний азбокартон.. Електрична міцність $E_{\text{пр}} = 15 \dots 25$ МВ/м. Застосовується в електричних машинах, що працюють при температурах $-40 \dots +130$ °С.

Ізофлекс – композиційний матеріал із склотканини, обклеєної з двох сторін поліетилентерефталатною плівкою. Використовується в якості пазової та міжфазної ізоляції. Він має високу волого-, хімо- та морозостійкість. Електрична міцність $90 \dots 130$ МВ/м.

Характеристики інших комбінованих електроізоляційних матеріалів, які застосовуються при виготовленні електротехнічних виробів наведені в додатку (таблиця Д.7).

Запитання для самоконтролю

1. Які основні електричні властивості діелектриків?
2. Що таке поляризація діелектриків? Види поляризації.
3. Що характеризує відносна діелектрична проникність?
4. Що таке струм зміщення, струм абсорбції та крізний струм?
5. Які характеристики використовують для порівняльної оцінки діелектриків у відношенні їх електропровідності?
6. Якими параметрами характеризуються механічні, теплові та фізико-хімічні властивості діелектриків?
7. Що таке діелектричні втрати та кут втрат?
8. Що таке електрична міцність діелектрика?
9. Які основні фізико-хімічні характеристики діелектриків?
10. Що таке нагрівостійкість діелектрика? Класи нагрівостійкості.
11. Які особливості газоподібних діелектриків?
12. Призначення і основні властивості трансформаторного масла.
13. Як класифікуються електроізоляційні лаки?
14. Що таке термопластичні та термореактивні матеріали?
15. Що таке полімеризація та поліконденсація?
16. Що таке пластмаси. Із яких компонентів їх виготовляють?
17. Які матеріали відносять до плівкових матеріалів?
18. Якими властивостями володіють електроізоляційні гуми?

19. Які матеріали називають твердими гумами? Як їх одержують?
20. Що таке лаки, емалі та компаунди? Чим вони відрізняються?
21. Які типи слюди та матеріали на їх основі застосовують для електричної ізоляції? Які їх властивості?
22. Де використовуються скло та кераміка?
23. Які матеріали використовують для виготовлення кераміки?
24. Основні переваги та недоліки матеріалів на основі азбесту.
25. Які матеріали відносяться до комбінованих електроізоляційних матеріалів? Область їх застосування.

РОЗДІЛ 4

ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Провідники – це тіла, або речовини які здатні добре проводити електричний струм, вони, у порівнянні із іншими матеріалами, володіють підвищеною електропровідністю ($\gamma > 10^5$ См/м).

Висока електропровідність провідникових матеріалів обумовлена наявністю великої кількості вільних електронів, які здатні покинути атом. Таку здатність мають лише валентні електрони, тобто електрони які знаходяться на енергетичних рівнях валентної зони. Провідникові матеріали практично не мають забороненої зони (розділ 1), тому валентні електрони досить легко можуть переходити із валентної зони в зону провідності.

Якщо провідник помістити в електричне поле, то під дією цього поля електрони набувають прискорення, яке пропорційне напруженості поля. Внаслідок цього виникає упорядкований направлений рух електронів в провіднику – **електричний струм**.

4.1 Класифікація провідникових матеріалів

За агрегатним станом провідникові матеріали класифікують так:

- тверді: метали, сплави металів, електровугільні та вугільно-графітні вироби, металокерамічні вироби;
- рідкі: електроліти (розчини кислот, солей та лугів), розплави солей та лугів, розплавлені метали;

– газоподібні: іонізовані пари металів та іонізовані гази (плазма).

За значенням питомого електричного опору металеві провідникові матеріали розділяються на дві групи:

– матеріали (метали) високої провідності у яких $\rho < 0,05 \cdot 10^{-6}$ Ом·м (срібло, мідь, золото, алюміній, берилій, магній, натрій);

– матеріали (сплави металів) високого опору $\rho > 0,3 \cdot 10^{-6}$ Ом·м (манганін, константан, ніхром, фехраль та ін.).

Окремою групою виділяють надпровідники та кріопровідники. **Надпровідники** – це провідникові матеріали, які володіють властивістю переходити у надпровідниковий стан ($\rho \rightarrow 0$) при їх охолодженні до дуже низької (критичної) температури.

До надпровідників за вказаних умов (при відповідних низьких температурах) відносяться: іридій ($-272,86^{\circ}\text{C}$), алюміній ($-271,8^{\circ}\text{C}$), олово ($-269,3^{\circ}\text{C}$), ртуть ($-268,8^{\circ}\text{C}$), свинець ($-265,8^{\circ}\text{C}$) та інші.

Деякі матеріали можуть досягати при досить низьких температурах (-173°C і нижче) дуже низького значення ρ , яке в сотні та навіть тисячі разів менше ніж при звичайних умовах – це **кріопровідники**. До кріопровідників відносять берилій, алюміній, мідь, срібло, золото та ін.

Матеріали високої провідності використовують для виготовлення обмоток електричних машин та реле, струмопровідних жил проводів та кабелів, шин розподільчих пристроїв, контактів, вставок запобіжників та ін.

Матеріали з високим електричним опором застосовують для виготовлення елементів нагрівачів, реостатів, точних вимірювальних приладів, резисторів, термопар.

Кріопровідники використовують для виготовлення струмоведучих жил проводів та кабелів, які працюють при температурах $-173\dots-252^{\circ}\text{C}$.

Також провідникові матеріали класифікують за механізмом електропровідності: провідники першого роду та провідники другого роду.

В металах механізм електропровідності обумовлений направленим рухом електронів під дією прикладеного електричного поля, тому їх прийнято називати провідниками з електронною (металічною) провідністю – *провідниками першого роду*.

Провідники другого роду – розчини та розплави кислот, лугів та солей з іонною будовою молекул. Електропровідність цих провідників зумовлена направленим рухом іонів. При проходженні струму через такі провідники електричні заряди переносяться разом із частинками молекул (іонами), при цьому змінюється їх склад і на електродах виділяються продукти гідролізу.

4.2 Основні властивості провідникових матеріалів

Провідникові матеріали характеризуються *електричними, механічними, тепловими та фізико-хімічними властивостями*.

4.2.1 Електричні властивості провідників

До основних характеристик, що описують електричні властивості провідникових матеріалів відносяться:

- питома електрична провідність γ , См/м;
- питомий електричний опір ρ , Ом·м;
- температурний коефіцієнт питомого опору TK_ρ або α_ρ , K^{-1} ;
- робота виходу електронів із металу A , еВ;
- термоелектрорушійна сила $\mathcal{E}$, В.

Електропровідність – це здатність матеріалу пропускати електричний струм. **Питома електропровідність** металевих провідників виражається в сименсах на метр (См/м) і, згідно із класичною теорією металів, виражається так:

$$\gamma = \frac{q^2 n_0 \lambda}{2m v_T}, \quad (4.1)$$

де q – заряд електрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

n_0 – число вільних електронів в одиниці об'єму металу;

λ – середня довжина вільного пробігу електрона між двома співударяннями із сусідніми вузлами решітки;

m – маса електрона;

v_T – середня швидкість теплового руху вільного електрона в металі.

Для різних провідникових матеріалів значення n_0 та v_T при заданій температурі майже не відрізняються.

Значення питомої провідності γ в основному залежить від середньої довжини вільного пробігу електронів λ , яка в свою чергу залежить від структури провідника. Чисті, відпалені метали з правильною кристалічною решіткою мають значно більшу провідність в порівнянні з металами, які мають домішки та дефекти решітки.

Електропровідність матеріалів визначають за мірою опору проходженню електричного струму. Для зручності різні провідникові матеріали, у відношенні електропровідності, порівнюють за **питомим електричним опором ρ** .

Питомим опором провідника ρ називається величина обернена питомій провідності:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}. \quad (4.2)$$

Питомий опір ρ відповідає опору провідника R із даного матеріалу, перерізом $S = 1 \text{ мм}^2$ та довжиною $l = 1 \text{ м}$.

Для будь-якого провідника, довжиною l (м) із постійним перерізом S (м²), який має опір R (Ом), питомий опір, який виражається в омах помножених на метр (Ом·м) визначається за формулою :

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}. \quad (4.3)$$

Питомий опір провідникових матеріалів залежить від наявності домішок, впливу магнітного поля, деформації матеріалу (волочіння дроту) та від температури.

Опір провідника R на змінному струмі високої частоти суттєво відрізняється від опору на постійному струмі внаслідок того, що високочастотне поле проникає в провідник на незначну глибину. Чим вища частота поля, тим на меншу глибину воно проникає в провідник. Це явище одержало назву *поверхневого ефекту*.

Температурний коефіцієнт питомого опору металів α_ρ (TK ρ).

Кількість носіїв заряду в металевому провіднику при підвищенні температури залишається практично незмінною. Але внаслідок коливання вузлів кристалічної решітки, із ростом температури, з'являється все більше перешкод на шляху направленого руху вільних електронів під дією електричного поля, тобто зменшується довжина вільного пробігу електрона λ , і як наслідок, зменшується питома електропровідність металу γ .

Зміну питомого опору металічного провідника із зміною температури прийнято характеризувати температурним коефіцієнтом питомого опору TK ρ або α_ρ (K $^{-1}$):

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (4.4)$$

При зміні температури в незначних діапазонах для визначення середнього температурного коефіцієнту на практиці користуються виразом:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho_1} \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(T_2 - T_1)}, \quad (4.5)$$

де ρ_1 та ρ_2 – питомий опір провідникового матеріалу, відповідно, при температурах T_1 та T_2 .

Тоді, використовуючи α_ρ , визначене для певного проміжку температур можна досить точно визначити значення ρ_2 для будь-якої температури T_2 :

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha_\rho (T_2 - T_1)]. \quad (4.6)$$

Для провідникових матеріалів α_ρ знаходиться в межах $10^{-3} \dots 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Робота виходу електронів із металу – це найменша енергія, яку необхідно затратити для видалення електрона із твердого або рідкого тіла у вакуумі. Робота виходу електронів є основною характеристикою поверхні провідника, яка визначає закономірності електронної емісії із цієї поверхні.

Робота виходу електронів для твердого тіла залежить від його матеріалу, будови поверхні та наявності на ній чужорідних атомів, а також від напруженості зовнішнього електричного поля.

Різниця в роботі виходу для двох провідників визначає контактну різницю потенціалів між ними.

Термоелектрорушійна сила. Між двома різними за хімічними властивостями провідниками при їх стиканні виникає контактна різниця потенціалів, обумовлена різницею значень роботи виходу електронів із різних металів (рисунки 4.1).

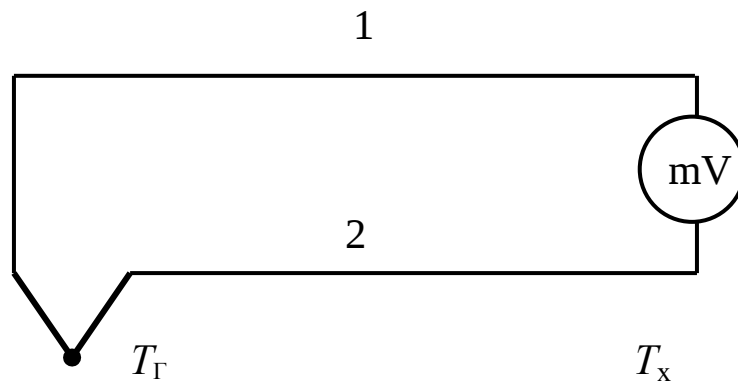


Рисунок 4.1 – Схема термопар

У відповідності із електронною теорією металів контактна різниця потенціалів між провідниками 1 та 2 дорівнює:

$$U_{1-2} = U_2 - U_1 + \left(\frac{RT}{q} \right) \cdot \ln \left(\frac{n_{01}}{n_{02}} \right), \quad (4.7)$$

де U_1, U_2 – потенціали провідників що стикаються;
 n_{01}, n_{02} – концентрація електронів в провідниках 1 та 2;
 R – постійна Больцмана, $R = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Якщо температури “спаїв” однакові, то в замкнутому колі сума різниці потенціалів дорівнює нулю. А коли температури різні, між провідниками виникає термо-ЕРС, яка визначається за формулою:

$$\mathcal{E} = U_{1-2} + U_{2-1} = C(T_1 - T_2), \quad (4.8)$$

де C – коефіцієнт термо-ЕРС даної пари провідників, мкВ/К.

$$C = \left(\frac{R}{q} \right) \cdot \ln \left(\frac{n_{01}}{n_{02}} \right).$$

Два ізольовані провідника із заданими хімічними властивостями, з'єднані між собою за допомогою паяння або зварювання, називаються **термопарою** і застосовуються для вимірювання температури.

Для виготовлення термопар використовують провідникові матеріали, які мають великий та стабільний коефіцієнт термо-ЕРС: мідь, залізо, константан (60%Cu, 40%Ni), копель (44 %Ni, 56% Cu), алюмель (95% Ni та 5% Al, Si, Mg), хромель (90% Ni, 10% Cr), платиновородій (90% Pt, 10% Rh).

Для вимірювання температур застосовують наступні термопари:

- мідь-константан, мідь-копель – температура до 350 °C;
- залізо-константан, залізо-копель, хромель-копель – температура до 600 °C;
- хромель-алюмель – температура до 1000 °C;
- платиновородій-платина – температура до 1600 °C.

4.2.2 Механічні властивості провідників

До основних характеристик, що описують механічні властивості провідникових матеріалів відносяться:

- твердість HB (HRC , HV), Па (Н/м^2);
- границя міцності при розтягуванні σ_p , Па (Н/м^2);
- відносне видовження при розриванні $\Delta l/l$, %;
- відносне звуження площі поперечного перерізу зразка $\Delta S/S$, %;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення TKl , K^{-1} .

Твердість – це здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього іншого, більш твердого тіла.

Найбільше поширення, із існуючих методів, одержав метод вдавлювання в матеріал сталюї кулі (твердість по Брінеллю), алмазної піраміди (твердість по Роксвеллу), алмазного конуса (твердість по Віккерсу).

Випробування матеріалів на твердість по методу Брінелля виконують шляхом вдавлювання сталюї кулі діаметром $10,5 \cdot 10^{-3}$ або $2,5 \cdot 10^{-3}$ м в матеріал, що випробовується, під дією заданого навантаження на протязі заданого часу. На одержаному відбитку виконують необхідні заміри.

Твердість матеріалу за Брінеллем визначається за виразом:

$$HB = \frac{P}{S_{\text{відб.}}} = \frac{2P}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4.9)$$

де P – прикладене навантаження, Н;

$S_{\text{відб.}}$ – площа відбитку на зразку, що випробовується, м²;

D – діаметр кулі, м²;

d – діаметр відбитку, м².

Діаметр кулі, навантаження та час впливу навантаження для різних матеріалів визначають за спеціальними таблицями.

Границю міцності при розтягуванні (σ_r , Па) визначають на зразках матеріалу відповідної форми, при якій забезпечується рівномірний розподіл зусилля розтягування по площі перерізу в середній частині зразка.

Зразок матеріалу (заготовка) потовщеними кінцями закріплюють у сталюих затискачах випробувальної машини. Нижній затискач машини нерухомий, а до другого докладають руйнівне

зусилля (зусилля розтягування) F_p , яке плавно зростає із відповідною швидкістю до моменту розривання зразка.

Границя міцності матеріалу при розтягуванні, обчислюється за виразом (3.26):

$$\sigma_p = \frac{F_p}{S_0}.$$

Пластичність – це здатність матеріалу, під впливом зовнішніх сил, деформуватися без руйнування та зберігати нову форму після припинення дії цих сил.

Для кількісної оцінки пластичності матеріалів використовують відносне видовження зразку при розриванні та відносне звуження площі поперечного перерізу зразка.

Відносним видовженням при розриванні називається відношення абсолютного видовження зразка до його початкової довжини виражене у процентах:

$$\Delta l / l = \frac{l_p - l_0}{l_0} \cdot 100, \quad (4.10)$$

де l_p – довжина зразка матеріалу після розривання, м;

l_0 – початкова довжина зразка, м.

Відносне звуження при розриванні – це відношення абсолютного звуження площі поперечного перерізу зразка матеріалу після розривання до його початкової площі поперечного перерізу виражене у процентах:

$$\Delta S / S = \frac{S_p - S_0}{S_0} \cdot 100, \quad (4.11)$$

де S_p – площа поперечного перерізу зразка матеріалу після розриву, м²;

S_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, м².

Температурний коефіцієнт лінійного видовження

дозволяє визначити зміну геометричних розмірів виробу (довжини, товщини, ширини) при нагріванні. Розрізняють температурний коефіцієнт лінійного розширення при заданій температурі TKl і його середнє значення в інтервалі температур α_l :

$$TKl = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta l}{\Delta T}, \quad (4.12)$$

$$\alpha_l = \frac{l}{l_0} \frac{(l_2 - l_1)}{(T_2 - T_1)}, \quad (4.13)$$

де l_2, l_1 – геометричні розміри виробу, відповідно, при температурах T_1 та T_2 .

4.2.3 Теплові та фізико-хімічні властивості провідників

Температура плавлення ($T_{пл}, ^\circ\text{C}$) – температура при якій матеріал переходить в інший агрегатний стан (відбувається його фазовий перехід).

Сплави металів зазвичай мають більш низьку температуру плавлення ніж їх компоненти окремо.

Теплопровідність – здатність металу (матеріалу) проводити тепло при нагріванні або при охолодженні.

Якщо через металеву пластину площею S та товщиною l за час T проходить тепловий потік із енергією θ , то між поверхнями протилежних граней створюється різниця температур ΔT , яка пов'язана із θ співвідношенням:

$$\theta = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{\Delta l}, \quad (4.14)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К.

Коефіцієнт теплопровідності провідникових матеріалів прямо пропорційний їх питомій електропровідності. Чим вища електропровідність матеріалу – тим вища його теплопровідність.

У зв'язку із цим пристрої для відводу теплоти (радіатори) виготовляють із міді, алюмінію та їх сплавів.

Густина (D , кг/м³) – кількість маси речовини, яка вміщується у певному її об'ємі. Чисельне вираження густини майже завжди співпадає із питомою вагою, тому густину матеріалу визначають за питомою вагою.

Густина металів змінюється від 534 кг/м³ у літію до 22500 кг/м³ у осмію. За густиною метали діляться на легкі та важкі.

До легких відносяться метали із густиною $D < 5000$ кг/м³. Представниками поширених легких матеріалів є алюміній ($D = 2600$ кг/м³), магній ($D = 1740$ кг/м³), натрій ($D = 970$ кг/м³) та інші.

До важких відносяться метали із густиною $D > 5000$ кг/м³: мідь ($D = 8940$ кг/м³), залізо ($D = 7870$ кг/м³), свинець ($D = 11400$ кг/м³), олово ($D = 7300$ кг/м³), нікель ($D = 8900$ кг/м³) та інші.

Корозійна стійкість – це здатність металів чинити опір руйнуванню під впливом зовнішніх факторів (повітря, вологи та ін.).

В таблиці 4.1 наведено параметри основних металів, які використовуються в якості провідників електричного струму.

Таблиця 4.1 – Основні параметри металів

Метал	Темпера- тура пла- влення, °С	Густина, кг/м ³	Коефіцієнт теплопро- відності, Дж/кг·К	Питомий електри- чний опір, мкОм·м	ТК пи- томого опору ×10 ⁻⁴ , К ⁻¹	ТК ліній- ного ро- зширення ×10 ⁻⁶ , К ⁻¹
Ртуть	-38,9	13600	10,0	0,958	9,0	61,0
Цезій	28,5	1870	–	0,210	48,0	95,0
Калій	63,7	870	92,0	0,069	58,0	80,0
Натрій	97,8	970	125,0	0,046	50,0	70,0
Літій	186,0	530	71,0	–	–	–
Олово	232,0	7310	65,0	0,120	44,0	23,0
Кадмій	321,0	8650	93,0	0,076	42,0	30,0
Свинець	327,0	11400	35,0	0,210	37,0	29,0
Цинк	420,0	7140	111,0	0,059	–	31,0
Магній	651,0	1740	167,0	0,045	42,0	26,0
Алюміній	657,0	2700	209,0	0,028	42,0	24,0
Кальцій	851	1530	98,0	0,040	–	18,5
Срібло	961,0	10500	415,0	0,016	40,0	19,0
Золото	1063,0	19300	293,0	0,024	38,0	14,0
Мідь	1083,0	8940	390,0	0,017	43,0	16,0
Марганець	1244	7440	66,7	1,850	10,0	22,3
Берилій	1284,0	1850	167,0	0,040	60,0	13,0
Нікель	1455,0	8900	95,0	0,073	65,0	13,0
Кобальт	1492,0	8710	79,0	0,062	60,0	12,0
Залізо	1535,0	7870	73,0	0,098	60,0	11,0
Паладій	1554,0	12100	72,0	0,110	–	12,0
Титан	1725,0	4500	15,0	0,480	33,0	8,1
Платина	1773,0	21400	–	0,105	–	6,5
Хром	1850,0	7100	–	0,210	–	11,2
Цирконій	1860,0	6500	17,0	0,410	45,0	5,4
Ніобій	2410,0	8570	50,0	0,140	30,0	7,2
Молібден	2620,0	10200	151,0	0,057	46,0	5,1
Вольфрам	3380,0	19300	168,0	0,055	46,0	7,4

4.3 Матеріали високої провідності

Срібло (Ag) – метал білого кольору, дуже дефіцитний, відноситься до металів з високою електропровідністю. Срібло має мінімальний питомий опір серед усіх відомих провідникових матеріалів ($\rho = 0,016 \cdot 10^{-6}$ Ом·м). Відповідно до вимог ДСТУ 6836-80 електротехнічне срібло марок Ср 999...999,9 повинно мати домішок не більше 0,1 %. Температура плавлення срібла $T_{\text{пл}} = 961$ °С, густина $D = 10500$ кг/м³. Механічні характеристики срібла: границя міцності при розтягуванні $\sigma_p = 200$ МПа; твердість за Брінеллем $HB = 25$ Н/м²; відносне видовження при розриванні $\Delta l/l = 50\%$.

Срібло достатньо широко використовується в електротехніці та радіoeлектроніці. Срібло застосовують: при виготовленні різноманітних контактів; для виготовлення електродів керамічних та слюдяних конденсаторів; для захисту мідних проводів, що працюють при температурах вище 250 °С; при виготовленні радіочастотних кабелів; срібло входить до складу твердих припоїв.

Мідь (Cu) – метал червонуватого кольору, як і срібло дуже дефіцитний. Мідь одержують шляхом переробки сульфідних руд. Після кількох плавок руди та випалювання з інтенсивним продуванням мідь проходить процес електролітичного очищення. Одержані в результаті електролізу катодні пластини міді переплавляють в зливки вагою 80...90 кг, які прокатують та протягують у виробі необхідного перерізу.

Механічні та електричні характеристики провідникової міді в значній мірі залежать від її стану. За станом мідь розділяють на *тверду* (не відпалену) та *м'яку* (відпалену).

Тверду мідь (МТ) одержують при холодному протягуванні, вона має високу границю міцності при розтягуванні, підвищену твердість ($HB = 65 \dots 120 \text{ Н/м}^2$) і пружність, але вона має меншу електропровідність.

Якщо мідь піддати відпалюванню (нагріти до температури $200 \dots 500^\circ\text{C}$ без доступу повітря і поступово охолодити) то одержимо м'яку (відпалену) мідь (ММ). М'яка мідь більш пластична, має велике відносне видовження при розриві, більшу питому провідність, але вона має меншу твердість ($HB = 35 \text{ Н/м}^2$) та меншу границю міцності при розтягуванні $\sigma_p = 200 \text{ МПа}$.

Основні переваги міді в порівнянні з іншими провідниками:

- малий питомий опір ($\rho = 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – для м'якої та $\rho = 0,018 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ – для твердої міді);
- висока питома провідність ($\gamma = (55,6 \dots 58,8) \cdot 10^6 \text{ См/м}$ – відповідно для твердої та для м'якої міді);
- достатньо висока механічна міцність ($\sigma_p = 260 \dots 280 \text{ МПа}$ – для м'якої та $\sigma_p = 360 \dots 390 \text{ МПа}$ – для твердої міді);
- висока пластичність ($\Delta l/l = 2,5 \dots 5\%$ для твердої, і $\Delta l/l = 18 \dots 35\%$ для м'якої міді);
- висока стійкість до корозії;
- добре обробляється, прокатується у листи та стрічки, протягується в дріт малого перерізу;
- відносна легкість паяння та зварювання.

Температура плавлення міді $T_{\text{пл}} = 1083^{\circ}\text{C}$, густина $D = 8940 \text{ кг/м}^3$, температурний коефіцієнт питомого опору $TK_p = 43 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

Згідно із стандартами мідь за хімічним складом розділяють на ряд марок: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М0б, М1 (99,90 % Cu), М1р, М2 (99,7 % Cu), М2р, М3 (99,5 % Cu), М3р, М4 (99,0 % Cu) та ін. Найменший питомий опір має хімічно чиста мідь (М00). Наявність домішок в міді знижує як її механічні властивості, так і її електропровідність. Найбільш небажаними домішками в міді є свинець, вісмут та кисень.

В якості провідникового матеріалу використовують мідь марок М1 та М0. Мідь марки М1 має в своєму складі 99,9 % міді та 0,1% домішок, в тому числі не більше 0,08 % кисню. Присутність кисню знижує механічні властивості міді. Більш високі механічні властивості має мідь марки М0, яка містить не більше 0,05 % домішок, в тому числі не більше 0,02 % кисню.

В сухому та вологому повітрі, прісній воді при температурі 20°C мідь практично не окислюється.

В присутності вологи та вуглекислого газу на поверхні міді утворюється зелена плівка (карбонат міді). Корозії міді також сприяють сірчистий газ, сірчистий водень, аміак та окис азоту. При нагріванні міді вище 225°C розпочинається її активне окислення.

Тверду мідь застосовують там, де необхідно забезпечити значну механічну міцність, твердість та опір до стирання: для контактних проводів електротранспорту, для шин розподільчих

пристроїв, для колекторних пластин електричних машин, струмоведучих жил кабелів.

М'яку мідь у вигляді дротів круглого та прямокутного перерізу застосовують головним чином для виготовлення струмопровідних жил обмоткових, монтажних та встановлювальних проводів, кабелів, для виготовлення фольги.

Алюміній (Al) – метал білого кольору, який займає друге місце за значенням, після міді, серед провідникових матеріалів і найбільш поширений в природі.

Алюміній відноситься до групи легких металів, його густина $D = 2600 \dots 2700 \text{ кг/м}^3$. Як і мідь, алюміній може бути м'який (відпалений) та твердий (не відпалений) відповідно марок АМ та АТ.

Операції прокатування, протягування та відпалювання алюмінію аналогічні відповідним операціям із міддю.

Питомий опір алюмінію $\rho = 0,028 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, питома провідність $\gamma = 35,7 \cdot 10^6 \text{ См/м}$, температура плавлення $T_{\text{пл}} = 657 \text{ }^\circ\text{C}$, границя міцності при розтягуванні для м'якого алюмінію $\sigma_p = 80 \dots 90 \text{ МПа}$, для твердого – $\sigma_p = 160 \dots 170 \text{ МПа}$, відносне видовження при розриві $\Delta l/l = 1,5 \dots 2,0 \text{ \%}$ – для АМ, $\Delta l/l = 10 \dots 18 \text{ \%}$ – для АТ.

Алюміній виготовляється наступних марок: А999 (99,999 % Al), А995, А99, А97, А95, А85, А8, А7, А6, А5, А0, А (99,0 % Al), АЕ та ін. Для електротехнічних виробів використовується алюміній, що містить не більше 0,5 % домішок. Більш чистий алюміній (не більше 0,03 % домішок) використовують для виготовлення

алюмінієвої фольги, електродів та корпусів електролітичних конденсаторів. Домішки суттєво погіршують питому електропровідність алюмінію та його механічні властивості (особливо титан).

Алюміній активно окислюється на повітрі і покривається оксидною плівкою з великим питомим електричним опором. Ця плівка оберігає алюміній від подальшої корозії, але вона створює великий перехідний опір в місцях з'єднань і утруднює паяння алюмінію. В місцях з'єднання алюмінію з міддю, особливо при підвищеній вологості, можливе виникнення гальванічної корозії.

Сірководень, аміак та сірчистий газ майже не впливають на швидкість корозії алюмінію, що сприяє широкому застосуванню проводів та інших електротехнічних виробів із алюмінію в тваринницьких приміщеннях.

Основна область застосування алюмінію – це виготовлення проводів повітряних ліній електропередач та струмопровідних жил кабелів. Також із алюмінію виготовляють проводи для обмоток електричних машин, монтажні та встановлювальні проводи, виготовляють обмотки (стержні) роторів асинхронних двигунів із коротко замкнутим ротором. Алюміній застосовують для виготовлення шин розподільчих пристроїв, оболонок кабелів, фольги, корпусів конденсаторів та ін.

Вольфрам (W) – метал сірого (сріблясто-білого) кольору, з високою температурою плавлення і великою твердістю. Вольфрам відноситься до групи тугоплавких металів.

Основні характеристики вольфраму: густина $D = 19300$ кг/м³; температура плавлення $T_{пл} = 3380^{\circ}\text{C}$; границя міцності для

вольфрамових стержнів діаметром $5 \cdot 10^{-3}$ м $\sigma_p = 500 \dots 600$ МПа, а для тонких вольфрамових ниток $\sigma_p = 3000 \dots 6000$ МПа; питомий електричний опір $\rho = 0,055 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; температурний коефіцієнт питомого опору $TK\rho = 46 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹.

Вольфрам отримують методом порошкової металургії, тобто внаслідок спікання спресованих частинок металу. Для цього із частинок вольфраму (порошку) пресуванням у спеціальних прес-формах отримують стержні. Потім їх запікають при температурі 1300°C. Спечені вольфрамові стержні мають зернисту будову і мають значну крихкість. Після цього вольфрамові стержні нагрівають до температури 3000°C. Внаслідок такої обробки вольфрам набуває волокнистої будови, яка забезпечує йому високу механічну міцність і пластичність.

Із вольфраму виготовляють дріт діаметром до $d = 0,01 \cdot 10^{-3}$ м. Окислення вольфраму на повітрі починається при температурі 400°C і вище. У вакуумі вольфрамові деталі можуть працювати при температурах до 2000°C.

Для вольфраму характерним є слабкий зв'язок між окремими кристалами, і тому масивні вироби із вольфраму дуже крихкі. При механічній обробці ковкою та волочінням вольфрам набуває волокнистої структури, цим пояснюється гнучкість вольфрамових ниток.

Вольфрам широко використовується в електротехнічному виробництві в якості матеріалу для електричних контактів і для деталей в електровакуумних приладах (нитки ламп розжарювання, електроди та ін.).

Сплави міді та алюмінію

Бронзи – це сплави міді з оловом, фосфором, берилієм, кремнієм, алюмінієм, хромом, кадмієм, магнієм.

Бронзи виготовляються наступних марок: Бр.ОФ, Бр.ОЦ, Бр.А, Бр.АМц, Бр.С, Бр.Б, Бр.АЖН та інших.

В маркуванні літерами позначають: Бр. – бронза, О – олово, Ф – фосфор, Ц – цинк, С – свинець, Н – нікель, Мц – марганець, А – алюміній, Ж – залізо, Б – берилій, Т – титан, К – кремній і т.д. Літерами позначають вміст компонентів сплаву в процентах (окрім міді).

Бронзи мають значно вищі механічні властивості ніж чиста мідь, але їх електропровідність менша ніж у міді. Границя міцності при розтягуванні $\sigma_p = 400 \dots 1100$ МПа (берилієва бронза). Введення до складу бронзи кадмію, при незначному зменшенні питомої електропровідності ($\rho = 0,02 \cdot 10^{-6}$ Ом·м) веде до підвищення твердості та міцності ($\sigma_p = 730$ МПа).

Кадмієву бронзу застосовують для контактних проводів та колекторних пластин. Також бронзи широко використовують для виготовлення струмопровідних пружин, тримачів щіток та ін.

Основні характеристики бронз, які використовуються в електротехніці наведені в додатку (таблиця Д.11).

Латунь – це сплав міді із цинком (до 43%): Л70, Л63, Л80 та ін. Інколи до складу латуні вводять алюміній (ЛА-77-2), нікель (ЛН-65-5) та марганець (ЛМц58-2) та інші метали. Латунь дуже пластична і має підвищені механічні властивості у порівнянні із міддю ($\sigma_p = 380 \dots 450$ МПа; $\Delta l/l = 6,5$ %).

Із латуні виготовляють різноманітні струмопровідні деталі: обойми для щіток, фасонні болти, гайки, шайби.

Альдрей – сплав алюмінію (98...99 %), заліза (0,2...0,3%), кремнію (0,4...0,7), магнію (0,3...0,5).

Альдрей має високі механічні властивості в порівнянні з алюмінієм, цих властивостей він набуває в результаті спеціальної, складної термічної обробки. Густина альдрею $D = 2700 \text{ кг/м}^3$, границя міцності при розтягуванні $\sigma_p = 320...370 \text{ МПа}$; відносне видовження $\Delta l/l = 6...9 \%$; питомий опір $\rho = 3,17 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Застосовують альдрей для виготовлення проводів ліній електропередач.

Силумін – сплав алюмінію з кремнієм (5...14 %). Із силуміну виготовляють корпуси та підшипникові щити мікро електромашин та асинхронних двигунів потужністю до 4 кВт, корпуси повітряних конденсаторів та інші вузли електротехнічних виробів.

4.4 Матеріали високого опору

Матеріали високого опору за застосуванням розділяються на три основні групи: сплави *для вимірювальних приладів*; сплави *для реостатів*; сплави *для електронагрівальних приладів*.

Перша група сплавів має високий питомий опір, малий TK_p , малу термо-ЕРС відносно міді та високу стабільність питомого опору в часі.

Друга група сплавів окрім великого значення питомого опору повинна мати підвищену нагрівостійкість (до 200 °С).

Треті сплави повинні мати ще більшу нагрівостійкість (1000°С і вище) і здатність працювати тривалий час на повітрі при цій температурі.

Крім переліченого вище, в багатьох випадках вимагається висока технологічність сплавів – можливість виготовлення гнучкого дроту дуже малого перерізу.

4.4.1 Сплави для вимірювальних приладів

Манганін (МНМц3-12, МНМцАЖ3-12-0,3) – сплав міді (85 %), марганцю (12 %) та нікелю (3 %). Питомий опір манганіну $\rho = (0,42...0,48) \cdot 10^{-6}$ Ом·м; температурний коефіцієнт питомого опору $\alpha_{\rho} = 6...50 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; коефіцієнт термо-ЕРС в парі з міддю $(1...2) \cdot 10^{-6}$ В/К; густина $D = 8400$ кг/м³; границя міцності $\sigma_{\rho} = 450...600$ МПа; відносне видовження при розтягуванні $\Delta l/l = 15...30\%$, температура плавлення $T_{пл} = 910...960$ °С.

Манганін може витягуватися в дріт діаметром $d = 0,02 \cdot 10^{-3}$ м. Цей дріт часто покривають емалевою ізоляцією. Для покращення властивостей дріт із манганіну піддають спеціальній термічній обробці у вакуумі із наступним повільним охолодженням. Гранично допустима робоча температура манганіну не більше 200 °С.

Манганін застосовують для виготовлення еталонних резисторів та вимірювальних приладів високого класу точності, а та-

кож для виготовлення перетворювачів (датчиків) тиску, так як опір манганінової проволочи зростає лінійно із зростанням тиску.

Константан (МНМц40-1,5) – сплав міді (до 60 %), нікелю (40 %) та марганцю (1,5%). Особливістю константану є те що його питомий опір практично не змінюється із зміною температури. Цим пояснюється його назва.

Питомий опір константану $\rho = (0,48...0,52) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, густина $D = 8900 \text{ кг/м}^3$, границя міцності $\sigma_p = 400...500 \text{ МПа}$, відносне видовження при розриванні $\Delta l/l = 20...40 \%$, температура плавлення $T_{пл} = 1250^\circ \text{C}$. Константан має підвищену нагрівостійкість (до 500°C) у порівнянні із манганіном, що дозволяє використовувати його в реостатах і нагрівальних елементах.

Суттєвою відмінністю константану від манганіну є високе значення коефіцієнта термо-ЕРС в парі із міддю ($\alpha_p = 43 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}$) та в парі із залізом ($\alpha_p = 54 \cdot 10^{-6} \text{ В/К}$). Це є недоліком при використанні константану в вимірювальних приладах високої точності. Але завдяки високому коефіцієнту термо-ЕРС він з великим успіхом використовується при виготовленні термопар, що призначені для вимірювання температур в діапазоні декількох сотень градусів. Константан також використовують для виготовлення потенціометрів та дугогасних резисторів.

Завдяки високим механічним властивостям, та високій пластичності із константану виготовляють дуже тонкий дріт, стрічки та фольгу.

4.4.2 Сплави для реостатів

Для реостатів може використовуватися мідно-нікелевий сплав – константан. Але його використання обмежено наявністю великої кількості дорогого нікелю. З цієї причини для реостатів використовують сплави в яких частину нікелю замінюють більш дешевими металами (цинк, кобальт, залізо та ін.). Одним із таких сплавів є нейзильбер.

Нейзильбер (МНЦ15-20) – мідно-нікелевий сплав, в якому частина нікелю замінена цинком (22 %). За зовнішнім виглядом нейзильбер нагадує срібло. Нейзильбер має питомий опір $\rho = (0,30 \dots 0,33) \cdot 10^{-6}$ Ом·м, густину $D = 8700$ кг/м³, границю міцності при розтягуванні $\sigma_p = 350 \dots 1100$ МПа, відносне видовження при розриванні $\Delta l/l = 3 \dots 30\%$, коефіцієнт термо-ЕРС в парі із міддю становить $14,4 \cdot 10^{-6}$ В/К. Температура плавлення нейзильберу $T_{пл} = 1080$ °С.

4.4.3 Сплави для нагрівальних приладів

Сплави для нагрівальних приладів мають в своїй основі залізо, нікель, хром, алюміній. Основними серед цих сплавів є ніхроми (ферроніхроми), хромалі (фехралі). Висока нагрівостійкість цих сплавів обумовлена наявністю в їх складі металів із високим значенням об'ємного коефіцієнта оксидації (нікель, хром, алюміній), які сприяють утворенню на поверхні провідника із таких сплавів, при нагріванні, суцільної оксидної плівки. Залізо має об'ємний коефіцієнт оксидації менший одиниці, і тому при

нагріванні воно дуже легко окислюється. Чим більше в складі сплаву заліза, тим менша нагрівостійкість сплаву.

Ніхром – сплав системи залізо-нікель-хром (Fe-Ni-Cr). При підвищеному вмісті заліза в сплаві – **ферроніхром**.

Основні характеристики ніхромів: питомий опір $\rho = (1,1 \dots 1,2) \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; густина $D = 8200 \dots 8400 \text{ кг/м}^3$; температурний коефіцієнт питомого опору $\alpha_\rho = (1 \dots 2) \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$; допустима робоча температура до 1100°C , границя міцності при розтягуванні $\sigma_\rho = 600 \dots 700 \text{ МПа}$, відносне видовження $\Delta l/l = 25 \dots 30\%$, температура плавлення $T_{\text{пл}} = 1380 \dots 1420^\circ\text{C}$.

Окрім швидкості окислення того чи іншого металу чи компонента сплаву, великого впливу на термін експлуатації нагрівального елемента, що працює на повітрі завдають властивості оксиду. Якщо оксид не леткий, то він при нагріванні утворює на поверхні металу плівку (тонкий шар), яка захищає його від подальшого окислення. Якщо оксид леткий, то при нагріванні відбувається постійне окислення сплаву – нагрівальний елемент швидко руйнується.

Ніхроми характеризуються високою стійкістю до окислення при високій температурі на повітрі, що зумовлено наближеними значеннями температурних коефіцієнтів лінійного розширення сплавів і оксидних плівок, що утворюються на їх поверхні.

Термін експлуатації нагрівальних елементів із ніхрому скорочується при багаторазовому короткочасному вмиканні нагрівача (при змінах температур оксидні плівки розтріскуються), а також при наявності коливань перерізу дроту.

Термін експлуатації нагрівальних елементів із ніхрому можна значно подовжити при припиненні доступу кисню до поверхні дроту. Цю особливість використовують при виготовленні ТЕНів.

ТЕН – нагрівальний елемент, виготовлений із ніхромової нитки, що розташована в металевій трубці і заповнена діелектричним порошком (наприклад, магнезією MgO). ТЕНи виготовляють для роботи на повіті, у воді, у маслі та в інших середовищах.

Ніхроми дуже технологічні, із них можна витягувати дуже тонкий дріт або стрічку, із яких виготовляють різноманітні нагрівальні елементи – для промислового та побутового застосування.

Хромаль – сплав системи залізо-хром-алюміній (Fe-Cr-Al), при підвищеному вмісті заліза – **фехраль**. Сплави цієї системи дешевші від нікелевих сплавів.

Сплави цієї системи характеризуються високою стійкістю до хімічного руйнування поверхні під впливом різних газоподібних середовищ при високих температурах, вони мають достатньо високі механічні характеристики.

Основним недоліком жаростійких сплавів системи Fe-Cr-Al є те, що вони менш технологічні, більш тверді та більш крихкі в порівнянні із ніхромами. Із таких сплавів одержують дріт та стрічки значно більшого перерізу ніж із ніхрому. Внаслідок цього їх можна використовувати лише в електротермічній техніці для нагрівальних пристроїв великої потужності та в промислових нагрівальних печах.

Основні характеристики фехралі: питомий опір $\rho = (1,26 \dots 1,40) \cdot 10^{-6}$ Ом·м; густина $D = 7200 \dots 7300$ кг/м³; температурний коефіцієнт питомого опору $\alpha_{\rho} = (0,5 \dots 1,5) \cdot 10^{-4}$ К⁻¹; допустима робоча температура 900...1300 °С, температура плавлення $T_{\text{пл}} = 1500^{\circ}\text{C}$, границя міцності $\sigma_{\rho} = 700 \dots 800$ МПа, відносне видовження $\Delta l/l = 10 \dots 20$ %.

Для маркування ніхромів (фероніхромів) та хромалей (фехралей) використовують традиційна літерно-цифрова система. Літерами позначають найбільш характерні елементи сплавів високого опору, а цифрами позначають приблизний процентний вміст цього елемента в сплаві.

Основні літери: Н – нікель, Х – хром, Б – ніобій, В – вольфрам, Г – марганець, Д – мідь, К – кобальт, Л – берилій, Т – титан, Ю – алюміній і т.д.

Приклад маркування жаростійких сплавів: ніхром марки Х15Н60 – 15...18 % хрому, 55...61% нікелю і близько 25% заліза; хромаль марки Х27Ю5Т – 26...28 % хрому, 5...5,8 % алюмінію, близько 67% заліза, також у сплаві присутній титан.

Також в розглянутих сплавах, в незначній кількості, присутні магній, кремній, вуглець та інші домішки.

Основні характеристики деяких жаростійких сплавів які використовуються для виготовлення елементів нагрівальних приладів наведені в додатку (таблиця Д.12).

4.5 Металокерамічні матеріали та вироби

Металокерамічними називають матеріали, які виготовлені пресуванням із металевих порошків із подальшим спіканням їх при високій температурі (1000...1400°C). До вихідних порошкових мас входять два або більше порошків різних металів, один з яких має бути з більш високою температурою плавлення в порівнянні з порошками інших металів.

При високотемпературній обробці порошкоподібної маси більш легкоплавкі порошки плавляться і заповнюють пори між частинками тугоплавкого металу. Внаслідок цього створюються монолітні металокерамічні вироби.

У випадках, коли потрібно виготовити пористі металокерамічні вироби, наприклад, підшипники, фільтри та інші. Для цього застосовують твердофазне спікання частинок порошків металу, які мають приблизно однакову температуру плавлення.

Іноді у вихідну масу, яка складається із металевих порошків, вводять порошок неметалу, наприклад графіту. Такі маси використовують для виготовлення металографітових щіток для електричних машин. Способи виготовлення виробів із пресованих порошкоподібних мас із подальшим спіканням їх частинок при високих температурах відносять до порошкової металургії.

В електротехнічному виробництві методи порошкової металургії широко використовуються для виготовлення електровугільних виробів, деяких видів магнітних матеріалів і електричних контактів.

У порівнянні із металевими контактами зі срібла, міді, вольфраму і сплавів металів, металокерамічні контакти виділяються

великою зносостійкістю, підвищеною дугостійкістю, допускають великі сили стискування і стійкість до ерозії.

В електричних апаратах низької напруги широко використовуються контакти із металокерамічних матеріалів на основі порошків срібла і окису кадмію (CdO , 15%). Вони мають характерні властивості металокерамічних виробів і надійно працюють в умовах тропічного клімату.

В якості контактів, які призначені для розмикання великих струмів використовують металокерамічні деталі, які виготовляють із порошків срібла, вольфраму (40...50%) і нікелю (2...3%). Деталі цього складу пластичні і допускають всі види механічної обробки.

Металокерамічні контакти, які виготовляють із порошків міді та графіту, відзначаються високою стійкістю до зварювання при розмиканні великих струмів. Це досягається не тільки складом і структурою металокерамічного матеріалу на основі порошків міді та графіту (3...5%), але й наявністю в об'ємі матеріалу до 10...15% пор.

При виробництві металокерамічних виробів кількість пор можна змінювати в широких межах. В металокерамічних контактах на невеликі струми пористість не повинна перевищувати 2...5%. Це досягається повторним пресуванням металокерамічних виробів з подальшою термічною обробкою (відпаленням).

4.6 Електровугільні матеріали та вироби

Серед твердих неметалічних провідникових матеріалів найбільше значення мають матеріали на основі вуглецю – електровугільні вироби. До електровугільних виробів належать щітки для електричних машин, контактні деталі, вугільні електроди, електроосвітлювальне вугілля та ін.

Електровугільні вироби виготовляють методами порошкової технології із суміші графіту, коксу, сажі та антрациту. У вихідний склад деяких електровугільних виробів вводять металеві порошки (мідний, свинцевий, олов'яний та ін.). В якості речовини, що зв'яє використовують синтетичні смоли (бакелітові, кремнієорганічні та ін.).

Внаслідок випалювання електровугільні вироби набувають механічної міцності і здатності до механічної обробки. При цьому зменшується величина їх питомого електричного опору.

Деякі типи електрощіток і освітлювального вугілля після механічної обробки підлягають обмідненню. Для цього частину їх поверхні покривають тонким шаром міді для створення надійного електричного контакту. Обміднення виробів відбувається гальванічним методом. Утворений на виробі шар міді має товщину $h = (10...15) \cdot 10^{-6}$ м.

Із електровугільних виробів найбільш широко використовуються щітки для електричних машин і контактні деталі. Розрізняють такі види щіток: графітні, вугільно-графітні, металографітні та електрографітовані.

Графітні щітки виготовляють із натурального графіту. Вони відзначаються м'якістю, безшумні при роботі та використовуються при колових швидкостях від 25 до 70 м/с, їхній питомий електричний опір $\rho = (10 \dots 50) \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Вугільно-графітні щітки виготовляють із графіту, сажі або коксу і зв'язуючих смол. Ці щітки мають підвищену твердість, механічну міцність і абразивність. Вони можуть очищати окисні плівки на колекторах і кільцях електричних машин. Щітки використовуються при колових швидкостях від 15 до 25 м/с, їхній питомий електричний опір $\rho = (40 \dots 60) \cdot 10^{-6}$ Ом·м.

Метало-графітні щітки виготовляють із порошків графіту та міді, а в деякі вводять ще порошки олова і срібла. Вони мають малий питомий електричний опір: $\rho = (0,03 \dots 0,3) \cdot 10^{-6}$ Ом·м; у щіток з пониженим складом міді питомий опір $\rho = (5 \dots 12) \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Ці щітки використовують при колових швидкостях 20...35 м/с.

Електрографітовані щітки виготовляють із графіту, коксу, сажі та зв'язуючих смол. Після пресування і випалювання в печах щітки надходять в електричні печі для графітизації при 2500°C. При цьому склад щіток збагачується графітом, що підвищує механічну міцність щіток і дає змогу використовувати їх при великих колових швидкостях 35...90 м/с. Використовуються для електричних машин з важкими умовами комутації.

Електровугільні електроди відзначаються стійкістю до електричної дуги, вони дуже повільно окислюються, не горять і не плавляться до температури 3800°C, широко використовуються в електричних апаратах великої потужності.

4.7 Провідникові вироби

Із провідникових матеріалів виготовляють струмоведучі жили проводів та кабелів. Проводи розділяють на ізолювані та неізолювані. Останні мають одну струмоведучу жилу, яка може бути однодротова або багатодротова. Вони використовуються для монтажу повітряних ліній електропередач та внутрішніх цехових ліній електропередачі.

Ізолювані проводи та кабелі мають одну або декілька ізолюваних однодротових або багатодрових струмоведучих жил.

За призначенням ізолювані проводи розділяють на обмотувальні, монтажні, установчі. Окремою групою виділяють кабельні вироби.

Виготовлення струмоведучих жил проводів та кабелів багатодровими дозволяє підвищити їх гнучкість та пластичність.

4.7.1 Обмотувальні проводи

Обмотувальні проводи призначені для виготовлення обмоток електричних машин, трансформаторів, вимірювальних приладів, реле, та інших електричних апаратів.

Обмотувальні проводи виготовляють із міді та алюмінію круглого та прямокутного перерізу. Залежно від ізоляції їх розділяють на проводи із: волокнистою, емалевою та комбінованою ізоляцією.

Проводи із волокнистою ізоляцією

ПБ, ПБО (АПБО), ПБД (АПБД), ПКД, ПШД, ПЛД – провід мідний (алюмінієвий), ізолюваний одним або двома (Д)

шарами паперу (Б), бавовняної (капронової, шовкової або лавсанової) пряжі; виготовляють ці проводи прямокутного та круглого перерізу.

ПШТБО – мідний провід прямокутного перерізу, який має два шари триацетатної плівки, шар телефонного паперу та один шар із бавовняної пряжі.

ПББО, ППЛБО – мідний провід прямокутного перерізу, декілька шарів кабельного паперу, або три шари лавсанового полотна і один шар бавовняної пряжі.

Перелічені проводи за нагрівостійкість відносяться до класу А та Е (ПЛД).

Проводи із емалевою ізоляцією

ПЭЛ – провід мідний, ізольований масло та лакостійкою емаллю, клас нагрівостійкості А.

ПЭВ-1, ПЭВ-2, ПЭМ-1, ПЭМ-2, ПЭДВ – мідний провід із надміцною емаллю вініфлекс (В) або металевін (М) із звичайною (1) або потовщеною (2) ізоляцією, та з додатковим термопластичним шаром із полівінілацетату.

ПЭЛР-1, ПЭЛР-2, ПЭВТЛ-1, ПЭВТЛ-2 – мідний провід із емаллю на поліамідно-резольній або поліуретановій основі. Клас нагрівостійкості Е.

ПЭТВ, ПЭТВ-939 та ПЭТВТР – мідний провід із емаллю на поліефірній основі з додатковим шаром термореактивної епоксидної смоли, клас нагрівостійкості В.

ПЭТ 155А – мідний провід із емаллю на поліефірно-імідній основі, клас нагрівостійкості F.

ПНЭТ – мідний провід із емаллю на поліамідній основі, допускає нагрів до 200 °С.

Проводи із емалевою ізоляцією виготовляються як правило круглого перерізу.

Проводи із комбінованою ізоляцією

ПЭЛБО, ПЭЛШО, ПЭЛШКО, ПЭЛЛО – мідний провід із емаллю на олійній основі із одним шаром відповідно бавовняної пряжі, натурального шовку, капрону або лавсанового волокна.

ПЭВЛО, ПЭТЛО, ПЭПЛО – мідний провід із надміцною емаллю вініфлекс або металвін на поліефірній або поліуретановій основі та одним шаром із лавсанового волокна.

Усі проводи із комбінованою ізоляцією виготовляються круглого перерізу і мають ізоляцію класу нагрівостійкості А.

Проводи із волокнистою ізоляцією мають підвищену механічну міцність, але недостатню електричну міцність. Вони мають значну товщину ізоляції та недостатню волого- та хімістійкість.

Проводи із емалевою ізоляцією знаходять застосування при виготовленні електродвигунів нових серій і допускають намотування на станках-автоматах. Проводи із комбінованою ізоляцією займають проміжне положення між проводами із емалевою та волокнистою ізоляцією.

Із метою підвищення надійності електрообладнання розроблені і виготовляються проводи із неорганічною азбестовою та скляною ізоляцією та проводи із подвійною лаковою та поліхлорвініловою або поліетиленовою ізоляцією.

ПДА – мідний провід із азбестовою ізоляцією, яка накладається підклеюю до мідного дроту за допомогою гліфталевих лаків. Виготовляються круглого та прямокутного перерізу, клас нагрівостійкості В.

ПСД (ПСДТ), ПСДК, ПСДКТ – мідний провід із двома шарами скловолокна, підклесного нагрівостійким кремнійорганічним лаком. Проводи виготовляються круглого та прямокутного перерізу, клас нагрівостійкості F, H.

ПЭВВП, ППВВП – проводи, які мають мідну однодротову або семидротову струмоведучу жилу поверх якої накладений полівінілхлоридний пластифікат або двохарова поліетиленова ізоляція. Такі проводи використовуються для виготовлення обмоток заглибних електродвигунів.

4.7.2 Встановлювальні та монтажні проводи

До встановлювальних та монтажних проводів відносять проводи, які призначені для передачі електроенергії до струмоприймачів. Їх застосовують для монтажу внутрішніх освітлювальних мереж, для живлення силових струмоприймачів, для з'єднання електричних приборів та апаратів в шафах, панелях, пультах керування та щитах.

ПР (АПР), ПРН (АПРН) – провід із мідною (алюмінієвою) жилою, із гумовою ізоляцією в бавовняному обплетенні, просоченому протигнильною речовиною або в негорючому хлоропреновому обплетенні.

ПРГ, ПРГН – одножильний провід із гнучкою мідною струмопровідною жилою із гумовою ізоляцією із бавовняним протигнильним або хлоропреновим негорючим обплетенням.

ПРТО (АПРТО) – одножильний мідний (алюмінієвий) провід із гумовою ізоляцією в обплетенні із бавовняної пряжі, просоченому протигнильним складом для прокладення в трубах.

ПРВ (АПРВ) – одножильний мідний (алюмінієвий) провід із гумовою ізоляцією в поліхлорвініловій оболонці.

ПРГВ – одножильний мідний провід із гумовою ізоляцією в поліхлорвініловій оболонці із багатодротовою гнучкою жилою (Г).

ПВ (АПВ), ПП (АПП) – одножильний мідний (алюмінієвий) провід із поліхлорвініловою (В) або поліетиленовою (П) ізоляцією відповідно.

ПГВ – теж саме, але із багатодротовою гнучкою жилою.

ППВ (АППВ), ППП (АППП) – плоский провід із мідними (алюмінієвими) струмоведучими жилами, із поліхлорвініловою ізоляцією.

ППВС (АППВС), ПППС (АПППС) – плоский провід із мідними (алюмінієвими) жилами, із поліхлорвініловою ізоляцією або із ізоляцією із само затухаючого поліетилену. Призначений для прихованої проводки (С).

ВПВ, ВПП – провід із мідною жилою із поліетиленовою ізоляцією в поліхлорвініловій або поліетиленовій оболонці, для заглибних електродвигунів.

АРТ, АВТ (АВТУ) – провід із алюмінієвими жилами, із гумовою або поліхлорвініловою ізоляцією, із стальним тросом (підсиленням тросом).

МШВ (МШП), МГШВ (МГШП), МГШВЭ (МГШПЭ) – монтажний провід із одно або багатодротовою гнучкою (Г) мідною жилою, із обмоткою з триацетатного шовку та в поліхлорвініловій (поліетиленовій) ізоляції, екранований (Э).

ПВ - 500 (ПП-500), ПВЭ-500 (ППЭ-500) монтажний провід із мідною струмоведучою жилою та із поліхлорвініловою (поліетиленовою) ізоляцією, екранований (Э).

4.7.3 Ізольовані проводи для повітряних ліній електропередачі

З метою підвищення надійності електропостачання при передачі електроенергії на значні відстані та при розподіленні її в силових і освітлювальних мережах використовують ізольовані проводи із алюмінієвими жилами із стальною несучою жилою, або без неї.

Самонесучі ізольовані проводи (СІП) використовують для ліній електропередачі напругою 0,38, 0,66 та 10 кВ при температурі від -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$. При використанні СІП знижуються експлуатаційні витрати, відсутнє утворення ожеледі на проводах, можлива робота лінії при перехрещенні проводів, виключена можливість к.з. між проводами.

СИП-1 (СИП-1А) – самонесучий ізолюваний провід, алюмінієві жили ізолювані світлостабілізованим термопластичним поліетиленом скручені навколо неізолюваного (ізолюваного) сталевалюмінієвого тросу; призначений для повітряних ліній електропередачі напругою до 1 кВ.

СИП-2 (СИП-2А) – самонесучий ізолюваний провід, алюмінієві жили ізолювані світлостабілізованим зшитим поліетиленом скручені навколо неізолюваного (ізолюваного) сталевалюмінієвого тросу; призначений для повітряних ліній електропередачі напругою до 1 кВ.

СИП-3 – одножильний самонесучий провід із ущільнених дротів із алюмінієвого сплаву із стальним дротом всередині, ізолюваний зшитим світлостабілізованим поліетиленом; призначений для повітряних ліній електропередачі напругою 6...20 кВ.

СИП-4 – самонесучий ізолюваний провід без несучого тросу, всі жили (фазні і нульова) виконані із алюмінію і мають однаковий переріз, ізолювані термопластичним світлостабілізованим поліетиленом; призначений для повітряних ліній електропередачі напругою до 1 кВ.

САПт (САПсш) – провід із алюмінієвими жилами із ізоляцією із світлостабілізованого термопластичного (т) або зшитого (сш) поліетилену для повітряних ліній напругою 0,38 кВ.

САСПт (САСПсш) – провід із алюмінієвими жилами із ізоляцією із світлостабілізованого термопластичного або зшитого поліетилену для повітряних ліній напругою 0,38 кВ із несучою жилою.

4.7.4 Кабелі

Кабель представляє собою одну або кілька ізольованих жил (одно або багатодротові), які розміщені у захисній герметичній оболонці із свинцю, алюмінію, полівінілхлоридного пластику або поліетилену. Кабелі прокладаються на повітрі, в землі та у воді.

АВВГ (ВВГ), АПВГ (ПВГ) – кабель із алюмінієвими (мідними) жилами, із полівінілхлоридною (В) або поліетиленовою (П) ізоляцією у оболонці із поліхвінілхлоридного пластику, голий (без джутового покриття).

АВВБ (ВВБ), АПВБ (ПВБ) – теж саме, що і попередній але броньований сталлюю полосою.

АППБ (ППБ) – кабель із алюмінієвими (мідними) жилами, із поліетиленовою ізоляцією у оболонці із поліетилену, броньований.

АСРБ (СРБ) – кабель із алюмінієвими (мідними) жилами, із гумовою ізоляцією у свинцевій оболонці, броньований сталлюю полосою.

АСРП (СРП) – кабель із алюмінієвими (мідними) жилами, із гумовою ізоляцією у свинцевій оболонці, броньований сталлюм оцинкованим дротом із захисним покровом.

АВРБ (ВРБ) – кабель із алюмінієвими (мідними) жилами, із гумовою ізоляцією у оболонці із полівінілхлориду, броньований сталлюю полосою.

АВРГ (ВРГ) – кабель із алюмінієвими (мідними) жилами, із гумовою ізоляцією у оболонці із полівінілхлориду, голий (Г).

4.7.5 Не ізолювані проводи

Для повітряних ліній електропередач використовують мідні, алюмінієві, сталі та сталюалюмінієві не ізолювані (голі) проводи.

За конструктивним виконанням голі проводи можуть бути однодротові або багатодотові.

В сільських електричних мережах використовують сталі, алюмінієві та сталюалюмінієві голі проводи наступних марок:

ПС 25 – провід сталі багатодотовий перерізом 25 мм².

ПСТ 5 – провід сталі однодротовий діаметром 5 мм.

А, АКП – провід алюмінієвий, простір між дротами заповнений нейтральним мастилом (АКП).

АН, АЖ, АНКП, АЖКП – провід із не термообробленого (АН) або термообробленого (АЖ) алюмінієвого сплаву, простір між дротами заповнений нейтральним мастилом (АНКП, АЖКП).

АС, АСКП – сталюалюмінієвий провід, простір між усіма дротами заповнений нейтральним мастилом (АСКП).

АСК – сталюалюмінієвий провід, сталі осердя якого заповнене мастилом і покрите двома шарами поліетилентерефталатної плівки.

АСКС – сталюалюмінієвий провід, простір між сталіми дротами і поверхня сталіного осердя заповнені і нейтральним мастилом.

Алюмінієві та сталюалюмінієві проводи розглянутих вище марок виготовляються перерізом 16...185 мм².

Стальні однодротові та багатодротові проводи із-за низької електропровідності, великої маси та низької корозійної стійкості на сьогодні майже не використовуються в лініях електропередачі.

Окрім перелічених вище, для ліній електропередачі також можуть використовуватися біметалеві проводи, в яких стальна жила електролітичним способом покривається товстим шаром міді або алюмінію.

4.8 Припої та флюси

Припої – це чисті метали або спеціальні сплави, які застосовуються для створення механічно міцних швів для з'єднання металевих частин (наприклад, проводів) паянням.

Припої повинні мати температуру плавлення, значно нижчу, ніж у металевих частин, що з'єднуються за їх допомогою. Припої розділяють на легкоплавкі та тугоплавкі.

Легкоплавкі (м'які) припої мають температуру плавлення нижче $427\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($65\ldots 427\text{ }^{\circ}\text{C}$), границя міцності при розриванні $\sigma_p = 16\ldots 100\text{ МПа}$. В процесі паяння розплавлений припій, під дією капілярних сил, заповнює зазор між відповідно пригнаними поверхнями деталей, що з'єднуються, та частково дифундує у основний метал. Якщо розплавлений припій утворює на поверхні металу суцільну плівку, то вважають, що він змочує поверхню. Змочування металу припоєм відбувається в тому випадку, коли сили притягання між атомами припою і атомами металу більші, ніж між атомами в самому припої.

Для отримання якісних паяних з'єднань поверхні металів, що паяють повинні бути чистими і вільними від оксидів. Станне очищення поверхні основного металу перед паянням від бруду, жиру і оксидів сприяє отриманню міцних паяних з'єднань.

Найбільшу частину, з усіх застосовуваних на практиці м'яких припоїв, займають олов'янисто-свинцеві припої (ПОС, ПОССу, ПОСК та ін). Вони мають велику рідкотекучість і застосовуються для з'єднання більшості металів. За паяння цими припоями оптимальний розмір зазору складає від $0,08 \cdot 10^{-3}$ до $0,13 \cdot 10^{-3}$ м, чим забезпечується досить висока міцність паяних швів. Олов'янисто-свинцеві припої мають задовільну корозійну стійкість в більшості середовищ.

Основні характеристики м'яких припоїв наведені в додатку (таблиця Д.13).

Тугоплавкі (тверді) припої мають температуру плавлення вище 427°C ($427 \dots 920^{\circ}\text{C}$), границя міцності при розриванні $\sigma_p = 100 \dots 500$ МПа. Найбільш поширеними твердими припоями є мідно-цинкові (ПМЦ-62, ПМЦ-54, ПМЦ-48 та ін.) і мідно-срібні (ПСр-25, ПСр-36, ПСр-70 та ін) із різними домішками, а також сплави алюмінію з міддю, цинком і кремнієм.

Найчастіше застосовуються мідно-срібні припої, які характеризуються малим питомим електричним опором і тому широко застосовуються для паяння струмопровідних елементів з чорних і кольорових металів. Мідно-цинкові припої застосовують для паяння мідних, латунних, бронзових і сталевих дета-

лей, але шви із таких припоїв крихкі і нестійкі проти вібрацій та ударних навантажень.

Для паяння алюмінієвих проводів та деталей із алюмінію і його сплавів застосовують припої на алюмінієвій основі із додаванням міді, кремнію та олова (З4-А). Отримані паяні шви характеризуються підвищеною механічною міцністю і стійкістю проти атмосферної корозії.

Основні характеристики тугоплавких (твердих) припоїв наведені в додатку (таблиця Д.14).

Для покращення якості паяння використовують **флюси**. Основне призначення флюсу видалення з поверхні оксидів та інших забруднень і захист від повторного окиснення. поверхонь при нагріванні. Флюс знижує поверхневий натяг розплавленого припою, покращує його текучість і зчеплення з металом. Він повинен легко витіснятися розплавленим припоєм з поверхні металу.

Флюси для паяння бувають рідкі (водний розчин хлористого цинку, спиртовий розчин каніфолі та ін.), тверді порошкоподібні (бура, борна кислота, каніфоль тощо), які при нагріванні сприяють або пришвидшують змочування металів припоєм.

Флюс наносять на поверхню перед паянням, він повинен мати наступні властивості:

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

Для паяння міді, латуні і бронз легкоплавкими припоями на свинцевій основі застосовують каніфоль, розчин каніфолі в етиловому спирті та інші сполуки на її основі. Оскільки каніфоль є слабоактивним флюсом, то перед її нанесенням поверхні металів, які спаюють, старанно зачищають.

Для паяння тугоплавкими припоями каніфоль та інші флюси, які розкладаються за високих температур, застосовувати не можна. Для високотемпературного паяння сталі, міді та мідних сплавів використовують буру ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) і її суміш з борною кислотою (H_3BO_7).

Для паяння алюмінію в якості флюсів використовують особливо активні речовини – сполуки на основі хлористого літію, фтористого натрію, хлористого цинку і хлористого калію. Температура плавлення твердого флюсу повинна бути нижчою від температури плавлення припою, а температура паяння – меншою від температури термічного розпаду флюсу. Залишки флюсу виводять промиванням швів гарячою водою за допомогою щіток.

Запитання для самоконтролю

1. Які матеріали відносяться до провідників?
2. Як класифікуються провідникові матеріали?
3. Якими електричними характеристиками (параметрами) описуються властивості провідників?

4. Якими механічними властивостями володіють провідникові матеріали?
5. Що таке питома електропровідність провідника? Від чого вона залежить?
6. Як пов'язані між собою питома електропровідність і питомий електричний опір?
7. В чому полягає сутність процесу надпровідності? Які надпровідники ви знаєте?
8. Які матеріали високої провідності ви знаєте, де їх застосовують?
9. Переваги та недоліки сплавів міді та алюмінію в порівнянні із чистими металами.
10. Які матеріали високого опору ви знаєте, область їх застосування?
11. Від чого залежить термін експлуатації сплавів для нагрівальних приладів? Як його можна збільшити?
12. Що таке металокерамічні матеріали? Область їх застосування.
13. Які ви знаєте не металічні провідникові матеріали та вироби? Область їх застосування.
14. Назвіть основні типи провідникових виробів. Область їх застосування.
15. Назвіть переваги самонесучих ізольованих проводів у порівнянні із неізольованими проводами.
16. Призначення припоїв, як вони класифікуються?
17. Для чого призначені флюси.

РОЗДІЛ 5

НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

Напівпровідники – це речовини, які за електропровідністю займають проміжне місце між провідниками і діелектриками ($\gamma = 10^{-9} \dots 10^6$ См/м). У всіх металевих провідників із підвищенням температури електричний опір збільшується, а у напівпровідників і діелектриків – зменшується.

Провідники мають велику кількість вільних електронів, спрямоване переміщення яких створює струм провідності, а у напівпровідників вільних електронів небагато. Це пояснюється тим, що валентні електрони в напівпровідниках зв'язані зі своїми атомами, тобто вони не вільні.

Особливістю напівпровідників є те, що струм в них може виникати і змінюватися в широких межах тільки під впливом зовнішніх енергетичних впливів: нагрівання, опромінення, механічного навантаження, під впливом електричного та магнітного полів, а також при введенні певних домішок. Всі перелічені фактори призводять до збільшення енергії валентних електронів, що дає змогу їм відірватися від своїх атомів і під дією прикладеної напруги почати спрямоване переміщення – стати носіями струму. Наприклад, чим вища температура напівпровідника або чим інтенсивніше опромінювання, тим більше буде в ньому вільних електронів і тим більшим буде струм.

5.1 Основні властивості напівпровідників

Властивості напівпровідників характеризуються власною та домішковою провідністю, електропровідністю, оптичними та фотоелектричними явищами, електронними процесами на поверхні, контактними явищами.

5.1.1 Власна і домішкова електропровідність напівпровідників

Механізм власної електропровідності напівпровідників розглянемо на прикладі кремнію. Як відмічалось раніше, кремній має алмазоподібну гранецентровану решітку, в якій кожен атом розміщується у вузлі кристалічної решітки і має ковалентний зв'язок із чотирма аналогічними атомами (рисунок 5.1, *а*). При цьому вільні носії, які б могли створити електропровідність відсутні.

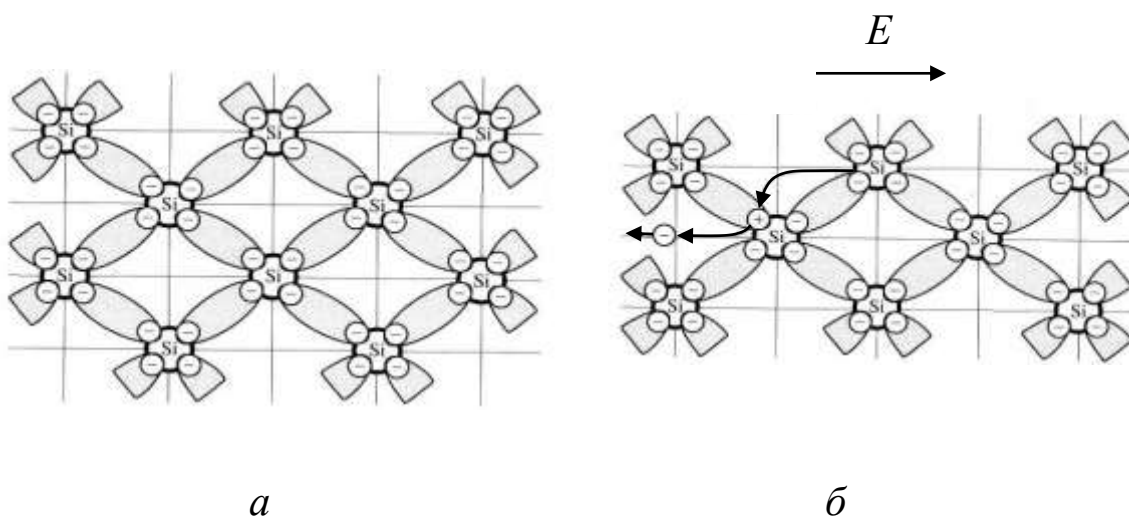


Рисунок 5.1 – Схема розміщення атомів кремнію: *а* – зовнішнє електричне поле відсутнє; *б* – зовнішнє електричне поле прикладене до напівпровідника

Для перетворення електрона у вільний носій заряду необхідно надати йому додаткову енергію, яка була б достатньою для розривання ковалентних зв'язків. Ця енергія визначається шириною забороненої зони і називається *енергією активації* (рисунок 5.2, а).

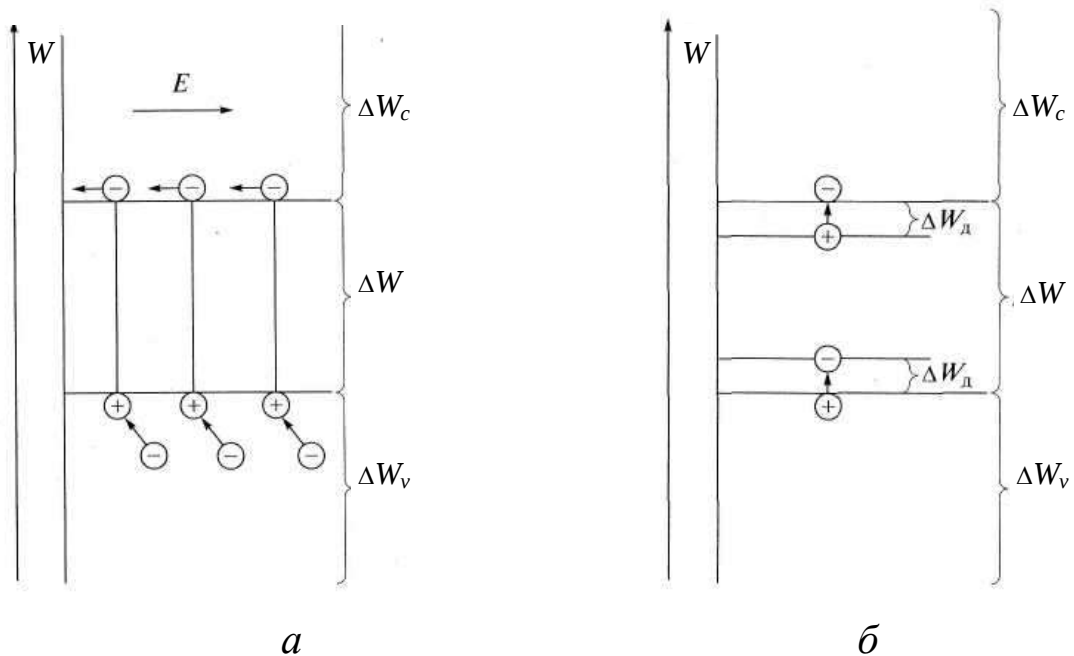


Рисунок 5.2 – Зонні діаграми напівпровідника: а – власного; б – із домішками

Таку енергію напівпровідник може одержати при нагріванні, опроміненні, деформації та при інших зовнішніх енергетичних впливах.

При розриві ковалентного зв'язку електрон вивільняється і хаотично рухається під впливом теплової енергії в об'ємі напівпровідника.

Атоми напівпровідника, які втратили електрони, перетворюються на позитивно заряджені іони, які закріплені на своїх місцях і не можуть переміщуватися. Місце на зовнішній орбіті атома, яке залишив електрон, називають *діркою*. Цю дірку (*вакан-*

сію) може зайняти інший електрон, який покинув своє місце в сусідньому атомі. Внаслідок такого перескоку електрона в сусідньому атомі також з'явиться дірка, тобто він перетвориться на позитивно заряджений іон (рисунок 5.1, б). Якщо зовнішнє електричне поле відсутнє, то дірка, так як і електрон буде здійснювати хаотичні рухи.

Процес утворення вільних електронів і дірок називається *генерацією* електронно-діркових пар. Одночасно в напівпровіднику відбувається і зворотній процес – повернення електронів, який називається *рекомбінацією* носіїв зарядів.

Якщо до напівпровідника прикласти електричне поле, то електрони будуть переміщуватися від одних атомів до інших в напрямку зворотному по відношенню до напрямку поля, так як електрон має негативний заряд.

Для розглянутого випадку, звільнені електрони і утворені на їх місці дірки належать атомам самого напівпровідника. Тому таку електропровідність називають *власною*.

У напівпровідниках із власною електропровідністю присутня *електронна (n-типу)* і *діркова (p-типу)* електропровідність. При цьому електрони переміщуються в одному напрямку, а дірки в протилежному. Переміщення електронів в напрямку протилежному до напрямку поля називають *електронним струмом*.

Дірку прийнято вважати позитивно зарядженою частинкою із зарядом, який дорівнює заряду електрона. Уявне переміщення дірок у напрямку, протилежному переміщенню електронів (в напрямку прикладеного поля), називається *дірковим струмом*.

Таким чином, переміщення електронів в одному напрямку, а дірок у протилежному (рисунок 5.3) є **власною електропровідністю** напівпровідника, оскільки носії струму (електрони й дірки) належать власним атомам напівпровідника. В цьому випадку загальний струм I складається із електронного I_n та діркового I_p струмів:

$$I = I_n + I_p. \quad (5.1)$$

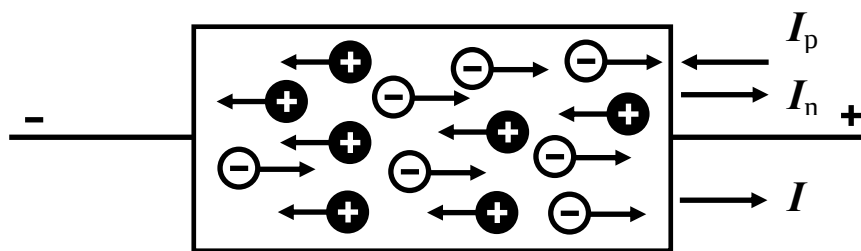


Рисунок 5.3 – Схема руху електронів і дірок у випадку власної електропровідності напівпровідника

У випадку власної електропровідності напівпровідника кількість електронів N_n і дірок N_p рівна. Але $I_n > I_p$, оскільки рухомість електрона більша за рухомість дірки.

Рухомість носія струму – відношенням швидкості переміщення електрона v_n , або швидкості переміщення дірки v_p , до напруженості електричного поля E в напівпровіднику. Тоді рухомість електрона, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$:

$$\mu_n = \frac{v_n}{E}, \quad (5.2)$$

рухомість дірки:

$$\mu_p = \frac{v_p}{E}. \quad (5.3)$$

Таким чином, рухомість вказує, який шлях проходить за одну секунду електрон, або дірка, при напруженості $E = 1$ В/м. Враховуючи викладене, можна написати вирази для електронного і діркового струмів:

$$I_n = N_n e v_n = N_n e \mu_n E, \quad (5.4)$$

$$I_p = N_p e v_p = N_p e \mu_p E, \quad (5.5)$$

де e – заряд електрона або дірки, Кл;

N_n, N_p – кількість електронів та дірок, шт.;

E – напруженість електричного поля, В/м.

Тоді, згідно із (5.1 - 5.3) сумарний струм у напівпровіднику:

$$I = N_n \cdot e v_n + N_p \cdot e v_p = N_n \cdot e \mu_n \cdot E + N_p \cdot e \mu_p E. \quad (5.6)$$

У випадку власної електропровідності напівпровідника число електронів дорівнює числу дірок ($N_n = N_p = N$). Загальний струм буде дорівнювати:

$$I = N \cdot e \cdot E (\mu_n + \mu_p). \quad (5.7)$$

Дуже часто для напівпровідникових приладів потрібні напівпровідникові матеріали виключно з електропровідністю ***n***-типу або ***p***-типу (наприклад, для створення напівпровідникових випрямлячів). Цього можна досягти внесенням, у старанно очищений напівпровідник, відповідних домішок.

Домішки, атоми яких мають більшу валентність ніж атоми напівпровідника, мають здатність постачати напівпровідник вільними електронами. Такі домішки називають ***донорними***, або ***донорами***.

Домішки, атоми яких мають меншу валентність ніж атоми напівпровідника, мають здатність приєднувати до себе електрони і, відповідно, утворювати дірки. Такі домішки називають **акцепторними**, або **акцепторами**.

Щоб виготовити напівпровідник, який має переважно електронну провідність, до нього вводять речовину (домішку), яка складається із атомів, валентність яких хоча б на одиницю більша за валентність атомів основного напівпровідника. Так, наприклад, в кремній (Si), атом якого має чотири валентних електрони, вводять донорну домішку – фосфор (P), атом якого має п'ять валентних електронів (рисунок 5.4).

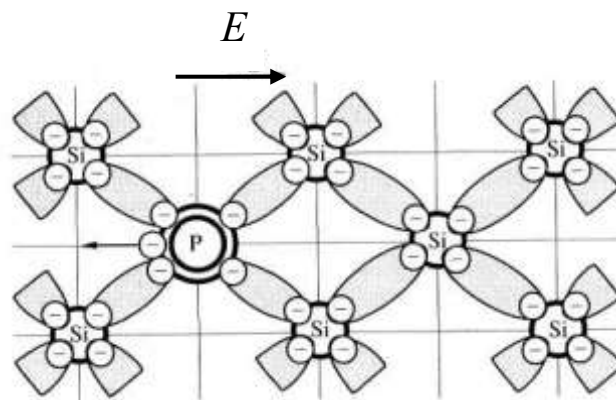


Рисунок 5.4 – Схема кристалічної решітки донорного напівпровідника

Чотири електрони кожного атому введеної домішки встановлюють чотири ковалентні (парні) зв'язки із відповідними атомами основного напівпровідника. П'ятий електрон домішки залишається без ковалентного зв'язку. Зі своїм атомом він пов'язаний лише силою кулонівської взаємодії. Енергія такої сили є дуже незначною. Отже, цей електрон може бути легко переведений у вільний стан і під дією прикладеної напруги брати участь в утворенні електронного струму в напівпровіднику (рисунок 5.5).

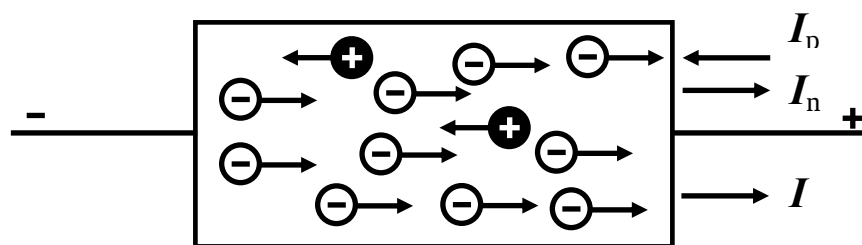


Рисунок 5.5 – Схема руху електронів і дірок у напівпровіднику із донорною домішкою

Із рисунку 5.5 видно, що, в наведеному прикладі, **основними** носіями струму є електрони, які складають **домішкову** електропровідність, а дірки є **неосновними** носіями струму. Дві дірки і відповідні їм два електрони утворились внаслідок іонізації атомів основного напівпровідника, вони обумовлюють **власну** електропровідність напівпровідника (кремнію).

Електрони фосфору утворюють **домішкову** електропровідність. Такий напівпровідник називається **електронним** або **n-типу**.

Загальний струм у напівпровіднику дорівнює сумі електронного та діркового струмів, але електронний струм набагато більший за дірковий.

На енергетичній діаграмі (рисунок 5.2, б) наявність донорної домішки в решітці напівпровідника характеризується появою локального енергетичного рівня, який лежить в забороненій зоні під «дном» зони провідності.

Якщо в кремній ввести будь-яку домішку із III групи таблиці Менделєєва, наприклад бор (В), то кожен із атомів домішки встановить три ковалентні зв'язки із сусідніми атомами кремнію (рисунок 5.6). Оскільки у бору всього три валентних електрони,

то він може встановити зв'язки тільки з трьома ближчими атомами кремнію. Для зв'язку з четвертим атомом кремнію у атома бору немає електронів. Таким чином, у кількох атомів кремнію буде по одному електрону без ковалентного зв'язку. В цей незавершений зв'язок біля атому бору, завдяки тепловій енергії, може перейти електрон від сусіднього атому основного напівпровідника (Si). При цьому утворюється негативний іон бору, а вільна дірка переміщується по напівпровіднику, і відповідно, приймає участь у провідності кристалу.

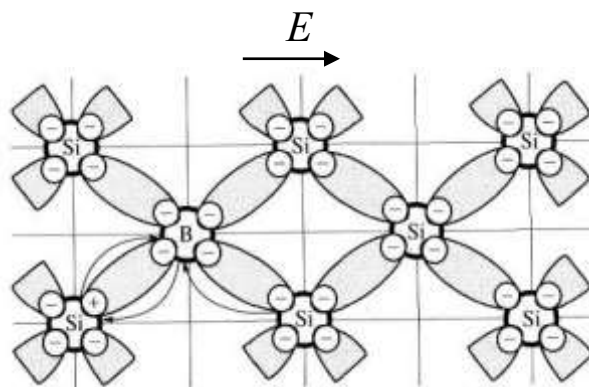


Рисунок 5.6 – Схема кристалічної решітки акцепторного напівпровідника

Під дією прикладеної напруги цей рух дірок упорядковується, в напівпровіднику виникне **домішковий дірковий** струм (рисунок 5.7). Крім цього, в напівпровіднику буде ще невелика кількість пар вільних електронів і дірок від атомів кремнію. Отже, поряд з домішковою електропровідністю в напівпровіднику буде невелика власна електропровідність. Величина загального струму в напівпровіднику, як і в попередньому випадку, буде дорівнювати сумі електронного й діркового струмів, але дірковий струм буде значно більшим за електронний, так як дірок буде значно більше.

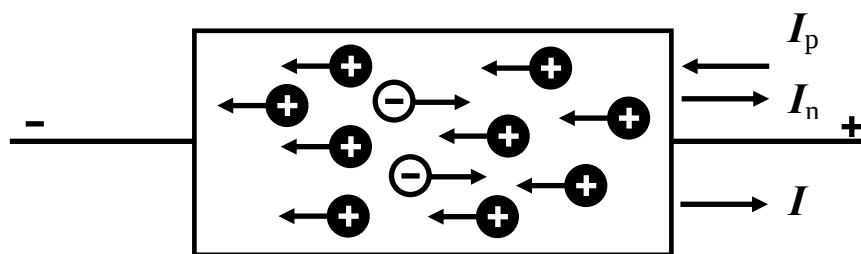


Рисунок 5.7 – Схема руху дірок і електронів у напівпровіднику із акцепторною домішкою

Напівпровідники із акцепторними домішками називаються **дірковими** напівпровідниками або напівпровідниками ***p-типу***.

На енергетичній діаграмі (рисунок 5.2, б) наявність акцепторної домішки в напівпровіднику характеризується появою локального енергетичного рівня, який лежить на незначній відстані над валентною зоною основного елемента. При іонізації акцепторної домішки відбувається перехід електрона із валентної зони на рівень ΔW_d , а у валентній зоні з'являється дірка яка і є вільним носієм заряду.

В напівпровідниках можуть одночасно бути присутніми донорна і акцепторна провідності. Такі напівпровідники називаються **скомпенсованими**. Домішки, які не впливають на електропровідність напівпровідників називаються **нейтральними**.

Розглянуті приклади показують, що домішки, якими легують напівпровідники (донорні або акцепторні) значно збільшують їх електропровідність. Можливість управління величиною та типом електропровідності напівпровідників внаслідок введення домішок (легкування) лежить в основі створення усіх напівпровідникових приладів.

Під дією прикладеної напруги електрони й дірки при переміщенні в напівпровіднику зустрічають різні перешкоди і втрачають частину енергії та відхиляються від свого шляху, тобто відбувається розсіювання носіїв струму. Воно спричинене забруднюючими домішками. Чим чистіший напівпровідник, тим менше розсіювання носіїв струму і тим вища рухомість електронів і дірок, а отже, тим більша провідність напівпровідника.

Питома електропровідність власного напівпровідника (без домішок) згідно із (5.4 – 5.7) визначається сумою електронної та діркової питомої електропровідності:

$$\gamma_{\text{власн.}} = \gamma_n + \gamma_p = N_n \cdot e\mu_n + N_p \cdot e\mu_p = N \cdot e(\mu_n + \mu_p). \quad (5.8)$$

Питома електропровідність напівпровідника із домішками – **n**-типу або **p**-типу визначається сумою власної і домішкової електропровідності:

$$\gamma_n = \gamma_{\text{власн}} + \gamma_{\text{дом.}}, \quad (5.9)$$

$$\gamma_p = \gamma_{\text{власн}} + \gamma_{\text{дом.}}. \quad (5.10)$$

Домішкова електропровідність визначається за виразами:

$$\gamma_{\text{дом}} = n_n \cdot e\mu_n, \quad (5.11)$$

$$\gamma_{\text{дом}} = n_p \cdot e\mu_p, \quad (5.12)$$

де n_n – концентрація вільних електронів, що утворилися за рахунок іонізації донорної домішки, тобто внаслідок переходу електронів із донорних рівнів в зону провідності;

n_p – концентрація дірок, що утворилися за рахунок іонізації акцепторної домішки, тобто внаслідок переходу електронів із валентної зони на акцепторні рівні.

В напівпровіднику із домішками (донорними або акцепторними) при кімнатній температурі домішки повністю іонізовані, і, як наслідок, провідність визначається вільними рухомими носіями заряду – електронами і дірками відповідно.

Питома електропровідність напівпровідників визначається концентрацією вільних носіїв та їх рухомістю. Рухомість носіїв заряду μ визначається їх ефективною масою, швидкістю та частотою зіткнень із вузлами і дефектами кристалічної решітки, а також залежить від температури.

При температурі близькій до абсолютного нуля (-273°C) електрони не рухаються, тобто вони міцно пов'язані зі своїми атомами. Внаслідок цього при абсолютному нулі напівпровідники стають діелектриками.

З підвищенням температури провідність всіх напівпровідників зростає. При високих температурах напівпровідники за провідністю наближаються до провідників. Провідність напівпровідника із підвищенням температури зростатиме тим інтенсивніше, чим більше донорної або акцепторної домішки введено в напівпровідник.

Як відмічалось вище, питома електропровідність напівпровідників також залежить від концентрації вільних носіїв заряду. Вплив сильного електричного поля призводить до значного зростання вільних носіїв заряду. Розрізняють декілька варіантів підвищення концентрації вільних носіїв заряду в напівпровіднику під впливом зовнішнього електричного поля: електростатичну, термоелектронну та ударну іонізацію.

Провідність твердого кристалічного тіла також змінюється при його деформації із-за збільшення або зменшення міжатомних відстаней, що веде до зміни концентрації та рухомості носіїв заряду.

Зміна питомої провідності напівпровідників при деформації характеризується коефіцієнтом тензочутливості:

$$d_{\rho} = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}, \quad (5.13)$$

де $\Delta\rho/\rho$ – відносна зміна питомого опору при деформації;

$\Delta l/l$ – відносна деформація напівпровідника.

Ця властивість напівпровідників використовується при виготовленні з них чутливих вимірювачів тиску – перетворювачів тиску (тензодатчиків).

Характерною властивістю напівпровідників є нелінійність залежності струму в напівпровіднику від прикладеної напруги (рисунок 5.8), тобто струм у напівпровіднику зростає значно швидше, ніж прикладена до нього напруга. Одночасно зі зростанням струму різко зменшується електричний опір напівпровідника.

Ця властивість використовується у вентилях напівпровідникових розрядниках та обмежувачах перенапруг (ОПН), які призначені для захисту обладнання від комутаційних (внутрішніх) та наведених атмосферних (зовнішніх) перенапруг. Вони одним виводом приєднуються до проводів ліній електропередачі, до шин трансформаторів або до клем інших електричних апаратів, а іншим виводом вони приєднуються до землі.

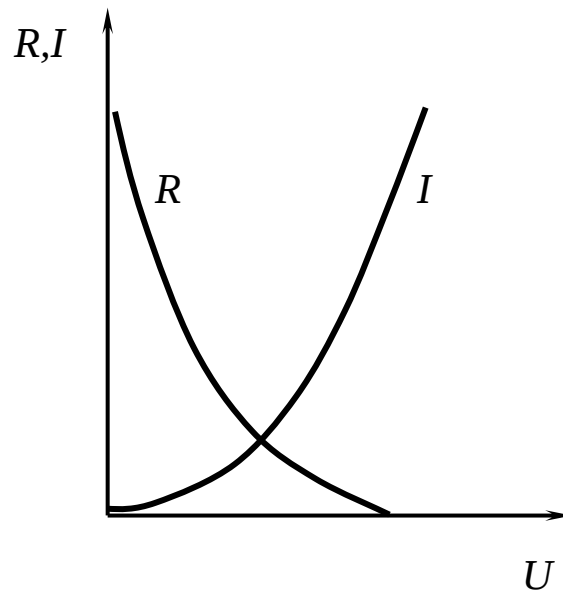


Рисунок 5.8 – Залежність струму і опору напівпровідника від прикладеної напруги

При нормальній (номінальній) напрузі розрядник (обмежувач перенапруги) не пропускає струм з лінії електропередачі на землю внаслідок дуже великого опору розрядника. При проходженні блискавки поряд із лінією в ній наводиться напруга, яка значно перевищує номінальну і електричний опір вентиляного розрядника різко зменшується. В зв'язку з цим розрядник відводить (замикає) хвилю перенапруги з лінії на землю, внаслідок чого напруга лінії знижується до номінального значення. Опір розрядника поновлюється, і струм з лінії на землю не буде пропускатися.

При зміні прикладеної до напівпровідника напруги з U на $-U$ струм у напівпровіднику протікатиме в зворотному напрямку і буде змінюватися за таким самим законом (рисунок 5.9). Із сказаного слідує, що напівпровідник має **симетричну вольт-амперну характеристику**.

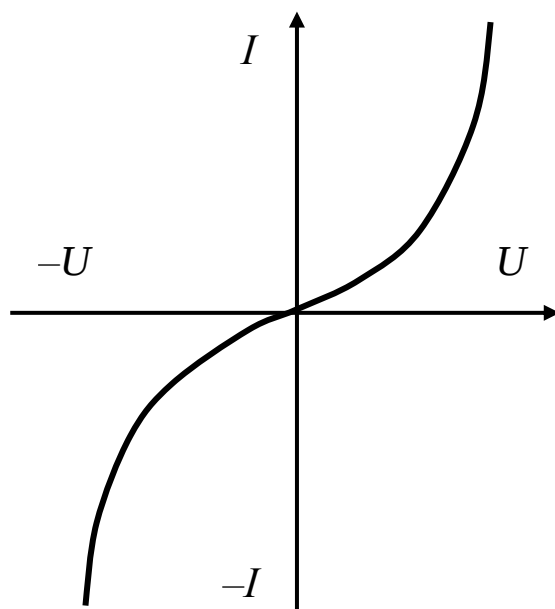


Рисунок 5.9 – Вольт-амперна характеристика напівпровідника

5.1.2 Оптичні та фотоелектричні явища в напівпровідниках

При проходженні світла через напівпровідник фотони частково відбиваються, а частково поглинаються електронами та атомами кристалічної решітки напівпровідника. Ступінь поглинання електромагнітної енергії світла називається коефіцієнтом поглинання α .

Під дією світла провідність деяких напівпровідників (наприклад, селену) може різко змінюватися. Це викликано тим, що світлове випромінювання, із відповідною довжиною хвилі віддає електронам енергію фотонів, достатню для того, щоб вони подолали заборонену зону і зробилися вільними. Енергія таких фотонів визначається із виразу:

$$W = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1,23}{\lambda}, \quad (5.14)$$

де h – постійна Планка, $h = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{с}$;

c – швидкість світла, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$;

λ – довжина хвилі світла що падає, м.

Якщо електромагнітної енергії фотона достатньо для переходу електрона із валентної зони в зону провідності, то такий перехід називають **прямим**. Якщо енергії фотона не достатньо для переходу електрона в зону провідності, і необхідну енергію він одержує за рахунок теплових коливань, то такий перехід називають **непрямим**.

Поглинання світла напівпровідником веде до появи, при заданій температурі, вільних носіїв заряду, що підвищує його електропровідність. Провідність, яка викликана дією світла називається **фотопровідністю**.

Ця властивість напівпровідників використовується при створенні фоточутливих приладів, які чутливі не тільки до видимої ділянки спектру, але і до інфрачервоного випромінювання.

Процес впливу світла на напівпровідник має зворотній характер. При зворотному переході може виділятися енергія у вигляді кванту світла. Таке світіння не є тепловим (рівноважним). Особливе місце серед таких не рівноважних випромінювань займає **люмінесценція** напівпровідників.

При частковому освітленні напівпровідника, коли на його поверхні є освітлені і неосвітлені області, між ними виникає

фотоелектрорушійна сила. Це явище використовують для одержання електричної енергії – для виготовлення фотоелементів і сонячних батарей. Останні здатні перетворити сонячну енергію безпосередньо в електричну.

5.1.3 Термоелектричні явища в напівпровідниках

В електричному колі, яке складається із з'єднаних послідовно різнорідних напівпровідників або напівпровідника і металевого провідника виникає термо-ЕРС, якщо між кінцями цих матеріалів існує різниця температур (рисунок 5.10). Це явище одержало назву **ефект Зеебека**.

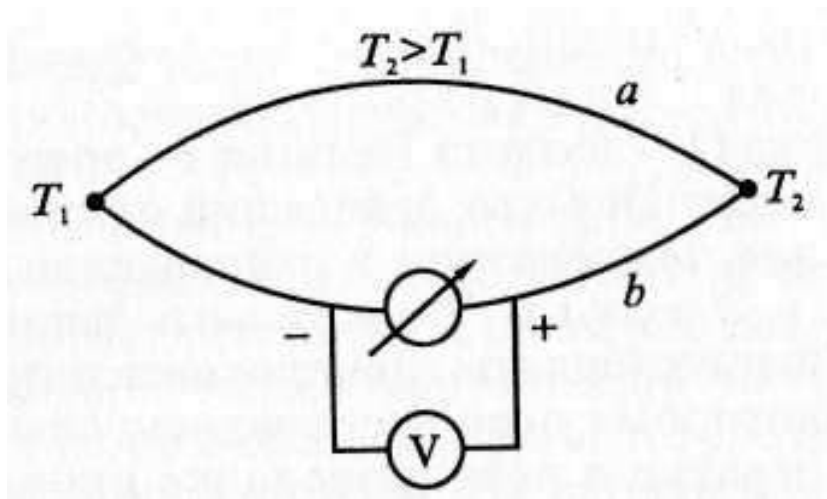


Рисунок 5.10 – Схема виникнення термо-ЕРС у колі із двома напівпровідниками

Термо-ЕРС в такому колі буде дорівнювати:

$$\varepsilon = \alpha \cdot (T_2 - T_1), \quad (5.14)$$

де α – коефіцієнт термо-ЕРС (залежить від матеріалу напівпровідників);

T_1, T_2 – температура елементів кола, $T_2 > T_1$.

Отже при наявності в напівпровіднику двох ділянок із різними температурами, відбувається переміщення вільних зарядів із нагрітої ділянки в холодну. Так, коли носіями струму є електрони, то вони переміщуючись у холодну ділянку, зарядять її від'ємною електрикою. Нагріта ділянка напівпровідника, втративши частину електронів, зарядиться позитивно. Внаслідок цього між нагрітою і холодною ділянками напівпровідника виникає термоелектрорушійна сила. Це явище використовується при створенні термоелементів і термогенераторів, які здатні перетворювати без посередньо теплову енергію в електричну.

Зворотний до розглянутого вище ефект називають ефектом Пельтьє. Він полягає в тому, що при проходженні струму через контакт двох різнорідних напівпровідників або напівпровідника і металічного провідника відбувається поглинання або виділення теплоти, в залежності від напрямку струму, що протікає.

5.1.4 Електронно-дірковий перехід напівпровідників

Якщо взяти два напівпровідники, які перебувають у щільному контакті один з одним, причому один з них має електропровідність *n*-типу, а другий *p*-типу, то така система матиме **несиметричну вольт-амперну характеристику** (рисунк 5.11).

При проходженні струму в одному напрямку система двох напівпровідників буде мати малий опір, а при проходженні в зворотному напрямку – дуже великий. В системі із двох напівпровідників із електропровідностями різного типу, струм, що проходить у різних напрямках, буде мати різну величину. При цьому прямий

струм I_{np} швидко зростає зі зростанням прикладеної напруги U_{np} . Коли ж до цієї системи прикладена напруга $-U$ ($U_{зв}$), то спочатку через цю систему струм зворотного напрямку ($I_{зв}$) практично не протікає. При підвищенні величини зворотної напруги з'являється дуже незначний зворотний струм.

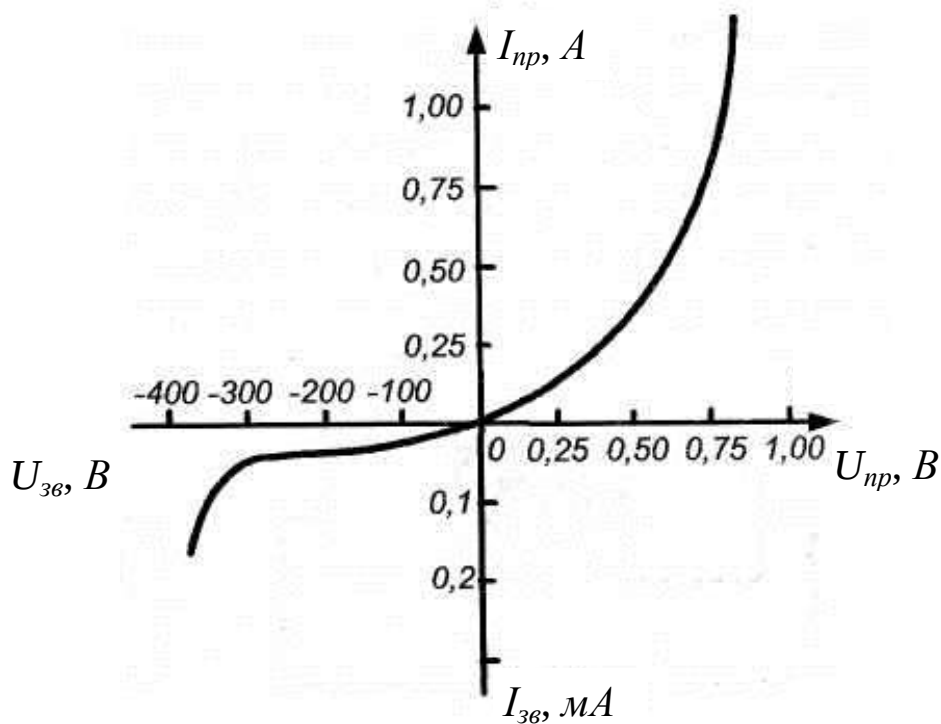


Рисунок 5.11 – Несиметрична вольт-амперна характеристика електронно-діркового переходу

Таким чином, система двох напівпровідників із електропровідністю різного типу, в зворотному напрямку струм не пропускає. Цю властивість напівпровідників широко використовують у напівпровідникових випрямлячах. При прикладенні до такої системи із двох напівпровідників дуже великої зворотної напруги в місці їх зіткнення відбувається електричний пробій за рахунок різкого зменшення опору.

Місце щільного з'єднання двох напівпровідників із електропровідностями різного типу називається **електронно-дірковим переходом** або ***p-n-переходом***, який має властивість випрямлення змінного струму. При прикладенні до системи двох напівпровідників змінної напруги ***p-n***-перехід буде пропускати струм тільки одної півхвилі напруги.

Розглянемо принцип роботи електронно-діркового переходу. Електронно-дірковий перехід одержують шляхом ідеального контакту двох напівпровідників (наприклад, вплавленням одного напівпровідника в інший), один із яких, за рахунок введення донорної домішки, має електронну провідність (***n***-типу), а інший, за рахунок введення акцепторної домішки – має діркову провідність (***p***-типу) (рисунок 5.12, *a*).

Коли до такої системи із двох напівпровідників не прикладена зовнішня напруга, то в напівпровіднику ***n***-типу є велика концентрація електронів, а в напівпровіднику ***p***-типу – велика концентрація дірок. Крім того, в обох напівпровідниках в незначній кількості присутні неосновні носії струму. Так, в напівпровіднику ***n***-типу є незначна кількість дірок, а в напівпровіднику ***p***-типу – незначна кількість електронів (рисунок 5.12, *a*).

При щільному контакті цих двох напівпровідників, який виконано, наприклад, вплавленням одного напівпровідника в інший, електрони напівпровідника ***n***-типу будуть дифундувати в напівпровідник ***p***-типу, де їх концентрація дуже мала. Одночасно дірки із ***p***-напівпровідника будуть дифундувати в ***n***-напівпровідник, де їх концентрація також дуже мала.

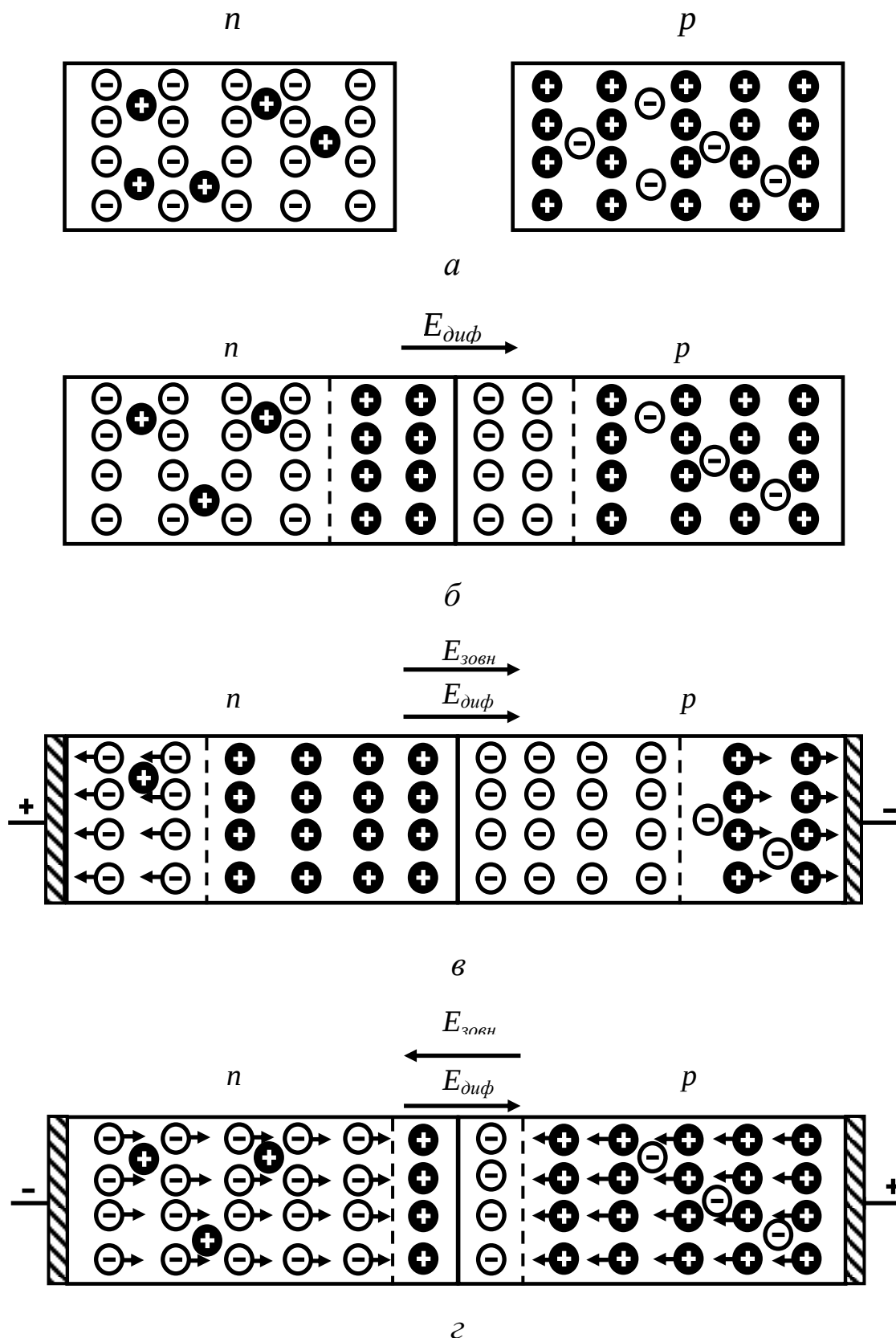


Рисунок 5.12 – Схема утворення ***p-n***-переходу: *a* – окремі області напівпровідника; *б* – області напівпровідника в одному кристалі при відсутності зовнішнього електричного поля; *в* – зовнішнє поле підключено назустріч дифузійному полю (запірне включення); *г* – зовнішнє поле підключено в напрямку дифузійного поля (пропускне включення)

Взаємна дифузія дірок і електронів зменшить концентрацію електронів у приконтактному шарі в n -напівпровіднику і заповнить його дірками. При цьому, відповідно, зменшиться концентрація дірок у приконтактному шарі p -напівпровідника, цей шар заповниться електронами (рисунок 5.12, б).

Таким чином, ще до подачі зовнішньої напруги в зоні контакту двох напівпровідників утворюється подвійний електричний шар – утворюється p - n -перехід. Внаслідок цього виникає місцеве електричне дифузійне поле з напруженістю $E_{\text{диф}}$, яке направлене в бік негативних зарядів в подвійному електричному шарі.

При прикладенні до системи із двох напівпровідників зовнішньої напруги, як показано на рисунку 5.12, в, коли напруженість зовнішнього джерела $E_{\text{зовн}}$ буде збігатися із напруженістю місцевого поля $E_{\text{диф}}$, електрони в n -напівпровіднику і дірки в p -напівпровіднику будуть переміщуватися в бік відповідних електродів. Внаслідок цього в зоні p - n -переходу області електронів у p -напівпровіднику і дірок в n -напівпровіднику будуть розширятися. Отже, електричний опір p - n -переходу значно збільшиться, тобто створюється *запираючий шар*, і струм через p - n -перехід протікати не буде. Фактично ж буде протікати струм дуже малої величини, викликаний переміщенням випадкових носіїв струму. Цей струм називається *зворотнім* (рисунок 5.11).

У випадку, коли $E_{\text{зовн}}$ буде направлена проти $E_{\text{диф}}$ (рисунок 5.12, г), поле, в зоні контакту напівпровідників, буде значно послаблене, і електрони в n -напівпровіднику і дірки в p -напівпровіднику почнуть переміщуватися в область p - n -переходу. Внаслідок цього запираючий шар значно звужиться, а електрич-

ний опір, відповідно, різко зменшиться. В цьому випадку ***p-n***-перехід буде пропускати струм. Цей струм називається ***прямим***, а напрямок струму – ***прямим***, або ***пропускним*** (рисунок 5.11).

Прямий струм у багато разів більший зворотного. Робота напівпровідникового випрямляча оцінюється його вольт-амперною характеристикою (рисунок 5.11). Вона показує, що при малих величинах напруги прямий струм, який пропускає випрямляч, досягає великих значень. При прикладенні до випрямляча зворотної напруги, коли плюс приєднаний до ***n***-напівпровідника, а мінус – до ***p***-напівпровідника, випрямляч практично не пропускає електричний струм.

Починаючи з 300 В зворотної напруги ***p-n***-перехід почне пропускати дуже малі величини зворотного струму. Якщо зворотну напругу збільшувати, то зворотний струм з деякого моменту почне сильно зростати і може досягнути такої величини, при якій відбудеться пробій ***p-n***-переходу.

В напівпровідникових діодах ***p-n***-перехід може бути виконаний або в вигляді сплавленого контакту між двома напівпровідниками з електропровідностями різного типу, або у вигляді контакту між пластинкою напівпровідника і металевим вістрям. В першому випадку утворюється деяка площа зіткнення (контакт) двох напівпровідників. Такі діоди називаються ***площинними***. У другому випадку пластинка напівпровідника (германію або кремнію) розміром $(2 \times 2) \cdot 10^{-3}$ м стикається із вістрям тонкого металевого дроту. Такі діоди називаються ***точковими***. Вони володіють малою ємністю ***p-n***-переходу і використовуються для роботи на високих частотах.

5.2 Прості напівпровідники

Напівпровідникові матеріали розділяються на напівпровідники неорганічного і органічного походження, на прості напівпровідники (монокристалічні) та на напівпровідникові сполуки (полікристалічні).

Простими називаються напівпровідники до основного складу яких входять атоми одного хімічного елементу. Більшість напівпровідникових матеріалів – це тверді кристалічні речовини із впорядкованою періодичною структурою.

Основні прості напівпровідники: германій, кремній, селен та телур.

Кремній і германій відносяться до алмазоподібних напівпровідників, так як вони мають кристалічну структуру алмазу (рисунк 5.13).

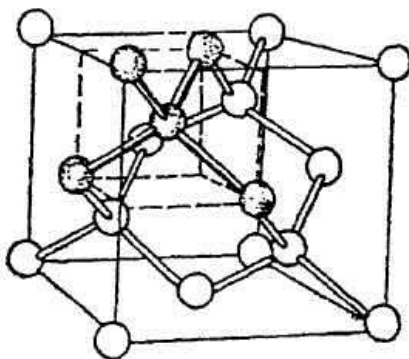


Рисунок 5.13 – Кристалічна гранецентрована кубічна решітка алмазного типу

Із рисунку 5.13 видно, що в структурі алмазного типу кожний із атомів (германію або кремнію) оточений чотирма такими ж атомами, розташованими на однаковій відстані один від одного, і кожен із атомів утворює валентний зв'язок із сусідніми атомами.

Германій (Ge) – елемент четвертої групи періодичної системи Д.І. Менделєєва. Германій майже не має своїх руд. Сировиною для отримання германію є цинкові і сульфатні руди. Внаслідок складних хімічних процесів отримують злиток германію. В такому вигляді германій не можна застосовувати для виготовлення напівпровідникових приладів, так як він має домішки і не є монокристалом. Спочатку цей злиток звільнюють від домішок методом зонового плавлення. В очищеному напівпровідниковому матеріалі домішки повинні складати не більше $10^{-6} \dots 10^{-8} \%$.

Щоб отримати монокристалічний германій, його розплавляють у вакуумі або в атмосфері інертного газу. Для отримання германію з електропровідністю *n*- або *p*-типу в розплав очищеного германію вводять відповідні донорні (миш'як, сурму, вісмут, фосфор, літій), акцепторні (галій, бор) або нейтральні (свинець, олово) домішки. Потім із розплаву, з відповідною швидкістю, витягують чистий монокристалічний германій у вигляді суцільного циліндра заданого діаметра. Германій має яскраво-сріблястий колір.

Германій має такі основні параметри: густина $D = 5320 \text{ кг/м}^3$; температура плавлення $T_{\text{пл}} = 936^\circ\text{C}$; концентрація власних носіїв заряду $n = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^3$; власний питомий електричний опір $\rho = 0,47 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; рухомість носіїв заряду: $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Германій широко використовується для виготовлення діодів, транзисторів, тензодатчиків, фотоелементів, фотодіодів, оптичних фільтрів, лічильників ядерних часток. Робочий діапазон температур напівпровідникових приладів із германію від -60 до $+70$ °С.

Кремній (Si) – елемент четвертої групи періодичної системи Менделєєва. На відміну від кремнію він широко розповсюджений в природі у вигляді кремнезему (SiO_2), який є однією із вихідних речовин для отримання технічних сортів кремнію.

Внаслідок очищення злитків кремнію методом зонного плавлення отримують монокристалічний кремній з електропровідністю *n*- або *p*-типу в залежності від введених легуючих домішок. Зразки полірованого кремнію мають колір сталі. Кремній, як і германій – крихкий матеріал.

Основні параметри очищеного нелегованого кремнію: густина $D = 2330$ кг/м³; температура плавлення $T_{\text{пл}} = 1417^\circ\text{C}$; концентрація власних носіїв заряду $n = 3 \cdot 10^{16}$ м³; власний питомий електричний опір $\rho = 2,3 \cdot 10^3$ Ом·м; рухомість носіїв заряду: $\mu_n = 0,14$ м²/(В·с), $\mu_p = 0,05$ м²/(В·с). Верхня границя робочої температури напівпровідникових приладів на основі кремнію $180 \dots 200^\circ\text{C}$.

Кремній використовують для виготовлення діодів, польових транзисторів, тиристорів, фотодіодів, фототранзисторів, елементів сонячних батарей, тензодатчиків, детекторів ядерного випромінювання.

Крім цього, кремній використовують в інтегральних напівпровідникових схемах у радіоелектроніці.

Селен (Se) – елемент шостої групи періодичної системи Менделєєва. Вихідними матеріалами для його отримання є залишки при електролітичному рафінуванні міді. Твердий селен може мати аморфну або кристалічну будову. Чорний аморфний селен отримують із очищеного розплавленого селену при швидкому охолодженні його до кімнатної температури. Сірий кристалічний селен отримують із розплавленого аморфного селену при повільному охолодженні його від температури плавлення до кімнатної. Кристалічний селен є домішковим напівпровідником *n*-типу і має полікристалічну структуру.

Основні характеристики чистого гексагонального селену: густина $D = 4800 \text{ кг/м}^3$; температура плавлення $T_{\text{пл}} = 218^\circ\text{C}$; власний питомий електричний опір $\rho = 2 \cdot 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; рухомість дірок $\mu_p = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Селен використовують для виготовлення селенових випрямлячів, фотоелементів і фоторезисторів. Робочий діапазон температур селенових випрямлячів від -60 до $+75^\circ\text{C}$.

Селен також використовують при виготовленні фарб, пластмас, кераміки та в якості легуючої добавки при виробництві сталі.

Телур (Te) – елемент шостої групи таблиці Менделєєва. Полікристалічний зливочок телуру отримують при повільному охолодженні розплавленого телуру. Із зливку вирізають монокристали.

Температура плавлення телуру $T_{\text{пл}} = 452^\circ\text{C}$; густина $D = 6250 \text{ кг/м}^3$; концентрація власних носіїв заряду $n = 9,3 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$; власний питомий електричний опір $\rho = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; рухомість носіїв заряду: $\mu_n = 0,17 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, $\mu_p = 0,1 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Телур застосовують у вигляді сплавів із вісмутом, свинцем, сурмою, які використовують для виготовлення термоелектричних генераторів. В скляній та керамічній промисловості телур застосовують у якості барвника.

5.3 Напівпровідникові сполуки

Прості напівпровідники не завжди відповідають вимогам сучасного виробництва напівпровідникових приладів. Для створення матеріалів із найрізноманітнішими властивостями широко використовують складні *напівпровідникові сполуки* як неорганічні, так і органічні.

Структура складних напівпровідників утворюється атомами різних хімічних елементів. Широке застосування знайшли неорганічні кристалічні напівпровідникові сполуки: карбід кремнію, арсенід галію, сульфід цинку, селенід цинку, сульфід кадмію, сульфід свинцю, телурид свинцю оксид цинку, оксид заліза та ін.

Напівпровідникові сполуки типу $A^{IV}B^{IV}$

Єдиною сполукою елементів IV-ї групи Періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва в твердій фазі є сполука кремнію (Si) із вуглецем (C) – карбід кремнію.

Карбід кремнію (SiC) – це крихкий матеріал полікристалічної будови з нелінійною залежністю між струмом і напругою (див. рисунок 5.8). Він утворюється внаслідок хімічного сполучення кремнію і вуглецю. Вихідними матеріалами для його

отримання є чистий кварцовий пісок і кам'яне вугілля. Щоб отримати домішкову електропровідність того чи іншого типу, у вихідний склад (шихту) вводять домішки – фосфор (P), сурму (Sb), вісмут (Bi), кальцій (Ca), магній (Mg), алюміній (Al), бор (B) та ін. Реакція утворення карбіду кремнію ведеться при температурі близько 2000°C.

Карбід кремнію легований фосфором, сурмою або вісмутом, має темно-зелене забарвлення, електропровідність *n*-типу.

Карбід кремнію легований кальцієм, алюмінієм або бором, має темно-фіолетове забарвлення і електропровідність *p*-типу.

Карбід кремнію існує у двох модифікаціях: кубічний α -SiC та гексагональний β -SiC.

Основні характеристики карбіду кремнію: густина $D = 3100 \dots 3200 \text{ кг/м}^3$; температура плавлення $T_{\text{пл}} = 2600^\circ\text{C}$; рухомість носіїв заряду: $\mu_n = 0,1 \text{ м}^2/(\text{В с})$; $\mu_p = 0,02 \text{ м}^2/(\text{В с})$.

Із-за великої енергії зв'язку атомів карбід кремнію має високу міцність, за твердістю він дещо поступається алмазу.

Карбід кремнію є домішковим напівпровідником, але при температурі 1400°C і вище у нього з'являється власна електропровідність.

Основною областю застосування найбільш чистих сортів карбіду кремнію є виробництво тунельних діодів, варисторів, які мають нелінійну симетричну вольт-амперну характеристику і можуть працювати в інтервалі температур від -50 до +80°C. Варистори використовують у пристроях автоматичного регулювання.

Із полікристалічного карбіду кремнію можуть бути отримані, методом перегонки (сублімації) в інертному газі, монокристали карбіду кремнію, які відрізняються хімічною чистотою. Вони широко використовуються для виготовлення діодів і транзисторів на робочі температури до 500°C , а також для виробництва світлодіодів. Завдяки високим механічним характеристикам карбід кремнію також може використовуватися для механічної обробки різних матеріалів.

Напівпровідникові сполуки типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$

Сполуки типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{IV}}$ – це хімічні сполуки металів III-ї групи таблиці Менделєєва (бор (B), індій (In), галій (Ga), алюміній (Al)) із елементами V-ї групи: азот (N), фосфор (P), сурма (Sb), миш'як (As).

Арсенід галію (GaAs) – складний напівпровідник типу $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$. Як і всі сполуки такого типу, арсенід галію має структуру сфалериту, тобто структуру аналогічну кристалічній решітці германію і кремнію в якій у вузлах знаходяться не нейтральні атоми, а розміщені по черзі, позитивно заряджені іони миш'яку (As) та негативно заряджені іони галію (Ga). Такий вид зв'язку називається донорно-акцепторним.

Арсенід галію має наступні властивості: густина $D = 5400 \text{ кг/м}^3$; температура плавлення $T_{\text{пл}} = 1237^{\circ}\text{C}$; рухомість електронів $\mu_n = 0,85 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; рухомість дірок $\mu_p = 0,1 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; діелектрична проникність $\varepsilon = 11$; робоча температура ***p-n***-переходу $T_{\text{роб}} = 400^{\circ}\text{C}$.

Арсенід галію є основним матеріалом для виробництва напівпровідникових лазерів із довжиною хвилі випромінювання 0,83...0,92 мкм. Його використовують для виготовлення тунельних діодів, генераторів НВЧ коливань із частотою до 100 ГГц, первинних перетворювачів (датчиків) світла, первинних перетворювачів низьких температур та для виробництва інтегральних мікросхем.

Також у напівпровідниковому виробництві застосовуються такі напівпровідникові сполуки типу $A^{III}B^V$: антимонід галію (GaSb), фосфід галію (GaP), арсенід індію (InAs), антимонід індію (InSb), фосфід індію (InP) та ін.

Напівпровідникові сполуки типу $A^{II}B^{VI}$

Групу напівпровідникових матеріалів типу $A^{II}B^{VI}$ складають халькогеніди – сполуки халькогенів (сірки (S), селену (Se) та телуру (Te)) із металами II-ї групи таблиці Менделєєва: цинком (Zn), кадмієм (Cd) та ртуттю (Hg). Всі халькогеніди володіють високою чутливістю до випромінювання від інфрачервоного до рентгенівського спектру, виражаючи при цьому сильно фоторезистивні та люмінесцентні властивості. Надлишок в сполуці металу A^{II} веде до створення електронної провідності, а надлишок халькогену B^{VI} – веде до появи діркової провідності.

Сульфід цинку (ZnS) – має наступні характеристики: густина $D = 4080 \text{ кг/м}^3$; температура плавлення $T_{пл} = 1830 \text{ }^{\circ}\text{C}$; рухомість електронів $\mu_n = 0,014 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; рухомість дірок $\mu_p = 0,0005$

$\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$; питомий електричний опір $\rho = 10^6 \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ (за шириною забороненої зони близький до діелектриків).

Монокристали ZnS використовують в якості оптичного матеріалу прозорого в інфрачервоній області спектра, для створення лазерів, та для п'єзопідсилювачів акустичних коливань. У вигляді кристалічного порошку сульфід цинку використовують для виготовлення люмінофорів різних приладів: телевізійних електронно-променевих трубок, люмінесцентних ламп.

Також використовують наступні напівпровідникові сполуки типу $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$: селенід цинку (ZnSe), телурід цинку (ZnTe), сульфід кадмію (CdS), селенід кадмію (CdSe), телурід кадмію (CdTe) та ін.

При виготовленні напівпровідникових приладів, окрім розглянутих вище напівпровідникових сполук, використовують:

- сполуки типу $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$: сульфід свинцю (PbS), селенід свинцю (PbSe), телурід свинцю (PbTe);
- оксидні напівпровідники: закис міді (Cu_2O), оксид цинку (ZnO), діоксид титану (TiO_2), оксид заліза (Fe_2O_3), оксид нікелю (NiO_2) та ін.

Такі зовнішні впливи, як волога і фонові (радіаційні) випромінювання значно погіршують характеристики напівпровідникових приладів. Тому для захисту від зовнішньої дії їх вміщують у герметичні (металічні, керамічні або пластмасові) корпуси.

Запитання для самоконтролю

1. Які матеріали називаються напівпровідниками?
2. Назвіть характерні властивості напівпровідників.
3. Що таке власний та домішковий напівпровідник?
4. Що таке донорні та акцепторні домішки?
5. Які енергетичні зони утворюються в напівпровідниках?
6. Від чого залежить електропровідність напівпровідників?
7. Як впливають на напівпровідник електричне поле, температура, освітлення та деформація?
8. В чому полягає робота *p-n*-переходу?
9. Як класифікуються напівпровідники за хімічним складом?
10. Прості напівпровідники та область їх застосування.
11. Напівпровідникові сполуки. Область їх застосування.

РОЗДІЛ 6

МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

Всі матеріали в природі, при внесенні їх в магнітне поле, в тій чи іншій мірі намагнічуються, тобто мають певні магнітні властивості, а деякі із них зберігають намагніченість і після припинення дії зовнішнього магнітного поля.

Магнітне поле в матеріалі створюють рухомі електричні заряди – електрони. Рух електрона навколо атомного ядра приводить до виникнення орбітального магнітного моменту. Рух електрона навколо своєї осі приводить до виникнення спінового магнітного моменту. Ці моменти в сумі утворюють магнітний момент атома. Магнітні властивості атома визначаються, в значній мірі магнітними властивостями електрона.

Матеріали із різною електронною структурою атомів мають різні магнітні властивості (див. розділ 1). Сумарний магнітний момент атомів у одиничному об'ємі матеріалу називається намагніченістю.

6.1 Класифікація матеріалів за магнітними властивостями

В залежності від взаємодії із магнітним полем всі речовини підрозділяються на *слабوماгнітні* та *сильномагнітні*. Сила взаємодії речовини (матеріалу) із зовнішнім магнітним полем оцінюється безрозмірною величиною – *магнітною сприйнятливістю*.

Слабомагнітні матеріали намагнічуються під впливом зовнішнього магнітного поля в незначній мірі. До цієї групи матеріалів відносяться діамагнетики, парамагнетики та антиферомагнетики.

Діамагнетики ($k_m < 0$) в незначній мірі послаблюють всередині себе зовнішнє магнітне поле, так як їх намагніченість має протилежний напрям по відношенню до зовнішнього поля. До діамагнетиків відносяться більшість органічних сполук та ряд металів (золото, срібло, мідь, свинець, цинк).

Парамагнетики ($k_m > 0$) при попаданні в магнітне поле підсилюють його всередині себе в незначній мірі, так як напрям їх намагніченості співпадає із напрямом зовнішнього поля. До парамагнетиків відносяться: натрій, калій, платина, титан, алюміній та ін.

Антиферомагнетики ($k_m > 0$) – матеріали у яких магнітні моменти сусідніх атомів рівні, але їх спіни розміщені антипаралельно, вони в незначній мірі підсилюють зовнішнє магнітне поле. До антиферомагнетиків відносяться: церій, самарій, марганець, солі та окиси деяких металів.

Із-за низьких магнітних властивостей діамагнетики, парамагнетики та антиферомагнетики не знайшли широкого застосування в техніці в якості магнітних матеріалів.

Практичне застосування в електротехніці в якості магнітних найшли **сильномагнітні матеріали**, які під дією зовнішнього магнітного поля здатні намагнічуватися, тобто набувати особливих магнітних властивостей. Саме ці матеріали ми і буде-

мо далі називати магнітними. До сильномагнітних відносяться **феромагнетики** та **феримагнетики**.

Феромагнетики ($k_m \gg 0$) характеризуються здатністю сильно намагнічуватися в магнітному полі. Вони також здатні переходити при певній температурі (температура Кюрі) у парамагнітний стан (магнітна сприйнятливість зменшується на кілька порядків). До феромагнетиків відносяться: залізо, нікель, кобальт, сплави на основі заліза, хрому і марганцю та ін.

Феримагнетики ($k_m \gg 0$) мають схожі властивості із феромагнетиками, але в значній мірі поступаються перед ними за величиною граничної намагніченості. Основними представниками цієї групи матеріалів є ферити – сполуки оксиду заліза із оксидами інших металів. Властивості феритів залежать від взаємного розташування в кристалічній решітці іонів заліза та іонів другого металу.

Окрім того, за поведінкою в магнітному полі сильномагнітні матеріали додатково розділяють на **магнітом'які** та **магнітотверді**.

За складом всі сильномагнітні матеріали родзіляються на **металеві** і **неметалеві**. До металевих магнітних матеріалів відносяться чисті метали (залізо, кобальт, нікель) і магнітні сплави деяких металів. До неметалевих магнітних матеріалів відносяться ферити.

6.2 Основні властивості магнітних матеріалів

Властивості магнітних матеріалів оцінюються за допомогою величин, які називаються *магнітними характеристиками*.

Намагнічування речовини в магнітному полі характеризують:

- магнітна індукція B , Тл;
- напруженість магнітного поля H , А/м;
- намагніченість M , А/м;
- магнітна сприйнятливість k_m ;
- магнітна проникність μ ;
- магнітний потік Φ , Вб
- втрати потужності на гістерезис P_H , Вт;
- втрати потужності на вихрові струми P_f , Вт.

Магнітні властивості матеріалів також характеризуються *кривою намагнічування та петлею гістерезису*.

Процес намагнічування феромагнітного матеріалу під впливом зовнішнього магнітного поля полягає в наступному (рис. 6.1):

- збільшення розмірів тих доменів, магнітні моменти яких складають найменший кут по відношенню до напрямку магнітного поля і, відповідно, зменшення інших доменів (процес зміщення меж доменів);
- поворот магнітних моментів доменів у напрямку зовнішнього магнітного поля (процес орієнтації). Магнітне насичення досягається тоді, коли закінчується ріст розмірів доменів і магнітні моменти усіх доменів будуть орієнтовані у напрямку поля.

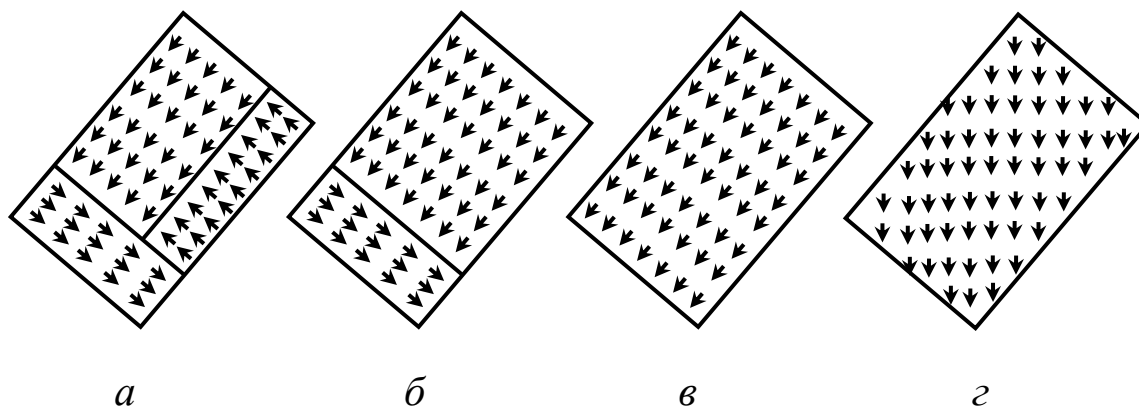


Рисунок 6.1 – Орієнтація спинів у доменах при намагнічуванні феромагнетика: *а* – зовнішнє магнітне поле відсутнє; *б* – слабке поле; *в* – сильне поле; *г* – насичення.

Протікання процесу намагнічування феромагнітного матеріалу на практиці характеризується **кривими намагнічування**. Крива намагнічування показує залежність магнітної індукції B матеріалу від напруженості зовнішнього магнітного поля H .

Основна крива намагнічування (рисунок 6.2) має ряд характерних ділянок, які можна умовно виділити при намагнічуванні феромагнетика. В області слабких магнітних полів зміна магнітної індукції відбувається за рахунок зміщення меж доменів (ділянка *I*). На ділянці *II* відбувається поворот векторів намагніченості доменів у напрямку зовнішнього магнітного поля. Ділянка *III* відповідає завершенню процесу намагнічування – тобто повна орієнтація векторів намагніченості доменів у напрямку поля. Ділянка *IV* відповідає технічному насиченню речовини. При цьому відбувається незначне зростання індукції при значному збільшенні напруженості поля.

Основна крива намагнічування є геометричним місцем вершин петель гістерезису, які одержані при циклічному перемагнічуванні феромагнетика.

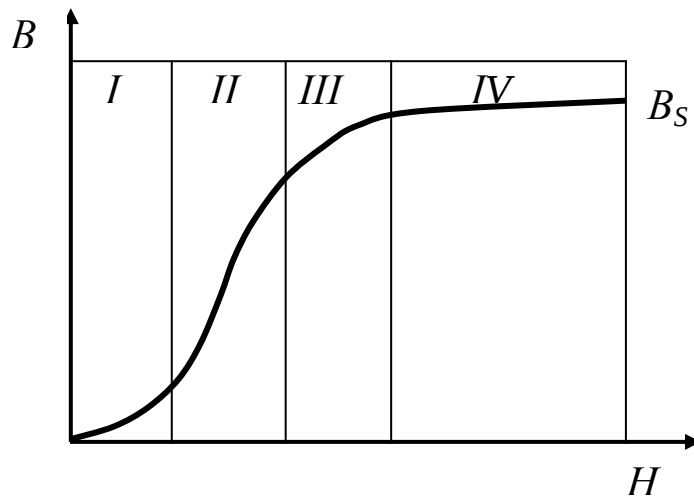


Рисунок 6.2 – Основна крива намагнічування ферромагнетика

Магнітна проникність (відносна магнітна проникність) μ це величина яка визначає здатність матеріалу до намагнічування. Ця величина безрозмірна. Чим більша величина μ , тим легше намагнічується матеріал, і навпаки, чим менша величина μ , тим менше він може бути намагнічений.

Магнітна проникність в значній мірі залежить від напруженості H , яка діє в матеріалі (рисунок 6.3).

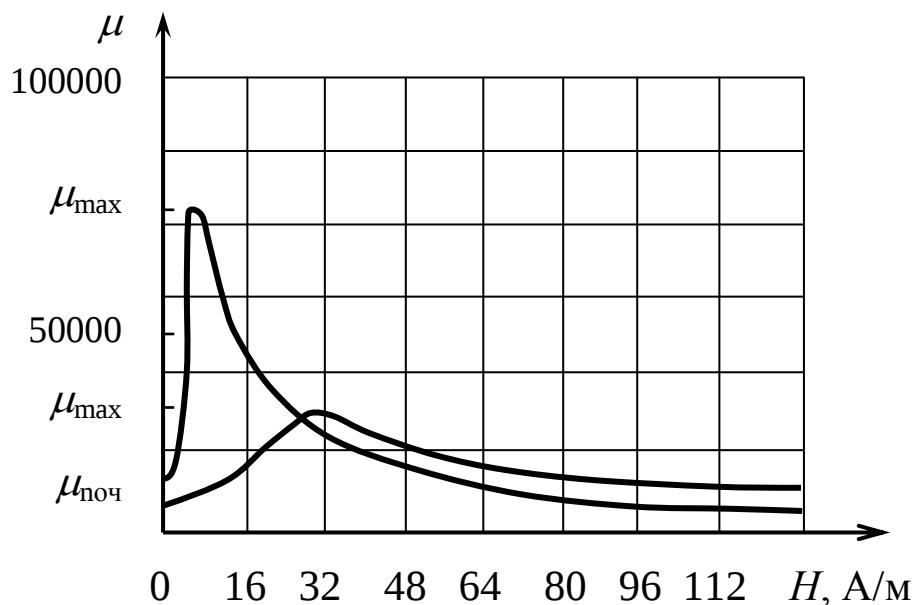


Рисунок 6.3 – Залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля: 1 – пермалой; 2 – чисте залізо

Для оцінки здатності матеріалу до намагнічування треба враховувати початкову магнітну проникність $\mu_{\text{поч}}$ і максимальну проникність μ_{max} .

Користуючись основною кривою намагнічування (рисунки 6.2 та 6.4) можна визначити різні види магнітної проникності, які використовуються в техніці для характеристики магнітних матеріалів. Розрізняють абсолютну магнітну проникність:

$$\mu_a = \frac{B}{H}, \quad (6.1)$$

та відносну магнітну проникність

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (6.2)$$

де B – магнітна індукція матеріалу, Тл;

H – напруженість зовнішнього магнітного поля, А/м;

μ_0 – магнітна постійна, $\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

Абсолютна та відносна проникність пов'язані між собою виразом:

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu. \quad (6.3)$$

Початкова і максимальна магнітна проникність визначаються як тангенс кута нахилу відповідних ділянок кривої намагнічування (рисунок 6.4):

$$\mu_{\text{поч}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{поч}}. \quad (6.4)$$

$$\mu_{\text{max}} = \operatorname{tg} \alpha_{\text{max}}. \quad (6.5)$$

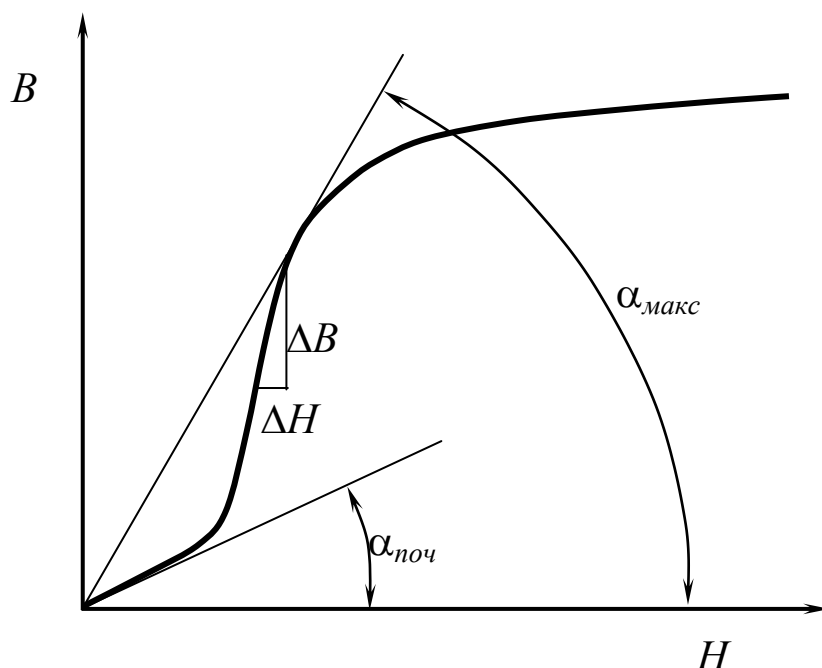


Рисунок 6.4 – Основна крива намагнічування і кути α , що характеризують різні типи магнітної проникності матеріалу

Чим вищі значення цих характеристик у даного матеріалу, тим легше він намагнічується. Будь-який магнітний матеріал має магнітні властивості тільки до певної температури (**точка Кюрі** θ_K), при досягненні якої магнітні властивості зникають, тобто він не може бути намагніченим. Це обумовлено дезорієнтацією внутрішніх намагнічених областей (доменів) із-за інтенсивного теплового руху його атомів і молекул. У деяких феритів магнітні властивості зникають при $\theta_K = 45^\circ\text{C}$, але є матеріали, у яких $\theta_K = 1131^\circ\text{C}$ (кобальт).

Петля гістерезису

Як відзначалося вище, поведінка магнітного матеріалу в магнітному полі характеризується кривою намагнічування (початковою). Ця крива (рисунок 6.2) показує зміну магнітної індукції

B в магнітному матеріалі в залежності від зміни напруженості поля H . Із розглянутої кривої видно, що магнітна індукція спочатку зростає, потім її ріст сповільнюється, а при досягненні індукції B_S , вона залишається постійною. Кажуть, що магнітний матеріал досяг насичення, а індукцію B_S називають **індукцією насичення**. Чим більша величина B_S , тим вищі властивості магнітного матеріалу. Магнітна індукція вимірюється в теслах (Тл).

Якщо зразок магнітного матеріалу намагнічувати безперервно підвищуючи напруженість магнітного поля H , то магнітна індукція B також буде безперервно підвищуватися по кривій намагнічування. Ця крива починається в точці 0 (рисунок 6.5) і закінчується в точці, що відповідає індукції насичення B_S .

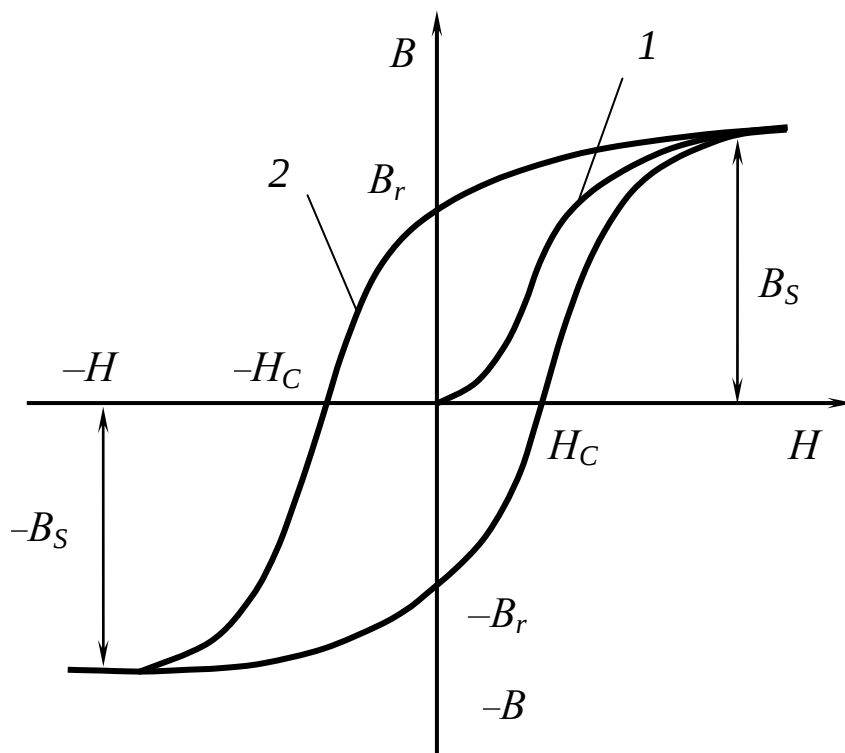


Рисунок 6.5 – Крива намагнічування (1) та петля гістерезису (2)

При зменшенні напруженості H магнітна індукція буде також зменшуватися. Починаючи з деякої величини B значення індукції не буде збігатися із значеннями цієї характеристики на початковій кривій намагнічування. Коли напруженість магнітного поля стане рівною нулю, у зразку магнітного матеріалу буде виявлятися **залишкова магнітна індукція** B_r . Для розмагнічування зразка матеріалу потрібно, щоб напруженість магнітного поля змінила свій напрям на зворотній ($-H$).

Напруженість магнітного поля H_C ($-H_C$), необхідна для зменшення індукції від залишкової B_r ($-B_r$) до нуля, називається **коерцитивною силою**.

Якщо після цього зразок магнітного матеріалу намагнічувати далі в протилежному напрямку, то в матеріалі знову буде спостерігатися індукція насичення ($-B_S$). При подальшому зменшенні напруженості магнітного поля до величини $H = 0$ і новому намагнічуванні в початковому напрямку індукція буде безперервно збільшуватися до величини індукції насичення B_S . Внаслідок цього утворюється замкнена петля, яку називають **граничною** або **статичною петлею гістерезису**. Гранична петля гістерезису змінюється при повільній зміні постійного магнітного поля від $+H$ до $-H$ і в зворотному напрямі, коли величина магнітної індукції дорівнює індукції насичення B_S ($-B_S$).

Магнітний гістерезис – це явище відставання зміни магнітної індукції від напруженості магнітного поля, яка визиває ці зміни.

Дотепер ми розглядали намагнічування матеріалів у постійному магнітному полі. При дії на матеріал змінного магнітного поля отримують *динамічну криву намагнічування і динамічну петлю гістерезису*.

Відношення амплітудного значення індукції до величини амплітудного значення напруженості магнітного поля називається *динамічною магнітною проникністю*:

$$\mu = \frac{B_{ампл}}{H_{ампл}}. \quad (6.6)$$

При низьких частотах і малій товщині магнітного матеріалу динамічна крива намагнічування збігається із статичною кривою. При цьому, значення динамічної магнітної проникності практично збігаються зі значеннями проникності, які вираховані по статичній кривій намагнічування. Динамічна петля гістерезису має трохи більшу площу, ніж статична петля, бо при дії змінного магнітного поля в матеріалі виникають, крім втрат на гістерезис, втрати на вихрові струми та на магнітну післядію.

Із сказаного вище слідує, що процес перемагнічування матеріалу в змінному магнітному полі пов'язаний із втратами частини енергії магнітного поля, що проявляється у нагріванні матеріалу. Втрати в магнітному матеріалі характеризуються питомими магнітними втратами $P_{пит}$.

За механізмом виникнення розрізняють втрати в магнітному матеріалі на гістерезис та динамічні втрати.

Втрати на гістерезис пов'язані із явищем магнітного гістерезису і з необоротним переміщенням меж доменів. Вони пропорційні площі петлі гістерезису та частоті змінного струму:

$$P_H = \eta B_{\max}^n f V, \quad (6.7)$$

де η – коефіцієнт, який залежить від властивостей матеріалу;
 $B_{\max}$ – максимальна індукція на протязі циклу намагнічування, Тл;

n – показник в межах 1,6...2,0;

f – частота, Гц;

V – об'єм зразка, м³.

Динамічні втрати обумовлені вихровими струмами та втратами на магнітну післядію (магнітну в'язкість).

Втрати на вихрові струми P_f викликані електричними струмами, що індукуються в матеріалі зовнішнім магнітним полем і в значній мірі залежать від питомого електричного опору ρ магнітного матеріалу. Чим він більший, тим менші втрати на вихрові струми. Втрати на вихрові струми, пропорційні квадрату частоти f змінного магнітного поля і квадрату магнітної індукції $B_{\max}$:

$$p_f = \xi B_{\max}^2 f^2 V, \quad (6.8)$$

де ξ – коефіцієнт, який залежить від типу магнітного матеріалу і форми виробу із нього.

Втрати на післядію P_n пов'язані із остаточною зміною магнітного стану після зміни напруженості магнітного поля. Вони залежать від складу і термічної обробки магнітного матеріалу і проявляються лише на високих частотах. Їх необхідно враховувати при використанні феромагнітних матеріалів в імпульсному режимі.

Сумарні втрати в магнітному матеріалі визначаються за виразом:

$$p = P_G + P_f + P_n, \quad (6.9)$$

Для роботи в змінних полях використовують матеріали із вузькою петлею гістерезису, тобто, матеріали із малою коерцитивною силою.

Для зменшення втрат на вихрові струми необхідно підвищувати питомий електричний опір магнітних матеріалів. Цього можна досягти наступним чином: введенням до складу електротехнічних сталей кремнію; застосуванням для виготовлення магнітопроводів тонких листів ізольованих один від одного лаком або окатиною; застосуванням для виготовлення порошкових магнітних матеріалів частинок, які покриті ізоляційними зв'язуючими і т.д.

6.3 Магнітом'які матеріали

Магнітом'які матеріали мають великі значення початкової і максимальної магнітної проникності і малу коерцитивну силу ($H_c \leq 4000$ А/м). Ці матеріали легко намагнічуються і легко роз-

магнічуються. Вони відрізняються малими втратами на гістерезис, тобто їм відповідає вузька петля гістерезису при високій магнітній індукції.

Рівень магнітних характеристик магнітом'яких матеріалів залежить від їх хімічної чистоти і ступеня зміни їх кристалічної структури. Чим менше різних домішок в магнітом'якому матеріалі, тим вищий рівень його характеристик, тобто тим більші $\mu_{\text{поч}}$ і μ_{max} і тим менші H_c і втрати на гістерезис. Тому при виробництві магнітом'яких матеріалів ретельно видаляють із них найбільш шкідливі домішки – вуглець, фосфор, сірку, кисень, азот і різні окисли. Одночасно намагаються не викривляти кристалічну структуру матеріалу і не викликати в ньому внутрішніх напружень.

Із магнітом'яких матеріалів із округлою петлею гістерезису виготовляють осердя електричних машин, трансформаторів, реле та інших електричних апаратів. Із магнітом'яких матеріалів із прямокутною петлею гістерезису виготовляють пристрої магнітної пам'яті.

Основними металевими магнітом'якими матеріалами, які використовуються в електротехніці, є технічно чисте залізо, маловуглецеві сталі, пермалої, альсифери та ін.

Технічно чисте залізо містить мало домішок (0,05...0,1%). Його одержують або шляхом електролізу (**електролітичне залізо**), або шляхом термічного розкладання пентакарбонілу заліза ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) (**карбонільне залізо**). Недоліком чистого заліза є низьких питомий електричний опір. Залізо володіє високими магнітними властивостями в постійних полях.

Основні характеристики: магнітна проникність: $\mu_{\text{ноч}} = 250 \dots 400$; $\mu_{\text{max}} = 3500 \dots 4500$; питомий опір $\rho = 0,1 \cdot 10^{-6}$ Ом м; індукція насичення $B_S = 2,18$ Тл; коерцитивна сила $H_C = 50 \dots 100$ А/м.

Технічно чисте залізо використовується для виготовлення електротехнічних виробів, які призначені для роботи в постійних магнітних полях. Залізо також використовується для одержання феромагнітних сплавів.

Маловуглецева електротехнічна сталь – різновид чистого заліза. До її складу входить 0,04 % вуглецю та близько 0,6 % домішок. Магнітна проникність $\mu_{\text{max}} \geq 3500 \dots 4500$, індукція насичення $B_S = 2,05$ Тл; коерцитивна сила $H_c \leq 65 \dots 100$ А/м.

Крем'яниста електротехнічна сталь – це маловуглецева сталь (0,08 % вуглецю), в яку додатково вводять кремній (0,8...4,8 %) з метою поліпшення її магнітних властивостей (підвищення питомого електричного опору, початкової магнітної проникності, зниження коерцитивної сили та зниження магнітних втрат). Значне підвищення вмісту кремнію підвищує крихкість сталі, вона стає непридатною до штампування.

Розрізняють гарячекатану та холоднокатану крем'янисту сталь. Холоднокатані крем'янисті сталі, в яких кристали заліза розміщені переважно в напрямку прокатки, називаються текстурованими. Магнітні властивості таких сталей вздовж прокатки значно вищі, а ніж поперек прокатки.

Основні характеристики електротехнічних крем'янистих сталей: магнітна проникність: $\mu_{\text{ноч}} = 200 \dots 600$, $\mu_{\text{max}} = 3000 \dots 8000$;

питомий опір $\rho = (0,17 \dots 0,6) \cdot 10^{-6}$ Ом м; індукція насичення $B_s = 1,95 \dots 2,02$ Тл; коерцитивна сила $H_C = 10 \dots 65$ А/м.

Електротехнічні сталі виготовляють у вигляді листів, рулонів або стрічок. Вони призначені для виготовлення магнітопроводів електричних машин та апаратів. Для зменшення втрат на вихрові струми на листи сталі може наноситися електроізоляційний лак.

Електротехнічні сталі маркують чотирма цифрами, наприклад: 1311, 2011, 3414, 5421 та ін. Перша цифра в марці сталі визначає вид прокату і текстуру (1 – гарячекатана ізотропна; 2 – холоднокатана ізотропна; 3 – холоднокатана анізотропна із ребристою текстурою; 5 – холоднокатана ізотропна із площинною кубічною текстурою). Друга цифра вказує на вміст Si, % (0 – вміст $< 0,4\%$; 1 – $0,4 \dots 0,8 \%$; 2 – $0,8 \dots 1,8 \%$; 3 – $1,8 \dots 2,8 \%$; 4 – $2,8 \dots 3,8 \%$; 5 – $3,8 \dots 4,8\%$). Третя цифра визначає втрати на гістерезис і теплові втрати при заданих значеннях B та f (0 – питомі втрати при $B = 1,7$ Тл, $f \leq 50$ Гц ($P_{1,7/50}$); 1 – при $B = 1,5$ Тл, $f \leq 50$ Гц – ($P_{1,5/50}$) ($P_{1,5/50}$); 2 – при $B = 1$ Тл, $f \leq 400$ Гц ($P_{1/400}$); 6 – магнітна індукція в слабких полях при напруженості поля $0,4$ А/м ($B_{0,4}$); 7 – магнітна індукція в середніх магнітних полях при напруженості поля 10 А/м (B_{10}). Четверта цифра визначає порядковий номер типу сталі.

Пермалої – пластичні залізо-нікелеві сплави з вмістом нікелю від 36 до 80 %. З метою покращення тих або інших властивостей у сплави вводять молібден, хром, мідь, марганець та кремній, отримуючи при цьому леговані пермалої.

Пермалої, які містять 36...50 % нікелю, називаються низьконікелевими, а ті що містять 60...80 % нікелю – високонікелевими.

Всі пермалої відрізняються високим рівнем магнітних характеристик. Це забезпечується не тільки їх складом і хімічною чистотою сплаву, а також спеціальною термічною обробкою. Сплав нагрівається зі швидкістю 400..500°C в годину, витримується протягом 3...6 годин при температурі 1000...1150°C і потім повільно охолоджується зі швидкістю 100...200°C за годину до кімнатної температури. Деяким пермалоєм потрібне повторне нагрівання до 600°C і швидке охолодження з швидкістю 150°C в хвилину.

Кращі магнітні характеристики пермалоїв досягаються при випаленні їх у вакуумі.

Малими втратами на вихрові струми володіють леговані пермалої із підвищеними значеннями магнітних характеристик. Кремній та марганець підвищують питомий електричний опір сплаву.

Основні характеристики низьконікелевих пермалоїв: питомий опір $\rho = (0,45...0,9) \cdot 10^{-6}$ Ом·м; магнітна проникність $\mu_{noc} = 1500...4000$, $\mu_{max} = 15000...60000$; індукція насичення $B_S = 1,0...1,6$ Тл; коерцитивна сила $H_C = 5...32$ А/м.

Основні характеристики високонікелевих пермалоїв: питомий електричний опір $\rho = (0,16...0,85) \cdot 10^{-6}$ Ом·м; магнітна проникність $\mu_{noc} = 700...100000$, $\mu_{max} = 50000...300000$; індукція насичення $B_S = 0,65...1,05$ Тл; коерцитивна сила $H_C = 0,65...6$ А/м.

Пермалої виготовляють наступних марок: 50НП, 65НП, 34Н КП, 50НХС, 79НМ, 80НХС, 76НХД. Літерами в маркуванні позначають: Н – нікель, М – марганець, Х – хром, Д – мідь, К – кобальт, С – кремній, П – прямокутна петля гістерезису, У – покращені властивості. Цифрами позначається вміст нікелю в сплаві.

Всі види пермалоїв чутливі до механічних деформацій матеріалу: наклепу при різанні, штампуванні і інших механічних діях. Тому деталі із пермалоїв, отримані таким чином, потребують додаткової термічної обробки – відпалення. Також недоліком пермалоїв є їх висока вартість.

Пермалої виготовляють у вигляді стрічок товщиною $(0,002...0,5) \cdot 10^{-3}$ м, листів товщиною $(1...2) \cdot 10^{-3}$ м і прутків діаметром $(5...50) \cdot 10^{-3}$ м і більше.

Низьконікелеві пермалої застосовують для виготовлення осердь дроселів, малогабаритних трансформаторів і магнітних підсилювачів, які працюють при підвищеній індукції без підмагнічування або із незначним підмагнічуванням.

Високонікелеві пермалої застосовують для виготовлення деталей апаратури (реле, магнітних екранів, малогабаритних трансформаторів та ін.), які працюють при частотах вищих за звукові. Магнітні характеристики пермалоїв стабільні в інтервалі температур від -60 до $+60^{\circ}\text{C}$.

Альсифери – не ковкі, крихкі сплави, які складаються із 5,5...13% алюмінію, 9...10% кремнію, решта – залізо. Промислові зразки альсиферів (12Ю, 12ЮВИ) мають наступні характерис-

тики: магнітна проникність $\mu_{\text{ноч}} = 35500$; $\mu_{\text{max}} = 120000$; коерцитивна сила $H_c = 18$ А/м; індукція насичення $B_S = 1,0$ Тл; питомий електричний опір $\rho = 0,8 \cdot 10^{-6}$ Ом м;

Альсифери призначалися для заміни дорогих пермалоїв, але вони замінили їх у порівняно обмеженій області застосування. Із альсиферів виготовляють литі осердя, які працюють при частотах до 20 кГц, так як на більш високих частотах у них виникають великі втрати на вихрові струми.

Альсифери добре себе зарекомендували при виготовленні виробів, які працюють в постійних магнітних полях. Із альсиферів виливають деталі з товщиною стінки не менше $2 \cdot 10^{-3}$ м – екрани, корпуси приладів, деталі магнітопроводів.

Магнітом'які сплави із спеціальними властивостями

Окрім розглянутих вище магнітом'яких сплавів в електротехніці використовують ряд матеріалів (сплавів) із *спеціальними* магнітними властивостями: пермінвар, пермендюр, кальмалой, пермалой, компенсатор та інші.

Ці матеріали характеризуються постійною магнітною проникністю в слабких магнітних полях. Із таких матеріалів виготовляють магнітні елементи із великим магнітним потоком: дроселі, елементи апаратури телефонного зв'язку та вимірювальних приладів, трансформатори струму та ін.

Пермінвар – це трійний сплав (25% Со, 45% Ні, 30% Fe). Магнітна проникність пермінвару після спеціальної термічної об-

робки у вакуумі становить $\mu = 300$, і залишається постійною при напруженості поля від 0 до 160 А/м. Індукція насичення пермінварів досягає $B_s = 1,55$ Тл.

Недоліки пермінвару: висока вартість і складна технологія виготовлення.

Пермендюр – трійний сплав (30...50% Со, 1,5...2% V, все інше – Fe). Сплав має найбільшу індукцію насичення серед ферромагнетиків – $B_s = 2,43$ Тл. Пермендюр призначений для виготовлення різноманітних осердь, полюсів електромагнітів які працюють в полях напруженістю 24000 А/м і більше. Також його застосовують для виготовлення мембран телефонів, елементів осцилографів та ін.

Недоліки пермендюру: малий питомий електричний опір, що веде до значних втрат на вихрові струми при роботі в змінних магнітних полях.

Для виготовлення магнітних шунтів використовують термомагнітні магнітом'які матеріали – матеріали для яких характерна велика залежність магнітної проникності від температури. До цих сплавів відноситься *кальмалой* (3...40 % Cu, Ni), *термалой* (28...34% Ni, Fe), *компенсатор* (Ni-Fe-Cr) та ін.

6.4 Магнітотверді матеріали

Магнітотверді матеріали мають велику коерцитивну силу ($H_c \geq 4000$ А/м) і велику залишку індукцію ($B_r \geq 0,1$ Тл). В них широка петля гістерезису. Ці матеріали важко намагнічуються, а після намагнічування можуть декілька років зберігати магнітну

енергію, тобто слугують джерелом постійного магнітного поля. Магнітно-тверді матеріали використовують, головним чином, для виготовлення постійних магнітів.

Магнітотверді матеріали застосовують для виготовлення постійних магнітів і інших деталей. Постійні магніти повинні створювати в повітряному зазорі між своїми полюсами магнітне поле з постійними по величині напруженістю і магнітною індукцією. Постійний магніт повинен володіти великою магнітною енергією, тобто магнітотверді матеріали повинні мати велику коерцитивну силу і велику залишкову магнітну індукцію.

У всякого постійного магніту з плином часу зменшується магнітний потік, а значить, і питома магнітна енергія. Цей процес називається *старінням магніту*.

Один вид старіння настає внаслідок вібрацій, ударів, різкої зміни температури магніту. Такому магніту можна повернути магнітні властивості повторним намагнічуванням. Другий вид старіння пов'язаний зі зміною структури магнітотвердого матеріалу, тому є незворотним. Вимогою, яка також ставиться до магнітотвердих матеріалів, є стійкість їх до старіння.

Металеві магнітотверді матеріали можна розділити на три основні групи: мартенситні високовуглецеві сталі; сплави на основі заліза-алюмінію-нікелю або на основі заліза-алюмінію-нікелю-кобальту; металокерамічні матеріали.

Мартенситні сталі

Мартенситна структура у високовуглецевих сталях одержується за допомогою їх гартування – нагрівання до температури, при якій сталь становить собою розчин вуглецю у залізі (аустеніт), і наступного різкого охолодження у воді або маслі. При мартенситній структурі кристали заліза різко змінюються – витягуються у довжину, а частина розчину вуглецю, яка залишилася, спричинить внутрішнє напруження. Все це забезпечує магнітну твердість постійним магнітам, виготовленим із мартенситних сталей.

В якості мартенситних сталей застосовують хромисті, вольфрамові і кобальтові сталі. В хромисті сталі в якості легуючої компоненти вводять хром (1,3...3,6%), у вольфрамові – вольфрам (5,5...6,5%) і хром (0,3...0,5%), в кобальтові сталі – кобальт (5...17%), молібден (1,2...1,7%) і хром (6...10%). Всі ці сталі також містять 0,9...1,1% вуглецю, решта – залізо.

Основні магнітні характеристики сталевих легованих магнітів:

- хромистих (EX3): $B_r = 0,9$ Тл; $H_c = 4400$ А/м;
- вольфрамових (EB6): $B_r = 1$ Тл; $H_c = 4800$ А/м;
- кобальтових (EX5K5, EX9K15M2): $B_r = 0,8...0,9$ Тл; $H_c = 1000...13500$ А/м.

Кращими матеріалами, із перелічених вище, є кобальтові сталі, але вони значно дорожчі хромистих і вольфрамових.

Ці матеріали відносяться до найбільш старих традиційних магнітотвердих матеріалів. На сьогодні вони мають обмежене застосування в зв'язку із невисоким рівнем їх магнітних характери-

стик, і використовуються лише для виготовлення магнітів в найменш відповідальних випадках.

Залізо-нікель-алюмінієві сплави

Сплави цього складу, леговані кобальтом, титаном або ніобієм після особливої термічної обробки мають високий рівень магнітних характеристик: залишкова індукція $B_r = 0,9 \dots 1,38$ Тл; коерцитивна сила $H_c = (42 \dots 97) \cdot 10^3$ А/м.

Альні – сплави алюмінію, нікелю та заліза. Ці сплави мають в 4,5 рази більшу магнітну енергію (до 26 кДж/м^3) ніж загартовані на мартенсит сталі.

Альнісі – сплав алюмінію та нікелю із доданням кремнію.

Альніко, магніко – сплав алюмінію та нікелю із доданням кобальту (***магніко*** – більш значна частка кобальту). Такі сплави мають магнітну енергію в 15 разів більшу ніж у загартованих на мартенсит сталей.

Ці сплави позначаються марками: ЮНД12 (альні); ЮНДК18С, ЮН13ДК24С (альнісі); ЮНДК15, ЮНДК24, ЮНДК24Б (альніко); ЮНДК35Т5 (магніко) та ін. Букви показують компоненти, які входять до складу сплавів на основі заліза. Ю – алюміній, Н – нікель, Д – мідь, К – кобальт, Т – титан, Б – ніобій. Постійні магніти із цих нековких сплавів можна отримувати тільки методом лиття з подальшою обробкою їх шліфуванням.

Високий рівень характеристик магнітної твердості магнітів із цих сплавів досягається спеціальною термообробкою. Спочатку нагрівають магніти до температури $900 \dots 1200^\circ\text{C}$ із подальшим

охолодженням на повітрі або в воді. При цьому всі складові частини сплаву (алюміній, нікель та ін.) будуть розчинені в залізі, утворюючи пересичений розчин. Через деякий час розчинені в залізі компоненти сплаву починають випадати у вигляді дрібнодисперсних частинок. Останні спричиняють внутрішні напруження в кристалах заліза, що забезпечує матеріалу високий рівень магнітної твердості. Щоб прискорити цей процес проводять відпускання загартованого магніту, тобто його нагрівають до температури $500\ldots 600^{\circ}\text{C}$, при якій починають випадати розчинені в залізі компоненти. При цьому витримують критичну швидкість охолодження: $15\ldots 20^{\circ}\text{C}$ в секунду. Описаний процес теплової обробки магнітів з цих сплавів називається *дисперсійним твердінням* і складається із двох етапів – гартування і відпускання.

Рівень магнітних характеристик у сплавів із вмістом кобальту від 15% і вище можна підвищити з допомогою термомагнітної обробки відлитих магнітів. Для цього магніт нагрівають до 1300°C і охолоджують в сильному магнітному полі зі швидкістю $10\ldots 15^{\circ}\text{C}$ в секунду. Внаслідок орієнтації магнітних доменів у напрямку дії зовнішнього магнітного поля, охолоджені магніти набувають магнітну текстуру. Внаслідок цього їх магнітна енергія зростає в середньому на 60...80% за рахунок різкого збільшення залишкової магнітної індукції. Після гартування магнітів у зовнішньому магнітному полі їх піддають відпусканню, тобто повторному нагріванню до 600°C і охолодженню з оптимальною швидкістю ($15\ldots 20^{\circ}\text{C}/\text{с}$).

Магніти з цих сплавів більш стійкі до старіння, ніж мартенситні сталі. Не дивлячись на високу вартість компонентів сплавів вони залишаються одними із найважливіших магнітотвердих матеріалів які використовують в точному приладобудуванні при конструюванні магнітних систем замкнутого типу.

Недоліком цих сплавів є те, що вони не піддаються звичайним методам механічної обробки внаслідок великої твердості і крихкості. Магніти із цих сплавів можна обробляти тільки шліфуванням.

Металокерамічні матеріали (порошкові магніти)

Магніти дуже малих розмірів або складної форми в масовому виробництві намагаються виготовляти із металокерамічних матеріалів. Ці матеріали отримують із металевих порошків, які беруть у співвідношеннях, що забезпечують магнітну твердість магнітам після їх пресування і подальшого спікання при високих температурах.

Металокерамічні магніти виготовляють на основі порошків із сплавів: залізо-нікель-алюміній або залізо-нікель-алюміній-кобальт. Чисті метали або їх сплави подрібнюють до частинок розміром $(10...75) \cdot 10^{-6}$ м. Із порошкоподібної вихідної маси магніти пресують під тиском $P = (1,0...1,5) \cdot 10^6$ Н/м². Відпресовані магніти обпікають у захисній атмосфері або у вакуумі при температурі 1100...1300°C. Спечені магніти гартують, а потім відпускають, охолоджуючи із заданою швидкістю. Магніти, до складу яких входить кобальт, підлягають термомагнітній обробці під ді-

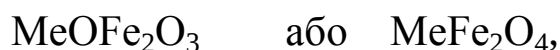
єю зовнішнього магнітного поля. Це покращує їх основні магнітні характеристики (B_r і H_c).

Металокерамічні магніти в готовому вигляді мають невелику пористість (2...5%), яка трохи знижує їх магнітні характеристики (на 10...20%). Позитивною якістю металокерамічних магнітів є чистота їх поверхні, яка не потребує допоміжної обробки, і точність заданих розмірів. Магніти із металокерамічних матеріалів можуть оброблятися тільки шліфуванням.

6.5 Ферити

Ферити виготовляють із порошкоподібної суміші, яка складається із окислу заліза і спеціально підібраних окислів інших металів. Відпресовані феритові вироби підлягають спіканню при високих температурах. Назва фериту визначається назвою двовалентного або одновалентного металу, окис якого входить до складу фериту. Так, якщо до складу фериту входить окис цинку (ZnO), то ферит називається феритом цинку, якщо окис нікелю (NiO) – феритом нікелю і т.д.

Ферити, до складу яких, крім окислу заліза Fe_2O_3 , входить тільки один окисел іншого металу, називаються *простими*. Хімічна формула простого фериту в загальному вигляді записується так:



Me – позначення металу, окисел якого входить до складу фериту.

Не всі прості ферити мають магнітні властивості. Так, ферити цинку ZnFe_2O_4 і кадмію CdFe_2O_4 є немагнітними речовинами. Наявність або відсутність магнітних властивостей у простих феритів визначається кристалічною структурою.

Найкращі магнітні характеристики мають *складні* або *змішані* ферити. Це тверді розчини одного простого фериту в другому. В такому випадку можуть бути використані немагнітні ферити в поєднанні з магнітними простими феритами. Наприклад, твердий розчин двох простих феритів цинку і нікелю утворює змішаний нікельцинковий ферит.

Ферити виготовляють за керамічною технологією, тобто вихідні порошкоподібні окисли металів, взяті в обумовленому співвідношенні, подрібнюють у кульових млинах. Із цієї суміші тонко помелених порошків пресують брикети, які підлягають обпаленню в печах. Потім брикети розмелюють і в отриманий тонкодисперсний порошок вводять пластифікатор, наприклад розчин полівінілового спирту. Із отриманої маси пресують феритові вироби – осердя, кільця, які обпалюють при $1000\ldots 1400^\circ\text{C}$. Отримують тверді і крихкі вироби чорного кольору; їх можна обробляти тільки шліфуванням.

Найбільш широко застосовують змішані *магнітом'які ферити*: нікель-цинкові, марганець-цинкові, літій-цинкові. Умовне позначення феритів: Н – низькочастотні, НН – нікельцинкові низькочастотні ферити, НМ – марганець-цинкові, ВТ – ферити із прямокутною петлею гістерезису. Цифри, які стоять

перед літерами вказують значення початкової магнітної проникності. Наприклад, 4000НМ – марганець-цинковий ферит з початковою магнітною проникністю, рівною 4000.

Основні характеристики магнітом'яких феритів такі: густина $D = 3800 \dots 5000 \text{ кг/м}^3$; $TK = (5 \dots 12) \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; пористість $1 \dots 1,5\%$; коерцитивна сила $H_c = 0,1 \dots 22 \text{ А/м}$. Позитивними якостями феритів є: стабільність магнітних характеристик в широкому діапазоні частот, малі втрати на вихрові струми і простота виготовлення феритових деталей.

Як і всі магнітні матеріали ферити зберігають свої магнітні властивості лише до точки Кюрі. У різних за складом феритів температура Кюрі коливається в широких межах від 45 до 950°C.

Для виготовлення постійних магнітів використовують **магнітотверді ферити**, найбільше застосування із яких отримали ферити барію $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$. На відміну від магнітом'яких феритів барієві ферити мають не кубічну, а гексагональну кристалічну структуру. Остання обумовлює магнітну твердість феритів барію, головним чином, за рахунок великої коерцитивної сили. За своєю структурою ферити барію – це полікристалічні матеріали, які складаються з багатьох кристалічних частинок. При цьому кристалічні частинки орієнтовані довільно, що визначає однаковість властивостей фериту в усіх напрямках. Ці ферити – **ізоτροпні** (марка БІ).

Якщо в процесі пресування магнітів порошкоподібну масу піддати дії зовнішнього магнітного поля великої напруженості

($H = 800 \text{ А/м}$), то кристалічні частинки будуть орієнтовані в одному напрямку. Виготовлені таким чином магніти із барієвих феритів є *анізотропними* (марка БА). Ці магніти в готовому вигляді, тобто після обпалення в печах і намагнічування, володіють більш високим рівнем магнітних характеристик.

Основні характеристики барієвих феритів: густина $D = 4600 \dots 5000 \text{ кг/м}^3$; коерцитивна сила $H_c = (128 \dots 232) 10^3 \text{ А/м}$; залишкова індукція $B_r = 0,2 \dots 0,35 \text{ Тл}$; температура Кюрі $\theta = 450^\circ \text{C}$.

Магніти, що виготовлені з барієвих феритів, володіють великим питомим опором, що дає змогу застосовувати їх в області високих частот. Для кращого використання барієвим магнітам надають форму, при якій їх довжина мала в порівнянні із перерізом.

Барієві ферити відрізняються стабільністю своїх характеристик, але вони чутливі до різкої зміни температури. Їх виготовляють із недефіцитних порошкоподібних матеріалів (окисли заліза Fe_2O_3 і вуглекислого барію BaCO_3) методами керамічної технології. Магніти із барієвих феритів значно дешевші магнітів із залізо-нікель-алюмінієвих сплавів та інших металевих матеріалів.

Недолікам усіх феритів є крихкість і можливість обробки тільки шліфуванням. Ферити є магнітними напівпровідниками, і тому із ростом температури їх питомий опір зменшується, що викликає збільшення втрат на вихрові струми.

Запитання для самоконтролю

1. Як класифікуються матеріали за поведінкою в магнітному полі?
2. Чим відрізняються між собою діамагнетики, парамагнетики та феромагнетики?
3. Якими характеристиками описують властивості магнітних матеріалів?
4. Що таке початкова крива намагнічування?
5. Що таке гранична петля гістерезису?
6. Як пов'язана доменна структура феромагнетиків із кривою намагнічування?
7. Що називається магнітним гістерезисом?
8. Що таке початкова та максимальна магнітна проникність?
9. Що таке максимальна та залишкова магнітна індукція? Одиниці вимірювання.
10. Що таке коерцитивна сила? Одиниці вимірювання.
11. Які матеріали називаються магнітом'якими?
12. Які матеріали відносяться до магнітом'яких матеріалів? Властивості. Область застосування.
13. Які матеріали називаються магніто твердими?
14. Які матеріали відносяться до магнітотвердих? Властивості. Область застосування.
15. Що таке ферити? Властивості феритів. Як вони класифікуються?

ДОДАТКИ

Таблиця Д.1 – Основні характеристики газоподібних діелектриків

Діелектрик	Густина, кг/м ³	Діелектри- чна прони- кність	Електрич- на міц- ність, МВ/м	Коефіцієнт теплопрові- дності, Вт/м·К	Питома теплоємність, кДж/(кг·К)
Повітря	1,293	1,00058	2...3	0,026	1,01
Азот	1,251	1,00059	2...3	0,027	1,06
Водень	0,089	1,00026	1,2...1,5	0,175	14,5
Гелій	0,179	1,000069	0,5...0,7	0,142	5,27
Елегаз (SF ₆)	6,700	1,00191	6...7,2	0,146	0,65

Таблиця Д.2 – Основні характеристики нафтових ізоляційних масел

Характеристики	Трансфор- маторне ма- сло	Конденса- торне масло	Кабель- не масло МН-4	Кабельне масло С-220
Густина, кг/м ³	870...890	860	890	840
В'язкість при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, м ² /с	$30 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$800 \cdot 10^{-6}$
В'язкість при $f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, м ² /с	$9,2 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
Температура спалаху парів, $^{\circ}\text{C}$	135	160	135	180
Температура застигання, $^{\circ}\text{C}$	-45	-45	-45	-30
Питомий об'ємний опір при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ом·м	$10^{13} \dots 10^{14}$	$10^{13} \dots 10^{14}$	$10^{13} \dots 10^{14}$	10^{14}
Кислотне число, мгКОН/г	0,02...0,03	0,01...0,02	0,04	0,02
Діелектрична проникність	2,2...2,4	2,2	2,3	2,1
Тангенс кута діелектричних втрат при $f = 50\text{ Гц}$	0,003...0,005	0,002...0,003	0,003	0,003
Електрична міцність при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, МВ/м	15...18	20	18	20

Таблиця Д.3 – Основні характеристики синтетичних рідких діелектриків

Характеристики	Совол	Совтол-2	Совтол-10	ПЕСЖ (ПЕС-Д)
Густина, кг/м ³	1560	1520	1510...1530	960
В'язкість при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, м ² /с	$70 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$
В'язкість при $f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, м ² /с	$30 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$
Температура спалаху парів, $^{\circ}\text{C}$	–	200	200	150
Температура застигання, $^{\circ}\text{C}$	+5	-40	-7	-60
Питомий об'ємний опір при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, Ом·м	10^{13}	10^{12}	10^{12}	10^{14}
Кислотне число, мгКОН/г	0,02	0,01	0,01	-
Діелектрична проникність	5,2	4,6	4,8	2,6
Тангенс кута діелектрич- них втрат при $f = 50\text{ Гц}$	0,002	0,08	0,06	0,003
Електрична міцність при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, МВ/м	18	20	20	18...25

Таблиця Д.4 – Основні характеристики електроізоляційних лаків

Класифікація лаків за основою	Марка лака	Час сушіння і температура	Електричні характеристики при $t = 20^{\circ}\text{C}$		Область застосування
			ρ_v , Ом·м	$E_{\text{пр}}$, МВ/м	
Масляно-бітумні	БТ-987	5...6 год. при 105°C	$10^{12} \dots 10^{13}$	60...70	Для просочування обмоток електричних машин, апаратів з ізоляцією класу А і В
	БТ-988	3 год. при 105°C	$10^{11} \dots 10^{12}$	50...60	Покривний лак з нагрівостійкістю 105°C
Масляні	МА-972	1 год. при 105°C	$10^{11} \dots 10^{12}$	50...60	Просочувальний і покривний лак. Використовується при ремонтах електричних машин
Гліфталеві	ГФ-95	2 год. при 105°C	$10^{12} \dots 10^{13}$	70...75	Просочувальний і покривний лак для обмоток, що працюють в маслі
	ФЛ-95	1...2 год. при 105°C	$10^{12} \dots 10^{13}$	60...70	Просочувальний і покривний лак з підвищеною цементуючою здатністю
Кремній-органічні	КО-964	1...2 год. при 200°C	$10^{12} \dots 10^{13}$	70...80	Просочувальний лак з високою нагрівостійкістю (до 200°C)
	КО-921	15...30 хв. при 200°C	$10^{11} \dots 10^{12}$	60...70	Просочувальний лак з високою нагрівостійкістю (до 200°C) і водостійкістю

Таблиця Д.5 – Основні характеристики електроізоляційних емалей

Марка емалі	Застосований тип лаку	Час сушки, температура	Електричні характеристики при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$		Область застосування
			ρ_v , Ом·м	$E_{пр}$, МВ/м	
ГФ-92-ГС (СПД)	Гліфталевий	3 год. при $105\text{ }^{\circ}\text{C}$	$10^9 \dots 10^{10}$	30...35	Емаль гарячого сушіння. Використовується для покриття обмоток, що обертаються
ГФ-92-ХС (СВД)	Гліфталевий	24 год. при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$10^9 \dots 10^{10}$	30...32	Емаль холодного сушіння утворює Використовується для покриття нерухомих обмоток.
ЕП-91	Епоксидний	2 год. при $180\text{ }^{\circ}\text{C}$	$10^{11} \dots 10^{12}$	50...70	Нагрівостійка ($130\text{ }^{\circ}\text{C}$) гарячої сушки, утворює плівку, стійку до вологи і мінерального масла.
КО-911	Кремній-органічні	2 год. при $200\text{ }^{\circ}\text{C}$	$10^{10} \dots 10^{11}$	50...70	Нагрівостійка емаль створює тверду плівку, має підвищену стійкість до мінерального масла і води. Нагрівостійкість – $180\text{ }^{\circ}\text{C}$
КО-935	Кремній-органічні	2 год. при $120\text{ }^{\circ}\text{C}$	$10^{11} \dots 10^{12}$	40...60	Теж, але висихає при зниженій температурі - $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Утворені плівки володіють стійкістю до води і плісняви. Нагрівостійкість – $180\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблиця Д.6 – Основні характеристики електроізоляційних лакотканин

Лакотканина	Марка	Товщина, мм	Границя міцності при роз- тягуван- ні, кПа	Питомий об'ємний опір, Ом·м	Електрична міцність, МВ/м
Бавовняна на мас- ляних лаках	ЛХМ-105 ЛХСМ-105	0,15...0,30 0,17...0,20	4,5 5,1	$10^{11} \dots 10^{12}$ $10^{11} \dots 10^{12}$	15...35 15...38
Бавовняна на мас- ляно-бітумних лаках	ЛХБ-105	0,17...0,24	7,5	$10^{12} \dots 10^{13}$	20...40
Шовкова на масляних лаках	ЛШМ-105 ЛШМС-105	0,08...0,15 0,04...0,15	2,4 2,5	$10^{11} \dots 10^{13}$ $10^{11} \dots 10^{13}$	18...38 20...42
Скляна на крем- ній-органічних лаках	ЛСК-180 ЛСКР-180	0,08...0,20 0,12...0,20	4...6	$10^{12} \dots 10^{13}$ $10^{12} \dots 10^{13}$	25...35 16...25

Таблиця Д.7 – Основні характеристики шаруватих пластиків

Характеристики	Гетинакс низькочас- тотний I, II, III і V	Текстоліт низькочас- тотний А, Б, Г	Склотекстоліт на основі зв'язуючої смоли		
			Фенол- формаль- дегідної	Кремній- органічної	Епоксидної і кремній- органічної
1	2	3	4	5	6
Густина, кг/м ³	1280...1450	1300...1450	1600...1850	1600...1800	1800...1900
Границя міцно- сті при згинан- ні, МПа	100...125	90...105	95...120	60...70	390...400

Продовження таблиці Д7

1	2	3	4	5	6
Границя міцності при розтягуванні, МПа	80...130	35...50	70...90	80...110	200...300
Нагрівостійкість, °С	130...150	130...135	180...185	220...300	185...200
Питомий об'ємний опір, Ом·м	$10^6...10^8$	$10^6...10^7$	$10^7...10^8$	$10^8...10^9$	$10^9...10^{10}$
Діелектрична проникність	5...6	6...7	5...7	5...6	6...7
Тангенс кута діелектричних втрат (при $f = 50\text{Гц}$)	0,05...0,4	0,08...0,18	0,05...0,09	0,06...0,04	0,08...0,04
Електрична міцність, МВ/м	12...20	5...12	12...20	12...25	18...30

Таблиця Д.8 – Основні характеристики електрокерамічних матеріалів

Матеріал	Густина, кг/м ³	Границя міцності при розтягуванні, МПа	Границя міцності при згинанні, МПа	Питомий об'ємний опір, Ом·м	Діелектрична проникність	Тангенс кута діелектричних втрат (при 50Гц)	Електрична міцність МВ/м
Електрофарфор	2300...2500	30...50	60...100	$10^{11}...10^{12}$	7...8	0,025...0,030	30...32
Стеатит	2600...3000	50...75	140...170	$10^{12}...10^{14}$	6...8	0,0006...0,0008	25...40

Таблиця Д.9 – Основні характеристики конденсаторної кераміки

Кристалічна основа кераміки	Хімічна формула кристалічної основи	Діелектрична проникність	Температурний коефіцієнт діелектричної проникності, 1/°C	Границя міцності при статичному згині, МПа
Титанат магнію	Mg Ti O ₃	14	+70 · 10 ⁻⁶	120
Титанат кальцію	Ca Ti O ₃	150	-1500 · 10 ⁻⁶	150
Станат кальцію	Ca Sn O ₃	14	+110 · 10 ⁻⁶	90
Цирконат барію	Ba Zr O ₃	38	-350 · 10 ⁻⁶	800

Таблиця Д.10 – Основні характеристики малолужного скла

Характеристика	Малолужне скло
Густина, кг/м ³	2600
Границя міцності при статичному згині, МПа	250
Питомий об'ємний опір, Ом·м	10 ¹²
Питомий поверхневий опір, Ом	10 ¹⁴
Тангенс кута діелектричних втрат	0,02...0,025
Середнє значення електричної міцності, МВ/м	45...48

Таблиця Д.11 – Основні характеристики міді і бронз

Матеріал	Характер обробки	Провідність, %	Границя міцності при розтягуванні, МПа	Відносне видовження при розтягуванні, %
Провідникова мідь (99,95% Cu)	м'яка	100	200...250	40
	тверда	98	360...420	3
Кадмійова бронза (0,9% кадмію)	м'яка	95	250...310	50
	тверда	90	600...730	4
Фосфориста бронза (6-7% олово, 0,15 фосфору)	м'яка	15	400...450	60
	тверда	10	950...1050	3
Берилієва бронза (2,3% берилію, 0,5 нікелію)	м'яка	17	490...600	30..50
	тверда	10	1000...1100	7

Таблиця Д.12 – Склад і основні характеристики жаростійких провідникових сплавів

Марка сплаву	X23Ю5	X27Ю5Т	X13Ю4	X20Н80Т3	X20Н80Т	X20Н80	X15Н60
Тип сплаву	хромаль	хромаль	фехраль	ніхром	ніхром	ніхром	ніхром
Склад, % мас	Хром	22...24	12...15	19...23	19...23	20...23	15...18
	Нікель	0,6	0,6	решта	75	77...80	55...61
	Алюміній	4,6...5,3	3,5...5,5	-	-	-	-
	Титан	-	-	2...2,9	0,4	-	-
Залізо	решта	решта	решта	2,5	решта	-	-
	Питомий опір, $\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot 10^{-6}$	1,3...1,4	1,37...1,47	1,18...1,34	1,04...1,17	1,04...1,15	1,06...1,16
Температурний коефіцієнт опору, $1/\text{K}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$15 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$10 \cdot 10^{-5}$	$12 \cdot 10^{-5}$
Допустима температура, $^{\circ}\text{C}$	1150...1300	1200...1300	900...950	1100...1200	1100...1200	1100...1200	950...1000

Таблиця Д.13 – Легкоплавкі (м'які) припої

Марка припою	Склад припою, % по масі	Температура плавлення, °С	Границя міцності при розтягуванні, МПа	Область застосування
Олово	Олово чисте	232	50	Паяння та лудіння міді, латуні та бронзи з утворенням корозійностійких швів та покриттів
ПОС-90	Олово – 89...91 Свинець – 9...11	220	49	
ПОС-61	Олово – 60...62 Свинець – 40...39	190	43	Теж саме, але при більш низькій температурі
ПОС-40	Олово – 39...41 Свинець – 61...59	238	38	Теж саме, але при підвищеній температурі
ПОС-10	Олово – 9...10 Свинець – 91...90	299	32	Теж саме, але для паяння частин невідповідального призначення
ПОССу-40-2	Олово – 39...41 Сурма – 2 Свинець – решта	229	43	Паяння і лудіння мідних проводів, частин з латуні та бронзи з утворенням герметичних швів
П 300	Цинк – 60 Кадмій – 40	300	35	Паяння проводів і деталей з алюмінію та алюмінієвих сплавів

Таблиця Д.14 – Тугоплавкі (тверді) припої

Марка припою	Склад припою, % по масі	Температура плавлення, °С	Границя міцності при розтягуванні, МПа	Область застосування
ПСр-72	Срібло – 72 мідь – 28	779	360	Пайка струмопровідних деталей із міді, латуні, бронзи та інших металів (крім алюмінію)
ПСр-70	Срібло – 70 мідь – 26 цинк – 4	775	350	Теж саме, але з більшою стійкістю до корозії
ПМЦ-54	Мідь – 54 цинк – 46	880	260	Пайка деталей із міді, латуні, бронзи та сталі з утворенням крихких швів
34-А	Алюміній – 66 мідь – 28 кремній – 6	525	180	Пайка деталей з алюмінію та його сплавів, з утворенням швів з підвищеною механічною міцністю