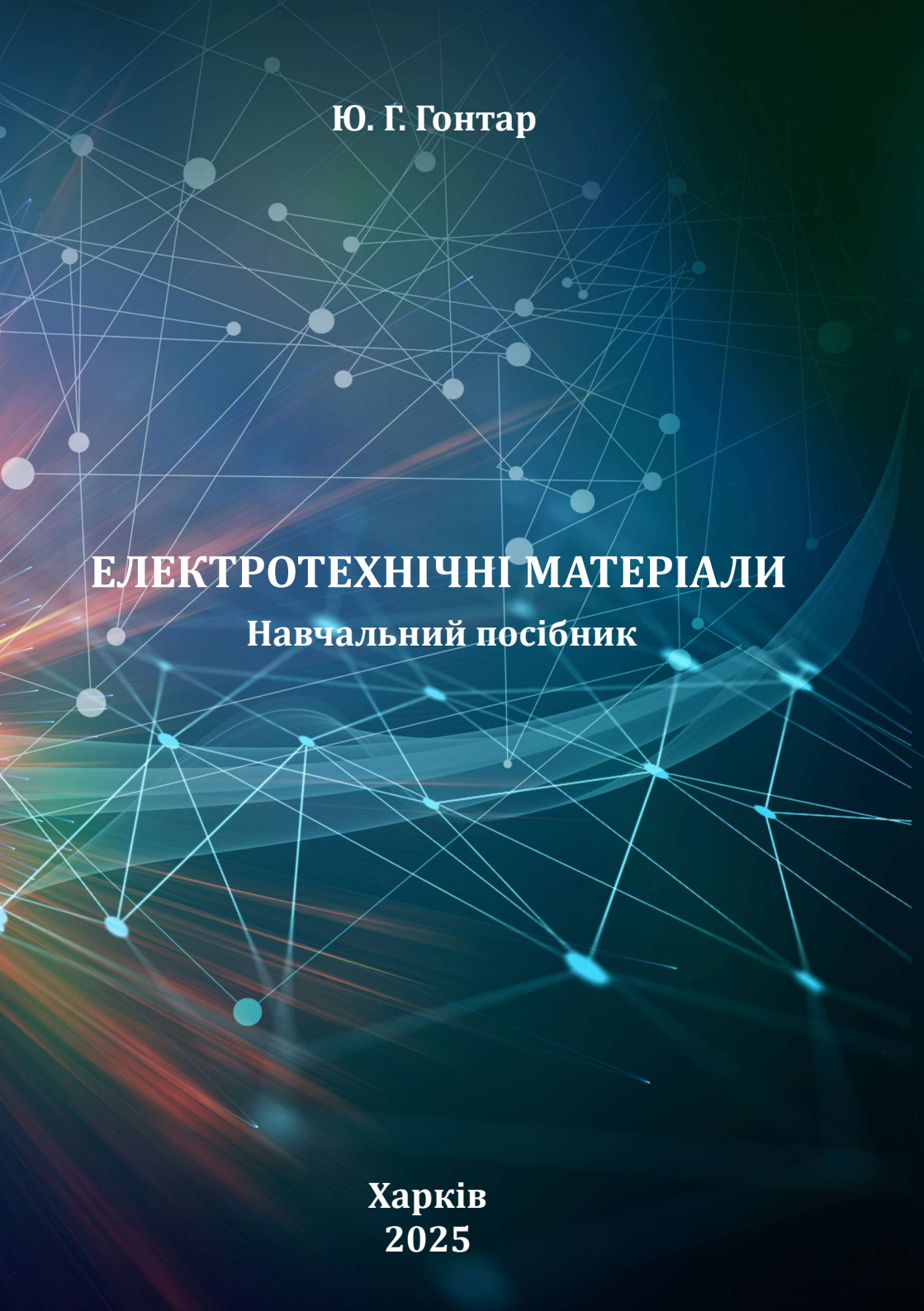




Ю. Г. Гонтар

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник

**Харків
2025**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Ю. Г. Гонтар

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник
для здобувачів денної та заочної
форм навчання спеціальностей
G3 Електрична інженерія та
G5 Електроніка, електронні комунікації,
приладобудування та радіотехніка

Затверджено
редакційно-видавничою радою
НТУ «ХПІ»,
протокол № 1 від 13.02.2025 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2025

УДК 621.315.5

Г 65

Рецензенти:

В.Є.Плюгін, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри систем електропостачання та електроспоживання,
Харківський національний університет міського господарства
імені О.М.Бекетова;

О.О.Мірошник, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту,
Державний біотехнологічний університет

Рекомендовано Вченою радою НТУ «ХПІ» як навчальний посібник для здобувачів денної та заочної форм навчання спеціальностей G3 Електрична інженерія та G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка
протокол №4 від 28 березня 2025 року

Гонтар Ю. Г.

Г 65 Електротехнічні матеріали : навчальний посібник /
Ю. Г. Гонтар. – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – 503 с.

ISBN 978-617-05-0551-4

Навчальний посібник призначено для здобувачів освіти технічних спеціальностей, аспірантів, викладачів, а також інженерів і науковців, що працюють у галузі електротехніки, матеріалознавства та суміжних дисциплін. Він охоплює широкий спектр питань, пов'язаних із класифікацією, фізико-хімічними та електричними властивостями матеріалів, зокрема провідників, діелектриків і магнітних матеріалів. Значна увага приділяється напівпровідникам, активним діелектрикам та іншим перспективним матеріалам. Кожен розділ містить теоретичний базис, практичні приклади, ілюстрації та таблиці, що дозволяють краще зрозуміти особливості використання матеріалів у різних умовах

Іл. 261. Табл. 24. Бібліогр. 79 назв.

УДК 621.315.5

ISBN 978-617-05-0551-4

© Гонтар Ю. Г., 2025

© НТУ «ХПІ», 2025

ЗМІСТ

Передмова.....	10
----------------	----

РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ. ВИДИ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Класифікація електротехнічних матеріалів.....	11
1.2 Основні типи хімічного зв'язку.....	15
1.2.1 Ковалентний зв'язок.....	16
1.2.2 Іонний зв'язок.....	19
1.2.3 Металічний зв'язок.....	20
1.2.4 Молекулярний зв'язок.....	21
1.3 Електропровідність діелектричних матеріалів.....	23
1.3.1 Питомий об'ємний опір.....	24
1.3.2 Питомий поверхневий опір.....	24
1.4 Вплив напруженості поля на електропровідність діелектриків.....	26
1.5 Вплив температури на електропровідність діелектриків.....	27
1.6 Особливості електропровідності різних газових і рідких діелектриків.....	28
1.6.1 Електропровідність газів.....	28
1.6.2 Електропровідність рідин.....	30
Питання для самоперевірки:	31

РОЗДІЛ 2. ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ.....

2.1 Пружні (деформаційні) типи поляризації.....	33
2.1.1 Електронна поляризація.....	34
2.1.2 Іонна поляризація.....	37
2.1.3 Дипольна (орієнтаційна) поляризація.....	39
2.2 Міжфазна поляризація.....	41
2.3 Релаксаційна (непружна) поляризація	43
2.4 Особливості поляризації активних діелектриків	46
Питання для самоперевірки:	46

РОЗДІЛ 3. ВТРАТИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ.....

3.1 Кут діелектричних втрат	47
-----------------------------------	----

3.2 Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах	53
3.3 Особливості діелектричних втрат в рідких, газових і твердих діелектриках	59
3.3.1 Діелектричні втрати в газах	59
3.3.2 Діелектричні втрати в рідких діелектриках	60
3.3.3 Діелектричні втрати в твердих діелектриках	62
<i>Питання для самоперевірки:</i>	68
РОЗДІЛ 4. ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ	69
4.1 Загальні відомості	69
4.2 Пробій газів	72
4.2.1 Ударна іонізація	72
4.2.2 Фотонна іонізація	75
4.3 Ступені однорідності електричного поля. Види розрядів у газах	77
4.4 Пробій газів в однорідному електричному полі	83
4.5 Пробій газів у неоднорідному електричному полі на постійній напрузі при різній полярності електродів	90
4.6 Пробій рідких діелектриків	92
4.7 Пробій твердих діелектриків	96
4.7.1 Електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків	97
4.7.2 Електричний пробій неоднорідних діелектриків	98
4.7.3 Тепловий пробій	100
4.7.4 Електрохімічний пробій	104
<i>Питання для самоперевірки:</i>	106
РОЗДІЛ 5. МЕХАНІЧНІ, ТЕПЛОВІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ	107
5.1 Механічні властивості матеріалів	107
5.2 Теплові властивості діелектриків	114
5.3 Фізико-хімічні властивості діелектриків	130
<i>Питання для самоперевірки:</i>	135
РОЗДІЛ 6. ГАЗОПОДІБНІ ДІЕЛЕКТРИКИ	136

6.1 Повітря.....	139
6.2 Водень.....	140
6.3 Азот.....	148
6.4 Елегаз.....	150
6.5 Фреон.....	152
6.6 Гелій.....	154
6.7 Неон.....	155
<i>Питання для самоперевірки:</i>	157
РОЗДІЛ 7. РІДКІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ.....	158
7.1 Природні рідкі діелектрики.....	160
7.2 Трансформаторне масло.....	161
7.3 Кабельне масло.....	165
7.4 Конденсаторне масло.....	166
7.5 Синтетичні рідкі діелектрики.....	167
7.6 Кремнійорганічні рідини.....	170
7.7 Фторорганічні рідини.....	171
<i>Питання для самоперевірки:</i>	172
РОЗДІЛ 8. ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНІ ОРГАНІЧНІ ТА ЕЛЕМЕНТООРГАНІЧНІ МАТЕРІАЛИ	173
8.1 Лінійні полімери.....	175
8.2 Розгалужені полімери.....	177
8.3 Сітчасті та просторові полімери.....	178
8.4 Неполярні полімеризаційні термопластичні синтетичні діелектрики.....	182
8.4.1 Поліетилен.....	182
8.4.2 Полістирол.....	186
8.4.3 АБС-пластик.....	188
8.4.4 Поліпропілен.....	189
8.4.5 Поліізобутилен.....	191
8.4.6 Політетрафторетилен.....	192
8.5 Полярні полімеризаційні термопластичні синтетичні діелектрики.....	194
8.5.1 Полівінілхлорид.....	194
8.5.2 Політрифторхлоретилен.....	196

8.5.3 Поліметилметакрилат	197
8.5.4 Полііміди	199
8.6 Поліконденсаційні органічні діелектрики	201
8.6.1 Поліаміди	201
8.6.2 Поліетилентерефталат	208
8.6.3 Полікарбонат	209
8.6.4 Поліуретани	210
8.6.5 Полівінілацетали	211
8.7 Пластмаси (пластики)	212
8.7.1 Гетинакс	217
8.7.2 Текстоліт	218
8.8 Еластomers	220
8.8.1 Каучуки та гуми	220
<i>Питання для самоперевірки:</i>	230

РОЗДІЛ 9. ТВЕРДЮЧІ ДІЕЛЕКТРИКИ: ЛАКИ, ЕМАЛІ, КОМПАУНДИ, КЛЕЇ, ГЕРМЕТИКИ.....231

9.1 Лаки. Класифікація за застосуванням	231
9.1.1 Просочувальні лаки	232
9.1.2 Покривні лаки	233
9.1.3 Клейкі лаки	235
9.2 Емалі.....	238
9.3 Компаунди	239
9.4 Клеї.....	244
9.5 Герметики	247
<i>Питання для самоперевірки:</i>	248

РОЗДІЛ 10. ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНЕ СКЛО, РАДІО- ТА ЕЛЕКТРОКЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ.....250

10.1 Скло.....	250
10.2 Основні види скла за хімічним складом	252
10.3 Різновиди скла за призначенням	257
10.4 Процес виготовлення заготовки для оптоволокна	263
10.5 Кераміка.....	266
10.6 Електротехнічний фарфор.....	266
10.7 Стеатитова кераміка	268

10.8 Конденсаторна кераміка	269
10.9 Сегнетокераміка	269
10.10 Ультрафарфор	270
10.11 Високотемпературна надпровідна кераміка	271
10.12 Кераміка спеціального призначення	272
<i>Питання для самоперевірки:</i>	<i>273</i>
РОЗДІЛ 11. СЛЮДА ТА МАТЕРІАЛИ НА ЇЇ ОСНОВІ.....	274
11.1 Слюдяні матеріали	274
11.2 Слюденіти та слюдопласти, їх застосування	283
<i>Питання для самоперевірки:</i>	<i>285</i>
РОЗДІЛ 12. АКТИВНІ ДІЕЛЕКТРИКИ.....	286
12.1 Сегнетоелектрики	287
12.1.1 Механізм виникнення спонтанної поляризації у сегнетоелектриках	287
12.2 П'єзоелектрики.....	305
12.3 Піроелектрики	321
12.4 Електрети	327
12.4.1 Фотоелектрети і радіоелектрети	338
12.4.2 Трибоелектрети	340
12.5 Рідки кристали.....	345
<i>Питання для самоперевірки:</i>	<i>355</i>
РОЗДІЛ 13. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ.....	356
13.1 Мідь.....	356
13.2 Сплави на основі міді	359
13.2.1 Бронза	359
13.2.2 Латунь	362
13.2.3 Нейзильбер	364
13.3 آلюміній.....	365
13.4 Сплави алюмінію	367
13.4.1 Дюралюмін	367
13.4.2 Силумін	368
13.4.3 Магналій	370
13.4.4 Альдрей	371

13.5	Матеріали високого питомого опору	372
13.5.1	Вольфрам	373
13.5.2	Молібден	375
13.5.3	Тантал	376
13.5.4	Ніобій	378
13.5.5	Реній	379
13.5.6	Хром	381
13.6	Провідникові резистивні матеріали	382
13.6.1	Манганін	383
13.6.2	Константан	384
13.6.3	Ніхром	385
13.6.4	Фехраль і хромаль	387
13.7	Матеріали для термопар	388
13.8	Дорогоцінні метали	392
13.8.1	Золото	392
13.8.2	Срібло	394
13.8.3	Платина	395
13.8.4	Паладій	397
13.9	Метали та сплави різного призначення	398
13.9.1	Залізо	398
13.9.2	Сталь	401
13.9.3	Чавун	403
13.9.4	Нікель	405
13.9.5	Олово	406
13.9.6	Свинець	409
13.10	Неметалеві провідникові матеріали	410
	<i>Питання для самоперевірки:</i>	415
РОЗДІЛ 14. НАДПРОВІДНИКИ ТА КРІОПРОВІДНИКИ		416
14.1	Надпровідники	416
14.2	Кріопровідники	427
	<i>Питання для самоперевірки:</i>	429
РОЗДІЛ 15. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ		430
15.1	Основні поняття	430
15.2	Магнітом'які матеріали	440

15.3 Магнітотверді матеріали	453
15.4 Інші магнітотверді матеріали.....	455
15.5 Матеріали спеціального призначення.....	457
<i>Питання для самоперевірки:</i>	<i>464</i>
РОЗДІЛ 16. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ	465
16.1 Напівпровідникові матеріали.....	465
16.1.1 Кремній	465
16.1.2 Германій	468
16.1.3 Селен	470
16.1.4 Телур	472
16.2 Властивості напівпровідників.....	473
16.3 Утворення енергетичних зон	476
16.4 Електропровідність напівпровідників та її види	479
16.5 Електронно-«дірковий» перехід (<i>p-n</i> -перехід)	484
16.6 Вольт-амперна характеристика напівпровідників	488
<i>Питання для самоперевірки:</i>	<i>491</i>
Предметний покажчик.....	493
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	497

Передмова

Розвиток сучасної електротехніки та матеріалознавства нерозривно пов'язаний з дослідженням та впровадженням нових електротехнічних матеріалів, які забезпечують підвищення ефективності, надійності й довговічності обладнання. Цей навчальний посібник створений для систематизації знань про електротехнічні матеріали, їхні властивості, особливості та сфери застосування.

В посібнику висвітлено широкий спектр питань, пов'язаних із класифікацією, фізико-хімічними та електричними властивостями матеріалів. Основну увагу приділено ключовим групам електротехнічних матеріалів: провідниковим, діелектричним і магнітним матеріалам, розглядаються особливості напівпровідникових, кріопровідникових і активних діелектриків, що мають важливе значення в розробці інноваційних технологій.

Детально розглянуто вплив зовнішніх факторів, таких як температура, механічні навантаження, електричні та магнітні поля, на властивості електротехнічних матеріалів, наведено дані про втрати в діелектриках, механізми пробою, поляризацію та інші критично важливі процеси, які визначають придатність матеріалів до експлуатації в тих чи інших умовах.

Посібник орієнтований на здобувачів технічних спеціальностей, інженерів і науковців, які працюють у галузі електротехніки, матеріалознавства та суміжних дисциплін. Він може бути використаний як навчальний матеріал для вивчення основ електротехнічних матеріалів, а також як довідкове видання для фахівців, які шукають інформацію про специфіку матеріалів, їхні параметри та особливості застосування.

РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ. ВИДИ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Класифікація електротехнічних матеріалів

Електротехнічні матеріали за їхніми електричними властивостями поділяють на три основні групи:

1 – провідники, тобто матеріали, які мають високу електропровідність, порівняно низький електричний опір (питомий електричний опір провідників лежить в межах $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \dots 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) і використовуються для передачі електричного струму:

- метали (мідь, алюміній, золото, срібло);
- деякі неметали (наприклад, вуглець є відмінним провідником, який застосовують в якості ковзних контактів в щітках електродвигунів);
- розчини солей і кислот у воді;

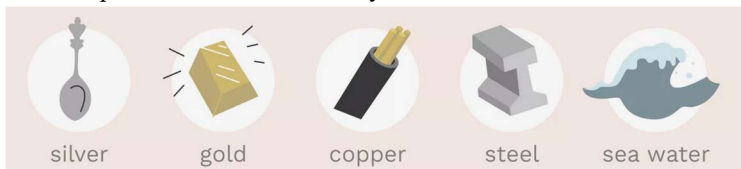


Рисунок 1.1 – Приклади провідникових матеріалів

2 – діелектрики (ізоляційні матеріали), тобто матеріали, які мають дуже низьку електропровідність, в звичайних умовах не проводять електричний струм (питомий об'ємний електричний опір діелектриків лежить в межах $\rho_v = 10^6 \dots 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) і використовуються для ізоляції провідників та захисту від протікання струму:

- газоподібні (повітря, азот, водень, елєгаз);
- рідкі (нафтові масла, синтетичні рідкі діелектрики);
- тверді (скло, кераміка, полімери, гума, слюда);



Рисунок 1.2 – Приклади діелектричних матеріалів

3 – напівпровідники, тобто матеріали, які мають електропровідність між провідниками і діелектриками. Вони можуть змінювати свої електричні властивості під впливом різних факторів, таких як температура, світло, домішки:

- кремній;
- германій;
- селен;
- миш'як;
- арсенід галію.



Клацаючи мишкою, проводячи пальцем по екрану, друкуючи на клавіатурі або кажучи в динамік ми змушуємо працювати саме напівпровідники.

Напівпровідники – це величезний список елементів, які використовуються в електронних пристроях: машинах, телефонах, ноутбуках, комп'ютерах, розумних годинниках тощо. Можна сказати, що напівпровідники – це мозок сучасної електроніки. Вони відповідають за пошук інформації, здійснення обчислень і оптимізацію електронних пристроїв, зокрема танків, безпілотників, літаків, ракет, засобів зв'язку, автомобілів тощо. Уявіть, в 2019 році обсяг ринку напівпровідників становив аж 412 млрд доларів! Світовий ринок напівпровідників у 2024 році зріс на 13,1% до рекордних \$588,36 млрд, завдяки зростаючому попиту на мікросхеми.

Окрему групу становлять **магнітні матеріали** – матеріали, що є носіями магнітного поля, або здатні підсилювати зовнішнє електромагнітне поле. Виготовляються вони як з провідникових, так і з напівпровідникових матеріалів.

В загальному ж випадку всі електротехнічні матеріали можна класифікувати за:

- **агрегатним станом** - тверді, рідкі та газоподібні. Виокремлюють матеріали, що твердішають. У вихідному стані вони є рідинами, а після застосування, у період експлуатації, є твердими речовинами: лаки, емалі, компаунди;

- **способом отримання** - природні й синтетичні;

- **хімічним складом** - органічні та неорганічні;

- **будовою молекул** - нейтральні (неполярні) й полярні.

Неполярні – такі, що складаються з атомів або молекул, у яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів збігаються (рис.1.3, а); полярні ж складаються з молекул, у яких центри розподілу позитивних і негативних зарядів не збігаються (рис. 1.3, б).



Рисунок 1.3 – Види діелектриків: а) неполярні; б) полярні

Основними елементарними частками, з яких будуються всі відомі нам речовини є протони, нейтрони і електрони. З протонів та нейтронів будуються атомні ядра, електрони заповнюють оболонки атома, компенсуючи позитивний заряд ядра. Таким

чином, **атом** – це позитивно заряджене ядро (із протонів і нейтронів), навколо якого обертаються негативно заряджені електрони. На планетарній (застарілій) моделі будови атома електрони обертаються навколо ядра по певних стаціонарних орбітах. Сучасна модель атома – це ядро, навколо якого кожен електрон начебто «розмазаний» по орбіталах – частинах простору, що оточують ядро (модель Ервіна Шредінгера).

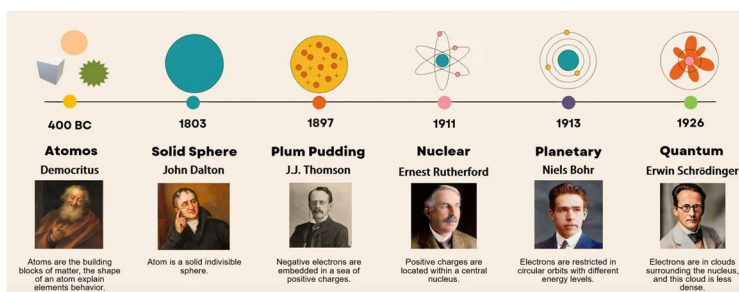


Рисунок 1.4 – Хронологія атомної теорії

Гази, рідкі і тверді тіла можуть складатися з атомів, молекул або іонів. Розміри атомів – порядку ангстрема (Å), розміри позитивних іонів, що вийшли з атомів, електронів, що позбулися частини, менше, ніж розміри атомів, а розміри негативних іонів, що приєднали додаткові електрони, більше, ніж розміри відповідних атомів. Електрони можуть залишати атом, і тоді він стає **йоном**. Якщо атом утратив один або кілька електронів – він стає **позитивним йоном**. Якщо атом приєднав один або кілька електронів – він стає **негативним йоном**. Атоми можуть об'єднуватися у мільйони різновидів молекул.

Молекула – це найменша частинка речовини, яка є носієм основних її властивостей. Усі частинки хаотично й безперервно

рухаються. Такий рух називають тепловим. Доказом безперервного хаотичного теплового руху є **дифузія** – процес взаємного проникнення молекул (атомів, йонів) однієї речовини в проміжки між молекулами (атомами, йонами) іншої речовини, унаслідок чого відбувається самовільне перемішування речовин.

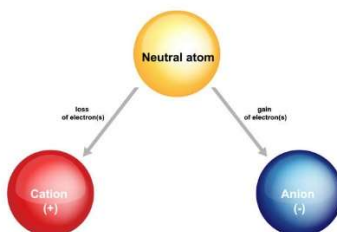


Рисунок 1.5 – Схема утворення йонів

1.2 Основні типи хімічного зв'язку

Сукупність сил, що діють між атомами, називають **хімічним зв'язком**. Унаслідок дії цих сил і утворюються молекули. Коли йдеться про хімічний зв'язок, то використовують термін «**валентність**» – ступінь здатності елемента до утворення хімічного зв'язку за рахунок так званих валентних електронів, які знаходяться на максимальній відстані від ядра й можуть вступати у взаємодію із сусідніми атомами. У різних речовин атоми містять різну кількість валентних електронів.

Якщо атом легко віддає валентні електрони – він має металеві властивості. Елементи, атоми яких приєднують електрони від інших атомів, мають неметалеві властивості. Тобто елементи належать до металів і неметалів, а їхні сполуки мають різні типи хімічного зв'язку.

1.2.1 Ковалентний зв'язок

Ковалентний зв'язок характеризується утворенням стійких електронних пар з електронів, які раніше належали до окремих атомів, що входять до складу молекули. Рухаючись, електрони найчастіше розташовуються між ядрами, де створюється «надлишок» негативного заряду, який сприяє зближенню атомів. Тому речовини, утворені молекулами з ковалентним зв'язком, надзвичайно тверді. Вони тугоплавкі й хімічно інертні, що пояснюється міцністю ковалентного зв'язку та його спрямованістю.

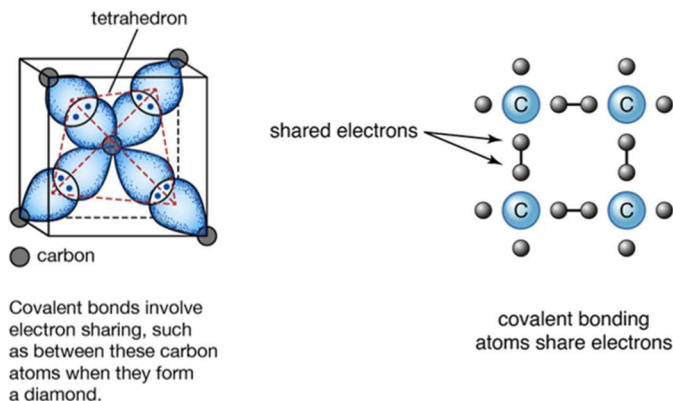


Рисунок 1.6 – Схематичне зображення молекули з ковалентним зв'язком

Ковалентний зв'язок спостерігається у твердих кристалічних речовин неорганічного походження, кристалічні ґратки яких побудовані з атомів. Прикладом такого кристала є алмаз. **Кристали** – тверді тіла, атоми і молекули яких утворюють впорядковану періодичну структуру (кристалічну ґратку). Характеризуються анізотропією фізичних властивостей. Більшість природних твердих матеріалів є полікристалами (тобто

складаються з багатьох кристалів). Одиночні кристали називають монокристаліями.

Анізотропія – неоднаковість (неоднорідність) фізичних властивостей речовини або тіла в різних напрямках.

Ізотропія – однаковість (однорідність) фізичних властивостей речовини або тіла в різних напрямках. Відповідно матеріали можуть бути або ізотропними, або анізотропними.

Основні типи кристалічних ґраток наведено на рисунку 1.7: кубічна (Body Centered Cubic Structure – BCC), гранецентрована кубічна (Face Centered Cubic Structure – FCC), гексагональна щільно упакована (Hexagonal Close Packet Structure – HCP).

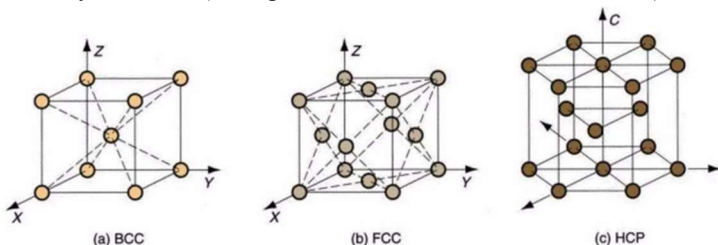


Рисунок 1.7 – Схеми кристалічних ґраток металів:

a – кубічна (Body Centered Cubic Structure – BCC),
б – гранецентрована кубічна (Face Centered Cubic Structure – FCC),
в – гексагональна щільно упакована (Hexagonal Close Packet Structure – HCP)

Кристалічні, мікро- і макроструктури матеріалів можуть мати дефекти (вакансії, дислокації, мікротріщини, тріщини, пори, включення інших матеріалів), які суттєво впливають на фізичні характеристики матеріалів, зокрема і на електричні.

Аморфна структура – стан речовини, що характеризується ізотропією фізичних властивостей, зумовленою

невпорядкованим розташуванням атомів і молекул (наприклад, скло).

Ковалентний зв'язок спостерігається в молекулах, утворених атомами металоїдів (*наприклад* в молекулі хлору (Cl_2), також в трьох агрегатних станах, між атомами, що утворюють решітку кристалів (*наприклад*: алмаз, германій, кремній), Ковалентним зв'язком утримуються не тільки однорідні ($-\text{Cl}-\text{Cl}-$), але й різні атоми (*наприклад*: $-\text{C}-\text{H}-$, $-\text{Si}-\text{C}-$) і інші.

Якщо двоатомна молекула складається з атомів одного елемента (H_2 , N_2 , Cl_2), то електронна пара однаковою мірою належить до обох атомів.

У такому разі молекулу та наявний у ній ковалентний зв'язок називають **неполярними (нейтральними)**. У неполярних молекулах центри позитивних і негативних зарядів збігаються.

Якщо ж двоатомна молекула складається з атомів різних елементів, то електронна пара може бути зміщена до одного з атомів. У таких випадках ковалентний зв'язок називають **полярним (дипольним)**.

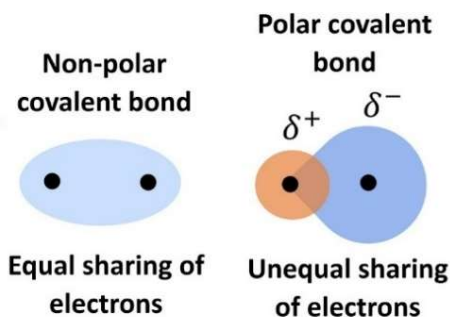


Рисунок 1.8 – Схематичне зображення полярного та неполярного ковалентного зв'язку

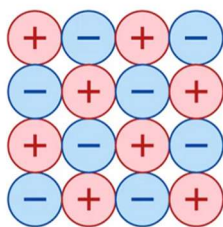
Центри позитивних і негативних зарядів у молекулах із полярним зв'язком не збігаються.

Донорно-акцепторний зв'язок є різновидом ковалентного зв'язку. Він виникає між атомами елементів, один з яких здатний віддати електрони (донор), а інший – прийняти ці електрони (акцептор).

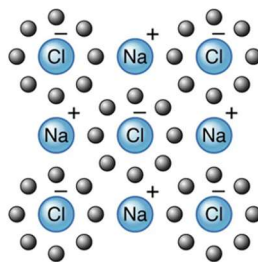
1.2.2 Іонний зв'язок

Іонний зв'язок зумовлений силами електростатичного тяжіння між позитивними та негативними іонами. Іонні сполуки утворюють елементи, що дуже відрізняються за властивостями, як-от: типові метали й типові неметали. До речовин з іонним зв'язком належать більшість солей і деякі оксиди металів: Cu_2O , ZnO , CdO , Fe_2O_3 , NiO тощо. Іонний зв'язок найхарактерніший для неорганічних діелектриків. Молекули речовин з іонним зв'язком полярні. Іонний зв'язок менш міцний, ніж ковалентний, тому іонні сполуки за механічною міцністю і хімічною стійкістю поступаються речовинам, утвореним за допомогою ковалентного зв'язку.

ionic bond



An idealized ionic
(or electrovalent) bonding
of oppositely charged ions.



ionic bonding
electron transferred from Na to Cl

Рисунок 1.9 – Схематичне зображення молекули з іонним зв'язком

Тверді тіла іонної структури характеризуються підвищеною механічною міцністю і досить високою температурою плавлення (наприклад: солі лужних металів, галоїди тощо).

1.2.3 Металічний зв'язок

Це особливий тип зв'язку, властивий лише металам. У всіх вузлах кристалічної ґратки розташовані позитивні іони металу. Між ними хаотично, подібно до молекул газу, рухаються валентні електрони, що відщепилися від атомів при утворенні іонів. Ці електрони відіграють роль «смоли», що утримує разом позитивні іони; інакше б ґратка розпалася під дією сил відштовхування між іонами. Водночас і електрони утримуються іонами в межах кристалічної ґратки й не можуть її покинути.

Металічний зв'язок зумовлений колективізацією валентних електронів, що належать не двом, а практично всім атомам у кристалі. Атоми металів здатні віддавати зовнішні електрони, перетворюючись на позитивні йони, або знову їх приєднувати, перетворюючись на нейтральні атоми. Отже, метал можна розглядати як систему, побудовану з позитивних іонів, які перебувають у середовищі вільних колективізованих електронів. Тобто металічний зв'язок визначається водночас наявністю ковалентного зв'язку між нейтральними молекулами й електростатичним тяжінням між йонами та вільними електронами, що в підсумку забезпечує монолітність і міцність металів. Завдяки наявності вільних електронів метали мають високу електро- і теплопровідність, а відсутність спрямованості металічного зв'язку пояснює високу пластичність металів.

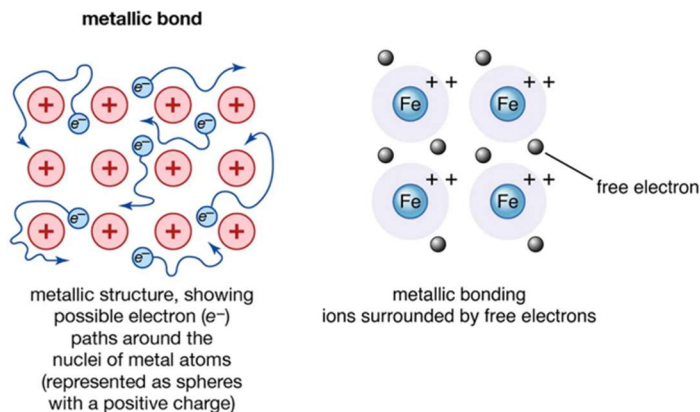


Рисунок 1.10 – Схематичне зображення молекули з металічним зв'язком

1.2.4 Молекулярний зв'язок

Даний тип зв'язку спостерігають у деяких речовинах між молекулами з ковалентним характером усередині молекулярної взаємодії (між зарядами з протилежними знаками). Таке електростатичне тяжіння називають силами Ван-дер-Ваальса. Молекулярне тяжіння в такому разі можливе при погодженому русі валентних електронів у сусідніх молекулах. Тоді сили тяжіння валентних електронів з ядром сусідньої молекули стають сильнішими за сили взаємного відштовхування електронних оболонок цих молекул. Речовини з молекулярним характером зв'язку мають низькі температури плавлення (наприклад, температура плавлення парафіну $+51\text{ }^{\circ}\text{C}$). Це свідчить про те, що зв'язки Ван-дер-Ваальса є дуже слабкими.

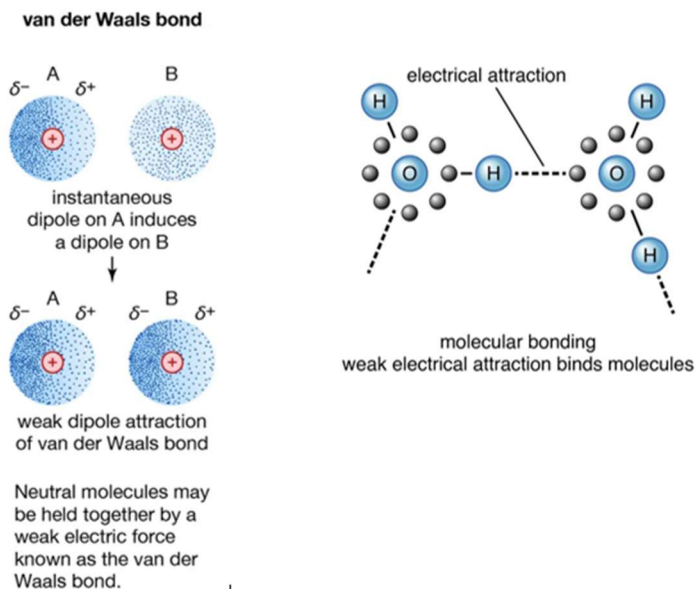


Рисунок 1.11 – Схематичне зображення молекулярного зв'язку

Молекулярний зв'язок характерний для атомів з електронними оболонками, що відносно легко деформуються, і для тих, що об'єднали в молекули атоми, здібні до деформації зовнішніх з'єднаних оболонок (наприклад, більшість полімерів, органічних речовин, парафін).

Зазначені види хімічного зв'язку можна спостерігати не тільки в різних тілах, а й у різних зонах одного тіла. Можливе, наприклад, утворення ланцюжків або шарів атомів, пов'язаних ковалентними зв'язками, і з'єднання ланцюжків або шарів молекулярними зв'язками, причому міцність тих та інших зв'язків може бути дуже різною. Тому деякі тверді тіла легко діляться на волокна, пластинки тощо.

1.3 Електропровідність діелектричних матеріалів

Особливістю електропровідності діелектриків в більшості випадків є її неелектронний характер.

Електропровідність діелектриків визначається в основному переміщенням іонів. На концентрацію іонів впливають: склад матеріалу, температура, опромінювання матеріалу частинками високих енергій. Для твердих діелектриків слід розрізняти об'ємну і поверхневу електропровідність. Для порівняльної характеристики різних матеріалів у відношенні їх об'ємної та поверхневої електропровідності користуються значенням **питомого об'ємного електроопору ρ** і **питомого поверхневого електроопору ρ_s** .

Оскільки діелектрики використовують як ізоляційні матеріали, то їхній електричний опір є діагностичним параметром стану ізоляції. Якщо під час вимірювання опору ізоляції виявляється, що він нижчий за певне нормативне значення, це свідчить про можливе пошкодження або «старіння» ізоляції та про неможливість її подальшої експлуатації.

Так для зразка простого перерізу при однорідному полі питомий об'ємний електричний опір визначиться формулою:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{h}, \quad (1.1)$$

де R – об'ємний електроопір зразка, Ом;

S – площа електроду, м²;

h – товщина зразка, м.

За нормальних умов питомий опір діелектрика має значення понад 10⁸ Ом·м. Розрізняють питомий об'ємний опір ρ_v і питомий поверхневий опір ρ_s .

1.3.1 Питомий об'ємний опір

Питомий об'ємний опір ρ_v твердого діелектрика за значенням дорівнює об'ємному опору куба матеріалу з ребром 1 м при проходженні наскрізного струму між двома протилежними гранями цього куба (рис. 1.12); одиниця виміру – Ом·м:

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h}, \quad (1.2)$$

де R_v – об'ємний опір зразка матеріалу, Ом;

S – площа електродів, що знаходяться в контакті зі зразком, м²;

h – товщина зразка, м.

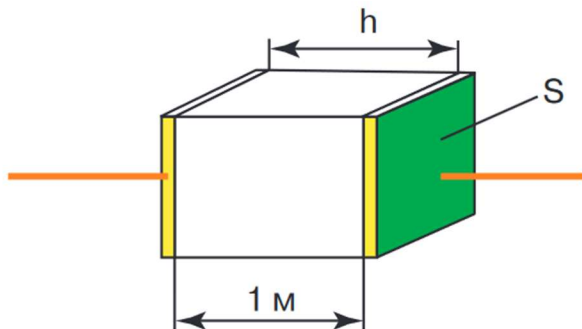


Рисунок 1.12 – Схематичне пояснення питомого об'ємного опору

1.3.2 Питомий поверхневий опір

Питомий поверхневий опір ρ_s твердого діелектрика за значенням дорівнює поверхневому опору плоскій ділянці поверхні матеріалу у формі квадрата довільного розміру при проходженні наскрізного струму між його двома протилежними сторонами (рис. 1.13); одиниця виміру – Ом:

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{l}, \quad (1.3)$$

де R_s – поверхневий опір зразка матеріалу, Ом;

d – ширина електродів, м;

l – відстань між електродами, м.

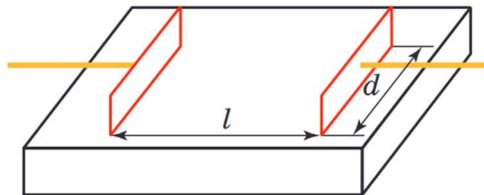


Рисунок 1.13 – Схематичне пояснення питомого поверхневого опору

Повний опір ізоляції дорівнює:

$$R_{\text{із}} = \frac{R_v \cdot R_s}{R_v + R_s}, \quad (1.4)$$

У природі немає такого матеріалу, який би так чи інакше не проводив електричний струм. Наявність у технічних діелектриках невеликої кількості вільних зарядів призводить до виникнення слабких наскрізних струмів.

Електропровідність діелектриків має дві характерні особливості. Перша особливість – струм витоку має об'ємну та поверхневу складові. Струм, який протікає через об'єм діелектрика, називають об'ємним, а той, що протікає по його поверхні, – поверхневим. Оскільки ці струми сумарні за величиною, то при визначенні електропровідності діелектриків потрібно враховувати як об'ємну, так і поверхневу складову струму витоку:

$$I_{\text{вит}} = I_s + I_v, \quad (1.5)$$

де I_s – поверхнева складова струму витоку, А;

I_v – об'ємна складова струму витоку, А.

Питома об'ємна електропровідність γ [См·м-1] визначається як:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{h}{R \cdot S} \quad (1.6)$$

Питома поверхнева електропровідність $\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}$, вимірюється в Сименсах [См].

Повна електропровідність твердого діелектрика складається з об'ємної та поверхневої.

При тривалій роботі під напругою струм через тверді і рідкі діелектрики з часом може зменшуватися або збільшуватися. Зменшення струму з часом говорить про те, що електропровідність матеріалу була обумовлена іонами сторонніх домішок і зменшувалася за рахунок електричного очищення зразка. Збільшення струму з часом говорить про участь в нім зарядів, що є структурними елементами самого матеріалу, і про те, що в ньому протікає незворотній процесі старіння під напругою, здатний поступово привести до руйнування – пробоем діелектрика.

Електропровідність діелектриків обумовлюється агрегатним станом речовини, залежить від впливу температури, вологості, зовнішнього електричного, магнітного поля чи інших видів випромінювання.

1.4 Вплив напруженості поля на електропровідність діелектриків

При порівняно невеликих значеннях напруженості поля електропровідність діелектриків слідує закону Ома. Проте при підвищенні напруженості поля електропровідність перестає слідувати закону Ома. При подальшому підвищенні напруженості поля можливі два випадки:

- у першому електропровідність швидко наростає із зростанням напруженості поля (рис.1.14 (a))

- у другому - спочатку настає насичення електропровідності, і лише потім в сильних полях спостерігається її різке зростання (рис.1.14 (б)).

Перший випадок спостерігається в забруднених діелектриках і чистих діелектриках з іонним зв'язком, в яких при збільшенні напруженості поля відбувається розмноження заряджених часток. Другий випадок типовий для не іонних діелектриків високої чистоти, в яких число заряджених часток обмежене, що і викликає насичення електропровідності. У дуже сильних полях відбувається розмноження іонів в результаті переходу до пробою.

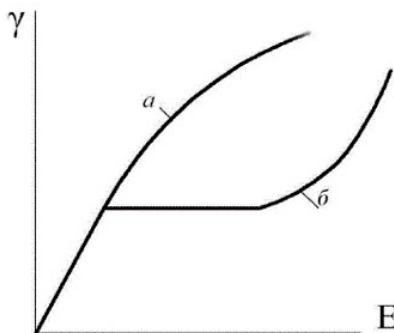


Рисунок 1.14 – Залежність електропровідності від напруженості поля для забруднених і чистих діелектриків з іонним зв'язком (а), і не іонних кристалів високої чистоти (б).

1.5 Вплив температури на електропровідність діелектриків

При підвищенні температури енергія системи підвищується на величину kT і вірогідність виходу іона з потенційної ями зростає. Тому електропровідність діелектриків при підвищенні температури росте відповідно до виразу:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\left(\frac{E_a}{\alpha T}\right)}, \quad (1.7)$$

де: γ – питома електропровідність діелектрика,

γ_0 – константа,

E_a – енергія активації виходу іона з потенційної ями,

αT – теплова енергія системи.

Залежність електропровідності від температури показана на рис.1.15.

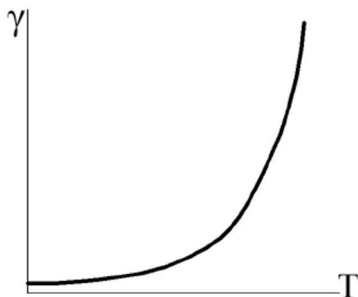


Рисунок 1.15 – Залежність електропровідності від температури

1.6 Особливості електропровідності різних газових і рідких діелектриків.

1.6.1 Електропровідність газів

Гази при невеликих значеннях напруженості електричного поля володіють виключно малою провідністю. Струм в газах може виникнути тільки за наявності в них іонів або вільних електронів. Іонізація нейтральних молекул газу виникає або під дією зовнішніх чинників, або унаслідок зіткнень заряджених частинок з молекулами.

Зовнішніми чинниками, що викликають іонізацію газу, є рентгенівські промені, ультрафіолетові промені, космічні промені, радіоактивне випромінювання, а також термічна дія

(сильний нагрів газу). Електропровідність газу, обумовлена дією зовнішніх іонізаторів, називається *несамостійною*. З іншого боку, особливо в розріджених газах, можливе створення електропровідності за рахунок іонів, що утворюються в результаті зіткнення заряджених частинок з молекулами газу. Ударна іонізація виникає в газі в тих випадках, коли кінетична енергія заряджених частинок, що набуває під дією електричного поля, досягає достатньо великих значень. Електропровідність газу, обумовлена ударною іонізацією, носить назву *самостійної*.

У слабких полях ударна іонізація відсутня і самостійній електропровідності не виявляється. При іонізації газу, обумовленій зовнішніми чинниками, відбувається розщеплювання молекул на позитивні і негативні іони. Одночасно частина позитивних іонів, з'єднуючись з негативними частинками, утворює нейтральні молекули. Цей процес, як відомо, називається **рекомбінацією**.

Наявність рекомбінації перешкоджає безмежному зростанню числа іонів в газі і пояснює встановлення певної концентрації іонів через короткий час після початку дії зовнішнього іонізатора.

На рис.1.16 показано залежність струму в повітрі від напруги зовнішнього поля. До напруження U_n виконується закон Ома. По мірі зростання прикладеної напруги іони уносяться до електродів, не встигаючи при цьому рекомбінувати, що викликає насичення струму.

Струм насичення U_n досягається для повітря в нормальних умовах при відстані між електродами в 10 мм і напруженості поля. Реальне значення щільності струму насичення в повітрі вельми мало і складає приблизно 10-15 А/м². Тому повітря можна

розглядати як вельми досконалий діелектрик до тих пір, поки не створяться умови для появи ударної іонізації.

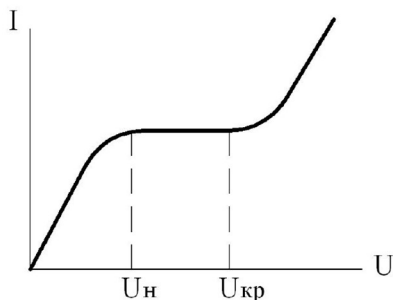


Рисунок 1.16 – Залежність струму в газі від напруги

При збільшенні напруги струм залишається постійним лише до тих пір, поки іонізація здійснюється під дією зовнішніх чинників. При виникненні ударної іонізації з'являється самостійна електропровідність (за $U_{кр}$) і струм знов починає збільшуватися із зростанням напруги.

1.6.2 Електропровідність рідин

Електропровідність рідких діелектриків тісно пов'язана з будовою молекул рідини. У неполярних рідинах електропровідність залежить від наявності дисоційованих домішок, зокрема води; у полярних рідинах електропровідність визначається не тільки домішками, але іноді і дисоціацією молекул самої рідини. Струм в рідині може бути обумовлений як пересуванням іонів, так і переміщенням щодо крупних заряджених колоїдних часток. Неможливість повного видалення здібних до дисоціації домішок з рідкого діелектрика утрудняє

отримання електроізоляційних рідин з малими значеннями питомої провідності.

Полярні рідини завжди мають підвищену провідність в порівнянні з неполярними, причому зростання діелектричної проникності приводить до зростання провідності. Сильнополярні рідини відрізняються настільки високою провідністю, що розглядаються вже не як рідкі діелектрики, а як провідники з іонною електропровідністю.

Очищення рідких діелектриків від домішок, що містяться в них, помітно підвищує їх питомий опір. При тривалому пропусканні електричного струму через нейтральний рідкий діелектрик також можна спостерігати зростання опору за рахунок перенесення вільних іонів до електродів (*електричне очищення*).

Питома електропровідність будь-якої рідини сильно залежить від температури. Із збільшенням температури зростає рухливість іонів у зв'язку із зменшенням в'язкості і може збільшуватися ступінь теплової дисоціації.

Обидва ці чинники підвищують провідність.

Питання для самоперевірки:

1. Які існують види хімічного зв'язку?
2. Що таке йон, атом, молекула?
3. Які властивості характерні для ковалентного зв'язку?
4. Які властивості характерні для металічного зв'язку?
5. У яких агрегатних станах можуть знаходитися речовини?
6. Чи впливає температура на електропровідність діелектриків? Якщо так, то як саме?

РОЗДІЛ 2. ПОЛЯРИЗАЦІЯ ДІЕЛЕКТРИКІВ

Діелектриками називаються речовини, в молекулах яких усі електрони сильно зв'язані з ядрами так, що навіть у сильних електричних полях вони ледь зміщуються відносно ядер. Через це в діелектрику є неможливим електричний струм, тобто переміщення зарядів по всьому об'єму. З цієї причини суцільна діелектрична оболонка ізолює область, яку оточує, від проникнення в неї зарядів. Тому діелектрики інакше називаються “ізоляторами”.

Основною властивістю діелектриків є здатність до поляризації під дією прикладеної напруги. За відсутності зовнішнього електричного поля всі зв'язані й вільні заряджені частинки діелектрика, а також його полярні молекули (диполі) розташовані так, що загальний електричний дипольний момент усіх мікроскопічних обсягів дорівнює або близький до нуля. Під дією прикладеного електричного поля всі зв'язані одна з одною заряджені частинки діелектрика трохи зміщуються зі своїх рівноважних положень на обмежені відстані – негативний заряд щодо позитивного. Виникає поляризація діелектрика, його результуючий дипольний момент стає відмінним від нуля.

Поляризація– це процес, коли під дією зовнішнього електричного поля відбувається обмежене переміщення зв'язаних заряджених частинок і деяке впорядкування в розташуванні диполів, що здійснюють хаотичний тепловий рух, у результаті чого в діелектрику утворюється результуючий електричний дипольний момент.

Розрізняють дві основні групи поляризації:

- пружна (або деформаційна) поляризація, яка відбувається в діелектрику під дією електричного поля

практично миттєво, без розсіювання енергії, тобто без виділення тепла;

– релаксаційна поляризація, яка наростає і зменшується уповільнено й супроводжується нагріванням діелектрика.

Група поляризації залежить насамперед від того, які частинки діелектрика, зміщуючись, викликають поляризацію, а також на які відстані частинки зміщуються. Пружно зв'язані заряди мають одне положення рівноваги, біля якого вони здійснюють тепловий рух. Під дією електричного поля вони зміщуються на невеликі відстані: електрони зміщуються в межах атома або йона, атоми – у межах молекули, йони – у межах осередку кристалічної ґратки тощо. Слабко пов'язані заряди (наприклад, йони в нещільно упакованій кристалічній ґратці, в аморфному тілі або на дефектах будови) мають кілька положень рівноваги, у яких вони розташовуються випадково під час теплового руху. Електричне поле надає таким переходам спрямованого характеру. Зсув слабо пов'язаних частинок відбувається на набагато більші відстані, ніж для пружно зв'язаних зарядів.

Зовнішнє електричне поле індукуює в частинках діелектрика елементарні електричні моменти. В утворенні індукованих полем електричних моментів можуть брати участь: електрони, що зміщуються з рівноважних станів в атомах відносно позитивно зарядженого ядра; йони, які відхиляються від рівноважного стану в кристалічній ґратці; диполі (полярні молекули або радикали), які під дією поля змінюють свою орієнтацію.

2.1 Пружні (деформаційні) типи поляризації

Існують основні види пружної поляризації – електронна, йонна, дипольна.

2.1.1 Електронна поляризація

Електронна поляризація – це пружний зсув і деформація електронних оболонок відносно ядра в атомах діелектрика.

Найпростіше процес поляризації можна пояснити за допомогою моделі конденсатора. Конденсатор складається з діелектричного матеріалу між двома провідними паралельними пластинами. Поляризація діелектрика відбувається, коли до конденсатора прикладається електричне поле.

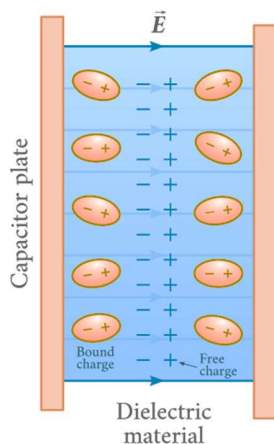


Рисунок 2.1 – Модель конденсатора для пояснення процесу поляризації

В процесі поляризації діелектрика внаслідок зміщення зв'язаних заряджених частинок діелектрика, він набуває направленої проти прикладеного поля електричного моменту

$$M = N \cdot \alpha \cdot E = N \cdot q \cdot \delta, \quad (2.1)$$

де N – число зв'язаних частинок в діелектрику,

α – поляризованість частинок речовини під дією поля напруженістю E ,

δ – відстань між центрами зміщених під дією поля зарядів протилежного знаку з абсолютною величиною q , не обов'язково кратною заряду електрона.

Електричний момент одиниці об'єму речовини:

$$P = M/V = N \cdot q \cdot \delta / S \cdot d = n \cdot q \cdot \delta \quad (2.2)$$

де n – концентрація частинок, що приймають участь у поляризації (кількість частинок в одиниці об'єму).

Якщо враховувати тільки заряд на відповідних поверхнях об'єму, то $d = \delta$, відповідно

$$P = q/S = \sigma_{\text{пд}}, \quad (2.3)$$

тобто електричний момент одиниці об'єму речовини дорівнює поверхневій густині поляризаційного заряду $\sigma_{\text{пд}}$.

Саме цей заряд визначає значення відносної діелектричної проникності ϵ_r , яка в свою чергу входить в коефіцієнт пропорційності між напруженістю електричного поля E та електричною індукцією D (яка дорівнює сумі густини заряду на електродах для вакууму $\sigma_{\text{п}}$ і поляризаційної густини заряду $\sigma_{\text{пд}}$, зумовленого поляризацією діелектрика).

В вакуумі для конденсатора з однорідним полем:

$$D_{\text{в}} = \sigma_{\text{п}} = \epsilon_0 \cdot E. \quad (2.4)$$

Якщо заповнити конденсатор діелектриком, то:

$$\begin{aligned} D = \sigma_{\text{п}} + \sigma_{\text{пд}} &= \epsilon_0 \cdot E + n \cdot \alpha \cdot E = \epsilon_0 \left(1 + \frac{n\alpha}{\epsilon_0} \right) \cdot E = \\ &= \epsilon_0 (1 + \chi) \cdot E = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot E = \epsilon_{\text{ад}} \cdot E, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала (абсолютна діелектрична проникність вакууму),

χ – діелектрична сприйнятливість, що дорівнює $\epsilon_r - 1$;

$\epsilon_{\text{ад}}$ – абсолютна діелектрична проникність діелектрика.

Таким чином, для відносної діелектричної проникності маємо $\epsilon_r = \epsilon_{ад}/\epsilon_0$ або через поляризованість $\epsilon_r = 1 + \chi$. Звідси можна побачити, що ϵ_r завжди більше 1 і тільки для вакууму $\epsilon_r = 1$.

Замінивши $\epsilon_r - 1$ на χ , можна знайти рівняння, що пов'язує відносну діелектричну проникність та електронну поляризованість:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{n\alpha}{\epsilon_0}, \quad (2.6)$$

де n – кількість молекул в одиниці об'єму.

Хоча це рівняння пов'язує діелектричну проникність з електронною поляризованістю, воно представляє лише матеріал у цілому й не враховує локальне поле або поле, яке відчуває молекула в діелектрику. Це поле відоме як поле Лоренца, яке визначається так:

$$E_{loc} = E + \frac{1}{3 \cdot \epsilon_0} P. \quad (2.7)$$

$$\text{Тобто } \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{n \cdot \alpha}{3 \epsilon_0}.$$

Це рівняння відоме, як рівняння Клаузіуса-Моссотті і є способом обміну між мікроскопічною властивістю електронної діелектричної проникності та діелектричною проникністю.

Використовуючи модель конденсатора, можна визначити відносну діелектричну проникність або діелектричну проникність матеріалу шляхом вимірювання ємності конденсатора зі зразком діелектрика і порівняння її з ємністю конденсатора без діелектрика (з вакуумом):

$$\epsilon_r = \frac{q}{q_0} = \frac{C}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}. \quad (2.8)$$

Електронна поляризація характерна для всіх діелектриків і не пов'язана з втратами енергії. Час електронної поляризації становить близько 10^{-15} с. Після зняття електричного поля електронна поляризація зникає. Оскільки поляризація

визначається пружною деформацією електронних оболонок атомів, то вона не повинна залежати від температури. Однак через розширення тіла при нагріванні електричний момент одиниці об'єму речовини зменшується, і діелектрична проникність діелектриків з електронним видом поляризації з підвищенням температури зменшується практично лінійно. Оскільки час релаксації менше 10^{-15} с, діелектрична проникність від частоти майже не залежить.

2.1.2 Іонна поляризація

Іонна поляризація – це механізм, який впливає на відносну діелектричну проникність матеріалу. Цей тип поляризації характерний для твердих діелектриків з йонною будовою та обумовлений пружним зсувом йонів на відстані, які не перевищують параметр кристалічної ґратки. Зазвичай такий тип поляризації виникає в йонних кристалічних елементах, таких як NaCl, KCl і LiBr.

За відсутності зовнішнього електричного поля всередині цих матеріалів немає сумарної поляризації, оскільки дипольні моменти негативних іонів компенсуються позитивними іонами. Однак, коли прикладається зовнішнє поле, іони зміщуються. На рисунку 2.2 показано зміщення іонів за рахунок прикладення зовнішнього електричного поля.

В цьому випадку напрям руху позитивних зарядів буде співпадати з напрямком поля, негативні ж заряди будуть спрямовані проти напрямку поля, спричиняючи утворення загального середнього дипольного моменту.

Цей ефект може бути записаний за допомогою формули:

$$P_{av} = \alpha_i \cdot E_{loc}, \quad (2.9)$$

де P_{av} – індукований середній дипольний момент пари іонів,

α_i – іонна поляризованість,

E – локальне електричне поле, яке відчуває пара іонів.

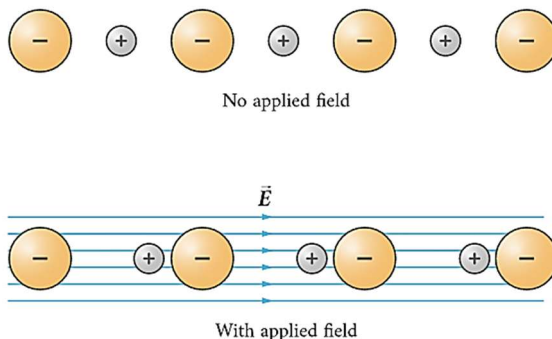


Рисунок 2.2 – Вплив зовнішнього електричного поля при іонній поляризації

Зазвичай іонна поляризованість в 10 разів більша, ніж електронна, що призводить до того, що речовини іонної структури мають високу діелектричну проникність. Подібно до електронної поляризації, іонна поляризація також пов'язана з повною поляризацією:

$$P = N_i \cdot P_{av} = n_i \cdot \alpha_i \cdot E_{loc} \quad (2.10)$$

У випадку іонної поляризації рівняння Клаузіуса-Моссотті запишеться у вигляді:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{1}{3\epsilon_0} \cdot n_i \cdot \alpha_i.$$

Ці рівняння припускає, що всередині іонного матеріалу (наприклад, NaCl) існує баланс зарядів, тоді як, у випадку дисбалансу зарядів (наприклад, у таких матеріалах, як CaF₂), необхідно використовувати інший набір рівнянь.

Час йонної поляризації становить близько 10^{-13} с. З підвищенням температури йонна поляризація підсилюється в результаті ослаблення пружних сил, що діють між йонами. Від частоти електричного поля діелектрична проникність майже не залежить, тому діелектрики з йонним видом поляризації широко застосовують при високих частотах.

2.1.3 Дипольна (орієнтаційна) поляризація

Дипольна поляризація обумовлена поворотом (орієнтацією) дипольних молекул у напрямку електричного поля й пов'язана з тепловим рухом частинок. З підвищенням температури дипольна поляризація зростає доти, доки ослаблення молекулярних сил не виявиться сильнішим, ніж зростання хаотичного теплового руху молекул. Коли хаотичний рух стає інтенсивнішим і починає переважати над орієнтацією молекул, дипольна поляризація зменшується. Ця поляризація характерна для полярних газів і рідин. Крім того, її спостерігають у твердих полярних діелектриках. Час дипольної поляризації – $10^{-2} - 10^{-8}$ с.

Щоб визначити, чи індукований середній дипольний момент вздовж електричного поля, потрібно обчислити середню потенціальну енергію диполя та порівняти її із середньою тепловою енергією 15 кТл, як визначено термодинамікою для п'яти ступенів свободи. Щоб досягти цього, силу F на рисунку 3 можна розглядати як крутний момент τ , що діє на тверде тіло дипольної молекули. Використовуючи цю модель, рівняння для крутного моменту визначається як:

$$\tau = (F \cdot \sin \theta) \alpha = E P_0 s \in (\theta), \quad (2.11)$$

де P_0 визначається як $P_0 = aQ$.

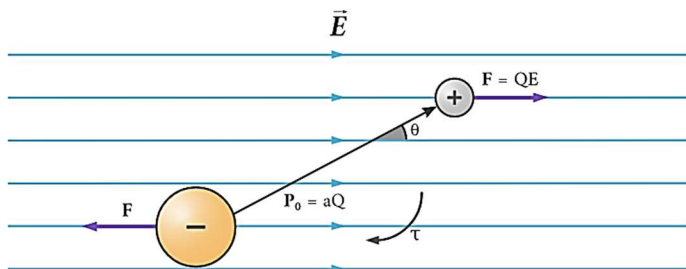


Рисунок 2.3 – Вплив електричного поля на типову дипольну молекулу: P_0 – дипольний момент, a – відстань від центру тіла молекули, F – сила, яка дорівнює заряду Q , помноженому на електричне поле E

Максимальну потенціальну енергію можна обчислити з рівняння 2.11, взявши інтеграл у момент максимального крутного моменту. Ця максимальна потенціальна енергія розраховується як $2P_0E$, що означає, що середня потенціальна енергія диполя дорівнює $12E_{\max}$ або P_0E . Знаючи середню потенціальну енергію диполя, можна обчислити середній дипольний момент P_{av} за допомогою розподілу Больцмана:

$$P_{av} = \frac{P_0^2 E}{3kT} \quad (2.12)$$

В свою чергу дипольна поляризованість α_d :

$$\alpha_d = \frac{P_0^2}{3k}. \quad (2.13)$$

Рівняння для орієнтаційної поляризованості показує, що на відміну від електронної та іонної, орієнтаційна поляризованість залежить від температури. Це важливий фактор, який слід враховувати при виборі діелектричного матеріалу для електронних і оптичних пристроїв.

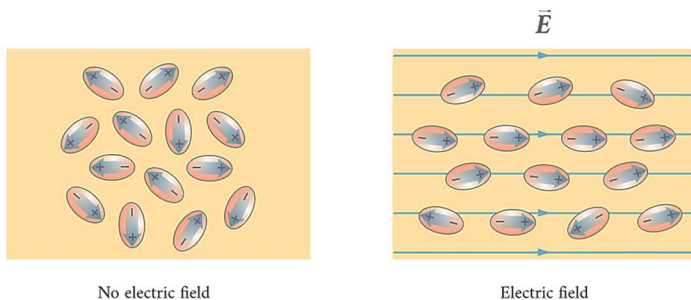


Рисунок 2.4 – Механізм виникнення дипольної поляризації під дією зовнішнього електричного поля

При дипольній поляризації діелектрична проникність матеріалу залежить від частоти. При високих частотах диполі не встигають стежити за зміною електричного поля, і діелектрична проникність зменшується. Через це полярні діелектрики не використовують на високих частотах.

2.2 Міжфазна поляризація

Поляризація міжфазного або просторового заряду виникає, коли відбувається накопичення заряду на межі розділу між двома матеріалами або між двома областями всередині матеріалу через зовнішнє поле. Це може статися, коли є складний діелектрик або коли є два електроди, з'єднані з діелектричним матеріалом. Цей тип електричної поляризації відрізняється від орієнтаційної та іонної поляризації, оскільки замість того, щоб впливати на пов'язані позитивні та негативні заряди, тобто на іонні та ковалентні зв'язані структури, міжфазна поляризація також впливає на вільні заряди. У результаті міжфазна поляризація зазвичай спостерігається в аморфних або полікристалічних твердих тілах. На рисунку 2.5 показано

приклад того, як вільні заряди можуть накопичуватися в полі, викликаючи поляризацію між фазами. Електричне поле спричинить дисбаланс зарядів через ізоляційні властивості діелектричного матеріалу. Однак мобільні заряди в діелектрику будуть мігрувати, зберігаючи нейтральність заряду. Як наслідок, це викликає поляризацію на поверхні.

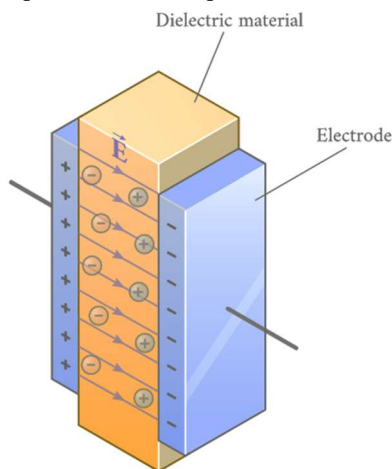


Рисунок 2.5 – Схема міграції вільних зарядів всередині діелектричного матеріалу

Рівняння, яке показує константу поляризованості просторового заряду:

$$\alpha_c = \alpha - \alpha_\infty - \alpha_0 \quad (2.14)$$

де α_c – поляризованість просторового заряду та α , α_∞ , α_0 відповідно поляризованість повної, електронної та орієнтаційної поляризацій. Важливо відзначити, що оскільки заряди є вільними, дефекти, такі як межі зерен або інші поверхні розділу, можуть служити середовищем для формування міжфазної поляризованості.

З рівняння поляризації просторового заряду визначається, що загальна величина діелектричної поляризації в матеріалі є сумою електронної, орієнтаційної та міжфазної поляризованості, або $\alpha = \alpha_c + \alpha_\infty + \alpha_0$.

2.3 Релаксаційна (непружна) поляризація

Релаксаційна поляризація – повільний вид поляризації. Для її здійснення потрібно затратити певну енергію, яка потім виділяється у вигляді тепла при поверненні діелектрика в початковий стан.

Релаксаційна поляризація виникає при зміщенні слабо пов'язаних електронів, йонів або дипольних молекул. Її поява зазвичай обумовлена дефектами кристалічної ґратки. Слабо зв'язані частинки здійснюють не тільки теплові коливання щодо деякої рівноваги в кристалічній ґратці, а й під дією теплового руху стрибком змінюють своє рівноважне становище: роблять теплові перескоки, переміщуючись на відстань атомних розмірів.

У чому ж полягає принцип поляризації? Під впливом електричного поля зв'язані електричні заряди діелектрика зміщуються в напрямку сил, які більше діють на них, якщо вища напруженість поля. Дипольні моменти створюють своє електричне поле, яке протидіє тому полю, що зумовило їхню появу. Як наслідок, сумарне електричне поле зменшується.

Явище поляризації характеризують за значенням діелектричної проникності. **Діелектричною проникністю** ϵ називають параметр матеріалу, що характеризує його здатність утворювати ємність і показує, у скільки разів збільшується ємність конденсатора, коли між його пластинами внесено певний діелектричний матеріал порівняно з вакуумом:

$$C = \epsilon \cdot C_0 \quad (2.15)$$

де C_0 – ємність вакуумного конденсатора.

Ємність конденсатора залежить і від його геометричних розмірів, і від властивостей матеріалу діелектрика:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{h}, \quad (2.16)$$

де S – площа обкладок конденсатора, м²;

h – товщина діелектрика, м;

ϵ_0 – електрична стала, $\epsilon_0 = 8,85416 \times 10^{12}$, Ф/м;

ϵ – діелектрична проникність матеріалу, величина безмірна.

Таблиця 2.1 – Значення діелектричних сталих деяких матеріалів за кімнатної температури

Вакуум (за визначенням)	1	Огрескло	3,5
Водень	1,0003	Шелак	3,5
Повітря	1,0005	Кварц плавлений	3,75
Гас	2,1	Фарфор	4–8,5
Парафін	2–2,3	Гума	7
Каучук	2,4	Метиловий спирт	30
Трансформаторне масло	2,5	Гліцерин	39
Бурштин	2,8	Вода	81
Папір	2,5–3	Титанат барію	1200

Добуток ($\epsilon_0 \times \epsilon$) називають **абсолютною діелектричною проникністю** $\epsilon_{\text{абс}}$. Її визначено для всіх діелектриків і занесено до таблиць. Наприклад, для чистої води $\epsilon = 81$, для електрофарфору $\epsilon = 8,5$, для трансформаторного масла $\epsilon = 2,5$.

Значення ϵ різних діелектриків по-різному залежить від температури матеріалу (рис. 2.6; рис. 2.7) і від частоти прикладеної напруги.

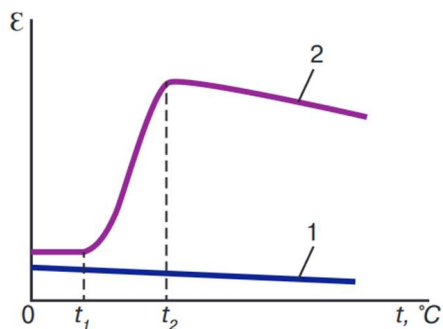


Рисунок 2.6 – Залежність діелектричної проникності ϵ від температури діелектрика: 1 – неполярний діелектрик; 2 – полярний діелектрик

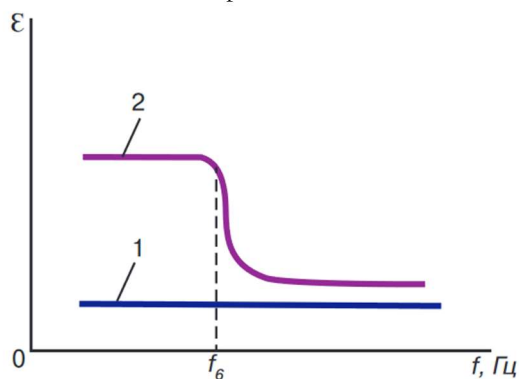


Рисунок 2.7 – Залежність діелектричної проникності ϵ від частоти напруги: 1 – неполярний діелектрик; 2 – полярний діелектрик

До основних електричних властивостей діелектриків, крім поляризації, належать електричний опір, електропровідність, діелектричні втрати, пробій, електрична міцність.

2.4 Особливості поляризації активних діелектриків

Активними називаються діелектрики, властивостями яких можна керувати за допомогою зовнішніх енергетичних впливів – температури, тиску, напруженості електричного поля і так далі. Такі діелектрики використовуються в різноманітних датчиках, перетворювачах, генераторах, модуляторах та інших активних елементах.

Властивості активних діелектриків мають тверді, рідкі, газообразні речовини. За будовою і властивостями їх можна поділити на полярні та неполярні, кристалічні і аморфні діелектрики.

До числа активних діелектриків відносять сегнето-, пьезо- і піроелектрики, електрети, матеріали квантової електроніки, рідкі кристали, електро-, магніто- і акустооптичні матеріали, діелектричні кристали з нелінійними оптичними властивостями тощо. Більш детально процеси в активних діелектриках буде розглянуто в Розділі 12.

Питання для самоперевірки:

1. Що таке поляризація?
2. Чим характеризується явище поляризації?
3. Назвіть основні види пружної поляризації?
4. Поясніть процес поляризації за допомогою моделі конденсатора.
5. Чи залежить (і якщо залежить, то як) діелектрична проникність від частоти і температури?
6. Чим обумовлена дипольна поляризація?
7. В чому проявляються особливості активних діелектриків?

РОЗДІЛ 3. ВТРАТИ В ДІЕЛЕКТРИКАХ

Під дією електричного поля в діелектрику розвиваються два основні процеси: поляризація і крізна електропровідність. Розвиток цих процесів може привести до розсіяння енергії електричного поля в діелектрику у вигляді тепла. Так, під дією електричного поля вільні носії заряду набирають кінетичну енергію і, стикаючись з молекулами речовини, передають їм цю енергію. Таким чином, енергія електричного поля трансформується в теплову енергію матеріалу. Крім того, у разі, коли структурні одиниці речовини (молекули) полярні, зовнішнє електричне поле здійснює роботу по повороту диполів по полю, і як наслідок, енергія поля знов розсівається в матеріалі.

3.1 Кут діелектричних втрат

Діелектричні втрати – це енергія, яка розсіюється в матеріалі під впливом електричних полів. Через цю енергію матеріал нагрівається, через що може статися його теплове руйнування та інші несприятливі наслідки, як-от: передчасне старіння, руйнування і розплавлення. Втрати в діелектриках спостерігають як під час змінної напруги, так і за постійної, оскільки в матеріалі є наскрізний струм, зумовлений провідністю. Що вище частота та значення напруги, то більші втрати. Вони також зростають зі збільшенням ємності й залежать від матеріалу діелектрика. При розгляді діелектричних втрат зазвичай мають на увазі втрати із змінною напругою, тому що вони в багато разів більші, ніж із постійною.

При постійній напрузі, коли немає періодичної поляризації, якість матеріалу характеризується значеннями питомих об'ємного і поверхневого електроопорів. При змінній

напрузі необхідно використовувати іншу характеристику якості матеріалу, оскільки в цьому випадку, окрім крізової електропровідності, виникає ряд додаткових причин, що викликають втрати енергії в діелектрику.

Діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі можна характеризувати розсіяною потужністю, віднесеною до одиниці об'єму, або **питомими втратами**. Неприпустимо великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають

Природа діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах різна в залежності від агрегатного стану речовини. Діелектричні втрати можуть обумовлюватися наскрізним струмом або активними складовими поляризаційних струмів. При вивченні діелектричних втрат, безпосередньо пов'язаних з поляризацією діелектрика, можна показати це явище у вигляді кривих, що являють собою залежність електричного заряду на обкладках конденсатора з діелектриком від прикладеної до нього напруги (рис. 3.1).

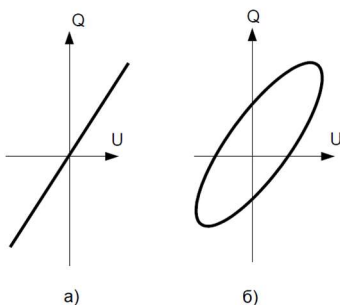


Рисунок 3.1 – Залежність заряду від напруги для лінійного діелектрика без втрат (а), з втратами (б)

При відсутності втрат, які були викликані явищем поляризації, заряд лінійно залежить від напруги (рис. 3.1, а), і

такий діелектрик називається **лінійним**. Якщо в лінійному діелектрику має місце уповільнена поляризація, пов'язана з втратами енергії, то крива залежності заряду від напруги має вигляд еліпса (рис. 3.1, б). Площа цього еліпса пропорційна кількості енергії, що поглинається діелектриком за один період зміни напруги. У випадку **нелінійного** діелектрика – сегнетоелектрика – крива залежності заряду від напруги має вигляд петлі такого ж характеру, як петля гістерезиса в магнітних матеріалах; в цьому випадку площа петлі пропорційна втратам енергії за один період.

В електротехнічних матеріалах окрім втрат від наскрізної електропровідності і втрат від уповільненої поляризації, виникають діелектричні втрати, які сильно впливають на електричні властивості діелектриків. Ці втрати проявляються наявністю ізольованих один від одного сторонніх провідних або напівпровідних включень вуглецю, оксидів заліза тощо. При високих напругах втрати в діелектрику виникають внаслідок іонізації газових включень всередині діелектрика, що особливо інтенсивно відбувається при високих частотах.

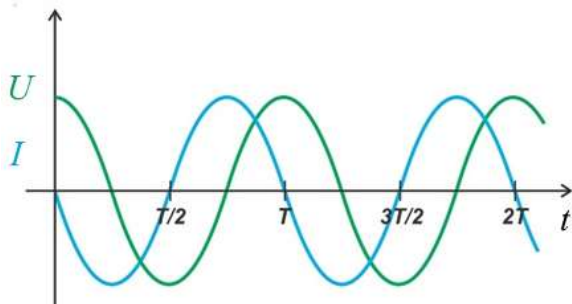


Рисунок 3.2 – Фазове співвідношення між формами сигналів напруги та струму в ідеальному конденсаторі

Кутом діелектричних втрат називається кут, доповнюючий до 90° кут зміщення фаз φ між струмом і напругою в ємнісному ланцюзі. У випадку ідеального діелектрика вектор струму в такому ланцюзі випереджатиме вектор напруги на 90° , при цьому кут δ буде рівний нулю. Чим більше потужність розсіювання, тим менше кут зміщення фаз φ і тим більше кут діелектричних втрат δ і його функція $\operatorname{tg} \delta$. У ідеальному діелектрику зміщення фаз між напругою U і реактивною складовою струму I_p дорівнює 90 градусам. У реальному діелектрику з'являється активна складова струму I_a .

Розглянемо схему, еквівалентну конденсатору з діелектриком, що має втрати в ланцюзі змінної напруги. Ця схема повинна бути вибрана так, щоб активна потужність, що витрачається в даній схемі, була еквівалентна потужності, що розсіюється в діелектрику конденсатора, а струм випереджав напругу на той же кут, що й у конденсаторі (рис.3.2).

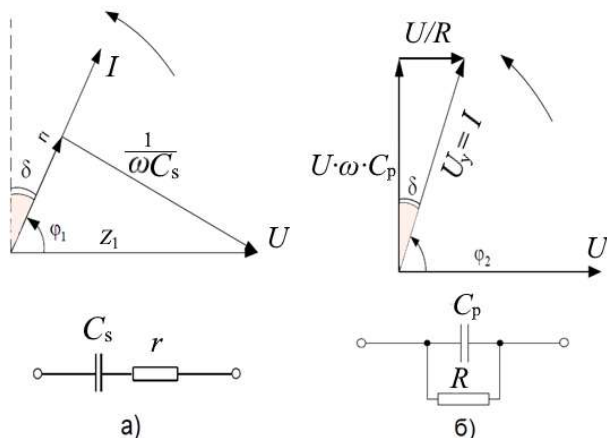


Рисунок 3.3 – Векторні діаграми та еквівалентні схеми діелектрика з втратами: а – послідовна, б – паралельна

Поставлена задача може бути вирішена заміною конденсатора з втратами ідеальним конденсатором з послідовно включеним активним опором (рис. 3.3, а) або ідеальним конденсатором, який включено паралельно з активним опором (рис. 3.3, б). Такі еквівалентні схеми, звичайно, не дають пояснення механізму діелектричних втрат у реальних діелектриках і введені умовно.

Послідовна і паралельна схеми еквівалентні одна одній, якщо при рівності повних опорів $z_1 = z_2 = z$ будуть рівні їх активні та реактивні складові. Ця умова буде дотримана, якщо кути зсуву струму щодо напруги рівні, а значення активної потужності однакові.

Відповідно до теорії змінних струмів активна потужність визначається як:

$$P_a = UI \cos \varphi. \quad (3.1)$$

Виразимо потужності для послідовної і паралельної схем через ємності C_s і C_p та кут δ .

Для послідовної схеми, використовуючи вираз (3.1) і відповідну векторну діаграму, маємо:

$$P_a = \frac{U}{z} \cdot \frac{U \cdot r}{z} = \frac{U^2 \cdot r}{x^2 + r^2} = \frac{U^2 \cdot r}{x^2 \left(1 + \frac{r^2}{x^2}\right)} = \frac{U^2 \cdot \omega C_s \cdot \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad (3.2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_s \cdot r. \quad (3.3)$$

Для паралельної схеми:

$$P_a = U^2 \cdot g = U^2 \cdot b \cdot \operatorname{tg} \delta = U^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot \operatorname{tg} \delta; \quad (3.4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot r}. \quad (3.5)$$

Прирівнюючи вирази (3.2) і (3.4), а також (3.3) і (3.5), знаходимо співвідношення між C_p і C_s а також між r і R :

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad (3.6)$$

$$R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right). \quad (3.7)$$

Для високоякісних діелектриків значенням $\operatorname{tg}^2 \delta$ можна нехтувати значенням у порівнянні з одиницею у формулі (3.6) і вважати $C_p \approx C_s \approx C$.

В цьому випадку вираз для потужності, що розсіюється в діелектрику, буде однаковим для обох схем:

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta;$$

де P_a – активна потужність, Вт;

U – напруга, В;

ω – кутова частота;

C – ємність, Ф.

Опір R у паралельній схемі, як впливає з виразів (3.3-3.7), у багато разів більше опору r .

Знаючи величину напруги U , кругову частоту ω і ємність конденсатора C , можна визначити реактивну складову струму:

$$I_p = U \cdot \omega \cdot C. \quad (3.8)$$

Тоді активні складова струму визначиться формулою:

$$I_a = I_p \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (3.9)$$

Величина напруги і кругова частота не залежать від матеріалу діелектрика, а ємність конденсатора і тангенс кута втрат визначаються матеріалом діелектрика. Оскільки ємність залежить від діелектричної проникності діелектрика і геометрії конденсатора (площі обкладок і відстані між обкладками), то розсіювана в матеріалі потужність електричного поля буде пропорційна добутку діелектричної проникності на тангенс кута втрат. Цю величину називають **коефіцієнтом діелектричних втрат**.

При дослідженні властивостей матеріалів за допомогою вимірювальних мостів є можливість визначення ємності, прикладеної напруги і кругової частоти. Отже, вимірювальні мости можуть автоматично визначати активну складову струму і повний струм, інакше кажучи, відбувається автоматичне вимірювання тангенса кута втрат. Таким чином, $\tan \delta$ можна використовувати, як міру втрат енергії поля в діелектрику.

Неприпустимо великі діелектричні втрати в електроізоляційному матеріалі викликають сильний нагрів виготовленого з нього виробу і можуть привести до його теплового руйнування. Навіть якщо напруга, прикладена до діелектрика, недостатньо велика для того, щоб за рахунок діелектричних втрат міг відбутися неприпустимий перегрів, то і в цьому випадку великі діелектричні втрати можуть принести істотну шкоду.

3.2 Види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах

Діелектричні втрати за їхніми особливостями і фізичній природі можна поділити на чотири основні види:

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

Діелектричні втрати, обумовлені поляризацією, особливо виразно спостерігаються в речовинах, що володіють релаксаційною поляризацією: у діелектриках дипольної структури і в діелектриках іонної структури з нещільною упаковкою іонів. Релаксаційні діелектричні втрати викликаються

порушенням теплового руху частинок під впливом сил електричного поля. Це порушення приводить до розсіювання енергії і нагріву діелектрика.

Діелектричні втрати в сегнетоелектриках пов'язані з явищем спонтанної поляризації. Втрати в сегнетоелектриках є значними при температурі, нижчій точки Кюрі, а при температурі вище за точку Кюрі втрати в сегнетоелектриках зменшуються.

У температурній залежності тангенса кута релаксаційних діелектричних втрат спостерігається максимум при деякій температурі, характерній для даної речовини (рисунок 3.4). При цій температурі час релаксації частинок діелектрика приблизно співпадає з періодом зміни прикладеного змінного електричного поля.

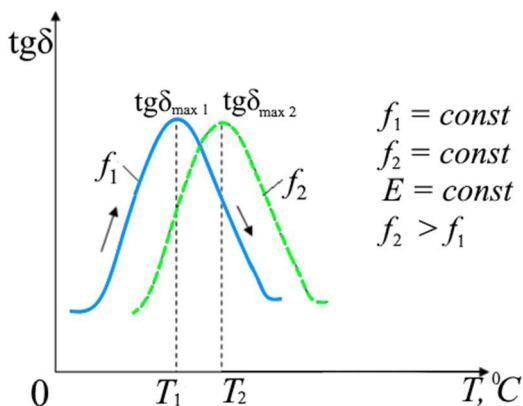


Рисунок 3.4 – Залежність тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ від температури для діелектриків з релаксаційною поляризацією

Якщо температура така, що час релаксації частинок значно більше напівперіоду зміни прикладеної змінної напруги, то тепловий рух частинок буде менш інтенсивним, і втрати

зменшаться; якщо температура така, що час релаксації частинок значно менше напівперіоду зміни напруги, то інтенсивність теплового руху буде більша, зв'язок між частинками зменшиться, внаслідок чого втрати також знизяться.

До діелектричних втрат, обумовлених поляризацією, слід віднести також так звані **резонансні втрати**, що виявляються в діелектриках при світлових частотах. Цей вид втрат з особливою чіткістю спостерігається в деяких газах при строго певній частоті і виражається в інтенсивному поглинанні енергії електричного поля.

Положення максимуму $\operatorname{tg}\delta$ визначається з умови $\tau_0 = \frac{1}{2f}$, де τ_0 – час релаксації, власний параметр діелектрика. Чим більша температура нагрівання діелектрика, тим менший час релаксації τ_0 . Наявність максимуму у температурній залежності $\operatorname{tg}\delta$ можна пояснити на прикладі рідини з дипольно-релаксаційною поляризацією. При малих температурах в'язкість рідини висока і молекули не встигають слідувати за зміною електричного поля, отже $\operatorname{tg}\delta$ незначний. При великих температурах в'язкість рідини низька і орієнтація молекул відбувається практично без тертя, а значить $\operatorname{tg}\delta$ також незначний. При середній в'язкості $\operatorname{tg}\delta$ набуває максимального значення відповідно до умови: $\tau_0 = \frac{1}{2f}$.

При підвищенні частоти діючого електричного поля максимум $\operatorname{tg}\delta$ зміщується в область вищої температури. Це пояснюється тим, що більше значення частоти вимагає меншого значення часу релаксації, необхідного для отримання максимуму $\operatorname{tg}\delta$, а для зменшення τ_0 необхідне зниження в'язкості рідини, тобто підвищення температури.

У частотній залежності спостерігається максимум $\operatorname{tg}\delta$ при певній фіксованій частоті (рисунок 3.5).

Діелектричні втрати зі збільшенням частоти зростають доти, доки диполі встигають слідувати зміною електричного поля. Коли частота стає настільки великою, що дипольні молекули не встигають слідувати за зміною поля, $\text{tg}\delta$ зменшується, а діелектричні втрати P_a залишаються постійними відповідно до формули $P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta$. Зі збільшенням температури від T_1 до T_2 максимум $\text{tg}\delta$ зміщується в область більш високих частот відповідно до умови наявності максимуму частотної залежності $\text{tg}\delta$, тобто $\tau_0 = \frac{1}{2f}$.

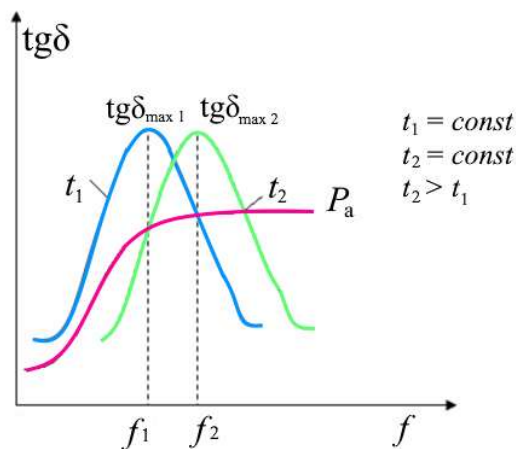


Рисунок 3.5 – Залежність тангенса кута діелектричних втрат від частоти f для діелектриків з релаксаційною поляризацією

Резонансні втрати можливі і в твердих речовинах, якщо частота вимушених коливань, що викликаються електричним полем, співпадає з частотою власних коливань частинок твердої речовини. Наявність максимуму в частотній залежності $\text{tg}\delta$ характерна також і для резонансного механізму втрат, проте в

даному випадку, температура на положення максимуму не впливає.

Діелектричні втрати, обумовлені наскрізною електропровідністю, виявляються в діелектриках, що мають помітну об'ємну або поверхневу електропровідність.

Діелектричні втрати цього виду не залежать від частоти поля; $\text{tg}\delta$ зменшується з частотою за гіперболічним законом (рисунок 3.6).

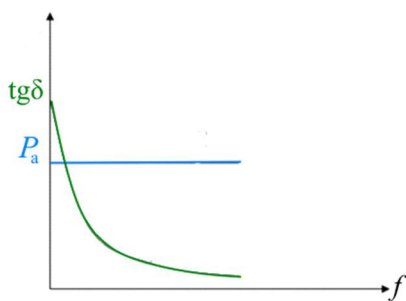


Рисунок 3.6 – Залежності активної потужності P_a і тангенса кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta$ від частоти зміни електричного поля

Діелектричні втрати, обумовлені електропровідністю, зростають з температурою за експоненціальним законом:

$$P_T = A \cdot e^{-\frac{b}{t}}, \quad (3.10)$$

де A, b – постійні матеріалу.

Наближений вираз:

$$P_T = P_0 \cdot e^{\alpha t}, \quad (3.11)$$

де P_T – втрати при певній температурі $t, ^\circ\text{C}$;

P_0 – втрати при температурі $t = 0 ^\circ\text{C}$;

α – постійна матеріалу;

t – температура нагріву діелектрика.

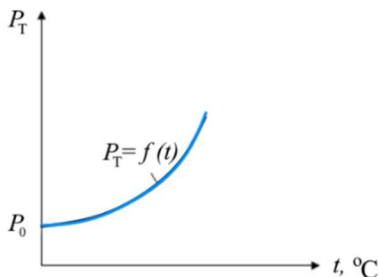


Рисунок 3.7 – Залежність активної потужності від температури

Іонізаційні діелектричні втрати властиві діелектрикам в газоподібному стані. Іонізаційні втрати виявляються в неоднорідних електричних полях при напрузі, що перевищує значення, відповідне початку іонізації даного газу. Із збільшенням тиску газу величина напруги початку іонізації зростає.

Іонізаційні втрати обчислюються за формулою:

$$P_i = A_1 \cdot f(U - U_0)^3, \quad (3.12)$$

де A_1 – постійний коефіцієнт;

f – частота електричного поля;

U – прикладена напруга;

U_0 – напруга, що відповідає початку іонізації.

Формула справедлива при $U > U_0$ і лінійній залежності $\text{tg} \delta$ від E . Напруга U_0 залежить від тиску, оскільки розвиток ударної іонізації молекул залежить від довжини вільного пробігу носіїв зарядів. Зі збільшенням тиску газу величина напруги початку іонізації зростає.

Діелектричні втрати, обумовлені неоднорідністю структури, спостерігаються в шаруватих діелектриках з просоченого паперу і тканини, в пластмасах з наповнювачем, в

пористій кераміці, в похідних слюди, міканітах, мікалексі тощо. Оскільки структура неоднорідних діелектриків і їх компонентів досить різна, то не існує загальної формули для розрахунку діелектричних втрат у цьому випадку.

3.3 Особливості діелектричних втрат в рідких, газових і твердих діелектриках

3.3.1 Діелектричні втрати в газах

Діелектричні втрати в газах при напруженості поля, нижчих за значення, необхідних для розвитку ударної іонізації молекул газу, дуже малі. В цьому випадку газ можна практично розглядати як ідеальний діелектрик.

Джерелом діелектричних втрат газу може бути в основному тільки електропровідність, оскільки орієнтація дипольних молекул газів при їх поляризації не супроводжується діелектричними втратами.

Як відомо, всі гази відрізняються вельми малою електропровідністю, і кут діелектричних втрат у зв'язку з цим буде малий, особливо при високих частотах. Питомий об'ємний опір газів $\gamma \sim 10^{16}$ Ом·м, $\epsilon \approx 1$, $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-8}$ при $f = 50$ Гц (у відсутності іонізації).

При високій напрузі і неоднорідному полі, коли напруженість в окремих місцях перевершить деяке критичне значення, молекули газу іонізуються, внаслідок чого, в газі виникають втрати на іонізацію. Ці втрати мають місце, як правило, в неоднорідних електричних полях, коли величина прикладеної напруги перевищує значення напруги іонізації.

При високих частотах іонізація і втрати в газах зростають настільки, що явище може призвести до розігрівання і руйнування виробів з газовою ізоляцією. Для пояснення

наведених відомостей розглянемо залежність $I(U)$ для газоподібних діелектриків з точки зору діелектричних втрат (рисунок 3.8).

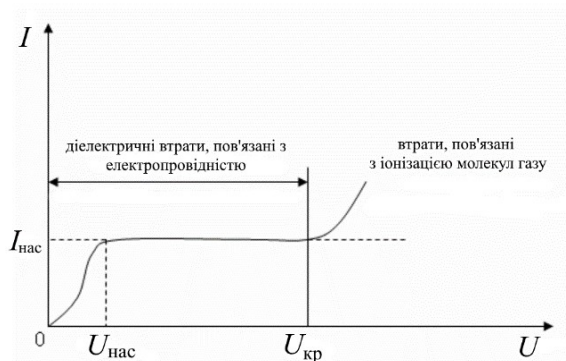


Рисунок 3.8 – Зміна виду діелектричних втрат у газоподібних діелектриках залежно від величини прикладеної напруги

Виникнення іонізації газу, що заповнює закриті пори в твердій ізоляції, нерідко приводить до такого ж руйнування. Іонізація повітря супроводжується утворенням озону і оксидів азоту, що викликає хімічне розкладання органічної ізоляції, що містить газові включення. Для виключення втрат у газах доцільно вибирати рівень робочої напруги, що не перевищує рівень критичної напруги або рекомендувати використання газоподібних діелектриків під надлишковим тиском.

3.3.2 Діелектричні втрати в рідких діелектриках

У неполярних рідинах діелектричні втрати обумовлені тільки електропровідністю, якщо рідина не містить домішок з дипольними молекулами. Питома провідність нейтральних чистих рідин надзвичайно мала, завдяки чому малі і діелектричні

втрати. Прикладом може служити ретельно очищене від домішок конденсаторне масло, $\text{tg}\delta$ якого дуже малий.

Полярні рідини залежно від умов (температура, частота) можуть володіти помітними втратами, пов'язаними з дипольно-релаксаційною поляризацією, крім втрат, обумовлених електропровідністю.

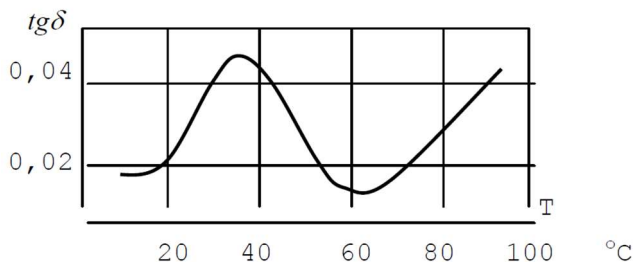


Рисунок 3.9 – Залежність тангенса кута діелектричних втрат від температури для полярних діелектриків

Вживані в техніці рідкі діелектрики часто є сумішами неполярних і полярних речовин (наприклад, масляно-каніфольні компаунди) або є полярними рідинами (совол).

У рідких діелектриків з полярними молекулами помітно виявляється залежність діелектричних втрат від в'язкості. Питома провідність таких рідин при кімнатній температурі 10^{-10} – $10^{-11}\text{См}\cdot\text{м}^{-1}$. Діелектричні втрати, спостережувані в полярних в'язких рідинах при змінній напрузі, значно перевершують втрати, обумовлені електропровідністю. Такі втрати називають **дипольно-релаксаційними втратами**. Дипольні молекули, слідуючи за зміною електричного поля, повертаються у в'язкому середовищі і викликають втрати електричної енергії на тертя з виділенням тепла. Якщо в'язкість рідини достатньо велика, молекули не встигають слідувати за зміною поля і дипольна

поляризація практично зникає; діелектричні втрати при цьому будуть малі. Дипольні втрати будуть також малі, якщо в'язкість рідини мала і орієнтація молекул відбувається без тертя. При середній в'язкості дипольні втрати можуть бути істотні і при деякому значенні в'язкості мають максимум.

При підвищенні частоти максимум $\text{tg}\delta$ зміщується в область вищої температури: велика частота вимагає меншого часу релаксації, необхідного для отримання максимуму кута втрат, а для зменшення часу релаксації, необхідне зниження в'язкості, тобто підвищення температури. Найменші значення $\text{tg}\delta$ відповідають температурам, при яких в'язкість рідини стає настільки малою, що орієнтація диполів відбувається практично без тертя. Втрати в цьому випадку малі.

3.3.3 Діелектричні втрати в твердих діелектриках

Діелектричні втрати в твердих діелектриках необхідно розглядати у зв'язку з їх структурою. Тверді речовини володіють різноманітним складом і будовою; у них можливі всі види діелектричних втрат.

Для зручності розгляду діелектричних втрат в твердих речовинах останні можна підрозділити на чотири групи:

- діелектрики молекулярної структури,
- іонної структури,
- сегнетоелектрики,
- діелектрики неоднорідної структури.

3.3.3.1 Діелектричні втрати в діелектриках молекулярної структури залежать від виду молекул.

У разі неполярних молекул, в речовинах, що не мають домішок, діелектричні втрати нікчемно малі. До таких

діелектриків відносяться сірка, парафін, неполярні полімери – поліетилен, політетрафторетилен, полістирол і ін. Вказані речовини в зв'язку з їх малими втратами знаходять застосування як височастотні діелектрики.

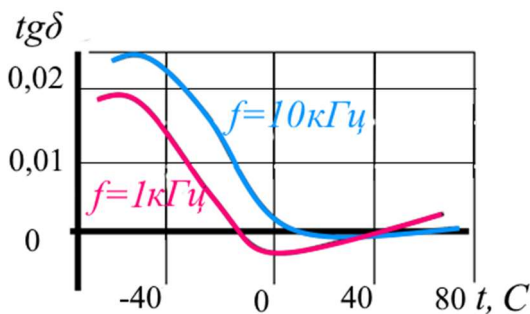


Рисунок 3.10 – Залежність тангенса кута діелектричних втрат від температури для паперу

Діелектрики молекулярної структури з полярними молекулами є головним чином органічними речовинами, широко використовуваними в техніці. До них належать матеріали на основі целюлози (папір, картон), полярні полімери: поліметилметакрилат (органічне скло), поліаміди (капрон) і поліуретани, каучукові матеріали (ебоніт), фенолформальдегідні смоли (бакеліт), ефіри целюлози (ацетилцелюлоза) тощо. Всі вони через властиву їм дипольно-релаксаційну поляризацію володіють великими втратами. Втрати в цих діелектриках істотно залежать від температури; при деяких температурах виявляються максимум і мінімум втрат; зростання втрат після мінімуму пояснюється збільшенням втрат наскрізної електропровідності.

3.3.3.2 Діелектричні втрати в твердих речовин іонної структури пов'язані з особливостями упаковки іонів в ґратках.

У речовинах кристалічної структури з щільною упаковкою іонів при відсутності домішок, що спотворюють ґрати, діелектричні втрати вельми малі. При підвищених температурах в таких речовинах з'являються втрати від кризової електропровідності. До речовин цього типу відносяться численні кристалічні неорганічні з'єднання, що мають велике значення в сучасному виробництві електротехнічної кераміки, наприклад корунд (Al_2O_3), що входить до складу ультрафарфору. Прикладом з'єднань такого роду є також кам'яна сіль. До діелектриків кристалічної структури з нещільною упаковкою іонів відноситься ряд кристалічних речовин, що характеризуються релаксаційною поляризацією, що викликає підвищені діелектричні втрати. До цих речовин відносяться: муліт, вхідний в склад ізоляторного фарфору, кордієрит.

Діелектричні втрати в аморфних речовинах іонної структури (неорганічному склі) пов'язані з явищем поляризації і наявністю електропровідності.

3.3.3.3 Діелектричні втрати в твердих речовинах неоднорідної структури. До твердих речовин цього типу, використовуваних як діелектрики, належать матеріали, до складу яких входить не менше двох компонентів, механічно змішаних один з одним. До неоднорідних діелектриків відноситься раніше всього кераміка. Будь-який керамічний матеріал є складною багатофазною системою. У складі кераміки розрізняють кристалічну фазу, склоподібну і газову (гази в закритих порах). Діелектричні втрати в кераміці залежать від характеру кристалічної і склоподібної фаз і кількісного співвідношення між ними. Газова фаза в кераміці викликає підвищення діелектричних втрат при високих напруженостях поля унаслідок розвитку іонізації.

Для більш детального розгляду випадку виникнення іонізаційних втрат введемо фізичну модель (рисунок 3.11):

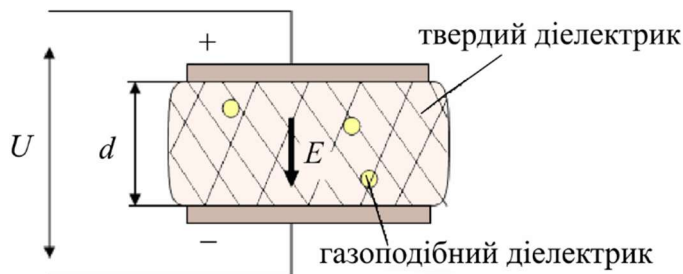


Рисунок 3.11 – Фізична модель для визначення іонізаційних втрат у твердих діелектриках, що містять газоподібні включення

Враховуючи безперервність силових ліній електричного поля можна стверджувати, що електрична індукція D у всіх точках простору між електродами залишається постійною величиною, відповідно до формули 3.13:

$$D = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E = \text{const}, \quad (3.13)$$

де ε_r – відносна діелектрична проникність матеріалу;

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична постійна (або діелектрична проникність вакууму);

E – напруженість електричного поля.

Звідси випливає, що:

$$\varepsilon_{r_{\text{газ}}} \cdot E_{\text{газ}} = \varepsilon_{r_{\text{ТВ}}} \cdot E_{\text{ТВ}} \rightarrow \frac{\varepsilon_{r_{\text{ТВ}}}}{\varepsilon_{r_{\text{газ}}}} = \frac{E_{\text{газ}}}{E_{\text{ТВ}}} \rightarrow E_{\text{газ}} = \frac{E_{\text{ТВ}} \cdot \varepsilon_{r_{\text{ТВ}}}}{\varepsilon_{r_{\text{газ}}}}.$$

На підставі наведеного співвідношення можна стверджувати наступне: у скільки разів діелектрична проникність твердого діелектрика $\varepsilon_{r_{\text{ТВ}}}$ буде більшою за діелектричну проникність газоподібного включення $\varepsilon_{r_{\text{газ}}}$, у

стільки ж разів буде більша напруженість електричного поля в газоподібному включенні $E_{\text{газ}}$ по відношенню до напруженості поля в твердому діелектриці $E_{\text{ТВ}}$. Внаслідок цього в реальних умовах може виявитися, що при деякому робочому напрузі починається іонізація в газових включеннях, якщо напруженість поля досягне критичного значення. Це характеризується залежністю $\text{tg}\delta = f(U)$, що називається **кривою іонізації** (рис. 3.12).

При $U < U_{\text{кр}}$ в діелектрику спостерігаються втрати, обумовлені або електропровідністю, або поляризацією, або сукупністю їх дій, але ці втрати не суттєві. При досягненні $U_{\text{кр}}$ починається іонізація в газових включеннях і $\text{tg}\delta$ зростає, а діелектричні іонізаційні втрати підкоряються залежності (3.12). При досягненні $U_{\text{нас}}$, коли газ у включеннях вже іонізований, енергія на процес іонізації не витрачається і $\text{tg}\delta$ зменшується. Таким чином, в залежності $\text{tg}\delta = f(U)$ спостерігається максимум. При високих частотах діелектричні втрати, пов'язані з іонізацією, призводять до сильного розігріву кромek газових включень у твердому діелектрику, і якщо термомеханічні напруги перевищують межу міцності матеріалу, діелектрик починає руйнуватися. При іонізації газових включень, крім розігріву діелектрика, в них з'являються хімічно активні речовини (озон, оксиди азоту), що спричиняє хімічну руйнацію, особливо органічної ізоляції. Це також значно знижує ККД ліній електропередач, тобто виникає корона (частковий розряд), який зі збільшенням напруги може призвести до пробою чи перекриття ізоляції. Для виключення процесів іонізації газових включень в твердих діелектриках рівень робочої напруги не повинен перевищувати $U_{\text{кр}}$.

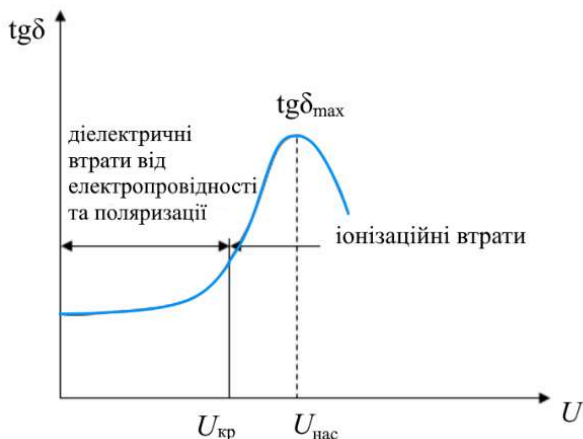


Рисунок 3.12 – Крива іонізації для твердих діелектриків з газовими включеннями

Отриману залежність $\text{tg}\delta = f(U)$ можна використовувати як метод неруйнівного контролю на наявність газових включень у твердому діелектрику.

До неоднорідних матеріалів також слід віднести слюду, що володіє шаруватою структурою. Наявність напівпровідних прошарків в пластинках слюди викликає збільшення $\text{tg}\delta$ при змінній напрузі низької частоти в порівнянні із значенням $\text{tg}\delta$ найтонших монокристалів цього матеріалу.

Просочений папір слід також віднести до діелектриків неоднорідної структури. Такий папір, окрім волокон целюлози, містить просочуючу речовину того чи іншого складу. Діелектричні втрати просоченого паперу визначаються електричними властивостями обох компонентів, їх кількісним співвідношенням і залишковими повітряними включеннями.

Питання для самоперевірки:

1. Що таке діелектричні втрати?
2. Які основні причини виникнення діелектричних втрат?
3. Якими величинами характеризуються втрати в діелектриках?
4. Що таке кут діелектричних втрат, про що він свідчить?
5. Чи впливають втрати в діелектриках на їх термін служби?
6. Які види діелектричних втрат в електроізоляційних матеріалах ви знаєте?
7. Яким чином температура і частота електричного струму впливають на діелектричні втрати в рідких і твердих діелектриках?

РОЗДІЛ 4. ПРОБІЙ ДІЕЛЕКТРИКІВ

4.1 Загальні відомості

Діелектрик, знаходячись в електричному полі, втрачає властивості електроізоляційного матеріалу, якщо напруженість поля перевищить деяке критичне значення. Це явище носить назву **пробою діелектрика** або порушення його електричної міцності.

Значення напруги, при якій відбувається пробій діелектрика, називається **пробивною напругою**, а відповідне значення напруженості поля – **електричною міцністю діелектрика**.

Напруга пробою – це те значення напруги зовнішнього електричного поля, при якому різко знижується питомий електричний опір матеріалу. Робоча напруга для діелектрика повинна бути нижчою за напругу пробою в 2,5 – 4 рази.

Пробивна напруга позначається $U_{\text{пр}}$ і вимірюється найчастіше в кіловольтах.

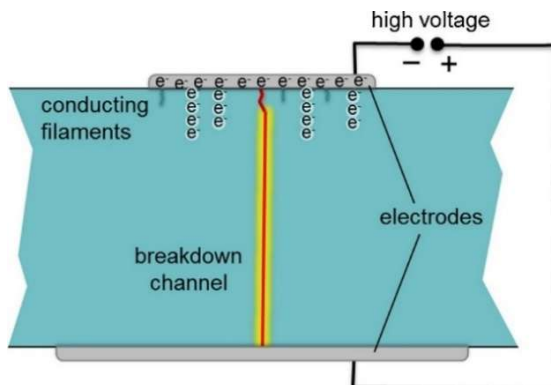


Рисунок 4.1 – Схема, що пояснює процес пробою діелектрика

Електрична міцність – це одна з основних характеристик діелектрика. Електрична міцність визначається пробивною напругою, віднесеною до товщини діелектрика в місці пробою:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \quad (4.1)$$

де h – товщина діелектрика.

Зручні для практичних цілей чисельні значення електричної міцності діелектриків виходять, якщо пробивну напругу виражати в кіловольтах, а товщину діелектрика – в міліметрах, відповідно електрична міцність буде в кВ/мм.

Явище електричного пробою пов'язане з електронними процесами в діелектрику, що виникають в сильному електричному полі і приводять до раптового різкого місцевого зростання щільності електричного струму до моменту пробою (рисунок 4.2).

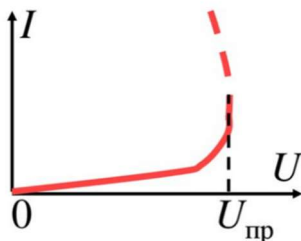


Рисунок 4.2 – Вольтамперна характеристика електричної ізоляції

Пробій газів обумовлюється явищами ударної та фотонної іонізаціями. Пробій рідких діелектриків відбувається в результаті іонізаційних теплових процесів. Одним із найголовніших факторів, що сприяють пробою рідин, є наявність в них сторонніх домішок (крапель води, волокон твердої ізоляції, продуктів старіння). Якщо рідина максимально очищена від домішок, то в

ній може відбуватися суто електричний пробій за рахунок ударної іонізації. Пробій твердих діелектриків може викликатись як чисто електричними, і тепловими процесами, що виникають під впливом електричного поля. Існує чотири види пробоїв:

- 1) електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків;
- 2) електричний пробій неоднорідних діелектриків;
- 3) електротепловий;
- 4) електрохімічний.

Чисто електричний пробій у твердих діелектриках відбувається за наявності електронних процесів, які розвиваються в сильному електричному полі та призводять до раптового різкого зростання струму в найслабшому місці на момент пробою.

Електротепловий пробій відбувається внаслідок зменшення активного опору діелектрика під впливом нагріву в електричному полі. Це призводить до зростання активного струму і подальшого збільшення нагріву діелектрика аж до його термічного руйнування.

Електрохімічний пробій спостерігається при постійній та при змінній напрузі низької частоти, коли в матеріалі розвиваються електролітичні процеси, що зумовлюють незворотне зменшення опору ізоляції.

Кожен із зазначених видів пробоїв може відбуватися в одному й тому ж діелектрику, все залежить від величини прикладеної напруги і часу її дії. Наприклад, електрохімічний пробій здійснюється при найнижчих напругах, але для свого розвитку вимагає дуже тривалого часу, а суто електричний пробій відбувається за лічені частки секунди, але при дуже високій напрузі.

4.2 Пробій газів

Зовнішньої ізоляцією у багатьох видах електротехнічних пристроїв та електроустаткування є повітря (в трансформаторах, конденсаторах, лініях електропередач тощо). Електрична міцність повітря в нормальних умовах невелика порівняно з електричною міцністю більшості рідких та твердих діелектриків (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Значення електричної міцності матеріалів

Назва матеріалу	$E_{пр}$, кВ/мм	Назва матеріалу	$E_{пр}$, кВ/мм
Повітря	3	Гетинакс	20-40
Трансформаторне масло	15-20	ПВХ-пластики	6-15
Поліетилен	35-60	Совол	14-18
Лавсан	80-120	Мусковіт	98-175

Іноді як ізоляцію використовуються спеціальні види газів (наприклад, елєгаз), що мають значно більшу електричну міцність, ніж повітря.

Основними видами іонізації в газах, що сприяють пробою, є ударна та фотонна іонізації.

4.2.1 Ударна іонізація

У звичайних умовах в газах (у повітрі) за рахунок дії зовнішніх іонізаторів вже є невелика кількість вільних позитивно і негативно заряджених іонів та електронів, які, як і нейтральні молекули, перебувають у тепловому хаотичному русі (рисунк 4.4).

При прикладенні електричного поля заряджені частинки починають переміщатися спрямовано, отримують деяку додаткову швидкість, тобто набувають додаткової енергії, величина якої визначається за формулою:

$$W = q \cdot U_{\lambda} \text{ [eV]}, \quad (4.1)$$

де q – заряд частинки;

U_{λ} – падіння напруги на довжині вільного пробігу λ (λ – вільний шлях зарядженої частинки від одного зіткнення до іншого).

Якщо електричне поле досить однорідне, то можна вважати, що:

$$U_{\lambda} = \lambda \cdot E \left[\frac{\text{В}}{\text{м}} \right]. \quad (4.2)$$

Тоді енергія, набута зарядженою частинкою, буде дорівнювати:

$$W = E \cdot q \cdot \lambda \text{ [eV]}. \quad (4.3)$$

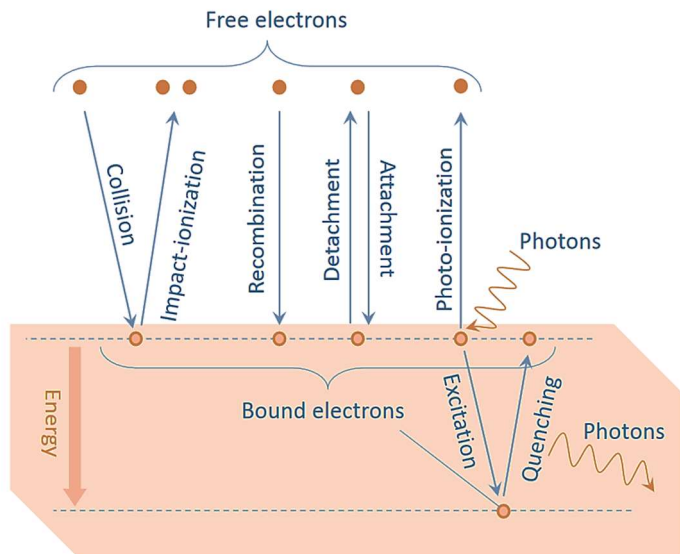


Рисунок 4.4 – Схема типових процесів, які відбуваються з електронами в повітрі

Якщо енергія, повідомлена зарядженій частинці досить велика, і виконується умова $W \geq W_i$, де W_i – енергія іонізації нейтральної частки даного газу при даному тиску і температурі, то відбувається ударна іонізація з утворенням вільного електрона і позитивно зарядженого іона (тобто відбувається розщеплення нею частки). При заданих значеннях тиску газу та температури ударна іонізація починається за певної напруженості, оскільки довжина вільного пробігу λ суттєво залежить від тиску та температури: чим більша щільність середовища, тим менша λ . Напруженість поля, коли він починається ударна іонізація, називається початковою напруженістю. Енергія W_i характеризується іонізаційним потенціалом:

$$U_i = \frac{W_i}{q}. \quad (4.4)$$

Іонізаційним потенціалом називається різниця потенціалів, проходячи яку електрон набуває енергію рівну енергії іонізації. Для більшості газів енергія іонізації знаходиться в межах від 4 до 25 еВ. У ряді випадків важливого значення набуває ступінчаста іонізація, яка здійснюється електронами з меншою енергією W_i . Ступінчаста іонізація може здійснюватися шляхом наступних процесів:

1 – електрон з енергією меншою за W_i при зіткненні з нейтральним атомом переводить його в збуджений стан. Електрон, що летить за ним, стикаючись з збудженим атомом, повідомляє йому недостатню енергію і він при цьому іонізується (рисунок 4.5);

2 – якщо атом перебуває у збудженому стані, але немає електрона, що летить за ним, то через деякий проміжок часу цей атом переходить у нормальний стан, а отримана надлишкова енергія вивільняється у формі випромінювання, тобто випускається квант енергії – фотон (короткохвильове

випромінювання). Швидкість переміщення фотонів дорівнює швидкості світла і він на своєму шляху може зіткнутися з збудженим атомом, який при цьому може іонізуватися. Питома вага іонізації, що здійснюється позитивно зарядженими іонами, дуже мала. Це пояснюється меншою довжиною вільного пробігу λ і швидкістю переміщення частинок. Іонізація позитивно зарядженими іонами здійснюється у 1300 разів рідше, ніж електронами і тому не може мати суттєвого значення. Основною зарядженою частинкою, яка здійснює іонізацію, є електрон.

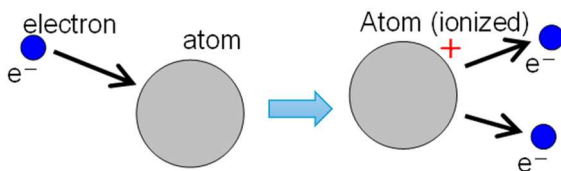


Рисунок 4.5 – Схема ударної іонізації газу

4.2.2 Фотонна іонізація

Виникнення вільних електронів під дією короткохвильового випромінювання можливо в результаті невиниклої ступінчатої іонізації, за рахунок дії спеціальних пристроїв (ртутно-кварцових ламп) або в результаті рекомбінації.

Рекомбінація – це процес зворотній іонізації, тобто процес приєднання електрона до позитивно зарядженого іона з утворенням нейтральної частинки. При цьому може виділятися енергія у формі випромінювання.

Частота випромінювання ν в загальному випадку визначається із рівності:

$$h \cdot \nu = W_{\text{п}} + \Delta W_{\text{к}}, \quad (4.5)$$

де h – квантова постійна;

ΔW_k – різниця сумарної кінетичної енергії частинок, що беруть участь у зіткненні (до та після зіткнення).

Енергія у вигляді фотонів, що випромінюється при переході збудження атома в нормальний стан або в результаті рекомбінації може поглинатися іншими молекулами або атомами, які можуть при цьому іонізуватися.

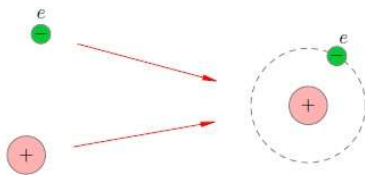


Рисунок 4.6 – Схема механізму рекомбінації

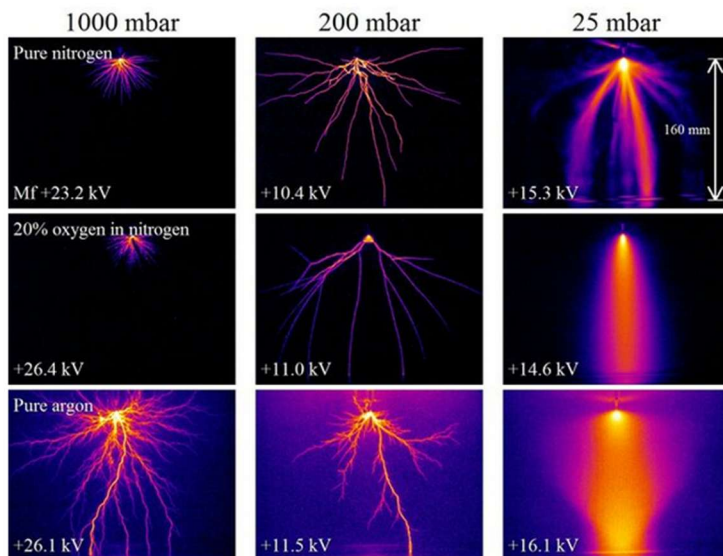


Рисунок 4.7 – Стримерні розряди, створені у трьох різних газових сумішах за тиску у 1000, 200 і 25 мбар

Фотонна (внутрішня) іонізація газу завдяки великій швидкості розповсюдження випромінювання, призводить до особливо швидкого розвитку розряду з утворенням каналу з підвищеною провідністю, що має назву «**стрімер**». В подальшому відбувається переродження каналу в плазму, що відповідає пробою газового проміжку. Фізична модель, що пояснює процес створення та розповсюдження стримеру в газовому проміжку показано на рисунках 4.6 та 4.7.

4.3 Ступені однорідності електричного поля. Види розрядів у газах

Розвиток процесів пробою в діелектриках залежить від ступеня однорідності електричного поля, тобто від розподілу напруженості електричного поля E у проміжку між електродами. Розглянемо розподіл напруженості електричного поля на прикладі газових проміжків між електродами різної форми, які показують можливі варіанти розподілу напруженості електричного поля в реальних електроустановках.

Ступінь неоднорідності електричного поля не залежить від роду напруги (постійна, змінна, імпульсна), прикладеної до електродів, а залежить лише від форми електродів, радіусу їхньої кривизни та відстані між ними.

Ознакою **однорідного електричного поля** є рівномірний розподіл силових ліній електричного поля в проміжку між електродами (струмоведучими частинами електроустановок) так, що напруженість електричного поля E у всіх точках газового проміжку приблизно однакова (рисунок 4.8). При цьому крайовим ефектом (спотворенням силових ліній у краю електродів) можна знехтувати: все залежить від площі поверхні електродів та відстані між ними.

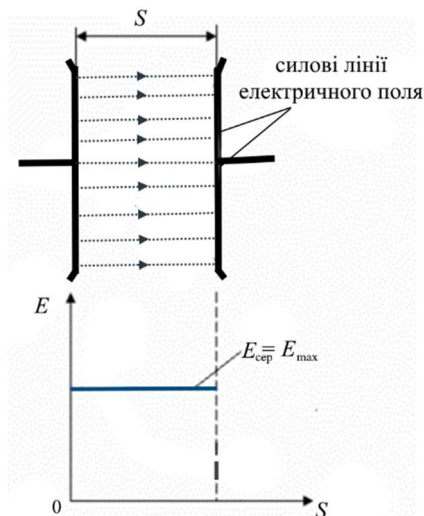


Рисунок 4.8 – Фізична модель для отримання однорідного електричного поля між електродами типу «площина-площина»:
 а) розподіл силових ліній електричного поля між електродами;
 б) розподіл напруженості електричного поля між електродами

Ознакою **неоднорідного електричного поля** є нерівномірний розподіл силових ліній електричного поля в проміжку між електродами (струмопровідними частинами електроустановок) так, що напруженість електричного поля E не є однаковою в усіх точках газового проміжку (рис. 4.9). При цьому найбільше значення напруженості електричного поля E буде в області найбільшої концентрації силових ліній електричного поля поблизу електрода з найменшим радіусом кривизни. У цьому випадку виявляються області з максимальним E_{max} та мінімальним E_{min} значеннями напруженостей електричного поля, які порівняно з попереднім випадком при тій самій відстані між електродами і тому ж значенні напруги на них

перевершують середнє значення напруженості електричного поля $E_{\text{сер}}$ (у випадку з E_{max}) або стає істотно менше його (у випадку з E_{min}).

У практичних розрахунках ступінь неоднорідності електричного поля враховується шляхом запровадження так званого коефіцієнта неоднорідності, що визначається за формулою: Ступінь неоднорідності можна характеризувати коефіцієнтом:

$$k_n = \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{сер}}}, \quad (4.6)$$

де $E_{\text{сер}} = \frac{U}{S}$.

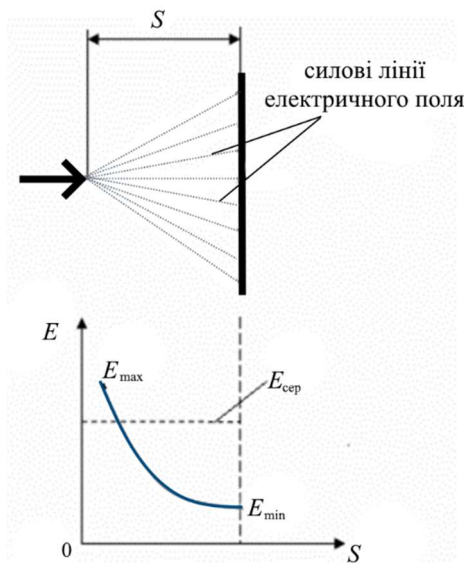


Рисунок 4.9 – Фізична модель для отримання неоднорідного електричного поля між електродами типу «голка-площина»: а) розподіл силових електричних ліній поля між електродами; б) розподіл напруженості електричного поля між електродам

Залежно від ступеня неоднорідності електричного поля між електродами та потужності джерела живлення розрізняють такі види розрядів у газових проміжках:

- 1) тихий розряд;
- 2) тліючий розряд;
- 3) іскровий розряд;
- 4) коронний розряд;
- 5) дуговий розряд.

Тліючий газовий розряд – тип газового розряду із неоднорідним розподілом електричного поля між катодом і анодом, спостерігається при низькому тиску.

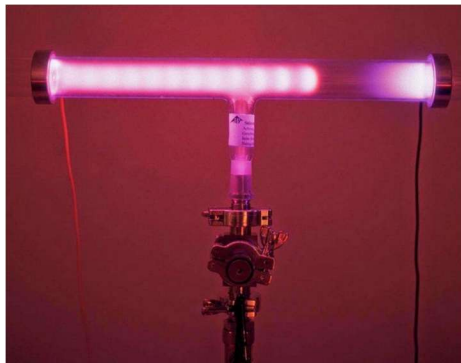


Рисунок 4.10 – Тліючий розряд

Тліючий розряд використовують у рекламних трубках, лампах денного світла (люмінесцентних трубках), у квантових джерелах світла - газових лазерах. Робота екранів плазмових телевізорів ґрунтується на електричному розряді в газах.

Іскровий газовий розряд – розряд, що виникає за атмосферного тиску та великої напруги між електродами. Такий розряд має вигляд яскравих зигзагоподібних смужок, що розгалужуються. Прикладом грандіозного іскрового розряду в

природі є блискавка. Триває всього кілька десятків мікросекунд і зазвичай супроводжується певними звуковими ефектами (потріскування, тріск, грім тощо).



Рисунок 4.11 – Приклади іскрового розряду

Температура газу, а отже, й тиск у каналі розряду різко підвищуються, в результаті повітря швидко розширюється і виникають звукові хвилі. У техніці іскровий розряд використовують, наприклад, у свічках запалювання бензинових двигунів, для обробки поверхні особливо міцних металів.

Дуговий газовий розряд – вид самостійного газового розряду, який виникає за високої температури між електродами, розведеними на невелику відстань і супроводжується яскравим світінням у формі дуги. Крізь проміжок може протікати струм, значення якого можуть досягати сотень та тисяч ампер. Такий струм сприяє розігріву каналу розряду, збільшенню його провідності.

Електрична дуга «працює» як потужне джерело світла в прожекторах. У металургії широко застосовують електродугові печі, в яких використовують дуговий розряд; жаром електричної дуги зварюють метали тощо.



Рисунок 4.12 – Приклад дугового розряду

Коронний газовий розряд – тип газового розряду, що виникає в сильних неоднорідних електричних полях навколо електродів із великою кривизною в газах із доволі високою густиною.

Коронний електричний заряд використовують для очищення газів (електрофільтри). На виникненні коронного розряду ґрунтується дія блискавковідводу.

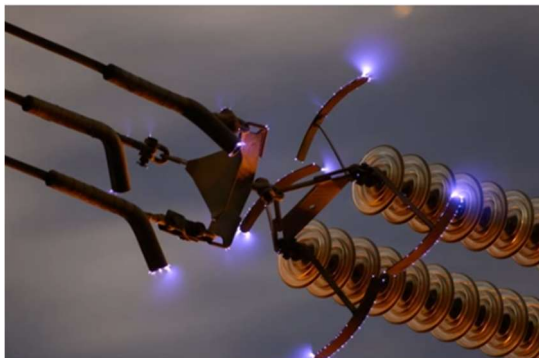


Рисунок 4.13 – Приклад коронного розряду



Вогні святого Ельма – це стійке синє чи фіолетове свічення, яке виникає навколо гострих кінців предметів під час сильної грози (коронний розряд). Найкраще з цим явищем знайомі працівники авіації та морської справи. Наукове розуміння вогню Святого Ельма стало можливим тільки після того, як британський хімік і фізик Вільям Крукс створив те, що він назвав “випромінюючою матерією”, завдяки своїй роботі з вакуумними лампами в 1879 році.

4.4 Пробій газів в однорідному електричному полі

Однорідне електричне поле може бути отримане між плоскими електродами із заокругленими краями, а також між сферами, якщо відстань між ними значно менша від їхнього діаметра. Час розвитку пробою в однорідному полі дорівнює 10^{-7} – 10^{-8} с, причому величина напруги пробою залежить від температури й тиску наповнюючого газу. При нормальному тиску (0,1 МПа) і за температури $+20$ °С електрична міцність повітря при відстані між електродами 1 см становить приблизно 3,2 МВ/м.

Зі зменшенням відстані між електродами електрична міцність збільшується, що пояснюється труднощами формування розряду. Явище пробою газоподібних діелектриків в однорідному електричному полі записують формуло (**закон Пашена**):

$$U_{\text{пр}} = A \cdot p \cdot h, \quad (4.7)$$

де $U_{\text{пр}}$ – пробивна напруга шару газу, В;

p – тиск газу, Па;

h – відстань між електродами в газі, м;

A – коефіцієнт, величина якого залежить від тиску газу та його шару.

Відповідно до закону Пашена, в однорідному електричному полі за незмінної температури напруга пробією є функцією тиску газу, що наповнює об'єм, і відстані між електродами $U_{пр} = f(p \cdot h)$. Таку залежність подано на рисунку 4.14.

Мінімальне значення пробивної напруги для різних газів становить 280–420 В, для повітря – приблизно 300 В. При підвищенні тиску понад 100 кПа відстань між молекулами зменшується, а отже, зменшується довжина вільного пробігу електронів і відповідно збільшується електрична міцність.

Зниження напруги спостерігають при зменшенні тиску нижче атмосферного до певної величини. Подальше зменшення тиску приводить до зростання електричної міцності, що пояснюється зменшенням кількості молекул в одиниці об'єму газу й зниженням імовірності зіткнень електронів із молекулами.

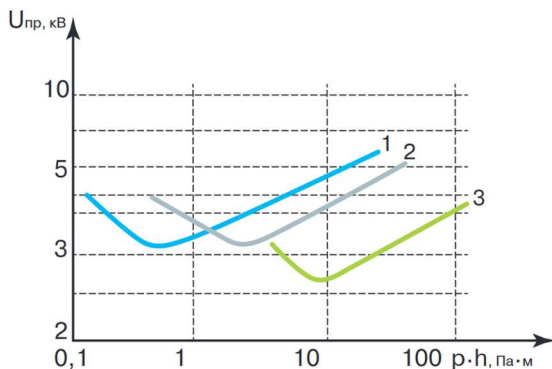


Рисунок 4.14 – Залежність пробивної напруги газів від добутку тиску на відстань між електродами: крива 1 – для повітря; крива 2 – для водню; крива 3 – для неону

При високому вакуумі електрична міцність досягає великих значень (приблизно 10^2 МВ/м). У такому разі на величину електричної міцності впливають матеріал і стан поверхні електродів.

Електрична міцність залежить від хімічного складу газу. Меншу електричну міцність порівняно з повітрям мають інертні гази (азот, аргон, гелій, неон, криптон, ксенон), які використовують для заповнення джерел світла й електровакуумних приладів. Високою електричною міцністю вирізняються деякі важкі гази з високою молекулярною масою, як-от: елегаз (SF_6), фреон (CCl_2F_2), чия електрична міцність практично у 2,5 раза вища, ніж у повітря.

Розглянемо газовий проміжок довжиною S між двома плоскими електродами та припустимо, що поблизу катода цього проміжку з'явився хоча б один електрон. Якщо напруженість поля у катода досить велика, то летячи до анода електрон здійснюватиме ударну іонізацію. Перше іонізуюче зіткнення з нейтральною молекулою газу призведе до утворення ще одного електрона, який також може брати участь у іонізації.

При наступному іонізуючому зіткненні кількість електронів збільшується до чотирьох, потім до восьми тощо, тобто зростатиме в геометричній прогресії (рисунки 4.15). Такий потік електронів, що поступово посилюється, отримав назву **початкової лавини**. Електрони, що рухаються, залишають позаду себе позитивно заряджені іони, які переміщуються до катода повільніше, ніж електрони летять до анода.

Розподіл об'ємних зарядів у початковій лавині виходить різко нерівномірним і за досить великий пробігу лавини суттєво спотворює електричне полі у просторі між електродами (рисунки 4.16). Для результуючої напруженості електричного поля $E_{\text{рез}}$

проміжку між електродами характерним є різкий підйом напруженості перед головкою початкової лавини та її спад за головкою початкової лавини, тобто розрізняються дві характерні зони (рис. 4.16).

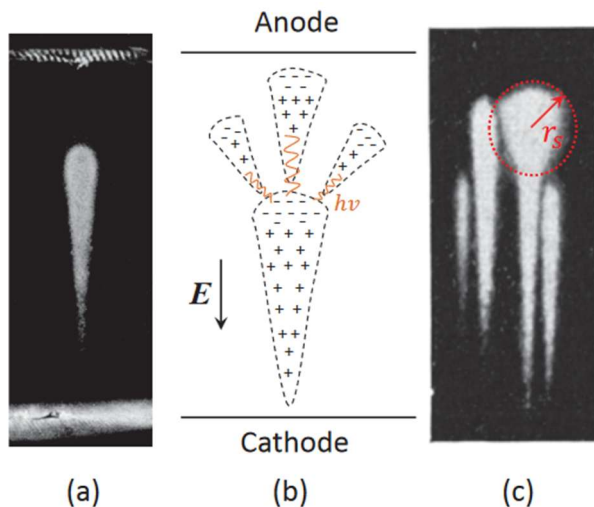


Рисунок 4.15 – Фотографія типової одиночної електронної лавини (а); ескіз розвитку електронної лавини в однорідному електричному полі (b) та фотографія, що показує перехід від лавин до стримерів (c), де r_c – початковий радіус стримера

В **області I** (зниженої напруженості електричного поля) відбувається найбільш інтенсивно рекомбінація і відтак виділятимуться (випромінюватимуться) фотони з енергією, що дорівнює енергії іонізації даного газу.

В **області II** (підвищеної напруженості поля) також відбуватиметься інтенсивне випромінювання, але пов'язане зі збудженням молекул та іонів і переходом їх в нормальний стан, тобто також виділятимуться фотони.

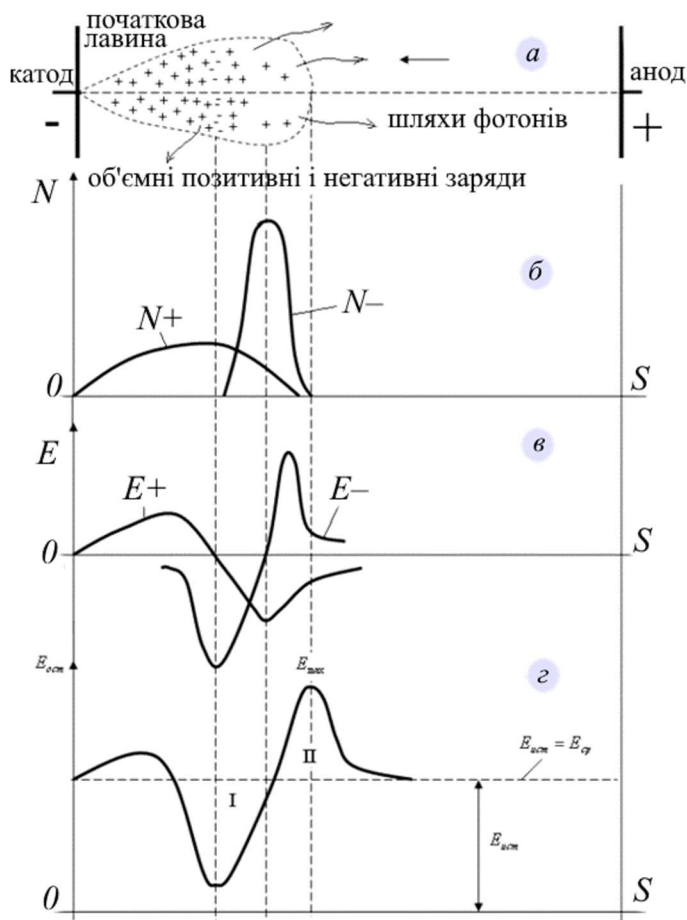


Рисунок 4.16 – Фізична модель початкового процесу розвитку розряду при пробію газів в однорідному електричному полі: а) утворення початкової лавини; б) розподіл об'ємних позитивних та негативних зарядів у початковій лавини; в) розподіл напруженостей електричного поля, створених об'ємними зарядами; г) розподіл результуючої напруженості електричного поля $E_{рез}$ в області початкової лавини

У міру просування початкової лавини до анода, коли створюване нею спотворення поля збільшується, випромінювання лавини робиться все більш інтенсивним, що породжує поза нею нові і нові осередки іонізації. Але виникнення початкової лавини і навіть перетин нею всієї відстані між електродами ще означає пробою газового проміжку. Справа в тому, що канал лавини в основному складається з позитивно заряджених іонів, які, рухаючись до катода, створюють струм, але він припиняється після відходу на катод усіх іонів.

Для відновлення електропровідності в газовому проміжку необхідне утворення нових і нових електронів за рахунок розвитку вторинних лавин. Розвиток розряду в газовому проміжку може відбуватися по-різному залежно від величини прикладеної напруги U :

1 – випадок, коли $U = U_{\text{пр min}}$;

2 – випадок, коли $U > U_{\text{пр min}}$ ($U_{\text{пр min}}$ – мінімальна, необхідна для пробою газового проміжку напруга).

При $U = U_{\text{пр min}}$ напруженість електричного поля E досить велика і канал початкової лавини починає випускати велику кількість фотонів ще до того, як позитивно заряджені іони початкової лавини усі підуть на катод. Утворені цими фотонами вторинні електрони дадуть початок новим (вторинним) лавинам, електрони яких притягуватимуться об'ємним позитивним зарядом, розташованим у головці початкової лавини (рис. 4.17,а). У просторі, заповненому об'ємними зарядами, середня напруженість поля невелика і тому велика кількість електронів, що проникли туди, перетворюються на негативно заряджені іони, відповідно у місці розташування позитивного об'ємного заряду утворюється канал, що добре проводить – **стример**.

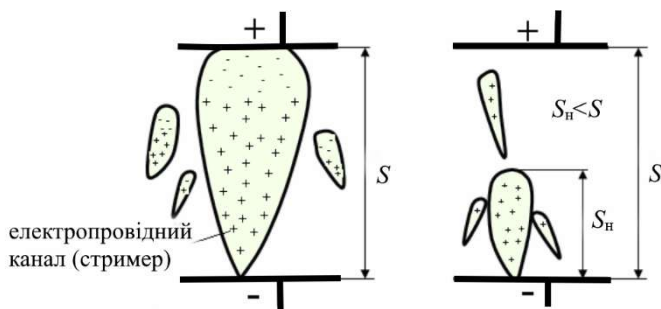


Рисунок 4.17 – Фізична модель розвитку кінцевої стадії розряду в газовому проміжку в однорідному електричному полі:

- а) процес розвитку електропровідного каналу при $U = U_{\text{пр min}}$;
- б) процес розвитку електропровідного каналу при $U > U_{\text{пр min}}$

Внаслідок цього на його кінці створюється підвищена напруженість електричного поля. Кількість нових вторинних лавин зростає, електрони цих лавин йдуть у канал стримера, а позитивно заряджені іони створюють об'ємний заряд, який притягує електрони наступних лавин, що перетворюють канал стримера на плазму. За рахунок зазначених процесів канал стримеру поступово подовжується і після перетину стримером всього простору між електродами пробій газового проміжку можна вважати завершеним.

При $U > U_{\text{пр min}}$ якщо напруженість поля між електродами збільшується, порівняно з першим випадком, то достатнє для виникнення фотоіонізації в обсязі спотворення електричного поля настає ще до того, як початкова лавина перетне весь проміжок між електродами. В цьому випадку вторинні електрони з'являються як позаду головки початкової лавини, так і перед нею, тобто у проміжку одночасно розвивається кілька лавин,

кожна з яких має пройти лише частину відстані між електродами, тому час розвитку розряду суттєво зменшується (рис. 4.17, б).

4.5 Пробій газів у неоднорідному електричному полі на постійній напрузі при різній полярності електродів

Неоднорідне електричне поле виникає між електродами, якщо хоча б один із них має малу площу: голкою і площиною, двома голками, двома сферами, при відстані між ними h , що перевищує радіус сфер.

Неоднорідні електричні поля існують переважно в газорозрядних приладах, між контактами реле, між проводами ліній електропередачі. Пробій газу в неоднорідному електричному полі вже має інші закономірності й виникає під час меншої пробивної напруги. Особливістю пробою є виникнення часткового розряду у вигляді «корони» в місцях, де напруженість електричного поля досягає критичних значень, з наступним переходом «корони» в іскровий розряд і дугу під час зростання напруги.

Величина пробивної напруги в неоднорідному електричному полі залежить від полярності електродів. При цьому іонізація газу незалежно від полярності електродів починає відбуватися в районі «голки», де існує найбільше значення напруженості електричного поля, і, отже, біля неї утворюється «хмара» з позитивно заряджених іонів (рис. 4.18).

При позитивній полярності на голці об'ємний позитивний заряд служить її продовженням і скорочує протяжність розрядного проміжку. Електрони, що знаходяться там, весь час встигають відновлювати об'ємний позитивний заряд і він «проростає» у бік негативно зарядженої площини, скорочуючи довжину газового проміжку.

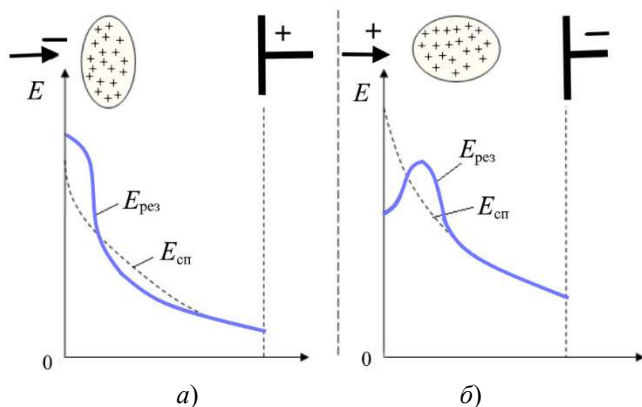


Рисунок 4.18 – Утворення «хмари» з позитивно заряджених іонів у районі «голки» та спотворення результуючої напруженості електричного поля $E_{рез}$ у просторі між електродами на фоні розподілу напруженості електричного поля у початковий момент часу: а) при негативно зарядженій «голці»; б) при позитивно зарядженій «голці»

Тому пробій настає при меншій напрузі, ніж у разі протилежної полярності електродів. При негативній полярності на електродах об'ємний позитивний заряд частково нейтралізує і екранує голку з негативною полярністю від площини, зарядженої позитивно. Величина пробивної напруги в цьому випадку приблизно в 2-2,5 рази більше, ніж при позитивній полярності на голці. Разом з тим ймовірність появи корони при негативній полярності на «голці» через більшу неоднорідності електричного поля значно вища, ніж при протилежній полярності.

На практиці для зменшення напруженості електричного поля в районі «голки» в проміжку між електродами типу «голка-площина» встановлюють бар'єри з паперу або іншого щільного матеріалу, що сприяє збільшенню пробивної напруги при позитивній полярності на «голці» і істотно зменшує зазначену

вище різницю величині пробивної напруги у разі негативної полярності на «голці».

4.6 Пробій рідких діелектриків

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

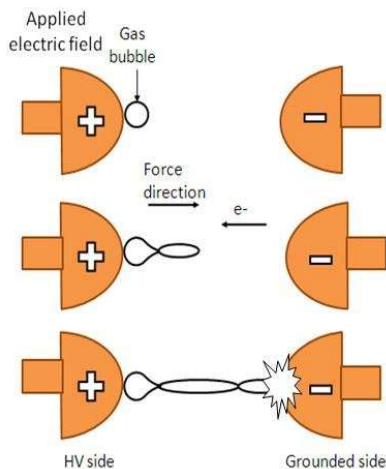


Рисунок 4.19 – Механізм пробою в рідкому діелектрику

Представлення теорії електричного пробою застосовують до рідин, максимально очищених від домішки. При високих значеннях напруженості електричного поля може відбуватися виривання електронів з металевих електродів і, як і для газів,

руйнування молекул самої рідини за рахунок ударів зарядженими частинками. При цьому підвищена електрична міцність рідкого діелектрика в порівнянні з газоподібним обумовлена значно меншою довжиною вільного пробігу електронів.

Пробій рідин, що містять газові включення (рисунок 4.19), пояснюють місцевим перегрівом рідини (за рахунок енергії, що виділяється у бульбашках газу, що досить легко іонізуються), який приводить до утворення газового каналу між електродами. Наявність води, наприклад, у трансформаторному маслі в свою чергу призводить до зменшення електричної міцності. Це пояснюється тим, що під впливом електричного поля крапельки води, як сильно полярної рідини поляризуються, перетворюються на еліпсоїди з різнозарядженими кінцями, які притягуються один до одного і створюють між електродами ланцюжки з підвищеною провідністю, по яким і відбувається електричний пробій (рисунок 4.20).

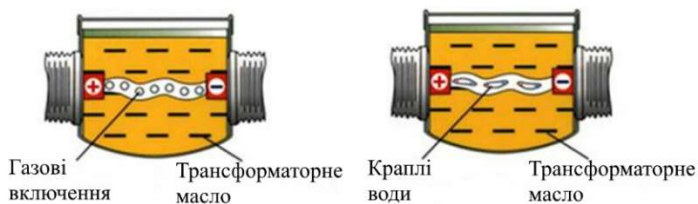


Рисунок 4.20 – Утворення ланцюжків, по яким відбувається пробій

Очищення рідких діелектриків, зокрема масел, від домішок помітно підвищує електричну міцність. Залежність електричної міцності від відсоткового вмісту води у маслі наведено на рис. 4.21. З наведеної залежності видно, що спостерігається суттєве зменшення електричної міцності $E_{пр}$

масла від присутності в ньому води в найменших кількостях (соті частки відсотка).

Електрична міцність трансформаторного масла також залежить від температури його нагрівання. Вплив температури на електричну міцність трансформаторного масла показано на рис. 4.22.

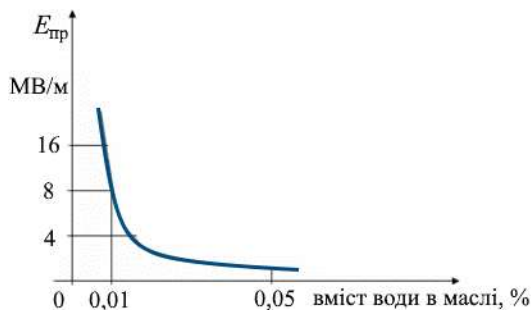


Рисунок 4.21 – Залежність електричної міцності $E_{пр}$ масла від процентного вмісту в ньому води

Згідно з наведеними залежностями, електрична міцність чистого масла (крива 1) не залежить від температури в межах до 80°C . Понад зазначену температуру починається «кипіння» легких масляних фракцій та утворення великої кількості бульбашок пари всередині рідини. В результаті цього електрична міцність про трансформаторного масла починає зменшуватися. Наявність «слідів» води в трансформаторному маслі (крива 2) значно знижує електричну міцність при кімнатній (нормальній) температурі.

Зі збільшенням температури вода переходить зі стану емульсії у стан молекулярного розчину (тобто молекули води приєднуються до молекул рідкого діелектрика). Вільних молекул

води стає менше і цим пояснюється зростання електричної міцності трансформаторного масла. Подальше зниження електричної міцності пояснюється процесами «кипіння» легких масляних фракцій рідкого діелектрика. Збільшення електричної міцності $E_{\text{пр}}$ при температурах нижче 0°C пов'язане зі збільшенням в'язкості рідкого діелектрика і меншими значеннями відносної діелектричної проникності льоду ϵ_r в порівнянні з водою. Тверді забруднення у вигляді волокон твердої органічної ізоляції, продуктів старіння трансформаторного масла спотворюють електричне поле всередині рідкого діелектрика, сприяють скупченню частинок води навколо них, що призводить до зниження електричної міцності рідкого діелектрика.

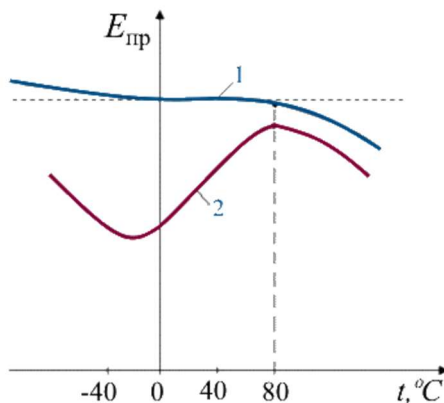


Рисунок 4.22 – Температурна залежність електричної міцності $E_{\text{пр}}$ для трансформаторного масла: 1 – чисте, висушене трансформаторне масло; 2 – експлуатаційне трансформаторне масло, яке містить «сліди» води

Електрична міцність забруднених рідких діелектриків при додатку до них імпульсної напруги в 5-7 разів вище електричної міцності при тривалому впливі напруги. Для очищених рідин ця різниця менше і не перевищує трьох разів. Це пояснюється суттєвою залежністю процесу формування розряду від часу напруги. При підвищених частотах пробій рідких діелектриків обумовлений їх розігрівом за рахунок наявних діелектричних втрат, що призводить до термічного руйнування рідини. Це пояснює необхідність встановлення нижчих робочих напруг для рідких діелектриків при високих частотах порівняно з величинами напруги при промисловій частоті. З цієї метою на практиці збільшують ізоляційні проміжки в рідконаповнених електроустановках при тому ж значенні напруги.

4.7 Пробій твердих діелектриків

Важливою особливістю пробою твердих діелектриків є зниження їх електричної міцності після пробою. Пробій супроводжується плавленням або пропалюванням діелектрика. При повторному прикладанні напруги пробій виникає в цій області при порівняно малій напруженості поля. Особливо небезпечний пробій для органічних діелектриків, в місці пробою яких відбувається розкладання органіки і виділення елементарного вуглецю. Отже, пробій твердої ізоляції електричної машини або апарату означає аварійний стан пристрою.

Після пробою рідин або газів висока рухливість молекул приводить до зникнення каналу пробою. Тому, хоча газова ізоляція і має меншу електричну міцність, але після пробою експлуатаційні властивості матеріалу відновлюються, тобто вона надійніша.

Розрізняють чотири види пробою твердих діелектриків:

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

Кожен з вказаних видів пробою може мати місце для одного і того ж матеріалу залежно від характеру електричного поля (постійного або змінного, імпульсного, низької або високої частоти), наявності в діелектрику дефектів, зокрема закритих пор, від умов охолодження, часу дії напруги.

4.7.1 Електричний пробій макроскопічно однорідних діелектриків

Цей вид пробою характеризується досить швидким розвитком, він протікає за час, менший 10^{-7} – 10^{-8} с, і не обумовлений тепловою енергією, хоча електрична міцність при електричному пробі в деякій мірі залежить від температури.

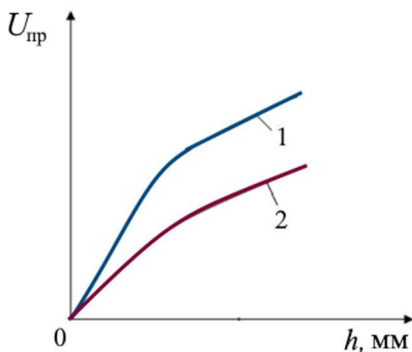


Рисунок 4.23 – Залежність пробивної напруги U від товщини h твердих діелектриків при частоті $f=50$ Гц: 1 – однорідне електричне поле; 2 – різконеоднорідне електричне поле

Електричний пробій за своєю природою є чисто електронним процесом, коли з небагатьох початкових електронів в твердому тілі створюється електронна лавина. Електрони розсіюють енергію свого руху, накопичену в електричному полі, порушуючи пружні коливання кристалічної решітки. Електрони, що досягли певної критичної швидкості, проводять відщеплення нових електронів, і стаціонарний стан порушується, тобто виникає ударна іонізація електронами в твердому тілі. Чисто електричний пробій має місце, коли виключений вплив електропровідності і діелектричних втрат, що обумовлюють нагрів матеріалу, а також відсутня іонізація газових включень. У разі однорідного поля і повної однорідності структури матеріалу напруженість поля при електричному пробіі може служити мірою електричної міцності речовини.

4.7.2 Електричний пробій неоднорідних діелектриків

Такий пробій характерний для технічних діелектриків, які найчастіше містять газові включення. Так само як і електричний пробій однорідного діелектрика, він відрізняється досить швидким розвитком.

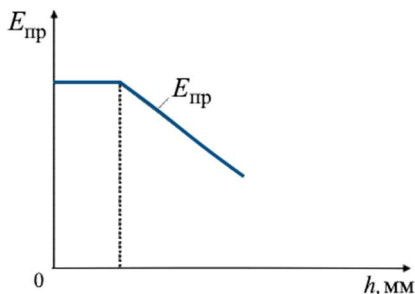


Рисунок 4.24 – Залежність електричної міцності твердих діелектриків від їх товщини

Пробивна напруга для неоднорідних діелектриків, що спостерігається в зовнішньому однорідному або неоднорідному полі, як правило, невисока і мало відрізняються один від одного.

Прийнято вважати, що електрична міцність не залежить від товщини зразка. Однак це справедливо лише для малих товщин зразків (від 0,05 мм до 0,5 мм), які мають порівняно невелику кількість дефектів. За більших товщин зростає кількість слабких місць і газових включень, відповідно електрична міцність зменшується, а лінійний ріст порушується (рисунк 4.24).

Високою електричною міцністю характеризуються діелектрики, що мають щільну структуру і що не містять газових включень. До них відносяться слюда, папір, ретельно просочений рідким діелектриком, стекла.

Низькою електричною міцністю відрізняються діелектрики з відкритою пористістю. До таких діелектриків відносяться мармур, непросочений папір, дерево, пориста кераміка. Електрична міцність їх порівняно мало відрізняється від електричної міцності для повітря, виняток становить папір з підвищеною щільністю.

Тверді діелектрики із закритими порами, наприклад щільна кераміка, характеризуються вищою електричною міцністю. Наявність газових включень в твердій ізоляції особливо небезпечно при високих частотах. За наявності крупних закритих пор (наприклад, через неправильну технологію виготовлення кераміки) можливе руйнування матеріалу термомеханічними напругами, що виникають при розігріві закритих пор, через іонізаційні втрати. В цьому випадку термомеханічні напруги виникають між сильно нагрітими під впливом іонізаційних втрат стінками закритої пори і менш

нагрітим об'ємом твердого діелектрика. Якщо термомеханічні напруги досягають величин, що переважають межу міцності матеріалу, то діелектрик розтріскується і навіть розривається.

Пробою часто передують окремі точкові світіння, викликані іонізацією газових включень. При розташуванні неоднорідних діелектриків в неоднорідному електричному полі іноді спостерігається збільшення електричної міцності у порівнянні з однорідним полем. Це пояснюється зменшенням кількості слабких місць, які потрапляють у межі поля.

Електрична міцність однорідних твердих діелектриків практично не залежить від температури до деякого її значення. Вище за цю температуру спостерігається значне зниження електричної міцності, що свідчить про механізм появи електротеплового пробою (рисунок 4.25)

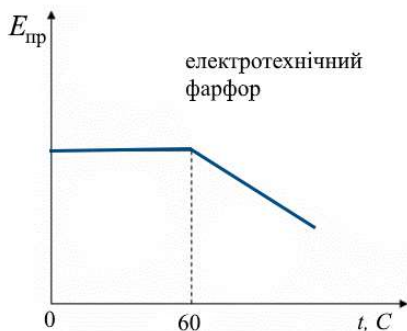


Рисунок 4.25 – Залежність електричної міцності від температури на прикладі виробу з фарфору при частоті $f=50$ Гц

4.7.3 Тепловий пробій

Пробивна напруга $U_{пр}$ при тепловому пробіі залежить від ряду факторів: частоти електричного поля, умов охолодження ізоляції, температури оточуючого середовища тощо. Також

напруга теплового пробою пов'язана з нагрівостійкістю матеріалу, і чим вище клас нагрівостійкості ізоляції, тим більше величина пробивної напруги. Органічні діелектрики унаслідок малої нагрівостійкості за інших рівних умов мають нижчі значення пробивної напруги при тепловому пробі, чим неорганічні

Електротепловий (тепловий) пробій зводиться до розігрівання матеріалу в електричному полі до температур, відповідних хоч би місцевій втраті ним електроізоляційних властивостей, пов'язаної з надмірним зростанням кризової електропровідності або діелектричних втрат. При розрахунках напруги теплового пробою повинні братися до уваги $\text{tg}\delta$ діелектрика і його залежність від температури, а також діелектрична проникність матеріалу.

Температура нагріву ізолятора в електричному полі високої напруги встановлюється тоді, коли тепловиділення виявляється рівним тепловіддачі в навколишнє середовище. Якщо кількість тепла, що виділяється в діелектрику під впливом діелектричних втрат, перевищує кількість тепла, яке в даних умовах може відводитися назовні, то виникає тепловий пробій, при цьому порушується теплова рівновага і процес набуває характеру лавини. Для виключення цього явища необхідно правильно встановити робочу напругу. Значення такої напруги можна знайти з рівняння теплового балансу для процесу нагріву, що встановився, прирівнявши кількість тепла, що виділяється в діелектрику, до кількості тепла, що відводиться за даної температури з поверхні діелектрика:

$$U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg}\delta = \sigma \cdot S \cdot (t_{\text{роб}} - t_0), \quad (4.7)$$

де U – прикладена напруга;

$\omega = 2\pi f$ – кутова частота;

C – електрична ємність ізолятора;

$\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат;

σ – коефіцієнт тепловіддачі;

S – площа поверхні діелектрика;

$t_{\text{роб}}, t_0$ – температура поверхні діелектрика та оточуючого середовища

В більшості випадків тепловідвід обумовлюється конвекцією повітря. Тепловідвід за рахунок теплопровідності навколишнього середовища має місце для кабелів, вводів, вмонтованих в стіни.

Формула (4.7) дозволяє з достатньою точністю розрахувати допустиму напругу для виробів з відомою електричною ємністю та теплопровідністю діелектрика, яка забезпечує малий перепад температури по перерізу ізоляційного виробу. Розглянемо графічне співвідношення між потужністю, що виділяється в ізоляторі, і потужністю, що відводиться з його поверхні в оточуюче середовище (рисунок 4.26).

Крива 1 має дві характерні точки перетину з прямою 3. Точка при $t_{1 \text{ роб}}$ – точка стійкої теплової рівноваги, точки при $t_{1 \text{ кр}}$ – точка нестійкої теплової рівноваги. При аналізі температур нагріву необхідно враховувати баланс потужностей між потужністю, яка виділяється в ізоляторі $P_{\text{а}}$, і потужністю, яка відводиться в оточуюче середовище $P_{\text{ох}}$.

При відхиленні температури нагріву від точки $t_{1 \text{ кр}}$ відбувається або повернення в точку при $t_{1 \text{ роб}}$ (при відхиленні вліво), або термічне руйнування діелектрика (при відхиленні вправо). Якщо робочий режим відповідав точці $t_{1 \text{ роб}}$ і відбулося короткочасне підвищення температури (наприклад, за рахунок дії сонячних променів) до значення меншого $t_{1 \text{ кр}}$, то

тепловіддаюча спроможність ізолятора після припинення дії сонячного випромінювання виявиться вище (рис.4.26, пряма 3).

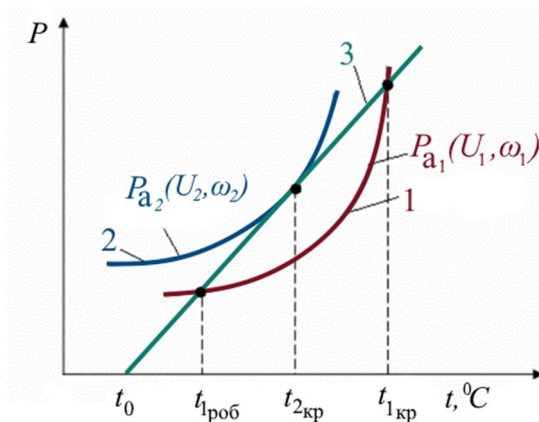


Рисунок 4.26 – Графіки залежностей потужності, що виділяється в ізоляторі, і потужності, що відводиться з його поверхні від температури: 1 – залежність активної потужності, що виділяється в ізоляторі за рахунок діелектричних втрат від температури при напрузі U_1 або кутовій частоті ω_1 ; 2 – залежність активної потужності, що виділяється в ізоляторі за інших умов: напрузі U_2 або кутовій частоті ω_2 ; 3 – залежність тепловіддачі з поверхні ізолятора від температури

Різниця температур $t_{1\text{кр}}$ та $t_{1\text{роб}}$ для кривої 1 вказує на допустимий перегрів ізолятора по відношенню до робочої температури за рахунок зовнішніх джерел тепла. Крива 2 представляє залежність, що лежить на порозі електричної міцності ізолятора при його тепловому пробіі. По кривій 1, використовуючи рівняння теплового балансу, можна розрахувати допустиму робочу напругу при температурах нагріву ізолятора $t_{1\text{роб}}$ та $t_{1\text{кр}}$:

$$U_{\text{роб}} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot S \cdot (t_{1 \text{ роб}} - t_0)}{\omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta_{1 \text{ роб}}}}, \quad (4.8)$$

де $\text{tg} \delta_{1 \text{ роб}}$ відповідає точці стійкої теплової рівноваги з температурою $t_{1 \text{ роб}}$.

За кривою 2, використовуючи рівняння теплового балансу, можна розрахувати пробивну напругу при досягненні температури його нагріву $t = t_{2 \text{ кр}}$:

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sigma \cdot S \cdot (t_{2 \text{ кр}} - t_0)}{\omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta_{2 \text{ кр}}}}, \quad (4.9)$$

де $\text{tg} \delta_{2 \text{ кр}}$ відповідає точці з критичною температурою нагріву $t = t_{2 \text{ кр}}$.

Крива 2 фактично представляє залежність $P_a(t)$, що лежить на порозі електричної міцності ізолятора (або ізоляційної конструкції) при тепловому пробіі. Тому величина робочої напруги $U_{\text{роб}}$ повинна бути меншою (з певним коефіцієнтом запасу) за величину пробивної напруги $U_{\text{пр}}$ ізолятора при тепловому пробіі. Сама ж величина пробивної напруги при тепловому пробіі істотно менше величини пробивної напруги при чисто електричному (електронному) пробіі.

4.7.4 Електрохімічний пробій

Електрохімічний пробій здійснюється при напругах близьких (або рівних) до номінальних значень напруги для працюючих електроустановок, тобто за суттєво менших значень напруги, ніж при чисто електричному чи електротепловому пробіях. Цей пробій має особливо істотне значення при підвищених температурах і високій вологості повітря. Він спостерігається при постійній і змінній напрузі підвищеної частоти, коли в матеріалі розвиваються електролітичні процеси, що обумовлюють незворотне зменшення опору ізоляції. Таке

явище часто називають також старінням діелектрика в електричному полі, оскільки воно призводить до поступового зниження електричної міцності, що закінчується пробоем при напруженості поля, значно меншій пробивній напруженості, отриманій при короткочасному випробуванні. Таке явище називається **старінням діелектрика**, оскільки воно призводить до зменшення електричної міцності $E_{\text{пр}}$ ізоляційної конструкції. Воно закінчується пробоем при напруженостях поля, значно менших, ніж отриманих при короткочасних випробуваннях.

Електрохімічний пробій вимагає для свого розвитку тривалого часу, оскільки він пов'язаний з явищем електропровідності, що приводить до повільного виділення в матеріалі малих кількостей хімічно активних речовин, або з утворенням напівпровідних з'єднань. У кераміці, що містить оксиди металів змінної валентності (наприклад, TiO_2), електрохімічний пробій зустрічається значно частіше, ніж в кераміці, що складається з оксидів алюмінію, кремнію, магнію, барії. Наявність лужних оксидів в алюмосилікатній кераміці сприяє виникненню електрохімічного пробоя і обмежує допустиму робочу температуру. При електрохімічному пробії, спостережуваному при постійній напрузі і низьких частотах в умовах підвищених температур або високої вологості повітря, велике значення має матеріал електроду. Наприклад, напилення срібла на поверхні діелектриків, здатні дифундувати в товщу матеріалу, що знижує пробивну напругу.

Раніше вважалося, що старіння властиве лише органічним діелектрикам (просочений папір, гума і т. д.), в яких воно обумовлене перш за все розвитком іонізаційного процесу в повітряних включеннях; іонізація пов'язана з виділенням озону і оксидів азоту, що приводять до поступового хімічного

руйнування ізоляції. Пізніше було показано, що явище старіння може мати місце і в деяких неорганічних діелектриках, наприклад в титановій кераміці.

Питання для самоперевірки:

1. Яке поле називають однорідним/неоднорідним? Від чого залежить ступінь неоднорідності електричного поля?
2. Охарактеризуйте явище пробою діелектриків.
3. Що називається електричною міцністю діелектриків?
4. Чим обумовлено пробій газів?
5. Які види розрядів в газових проміжках Вам відомі. Коротко охарактеризуйте кожен з них.
6. Поясніть механізм пробою в рідкому діелектрику.
7. За допомогою чого можна підвищити електричну міцність рідких діелектриків?
8. Назвіть види пробою твердих діелектриків.
9. В чому полягає тепловий пробій?
10. Що так старіння діелектрика? Чому воно відбувається і до чого призводить?

РОЗДІЛ 5. МЕХАНІЧНІ, ТЕПЛОВІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Механічні, теплові та фізико-хімічні властивості електротехнічних матеріалів визначають їхню поведінку в різних умовах експлуатації, впливаючи на їхню міцність, стабільність, теплопровідність та взаємодію з іншими матеріалами. Розуміння цих властивостей дозволяє оптимально використовувати матеріали в різноманітних технологічних процесах та розробляти нові матеріали з покращеними характеристиками.

5.1 Механічні властивості матеріалів

Механічні властивості матеріалів пов'язані з поняттям про навантаження, деформацію та механічні напруження. До механічних властивостей належать міцність, пружність, пластичність, в'язкість, твердість тощо.

Залежно від швидкості прикладання навантаження розрізняють статичні й динамічні випробування матеріалів (рис. 5.1). Під час статичного випробування навантаження додається повільно й зростає поступово; при динамічних випробуваннях – з високою швидкістю.

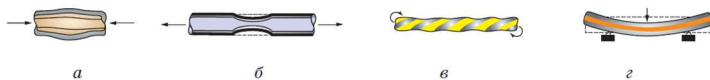


Рисунок 5.1 – Прикладання навантаження при статичному випробуванні: а) при стисненні; б) при розтягуванні; в) при крученні; г) при вигинанні

Міцність – це властивість матеріалів, не руйнуючись, чинити опір дії прикладених зовнішніх сил. Міцність матеріалів характеризують межами механічного напруження, яке

визначають під час різних видів деформування зразків: розтягування, стиснення, згинання. З механічного напруження виникає холодна пластична текучість матеріалу, коли навіть після зняття механічного напруження форма зразка не відновлюється. Таке значення напруження називають **границею текучості** $\sigma_{\text{тек}}$. Подальше збільшення механічного напруження призводить до руйнування зразка матеріалу.

Міцність матеріалів характеризується умовною величиною – **межею міцності**. Це механічне напруження $\sigma_{\text{міц}}$, після перевищення якого відбувається руйнування матеріалу:

$$\sigma_{\text{міц}} = \frac{F}{S_0}, \quad (5.1)$$

де F – числове значення найбільшого навантаження, Н;

S_0 – вихідна площа поперечного перерізу зразка, м^2 .

Для діелектриків межі міцності на розтягування, стиснення, згинання можуть значно відрізнятися.

Деформацію, що виникає в результаті порівняно невеликих напружень і зникає після зняття навантаження, називають **пружною**, а та, що залишається, – залишковою, або **пластичною**.

Пластична деформація $\sigma_{\text{тек}} - \sigma_{\text{міц}}$ пов'язана з переміщенням атомів речовини на відносно великі відстані й викликає залишкові зміни форми, структури та властивостей без макроскопічних порушень цілісності. Матеріали, у яких немає пластичної деформації, називають крихкими (скло, кераміка тощо). Вони легко руйнуються під впливом вібрацій та динамічних навантажень. І навпаки, матеріали, у яких пластична деформація має широку смугу значення, називають пластичними (поліетилен, полівінілхлорид, гума тощо).

Пружність – здатність матеріалів змінювати свою форму під дією зовнішніх сил і відновлювати її після припинення дії цих

сил. При невеликих механічних напруженнях після зняття навантаження форма зразка відновлюється. Але з деякого значення механічного напруження форма зразка не відновлюється.

Відношення навантаження, при якому зразок починає набувати залишкових подовжень, до площини його поперечного перерізу називають **межею пружності**. Наприклад, межа пружності сталі – до 300, міді – 25, свинцю – 2,5 МПа.

Пластичність – здатність матеріалів, не руйнуючись, змінювати свою форму під дією зовнішніх сил і зберегти нову форму після припинення дії сил. Пластичність металів (здатність прокатуватися в тонкі листи, витягуватися в дріт) зменшується в такому ряду: золото, срібло, мідь, свинець, цинк, залізо. Сталь значною мірою пластична, і при нагріванні її пластичність зростає. Цю властивість використовують при отриманні виробів шляхом прокатування та кування. Пластичність матеріалів оцінюють за відносним видовженням і звуженням, які вимірюють у відсотках (%).

Відносне видовження G визначають за формулою:

$$G = \frac{(l_1 - l_0) \cdot 100\%}{l_0}, \quad (5.2)$$

де l_0 – довжина зразку до розриву;

l_1 – довжина зразка після розриву.

Відносне звуження X визначають за формулою:

$$X = \frac{(S_1 - S_0) \cdot 100\%}{S_0}, \quad (5.3)$$

де S_0 – початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка;

S_1 – площа поперечного перерізу після розриву.

Крихкість – властивість матеріалу руйнуватися відразу після дії прикладених до нього сил, не показуючи жодних ознак деформації (наприклад, скло).

В'язкість – здатність матеріалу поглинати механічну енергію і при цьому проявляти значну пластичність. Тверді матеріали з високою в'язкістю швидко гасять вібрації, які є причиною передчасного руйнування конструкцій. Наприклад, чавун має високу в'язкість. Для виготовлення станин верстатів і корпусних деталей чавун цінніший від вуглецевої сталі.

Якщо ж розглядати діелектрики, то **в'язкість (внутрішнє тертя)** – властивість рідин і газів створювати опір переміщенню однієї їхньої частини щодо іншої. В'язкість більше властива матеріалам у рідкому агрегатному стані. Залежно від рівня в'язкості рідкі діелектрики можуть використовувати: як просочувальний матеріал (наприклад, що менша в'язкість лаку, то більша його просочувальна властивість); середовище для гасіння дуги (наприклад, масло в баку високовольтного автоматичного вимикача); охолоджувальне середовище (наприклад, якісне трансформаторне масло з низькою в'язкістю не перешкоджає конвекційній циркуляції масла всередині бака трансформатора та забезпечує менший опір звичайному потоку, не впливаючи на процес охолодження). В'язкість рідини значно залежить від температури, тому правила технічної експлуатації регламентують значення в'язкості рідких діелектриків за певної температури.

Ударна в'язкість – здатність матеріалу чинити опір ударним навантаженням, які швидко зростають. Це робота, витрачена на ударний злам зразка. За цією характеристикою оцінюють опір матеріалу проти крихкого руйнування.

Втома – зміна механічних і фізичних властивостей матеріалів під дією сил, які циклічно змінюються під час напружень і деформацій. В умовах дії таких навантажень у деталях під час роботи утворюються й розвиваються тріщини, які призводять до повного їхнього руйнування.

Твердість – здатність матеріалу чинити опір вдавненню в нього іншого, більш твердого матеріалу. За ступенем твердості всі метали значно різняться (рисунок 5.2). Наприклад, калій та натрій – м'які метали, їх навіть можна різати ножем, а хром за твердістю близький до алмазу. Чавун і сталь мають високу твердість, свинець – низьку. Для неорганічних матеріалів твердість визначається за мінералогічною шкалою Мооса, для органічних діелектриків способом Брінелля, Роквелла, Віккерса або за допомогою маятника Кузнецова.



Рисунок 5.2 – Шкала твердості для металів

Для перевірки твердості матеріалів існує три методи випробування, названі за іменами їхніх винахідників, – Брінелля, Роквелла, Віккерса (рис. 5.3-5.5).

Випробування за методом Брінелля проводять шляхом вдавлювання в матеріал сталеві загартованої кульки протягом певного часу. У результаті на поверхні матеріалу (попередньо зачищеного напилком) утворюється сферичний відбиток. Що твердіший матеріал, то менша площа відбитка. Діаметр кульки D і навантаження P установлюють залежно від матеріалу, який досліджують, його твердості й товщини (рис. 5.3, а). Наприклад,

при випробуванні сталі й чавуну вибирають $D = 10$ мм і $P = 30$ кН, міді та її сплавів – $D = 10$ мм і $P = 10$ кН.

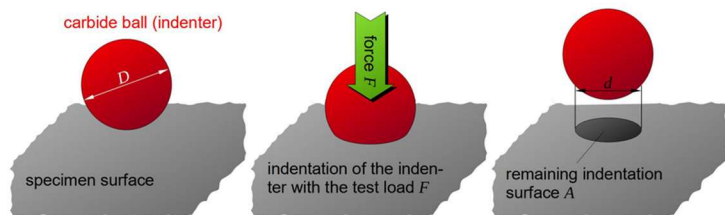


Рисунок 5.3 – Метод визначення твердості за Брінеллем

При випробуванні зразків товщиною менше 6 мм вибирають кульки з меншим діаметром: 5 і 2,5 мм. На практиці користуються таблицею переведення площі відбитка кульки в число твердості. Твердість за Брінеллем позначають **HB** і визначають за формулою:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (5.4)$$

де P – числове значення навантаження на метал, Н;

D – діаметр кульки, мм;

d – діаметр відбитка кульки, мм.

Випробування за методом Роквелла здійснюють шляхом вдавлювання в матеріал алмазного конуса з кутом при вершині 120° або сталеві кульки $D = 1,59$ мм під певним навантаженням (рис. 5.3, б). Прилад Роквелла має три шкали – B , C і A . Алмазний конус застосовують для випробування твердих матеріалів (шкали C і A); сталеву кульку застосовують для випробування м'яких матеріалів (шкала B).

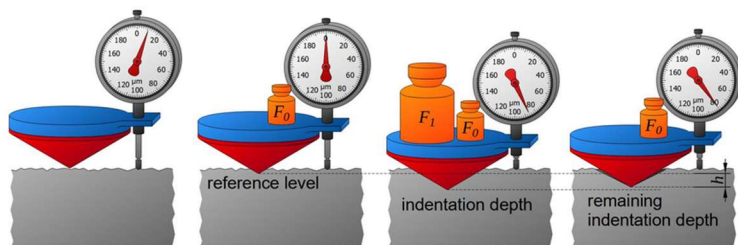


Рисунок 5.4 – Процедура випробування твердості за Роквеллом

Залежно від обраної шкали твердість за Роквеллом позначають **HRB**, **HRC**, **HRA**. Вимірюють в умовних одиницях. За одиницю твердості приймають величину, що відповідає осьовому переміщенню наконечника конуса на відстань 0,002 мм. Твердість за Роквеллом обчислюють у такий спосіб:

- для шкали А і С: $HR = 100 - e$;
- для шкали В: $HR = 130 - e$.

Величину e визначають за формулою:

$$e = \frac{h - h_0}{0,002}, \quad (5.5)$$

де h – глибина проникнення в метал наконечника під дією загального навантаження P ($P = P_0 + P_1$);

h_0 – глибина проникнення наконечника під дією попереднього навантаження P_0 .

Випробування за методом Віккерса здійснюють шляхом вдавлювання в поверхню (шліфовану чи навіть поліровану), що підлягає випробуванню, чотиригранної алмазної пірамідки з кутом при вершині 136° під навантаженням від 10 до 500 Н (рис. 5.5). Метод використовують для визначення твердості деталей малої товщини й тонких поверхневих шарів, які мають високу твердість. Число твердості за методом Віккерса позначають **HV** і

визначають за спеціальними таблицями по діагоналі відбитка d .
Що більша діагональ, то менша твердість матеріалу.

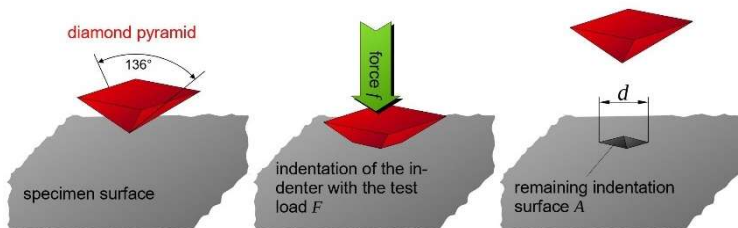


Рисунок 5.5 – Чотиригранна алмазна пірамідка з кутом при вершині 136° для випробувань твердості матеріалів за методом Віккерса

5.2 Теплові властивості діелектриків

Під час експлуатації ізоляційні матеріали працюють за підвищених температур. Ізоляція нагрівається від струму, що проходить по проводу. Тому ізоляційні матеріали обирають із певною робочою температурою та тепловими властивостями. Теплові характеристики дають змогу оцінити поведінку електроізоляційних матеріалів під час нагрівання.

Теплостійкість – це здатність діелектрика зберігати форму й розміри під час короткочасного підвищення температури.

Нагрівостійкість – це здатність діелектриків і виробів із них витримувати протягом тривалого часу вплив високої температури без погіршення своїх властивостей. Нагрівостійкість визначається тією температурою, за якої виникає неприпустима зміна експлуатаційних характеристик діелектрика. Для електроізоляційних матеріалів встановлено сім класів нагрівостійкості (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Допустимі граничні температури нагрівання для ізоляційних матеріалів різних класів нагрівостійкості

Клас нагрівостійкості ізоляції	Допустима гранична температура, °С	Перелік основних груп ізоляційних матеріалів
У	90	Органічні діелектрики; непросочені волокнисті матеріали на основі целюлози та шовку (деревина, папір, картон, фібра, пряжа); полістирол, поліетилен
А	105	Ті ж самі волокнисті матеріали, але просочені поліамідними смолами, олійно-смолянистими й полівінілацетатними лаками
Е	120	Шаруваті пластики (гетинакс, текстоліт), пластмаси з органічним наповнювачем
В	130	Матеріали з великим вмістом неорганічних компонентів (скло, тканина, склотекстоліт)
F	155	Матеріали на основі слюди, скловолокна, азбесту в поєднанні зі зв'язувальними компонентами підвищеної нагрівостійкості (кремнійорганічними, епоксидними)
Н	180	Кремнійорганічні лаки, гуми, композиційні матеріали зі слюди, азбесту, склеєних за допомогою нагрівостійких кремнійорганічних смол
N	200	Поліаміди, поліефірні смоли, силікони, поліімідні плівки
R	220	Високотемпературні полімери та композити: поліімідні смоли, силікони, фторопласти, арамідні волокна

Питання щодо віднесення певного електроізоляційного матеріалу або комбінації електроізоляційних матеріалів до якогось класу нагрівостійкості вимагає тривалих і трудомістких випробувань зразків матеріалів на теплове старіння в умовах,

найбільш схожих до тих умов, у яких ці матеріали експлуатуватимуться. Для ряду електроізоляційних матеріалів досить важлива стійкість до різких змін температури, бо результати таких змін в матеріалі можуть утворюватися тріщини. У результаті випробувань встановлюється стійкість матеріалу до теплових впливів, але матеріал, що витримує короточасне нагрівання до деякої температури, може виявитися нестійким до теплового старіння при тривалому впливі нижчої температури. Якщо погіршення якості ізоляції може виявитися при тривалому впливі підвищеної температури внаслідок повільних хімічних процесів, то це явище називають тепловим старінням ізоляції.

Теплове старіння ізоляції - погіршення якості ізоляції при тривалому впливі підвищеної температури внаслідок повільних хімічних процесів.

Зразки матеріалів довгостроково витримують при порівняно невисокій температурі, що не викликає негайного руйнування матеріалу.

Властивості зразків, що старіли певний час, порівнюють із властивостями початкового матеріалу. При інших рівних умовах швидкість теплового старіння органічних і елементоорганічних полімерів значно зростає з підвищенням температури старіння, підкоряючись загальним закономірностям температурної зміни швидкості хімічних реакцій. Тривалість старіння τ пов'язана з абсолютною температурою старіння T залежністю вигляду:

$$\ln \tau = \frac{A}{T} + B, \quad (5.6)$$

τ – тривалість старіння

T – абсолютна температура старіння

A та B – величини, постійні для даного матеріалу і даних умов старіння.

Ця залежність швидкості хімічних реакцій від температури носить назву **емпіричний закон Ареніуса** і для вузького діапазону температур може бути записана у вигляді:

$$\tau = a \cdot e^{[-b(t-t_0)]},$$

де ***a***, ***b*** – константи для даного діелектрика в даних умовах його використання.



Емпіричний закон Ареніуса описує залежність швидкості хімічних реакцій від температури. Він був запропонований шведським хіміком **Сванте Ареніусом** у 1889 році і часто використовується в матеріалознавстві для моделювання процесів, які залежать від температури, таких як корозія, старіння матеріалів і інші хімічні реакції. Цей закон залишається одним з основних інструментів для інженерів і науковців, які працюють у галузі хімії, фізики та матеріалознавства, для розуміння та прогнозування поведінки матеріалів під впливом температури.

Залежність τ (в логарифмічному масштабі) від величини, оберненої абсолютній температурі старіння, повинна мати вигляд прямої лінії (рис. 5.6).

У більшості випадків нахил цих прямих такий, що зменшує τ удвічі і відповідає підвищенню температури старіння в середньому на 10 К. Аналогічні залежності спостерігаються для терміну служби ізоляції електричних машин й інших електроізоляційних конструкцій. Крім температури на швидкість старіння впливає зміна тиску повітря або його концентрація, присутність озону, а також різних хімічних реагентів, що прискорюють або сповільнюють старіння.

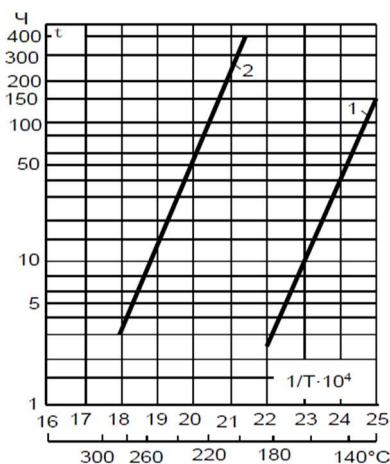


Рисунок 5.6 – Тривалість старіння τ півок до появи тріщин при вигині у функції температури масляно-бітумного (1) і кремнійорганічного (2) лаків

Для загальної характеристики стійкості електричної ізоляції до термічного старіння використовують поняття довговічності. **Довговічність** - це час, за який механічна міцність ізоляції знижується до значення, нижчого ніж експлуатаційні механічні навантаження. Теплове старіння електричної ізоляції супроводжується зміною механічних характеристик. Сильніше всього змінюються відносно подовження при розриванні й міцність на ударне вигинання. Трохи повільніше – міцність на розривання.

Холодостійкість – здатність діелектрика працювати без погіршення експлуатаційних властивостей за низьких температур. У багатьох випадках для ізоляції, наприклад, ліній електропередачі і зв'язку, відкритих підстанцій, літакового електро- і радіоустаткування і в інших випадках важлива

холодостійкість, тобто здатність електричної ізоляції не знижувати експлуатаційної надійності при низьких температурах, наприклад – (60–70) °С і більш низьких (криогенних) температурах. При низьких температурах, як правило, електричні властивості ізоляційних матеріалів поліпшуються; однак багато матеріалів, гнучкі й еластичні в нормальних умовах, при низьких температурах стають крихкими і твердими, що створює відповідні ускладнення. Наприклад, поліетилен при температурі рідкого азоту стає настільки крихкий, що поліетиленова плівка розтріскується під дією навіть малопотужних часткових розрядів.

При випробуваннях на холодостійкість визначають значення однієї з механічних характеристик, наприклад, деформацію при даному навантаженні при нормальній температурі l_n і при пониженій температурі l_p , а потім коефіцієнт холодостійкості розраховують як відношення $k_x = l_p / l_n$. Для полімерних діелектриків холодостійкість можна оцінювати по температурі крихкості.

Перевірку електроізоляційних матеріалів і виробів з них на холодостійкість нерідко здійснюють при одночасному впливі вібрацій, оскільки саме динамічна дія механічних факторів є визначальною у цих обставинах.

Теплопровідність – властивість діелектрика відводити теплоту від нагрітих провідників і магнітопроводів через шар електричної ізоляції, а також відводити теплоту з товщі електричної ізоляції, нагрітої за рахунок діелектричних втрат.

Тепло, яке виділяється внаслідок втрат потужності в оточених електричною ізоляцією провідниках і магнітному осерді, а також внаслідок діелектричних втрат в ізоляції, переходить у навколишнє середовище. Теплопровідність впливає

на електричну міцність при тепловому пробої і на стійкість матеріалу до теплових імпульсів.

Таблиця 5.2 – Середні значення коефіцієнту теплопровідності для деяких матеріалів

Матеріал	Теплопровідність Вт/м·К	Матеріал	Теплопровідність Вт/м·К
Алмаз	1000-2600	Вода	0,6
Срібло	430	Фарфор	1,6
Мідь	390	Кварцове скло	1,16
Золото	320	Гетинакс	0,35
Алюміній	236	Папір	0,10
Латунь	111	Лакотканина	0,13

Теплопровідність матеріалів характеризується коефіцієнтом теплопровідності λ , що входить у рівняння Фур'є:

$$\Delta P_T = \lambda \frac{dT}{dt} \Delta S, \quad (5.7)$$

ΔP_T – потужність теплового потоку крізь площадку ΔS , нормальну до потоку;

$\frac{dT}{dt}$ – градієнт температури.

Гази мають надзвичайно малу молекулярну теплопровідність, порядку 0,05 – 0,5 Вт/(м·К), яка проявляється в умовах, коли молекули газу не можуть приймати участь в упорядкованих макроскопічних рухах, наприклад в об'ємах менше 1 мм³.

Теплопровідність рідких діелектриків знаходиться в межах 0,08 – 0,7 Вт/(м·К), води від 0,56 Вт/(м·К) при 0° до 0,68 Вт/(м·К) при 100° С.

Теплопровідність твердих діелектриків залежить від їх структури, складу і будови. Полімерні діелектрики мають

теплопровідність на рівні десятих часток Вт/(м·К), пластмаси – на рівні десятих часток – одиниць Вт/(м·К), неорганічні діелектрики – від одиниць до десятків і дуже рідко від десятків до сотень Вт/(м·К), як, наприклад, для керамічних оксидів металів (Al_2O_3 , MgO , BeO). Перехід від аморфних до кристалічних речовин приводить до зростання теплопровідності. Тверді пористі діелектрики через низьку молекулярну теплопровідність газів в їх порожнинах мають також низьку теплопровідність, на рівні сотих – десятих часток Вт/(м·К). При просоченні пористих матеріалів, наприклад в конденсаторах, їх теплопровідність зростає.



Рисунок 5.7 – Схема для визначення теплопровідності

Для практичного визначення теплопровідності використовують стаціонарні і нестаціонарні методи, що в свою чергу можуть бути абсолютними та відносними. Стаціонарні методи характеризуються стабільністю розподілу теплового поля, що використовують для розрахунку λ , в діелектрику (рисунок 5.7). Наприклад, для плоского зразка діелектрика у вигляді круга чи прямокутника з товщиною h меншою 0,1 найбільшого іншого лінійного розміру, наприклад діаметра, при температурах стінок T_1 і T_2 відповідно до формули (5.7) маємо:

$$\lambda = \frac{P_{\text{т}} h}{(T_1 - T_2) S}. \quad (5.8)$$

Для підвищення точності використовують абсолютний метод двох зразків (рисунок 5.8, б), в якому нагрівач розташований між двома, однаковими за властивостями та розмірами, зразками діелектрика.

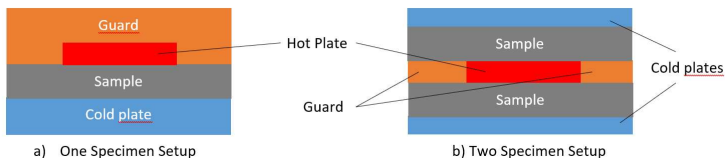


Рисунок 5.8 – Метод вимірювання теплопровідності матеріалу в стаціонарному режимі

У цьому випадку:

$$\lambda = \frac{P_T - P_{nc}}{(\Delta T_1/h_1 - \Delta T_2/h_2)S'} \quad (5.9)$$

де P_{nc} – втрати теплоти в навколишнє середовище, що визначаються за температурою поверхні діелектрика і коефіцієнтом теплопередачі.

У відносному стаціонарному методі λ вимірюють для зразка, що розташований між двома еталонними зразками, наприклад з поліметилакрилату ($\lambda = 0,198$ Вт/(м·К)): вимірюють падіння температур на робочому ΔT_p і еталонних ΔT_{et} зразках матеріалів і розраховують λ за формулою:

$$\lambda = \lambda_{et} \frac{\Delta T_{et}}{\Delta T_x} \quad (5.10)$$

Основними недоліками стаціонарних методів визначення λ , крім складності створення однорідного теплового поля, компенсації втрат теплоти в неробочих напрямках, що є притаманним для всіх методів, є значні витрати часу на вимірювання та велика кількість термопар для вимірювання температури поверхонь.

Нестационарні методи дають можливість отримати інформацію не тільки про λ , а й про теплоємність, густину і температуропровідність, проте вони значно складніші в реалізації.

Відведення теплоти від поверхні діелектрика характеризується **коефіцієнтом тепловіддачі**:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta}, \quad (5.11)$$

де δ – товщина пограничного шару.

Теплопередача може здійснюватися в трьох варіантах: молекулярна, конвективна і теплопередача випромінюванням.

Молекулярна тепловіддача можлива в умовах, коли в навколишньому середовищі не можуть утворюватися конвективні потоки, наприклад у вузьких прошарках газу, а температура поверхні діелектрика недостатня для виникнення інтенсивної теплопередачі випромінюванням.

За умови, що в навколишньому середовищі вільно утворюються конвективні потоки в результаті його нагрівання поверхнею діелектрика, значення коефіцієнта теплопередачі у повітрі знаходиться в межах 8–30 Вт/(м²·К). При вимушеній конвекції, тобто при продуванні повітря вентилятором чи компресором вздовж поверхні діелектрика, коефіцієнт теплопередачі може досягати 10 – 500 Вт/(м²·К).

Конвективний коефіцієнт теплопередачі від діелектрика в рідину, наприклад воду, з поверхні діелектриків при вільній конвекції може становити 100 – 1000 Вт/(м²·К), а при вимушеній – від 500 до 20000 Вт/(м²·К). Найінтенсивніше відведення теплоти має місце при плівковій конденсації водяної пари, коли коефіцієнт теплопередачі становить 4·10³ – 10⁴ Вт/(м²·К), а при капельній навіть 4·10⁴ – 10⁵ Вт/(м²·К). Внаслідок збільшеного

коефіцієнта теплопередачі рідкі діелектрики широко використовуються як основна ізоляція в трансформаторах і деяких апаратах.

Теплоємність діелектриків може бути молярною при сталому тиску C_p , Дж/(моль·К), молярною при сталому об'ємі C_v , Дж/(моль·К) або просто питомою масовою чи об'ємною теплоємністю c . Різниця між C_p і C_v є тільки для газоподібних діелектриків, для рідких і твердих діелектриків вона не суттєва.

Питома масова і питома об'ємна теплоємності визначаються при відповідних умовах:

$$c = \frac{P_T}{\Delta T \cdot V} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right] \quad \text{або} \quad c = \frac{P_T}{\Delta T \cdot m} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]. \quad (5.12)$$

Величиною, яка тісно пов'язана з теплопровідністю і теплоємністю є **температуропровідність**:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \left[\frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right] \quad (5.13)$$

де ρ – густина діелектрика. Температуропровідність характеризує співвідношення між здатностями діелектрика проводити теплоту та акумулювати її, визначає швидкість прогрівання чи охолодження діелектрика і розподіл температури в ньому.

В електрообладнанні різні діелектрики часто використовують разом, наприклад поліетилен, як ізоляцію, і полівінілхлорид, як захисну оболонку кабелю, або в комбінації з провідниковими матеріалами – мідна або алюмінієва жила і поліетиленова ізоляція кабелю, фарфорове чи скляне ізоляційне тіло і чавунна арматура в ізоляторах тощо. В таких випадках для надійної роботи обладнання суттєве значення має виникнення термомеханічних напружень внаслідок різного теплового розширення матеріалів, що може привести до їх деформації чи навіть розтріскування у випадку неорганічних діелектриків.

Теплове розширення діелектричних матеріалів визначає теплостійкість діелектриків і їх стійкість до термоударів і оцінюється **температурним коефіцієнтом лінійного розширення** ТКЛР, K^{-1} , який характеризує відносне подовження зразка при нагріванні на 1 К:

$$TKLP = \alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}, \quad (5.14)$$

де l – довжина випробувального зразка, м.

Значення ТКЛР лінійного розширення необхідно знати при конструюванні електроустановки, що працює в широкому діапазоні температур. У цьому випадку добирають матеріали з приблизно однаковими коефіцієнтами лінійного розширення, щоб запобігти термомеханічним напруженням, або передбачають спеціальні конструктивні заходи для їх зменшення.

Для неорганічних діелектриків інколи доводиться конструктивно забезпечувати можливість вільного руху контактних деталей, як, наприклад, в підвісних лінійних ізоляторах, де обернене конічне з'єднання забезпечує перетворення розтягуючих зусиль, що виникають у стрижні при підвищенні проводу, в стискаючі і вільний ковзний рух верхньої конічної частини стрижня в головці ізолятора при зміні температури ізолятора.

Матеріали з малим значенням ТКЛР мають більш високу **стійкість до термоудару** (табл. 5.3), яку можна охарактеризувати перепадом температур, що може витримати діелектрик без руйнування:

$$\Delta T = k \frac{\sigma_p}{\alpha_l E} \sqrt{\frac{\lambda}{c \cdot \rho}}, \quad (5.15)$$

де k – константа; σ_p – розривна напруга при розтягуванні, МПа; α_l – ТКЛР, K^{-1} ; E – модуль пружності, МПа; λ – теплопровідність, Вт/(м·К); c – теплоємність, кДж/(кг·К); ρ – густина kg/m^3 .

Стійкість до термоудару тим вища, чим більша механічна міцність матеріалу і його температуропровідність та чим нижчі модуль Юнга і ТКЛР, тому високу стійкість до термоудару мають органічні термопластичні матеріали. Серед неорганічних діелектриків можна виділити кварц, нітрид кремнію, оксид берилію тощо.

На практиці стійкість до термоударів визначається для крихких матеріалів шляхом їх різкого нагрівання або охолодження. Наприклад, лінійні ізолятори повинні витримати трьохкратне нагрівання і охолодження шляхом занурення в крижану воду без погіршення своїх властивостей, про що повинні свідчити результати наступних оглядів і випробувань високою напругою. Температура і час нагрівання залежать від маси виробів.

Таблиця 5.3 – Температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалів $\alpha_l \cdot 10^6, K^{-1}$

Неорганічні матеріали		Органічні матеріали	
Кварцове скло	0,55	Епоксидні смоли	55
Фарфор	3,5	Пластмаси	55-70
Стеатит	7	Політетрафторетилен	100
Силікатні стекла	9,2	Поліетилен	100-145

В процесі роботи діелектрики можуть нагріватися по різному: швидке нагрівання до високих температур, досить тривала робота при підвищених температурах, різке охолодження тощо. Тому для них в залежності від характеру нагрівання потрібно враховувати такі теплофізичні характеристики, як температура розм'якшення, температура

каплепадіння, температура плавлення, температура крихкості, температура склування, температура спалаху пару, температура займання, теплостійкість, термостійкість, холодостійкість та нагрівостійкість.

Температура розм'якшення бітумів, воску та деяких видів термопластичних компаундів визначається методом «кільця і кулі» (рисунок 5.9) за температурою, при якій стальна кулька діаметром 9,5 мм проходить через кільце, заповнене випробувальним матеріалом при нагріванні в середовищі термостатувальної рідини (вода, гліцерин тощо) від 5 °C зі швидкістю $5 \pm 0,5$ °C/хв. Варіантом цього метода є метод ртутного шару, коли ртуть наливається поверх діелектрика і при нагріванні його при температурі, яка приймається за температуру розм'якшення, продавлює діелектрик і переходить на дно посудини.



Рисунок 5.9 – Прилад для визначення температури розм'якшення матеріалів за методом «Кільце та куля»

Для пластмас температура розм'якшення визначається за методом Віка (рисунок 5.10) при підвищенні температури зі швидкістю $5\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$, як температура, при якій індентор (тіло, що вдавлюється в дану речовину) у вигляді циліндра діаметром $1,13\text{ мм}$ і довжиною 3 мм під дією навантаження 10 або 50 Н проникає в матеріал на глибину 1 мм .

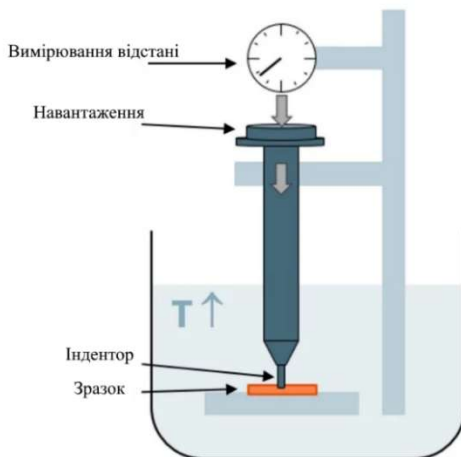


Рисунок 5.10 – Визначення температури розм'якшення за методом Віка

Для полімерних діелектриків визначають температури плинності, плавлення, склування і крихкості.

При **температурі плинності** $T_{\text{пл}}$ полімер повністю втрачає пружну деформацію, залишається тільки пластична. В цьому стані він переробляється: ллється, пресується, формується, екструдується тощо. **Температура плавлення** $T_{\text{пв}}$ кристалічних утворень (кристаліти, сфероліти) в полімерних діелектриках може бути нижчою або вищою температури плинності. Наприклад, фторопласт-4 плавиться при температурі $327\text{ }^{\circ}\text{C}$ і сублімується (переходить з твердого до газоподібного стану)

тільки при 415 °С, але при цьому зовсім не переходить у в'язкоплинний стан.

При зниженні температури нижче **температури склування** T_c кристалічний полімер переходить у твердий і крихкий стан, втрачаючи пластичну деформацію, але може експлуатуватися і при нижчих температурах аж до **температури крихкості** $T_{крх}$, коли його механічна міцність стає незадовільною.

Різниця $T_c - T_{крх}$ визначає **температурний інтервал примусової еластичності**. Чим вона більша, тим ширше температурний інтервал експлуатації полімеру і тим більш цінним є полімер. Цей температурний інтервал зростає зі збільшенням величини сегмента молекулярного ланцюга. Якщо від T_c залежить верхня межа робочого температурного інтервалу полімера, що експлуатується в скловидному стані, то $T_{крх}$ у багатьох випадках визначає його нижню межу (табл. 5.4).

Таблиця 5.4 – Значення температури склування T_c , крихкості $T_{крх}$ і температурного інтервалу примусової еластичності $T_c - T_{крх}$ деяких полімерів

Полімер	$T_c, ^\circ\text{C}$	$T_{крх}, ^\circ\text{C}$	$T_c - T_{крх}, ^\circ\text{C}$
Полістирол	80-90	-40	120
Поліметилметакрилат	100	10	90
Полівінілхлорид	81	-90	170
Гума ненаповнена на основі:			
– натурального каучуку НК	-62	-80	18
– бутадієнового каучуку СКС	-39	-112	73
– бутадієн-стирольного каучуку СКС-30	-49	-135	86

Для рідинних горючих речовин дуже важливими експлуатаційними характеристиками є **температура спалаху** $T_{сп}$ і **температура займання** $T_{зм}$. Для визначення температури

спалаху рідину нагрівають у відкритому тиглі зі швидкістю $10\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$ до температури $(T_{\text{сп}} - 40)\text{ }^{\circ}\text{C}$, де $T_{\text{сп}}$ – очікуване значення температури спалаху, потім знижують швидкість нагрівання до $4\text{ }^{\circ}\text{C/хв}$, при температурі $(T_{\text{сп}} - 10)\text{ }^{\circ}\text{C}$ на відстані $10 - 14\text{ см}$ від поверхні рідини проводять полум'ям запалювального пристрою від однієї сторони тигля до іншої за $2-3\text{ с}$, повторюючи цю операцію через кожні $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. За температуру спалаху приймають температуру, при якій над поверхнею рідини перший раз з'явиться голубе полум'я.

Для визначення **температури займання** продовжують нагрівати рідину і підносити полум'я через кожні $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температуру, при якій загориться сама рідина і буде продовжувати горіти не менше 5 с , вважають температурою займання.

Підвищення температур спалаху і займання приводять до зменшення небезпеки пожежі, але не зменшують пожежної небезпеки трансформаторного масла, що горить.

5.3 Фізико-хімічні властивості діелектриків

До фізико-хімічних характеристик діелектриків належать кислотність, гігроскопічність, водопоглинання, хімічна стійкість, тропічна стійкість, розчинність, світлостійкість, радіаційна стійкість тощо.

Кислотність (кислотне число) – характеристика рідких діелектриків, компаундів і лаків. Кислотне число визначають кількістю міліграмів гідроксиду калію, необхідного для нейтралізації всіх вільних кислих з'єднань, що входять до складу 1 г рідкого діелектрика й погіршують його електроізоляційні властивості. Що менше кислотне число, то вища якість діелектрика. Наприклад, для трансформаторного масла кислотне

число має бути не більше 0,05 мг/г. Високе кислотне число є ознакою поганого очищення масла під час його виготовлення або ознакою «старіння».

Вологоємні властивості діелектриків визначаються гігроскопічністю, водопоглинанням і вологопроникністю.

Гігроскопічність – здатність матеріалу поглинати пари води з навколишнього середовища. Зволоження діелектриків погіршує їхні діелектричні властивості. Пористі матеріали більш гігроскопічні, ніж щільні. Багато електроізоляційних матеріалів саме гігроскопічні. Для захисту поверхні електроізоляційних деталей від впливу вологи їх покривають лаками, які не змочуються водою. Матеріали, що не мають пор (скло, кераміка), накопичують вологу з довкілля на своїй поверхні, не пропускаючи її в глиб матеріалу.

Гігроскопічність матеріалу визначають за формулою:

$$W_r = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 100\%}{m_1}, \quad (5.16)$$

де m_1 – маса сухого зразка матеріалу, г;

m_2 – маса зразка після тримання його в умовах відносної вологості 96–98 % протягом 24–48 год (г).

Водопоглинання – здатність ізоляції вбирати (поглинати) воду. Інколи електроізоляційні матеріали безпосередньо стикаються з водою (атмосферні опади, ізоляція деталей водяних насосів тощо).

Водопоглинання визначають за формулою:

$$W_b = \frac{(m_3 - m_1) \cdot 100\%}{m_1}, \quad (5.17)$$

де m_1 – маса сухого зразка матеріалу, г;

m_3 – маса зразка, г, після тримання його у воді протягом 24 год.

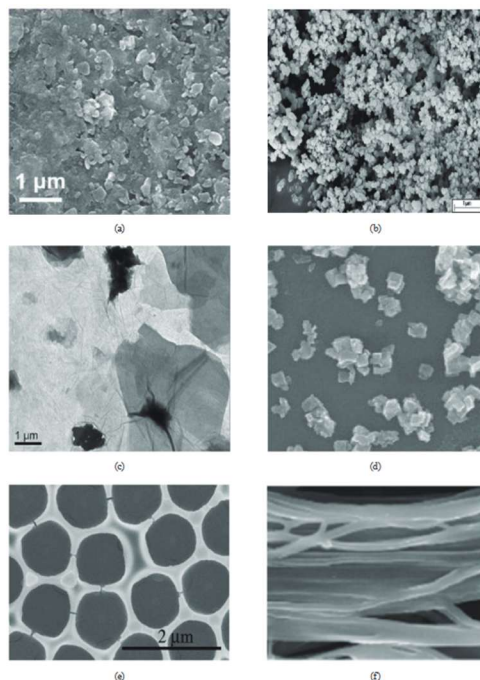


Рисунок 5.11 – Наноструктури різних матеріалів, які можуть проявляти гігроскопічну поведінку: (а) BaTiO_3 , (б) алюміній гідроксид, (с) оксид графену, (d) оксид індію (In_2O_3), (е) плівка TiO_2 , (f) поліімідні нановолокна

Вологопроникність – здатність діелектрика пропускати крізь себе пари води. Ця характеристика дуже важлива для оцінювання якості матеріалів, які застосовують для захисних покриттів: зовнішні шланги кабелів, лакові покриття деталей тощо. Вологопроникність практично дорівнює нулю лише для скла та добре випаленої кераміки. Кількість вологи m , яка проходить за час t крізь поверхню S шару ізоляційного матеріалу

товщиною h під дією різниці тиску водяних парів P_1 і P_2 з обох боків цього шару, можна розрахувати за формулою:

$$m = \Pi \cdot \frac{(P_1 - P_2) \cdot S}{h} \cdot \tau, \quad (5.18)$$

де коефіцієнт Π – вологопроникності матеріалу.

У системі СІ вологопроникність вимірюють у секундах. Для твердих органічних діелектриків вологопроникність має порядок значень 10^{-13} – 10^{-16} с. Для зменшення гігроскопічності й вологопроникності пористих і волокнистих ізоляційних матеріалів широко застосовують їхнє просочення.

Різні діелектричні матеріали при зіткненні між собою в процесі виготовлення або експлуатації виробів можуть частково або повністю проникати один в одного. Таку властивість називають розчинністю, вона важлива для підбору розчинників лаків або для оцінювання стійкості електроізоляційних матеріалів до дії різних рідин, з якими вони контактують. Найлегше розчиняються речовини, близькі до розчинника за хімічною природою.

Електроізоляційні матеріали мають різну стійкість до руйнування (корозії) під час контактування з кислотами, лугами, сольовими розчинами, маслами, паливом і газами.

Хімічна стійкість – це здатність електроізоляційних матеріалів протистояти дії хімічно активних речовин. Зразки матеріалів поміщають у середовище, подібне до експлуатаційного або більш інтенсивне за концентрацією хімічно активних елементів і несприятливе за температурними умовами. Зразок витримують певний час, потім визначають зміни маси, зовнішнього вигляду й інших показників.

Тропічну стійкість діелектрика визначають за зміною значень його параметрів під впливом тропічних кліматичних факторів. Для районів із тропічним вологим або сухим кліматом,

морським кліматом характерні такі фактори, як холод, спека, волога, атмосфера, насичена морською сіллю, пустельним або степовим пилом, піском, попелом, хімічними сполуками; вплив мікроорганізмів – цвілевих грибів, бактерій; наявність шкідників тваринного світу – термітів, мурах, тарганів, гризунів та ін.

Здатність матеріалів зберігати свої експлуатаційні характеристики під дією світлового опромінення називають **світлостійкістю**. Світлові й особливо ультрафіолетові промені можуть викликати фотопровідність, хімічні зміни в деяких органічних діелектриках, а також стимулювати процеси, які погіршують їхню механічну міцність та еластичність. Світлове опромінення прискорює «старіння» електроізоляційних матеріалів.

Сучасна техніка може зазнавати впливу корпускулярного або хвильового випромінювання високої енергії, яке змінює фізичні й хімічні властивості матеріалів. Ступінь стійкості фізико-хімічних властивостей діелектриків, ступінь збереження ними електричних, механічних та інших експлуатаційних властивостей до впливу йонізуючого випромінювання називають **радіаційною стійкістю**.

Вплив випромінювання може супроводжуватися хімічними перетвореннями – розриваються та переміщуються хімічні зв'язки, утворюються вільні радикали, відбувається виділення газів, вулканізація. Найбільш вразливі до випромінювання органічні діелектрики (наприклад, полімери). Найстійкіші до опромінення неорганічні діелектрики: кварц, глинозем, слюда й слюдяні матеріали. Вплив випромінювання призводить у них до зниження питомого опору й електричної міцності, але після прогрівання опромінених неорганічних

діелектриків за високих температур (відпалу) у них можливе відновлення первинних властивостей.

Питання для самоперевірки:

1. Якими поняттями характеризують механічні властивості матеріалів?
2. Що таке механічна міцність матеріалу, межа міцності?
3. Що таке пластичність? Як оцінюють пластичність матеріалів?
4. Що таке твердість? Які методи використовуються для її вимірювання?
5. Дайте визначення таким поняттям, як теплостійкість та нагрівостійкість. Які ви знаєте класи нагрівостійкості?
6. Поясніть залежність швидкості старіння діелектрика від температури.
7. Як впливає волога на електроізоляційні матеріали? Які вам відомі засоби захисту від вологи?

РОЗДІЛ 6. ГАЗОПОДІБНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

Види діелектриків, що використовуються для створення ізоляції електрообладнання (електроустаткування), прийнято поділяти на газоподібні, рідкі та тверді. До окремого виду, який слід називати діелектричним середовищем, відноситься вакуум.

Із газоподібних діелектриків для утворення зовнішньої ізоляції використовується повітря, а для внутрішньої ізоляції – повітря, вуглекислий газ, елєгаз. Створення внутрішньої ізоляції відбувається також з використанням вакууму.

До газоподібних діелектриків належать усі гази, зокрема повітря (суміш газів і водяної пари). Повітря заповнює весь простір, проникає в пори, заповнює пустоти, розчиняється в рідинах, оточує всі електричні установки, проводи високовольтних ЛЕП. Повітря знаходиться між контактами при їх розмиканні в багатьох електричних апаратах (вимикачі, пускачі). Але найчастіше повітря є все ж допоміжним, а не основним діелектриком.



Рисунок 6.1 – Приклад газової (повітряної) ізоляції ЛЕП

До переваг газових діелектричних матеріалів відносяться надзвичайно високі значення електрофізичних властивостей при низьких (до 1000 В) напругах:

- дуже високий питомий електричний опір ($10^{15} - 10^{17}$ Ом·м);
- мале значення відносної діелектричної проникності (~ 1) і дуже малий $\text{tg}\delta$ ($<10^{-5}$);
- мала густина, що особливо важливо для бортової апаратури.

До основних недоліків газоподібної ізоляції можна віднести:

- низьку електричну міцність (3 – 7,8 кВ/мм);
- відсутність конструкційних властивостей, тобто можливостей сприймати і витримувати механічні навантаження;
- необхідність герметизації (крім повітря при атмосферному тиску);
- підвищена вартість (крім повітря, яке практично безкоштовне).

Основні характеристики газів, що використовуються як електротехнічні матеріали, наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Порівняльна таблиця властивостей газів

Газ	Відносна густина	Діелектрична проникність	Відносні до характеристик повітря значення			
			Електрична міцність	Теплопровідність	Теплоємність	Коефіцієнт тепловіддачі
Повітря	1,0	1,00057	1,0	1,0	1,0	1,0
Азот	0,97	1,00058	1,0	1,08	1,05	1,03
Водень	0,069	1,00026	0,6	6,69	14,35	1,51
Елегаз	5,03	1,00191	2,4	1,25	0,6	–
Фреон	–	–	2,6	–	–	–

Варто зазначити, що важливими властивостями газів є їхня здатність відновлювати електричну міцність, мала діелектрична проникність, високе значення питомого опору, відсутність «старіння», інертність деяких газів щодо твердих і рідких

матеріалів, здатність працювати за низьких температур і під час високого тиску, нетоксичність, негорючість. Багато газів (повітря, елєгаз тощо) використовують як діелектрики в газонаповнених конденсаторах, автоматичних вимикачах. Ще одне призначення газоподібних діелектриків – це охолодження різних пристроїв та апаратури.

Газам властива електронна поляризація, це пов'язано з тим, що гази мають малу питому густину. Однак, попри це, їх поділяють на неполярні (O_2 , H_2 , Cl_2) і полярні (CO , HF , H_2S). Гази мають надзвичайно малу провідність, що пов'язано з дуже низькою концентрацією носіїв заряду. Поява носіїв у газі відбувається за рахунок йонізації нейтральних молекул під дією зовнішніх факторів або при зіткненні заряджених часток із молекулами. Основним фактором, що визначає провідність газів, є космічне випромінювання.

Йонізація значно збільшується при нагріванні газу. Електропровідність газу, обумовлену цим явищем, називають **несамостійною**. Під дією сильних електричних полів заряджені частинки можуть набувати більших швидкостей та утворювати нові йони при зіткненнях із нейтральними молекулами. Електропровідність газу, обумовлену цим явищем, називають **самостійною**. У слабких електричних полях ударна йонізація відсутня.

Одночасно з утворенням носіїв зарядів відбувається протилежний процес – об'єднання заряджених частинок у нейтральні молекули. Цей процес називають рекомбінацією. Наявність рекомбінації пояснює встановлення певного рівня йонів через короткий час після початку дії зовнішнього йонізатора.

6.1 Повітря

Повітря являє собою утворену природним шляхом суміш ряду газів (основна частина це кисень і азот) з домішками, що не є газами (наприклад волога, аерозолі).

Повітря створює супутню ізоляцію в лініях електричних мереж, що діє паралельно з твердою ізоляцією, яка представлена підвісними або штирьовими ізоляторами. На властивості повітря і його взаємодію з твердою ізоляцією електричних мереж найбільше впливає волога. Повітря завжди супроводжує роботу електротехнічного та електроенергетичного обладнання.

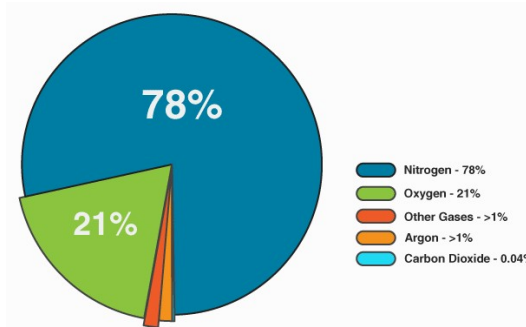


Рисунок 6.2 – Склад атмосферного повітря

Основним недоліком повітря є його хімічна активність, зумовлена наявністю кисню і низька електрична міцність в неоднорідних полях, тому в герметизованих пристроях повітря використовується рідко.

Основні властивості повітря: густина – 1.293 кг/м^3 , електрична міцність – 3 кВ/мм ; теплопровідність – $0.0257 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; теплоємність $1.01 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$; коефіцієнт розвиненої конвективної тепловіддачі $10 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$.



Рисунок 6.3 - Повітряний діелектричний коаксіальний кабель HELIAX для 2,7 ГГц і нижче

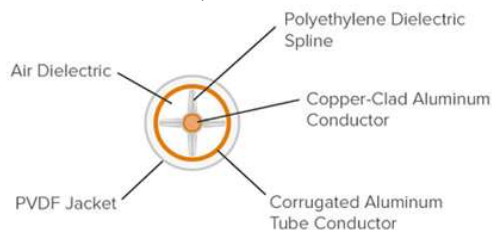


Рисунок 6.4 – Коаксіальний кабель Wilson 1/2"

6.2 Водень

Водень давно й успішно використовується як джерело або носій енергії, робочий сировинний компонент у нафтовій промисловості, виробництві мінеральних добрив, органічної хімічної промисловості, металургії, електроніці, виробництві скла, космічної індустрії і атомній енергетиці.

На частку екологічно чистих методів отримання водню припадає менше ніж 1 % від загального обсягу виробництва.

Це дуже легкий газ, що володіє вельми сприятливими властивостями для використання як середовище, що охолоджує, замість повітря. Водень характеризується високими значеннями питомої теплопровідності і теплоємності. При використанні водню охолодження електричних машин, що обертаються, істотно поліпшується. Крім того, при заміні повітря воднем помітно знижуються втрати потужності на тертя ротора машини об газ і на вентиляцію, оскільки ці втрати приблизно пропорційні щільності газу. Унаслідок відсутності окислюваної дії кисню повітря сповільнюється старіння органічної ізоляції обмоток машини і усувається небезпека пожежі у разі короткого замикання усередині машини. У атмосфері водню поліпшуються умови роботи щіток. Тому водневе охолодження дозволяє підвищити потужність машини та її к.к.д. Крупні турбогенератори, синхронні компенсатори і тому подібне виконуються з водневим охолодженням (ще ефективніше охолодження досягається циркуляцією рідини усередині порожнистих провідників обмоток статора і, іноді, ротора). Застосування циркуляційного водневого охолодження вимагає герметизації машини (підшипники ущільнюються за допомогою масляних затворів). Щоб уникнути попадання всередину машини повітря (водень при змісті його в повітрі від 4 до 74% за об'ємом утворює вибухову суміш – гримучий газ), усередині машини підтримується деякий надмірний тиск понад атмосферний, поступовий витік водню заповнюється подачею газу з балонів. За інших рівних умов електрична міцність водню приблизно на 40%, а вугільного ангідриду CO_2 – на 10% нижче, ніж електрична міцність повітря.

Починаючи з 2021 року Міністерство енергетики за підтримки міжнародних партнерів почало розробляти Водневу стратегію України

Водень (H_2) у вільному стані практично не зустрічається, тому він не є прямим джерелом енергії, а виступає лише енергоносієм. На відміну від електрики, водень – джерело хімічної енергії. Потенціал H_2 проявляється у вигляді засобу накопичення енергії, особливо при використанні в нестабільних енергосистемах з використанням енергії сонця та вітру. Саме водень, який виробляється з ВДЕ, називають "зеленим", "чистим" або відновлюваним воднем.



Перший вітроводневий комплекс в Європі мав запрацювати в Україні ще в 1994 році. Було створено пілотний вітропарк з 8 вітрогенераторів загальною потужністю 160 кВт на науково-дослідному полігоні "Десна". Вчені з НТУУ «КПІ» випробовували лужні та кислотні акумулятори, а також вивчали схеми акумулювання на основі водневих технологій. Електролізер для отримання водню було виготовлено у Харкові. Потужність установки мала задовольнити потреби локального споживання - кількох лабораторних споруд. На жаль, пілотний проєкт з відновлюваного водню не змогли запустити в Україні через невизначеність рівня безпеки водневого проєкту. Проте розробка зацікавила Данський центр з відновлюваної енергії Folkecenter, станції було втілено на їх базі. Це був перший досвід роботи електролізера з вітрогенератором, тобто перша в Європі вітроводнева станція, для якої українські спеціалісти поставили електролізер та виконали монтаж установки.

Автомобільний, залізничний, трубопровідний, водний, повітряний транспорт, системи автономного енергопостачання для приватного житла – перелік застосувань водню постійно розширюється. Відповідно, експоненціально зростає кількість користувачів і операцій з воднем, кількість необхідних інфраструктурних об'єктів.

Основні галузі промисловості, що потребують значних об'ємів H_2 : нафтопереробка; виробництво аміаку; метанолу та сталі. Наразі водень у промислових масштабах виробляється з використанням викопного палива, тому, наголошує на потенціалі скорочення викидів за рахунок переходу на "чистий" водень.

На транспорті конкурентоспроможність автомобілів на водневих паливних елементах залежить від вартості паливних елементів і заправних станцій, а також вартості доставки самого водню.

У будівлях водень можна використовувати у сумішах з природним газом, експлуатуючи існуючі мережі. Найбільший потенціал – у багатоквартирних і комерційних будівлях, особливо у густонаселених містах.

Важливу місію виконує водень у виробництві електроенергії. Водень – один з провідних варіантів зберігання відновлюваної енергії, а водень і аміак можна використовувати в газових турбінах для підвищення гнучкості енергосистеми

Масштабне виробництво та використання водню в Україні у комплексі з потужним розвитком відновлюваної енергетики дозволить декарбонізувати енергетичний сектор, інфраструктурну галузь та промисловість. Так влітку 2020 року ДТЕК першою з українських компаній приєдналася до асоціації Hydrogen Europe.

Україна має значний природний потенціал для виробництва енергії з ВДЕ, що дозволяє виробляти відновлюваний водень. Загальний потенціал середньорічного виробництва "зеленого" водню становить близько 505 млрд кубометрів.

Представлені дані свідчать, що територія України може стати майданчиком для виробництва відновлюваного водню не тільки для власних потреб у чистій енергії, але й для експорту на ринок Євросоюзу.

Існує також пілотний проєкт "Сонце-водень-аміак" - проєкт сонячної станції потужністю до 125 МВт в Херсонській області.

Мета проєкту – виробництво "зеленого" водню на півдні України за рахунок власної сонячної генерації та його постачання до ЄС та на внутрішній ринок.



Рисунок 6.5 – Розподіл потенційного середньорічного виробітку відновлюваного водню в Україні (за даними на 2021 р.)

Для транспортування газоподібний водень пропонують перетворювати в рідкий стан: аміак або толуол. Завод розташований недалеко від логістичних центрів, що забезпечує оптимальну доставку як до ЄС, так і на внутрішній ринок.

Для транспортування "зеленого" водню компанія пропонує різні рішення: у газоподібному чи скрапленому стані, перетвореним на аміак (NH_3) чи збереженим в рідких органічних носіях (ЛОНС).

Переваги застосування водню:

- водень не утворює парникових газів при спалюванні, тому є безпечним з точки зору впливу на зміну клімату
- водень є найбільш поширеним хімічним елементом у світі, є багато джерел і технологій його отримання
- водень дає втричі більше енергії, ніж вуглеводні (на одиницю ваги)
- водень можна накопичувати, зберігати і транспортувати на великі відстані (як у чистому вигляді, так і у вигляді аміаку)
- водень може знайти широке застосування в металургії та хімічній промисловості.

Але для широкого комерційного використання цих переваг необхідно подолати значну кількість технічних проблем, головними з яких є екологічна шкідливість сучасних технологій виробництва водню і високі витрати на виробництво екологічно чистого водню.

У промислових процесах поводження з воднем досить добре вивчено й регулюється. Але навіть у давно використовуваних промислових процесах, потенційна небезпека, пов'язана з воднем, підносить сюрпризи. Наприклад, катастрофічні руйнування на трьох енергоблоках АЕС Фукусіма-1 у 2011 році, хоча й були наслідком цілого ланцюжка негативних

позапроектних чинників, у кінцевому підсумку, відбулися через вибухи водню, що з'явився в результаті паро-цирконієвої реакції.



Рисунок 6.6 – Візуалізація заводу з виробництва "зеленого" водню на півдні України за рахунок власної сонячної генерації

З точки зору діелектричних властивостей, електрична міцність водню становить всього 0,54 від електричної міцності повітря, він має надзвичайно високі теплофізичні характеристики – його теплоємність в 14,35 раз, а теплопровідність в 6,8 раз більші, ніж у повітря. Водень використовують для охолодження в електричних машинах великої потужності. Крім того, використання водню зменшує втрати потужності на тертя ротора в газі і внаслідок відсутності кисню приводить до уповільнення теплового старіння органічних складових ізоляції. Але враховуючи горючість і можливість утворення гримучого газу, в машині весь час необхідно підтримувати надлишковий тиск, що можна віднести до недоліків водню.

В 1935 році американський фізик Юджин Вігнер та його колега доктор Хіллارد Белл Хантінгтон обґрунтували теорію про те, що за певних умов водень може переходити в стан металу і мати надпровідність. З того часу було багато спроб реалізувати перехід водню в метал на практиці. У 2017 році видання Science написало про те, що вченим з Гарвардського університету США це вдалося шляхом стиснення водню в лещатах з двох алмазів при дуже високому тиску. За словами вчених, під впливом тиску водень став непрозорим, що свідчить про його перехід в металеву форму. На жаль, при спробі витягти дослідний зразок один з алмазів розсипався, а сам металоводень зник.

Два роки по тому, 13 червня 2019 року на порталі Корнельського університету з'явилося повідомлення про те, що вченим вдалося виділити передбачуваний металевий водень шляхом стиснення під величезним тиском і за дуже низьких температур.

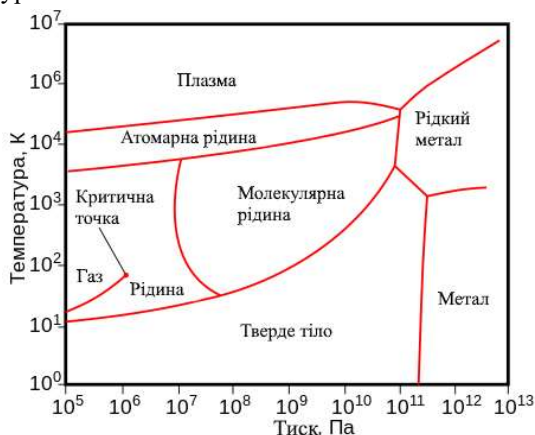


Рисунок 6.7 – Фазова діаграма водню

В результаті експерименту водень набув металевих властивостей: блиск і здатність відбивати світло, а також проводити електрику. Якщо дослідження підтвердиться, світ, нарешті, отримає невловимий металевий водень, який передбачали фізики-теоретики на початку XX століття.

29 січня 2020 року онлайн-видання Nature повідомило про дослідження команди французьких вчених, яким вдалося знайти докази фазового переходу водню при тиску 425 гігапаскалів в металевий водень.

Вчені мають намір повторити дослід і заодно перевірити, чи проводить металевий водень електрику. Вчені б'ються над отриманням металевого водню з однієї причини - через припущення про його надпровідні властивості. Сьогодні електрика, проходячи крізь кабелі і проводи, втрачає енергію здебільшого у вигляді тепла завдяки опорі матеріалу. Саме тому так складно передавати електрику на великі відстані. Але струм, що проходить через надпровідний матеріал, практично не втрачає енергію.

На відміну від інших відомих надпровідників, які мають охолоджуватися до дуже низьких температур, передбачається, що металевий водень може бути надпровідником за кімнатної температури. Саме в цьому головна мета вчених – знайти надпровідник, який не потребує ані охолодження, ані високого тиску. Якщо такі матеріали будуть відкриті, вони можуть заощадити величезну кількість енергії і грошей.

6.3 Азот

Крім повітря, у практичній електротехніці використовуються азот, що має властивості, близькі до властивостей повітря, але відзначається хімічною інертністю, а тому використовується для «азотного захисту»

трансформаторної оливи, що попередньо вакуумується і знекиснюється, та для заповнення газових конденсаторів.

Існує також система захисту трансформатора з інжекцією азоту. Це вдосконалений метод захисту силових трансформаторів від можливих пожеж, вибухів та пошкоджень, які можуть бути викликані несправностями електрики через дугу, діелектричні пробої в осерді та котушках, недостатньому заземленні тощо. Також зовнішні пожежі можуть бути спричинені проблемами з витоками масла з прокладок, несправними зварювальними шнурами, несправними вентиляторами примусового охолодження, несправними реле, проблемами або руйнуванням вводів, неправильними/слабкими кабельними з'єднаннями або навіть несправності лінії електропередач.

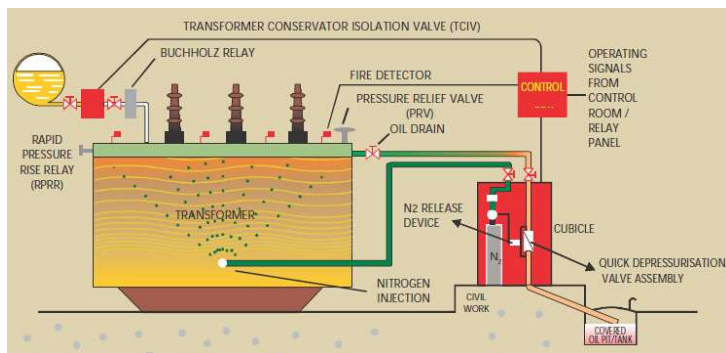


Рисунок 6.8 – Система захисту трансформатора з інжекцією азоту

Система протипожежного захисту з впорскуванням азоту (NIFPS) отримуватиме сигнали зворотного зв'язку/відключення від трансформаторної панелі, якщо температура перевищить допустиму. Виявивши це, він запускає елементи з електричним

приводом, такі як ізоляційні клапани, клапани зливу масла та клапани впорскування азоту, щоб створити шар залишкового масла поверх усього іншого масла та запобігти контакту з киснем з атмосфери.

Системи захисту трансформаторів із впорскуванням азоту (NIFPS) особливо цінні в умовах критичної інфраструктури, таких як електропідстанції та промислові об'єкти, де трансформатори є центральними для операцій. Завчасно зменшуючи ризики, пов'язані з поломками трансформаторів, пожежами та вибухами, ця система підвищує загальну безпеку, мінімізує час простою та захищає від потенційно катастрофічних інцидентів.

6.4 Елегаз

Найбільшого поширення в герметизованих установках отримав елегаз. Назву «елегаз» шестифториста сірка отримала від скорочення «електричний газ». Вперше елегаз був отриманий в ході дослідів французьких вчених-хіміків Анрі Муассана і Пола Лебо в 1901 році. Отримано газ був в результаті вивчення хімії фтору, як одне із з'єднань даного елемента. Фтор, отриманий електролізом, вступав у взаємодію із сіркою, і в результаті екзотермічної реакції виходив досить стійкий газ.

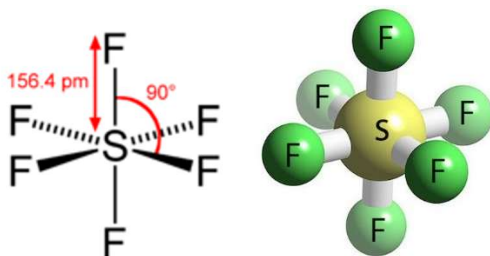


Рисунок 6.9 – Гексафторид сірки SF₆

Гексафторид сірки SF_6 (шестифториста сірка) має електричну міцність приблизно в 2,5 разу вище, ніж у повітря. Елегаз не токсичний, хімічно стійкий, не розкладається при нагріві до 800°C , його з успіхом можна використовувати в конденсаторах, кабелях. Особливо великі переваги елегазу при підвищеному тиску. Цікавість до гексафториду сірки виникла після публікації у сорокових роках XX сторіччя робіт Бориса Гохберга, які стосувались високої електричної міцності й дугогасної здібності SF_6 . Вже на початку п'ятдесятих років у США з'явилися вимикачі, що використовували SF_6 як діелектричне й дугогасне середовище, а наприкінці шестидесятих їх вже виготовлювали провідні фірми Європи, Америки та Японії. Потреба в елегазі з'явилася в на початку 1980-х років і була пов'язана з розробкою і освоєнням електрообладнання для передач постійного струму надвисокої напруги.

На цей час елегаз знайшов широке використання не тільки для вимикачів, але й для створення ізоляції як окремих видів високовольтного електрообладнання (кабелі, трансформатори, вводи), так і цілих комплексів, якими є, наприклад, комплектні розподільні установки елегазові – КРУЕ.

Вища, аніж для повітря, електрична міцність елегазу пояснюється тим, що молекули SF_6 , у порівнянні з сукупністю молекул газів повітря, мають більшу здатність до захоплення вільних електронів з утворенням негативних іонів. Такий процес не змінює загальне число носіїв заряду, але кількість вільних електронів у проміжку між електродами, до яких прикладена напруга, суттєво зменшується. Електронів, необхідних для початку розряду, стає мало і для появи розряду потрібно прикладати до електродів більшу напругу. Газу, молекули яких

мають властивість захоплювати вільні електрони, називають **електронегативними**.



Рисунок 6.10 – Розподільний пристрій надвисокої напруги з елегазовою ізоляцією

Відомі інші штучного виготовлення гази, які мають електричну міцність, вищу за елегаз, але за сукупністю властивостей елегаз виявився найкращим із них. Для заповнення електровакуумних приладів і ламп застосовуються інертні гази аргон, неон та інші, а також пари ртуті і натрію. Інертні гази володіють низькою електричною міцністю. Слід зазначити малу теплопровідність криптону і ксенону, ця обставина використовується у виробництві деяких типів електричних ламп.

6.5 Фреон

Фреони – це основна робоча рідина багатьох охолоджувальних механізмів. Уперше отримати фреон вдалося тільки в 1928 році. Винайшов його американський хімік Томас Мідглей, який на той час працював у компанії General Motors. У

той час велися пошуки речовини, яка була б безпечним аналогом використовуваних сірчистого ангідриду й аміаку. У результаті Томас знайшов таку речовину, як дихлордифторметан, який, як виявилося, був ідеальним замінником. У нього була невисока температура кипіння ($+29,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), він не мав замаху, не виділяв небезпечних для людини газів і не був палимим. Внаслідок своїх корисних якостей він почав широко застосовуватися в холодильних установках, і вже в 1932 році повністю витіснив інші охолоджувальні речовини.

Назву «фреон» було дано речовині компанією «Кінетик Кеніканз Інк», яка першою освоїла масовий випуск цього холодоагенту. Починаючи з 1930-го року, кожні 10-15 років з'являлися нові види фреону для різних галузей. Загалом, нині існує понад 40 видів фреону, кожен з яких ефективний у своїй галузі. Найбільш популярними є такі: R134a, R404a, R403a.

У промислових масштабах фреон видобувається шляхом подачі фтористого водню в газоподібному стані без випарника (тобто без «змійовика»). Використовується змішувач-гомогенізатор для отримання однорідного стану фтористого водню, який згодом переходить у стан фтористого водню в хлороформі. Далі фтористий водень у хлороформі надходить у реактор синтезу холодоагенту, своєрідний «змійовик», у якому краплі рівномірно поширюються по всьому реакційному об'єму.

Фреон, як і будь-який інший технічний газ, має низку параметрів (характеристик), за якими визначається ефективність його використання. До основних параметрів фреону належать тиск і температура кипіння холодоагенту. Від цих значень залежить, яким буде результат охолодження від використання газу і які потрібно створити умови, щоб його отримати.

Попри однакову основу – фтористий водень, усі види фреону за хімічним складом можна поділити на кілька видів. Зокрема, фреон поділяють на такі види:

ХФУ – хлорфторвуглецьвмісні;

ГХФУ – гідрофторхлорвмісні;

ГФУ – гідрофторвуглецьвмісні.

Фреон застосовується як випаровувальний охолоджувач в малогабаритних бортових трансформаторах, в холодильних машинах. При використанні фреону необхідно враховувати, що він викликає корозію деяких твердих органічних діелектриків.

6.6 Гелій

Особливо велике значення в якості, низькотемпературного хладагенту, зокрема для пристроїв, що використовують явище надпровідності, має зріджений гелій. Гелій взагалі є виключно цікавим матеріалом, що володіє унікальними властивостями. Так, у нього найнижча в порівнянні з іншими газами температура зріджування (4,216К при атмосферному тиску). Рідкий гелій має дуже малу щільність. Квантовомеханічні явища в рідкому гелії роблять його поведінку багато в чому схожим з поведінкою газів, а не рідин. Діелектрична проникність рідкого гелію мала. Вельми мала відмінність питомих теплопровідностей рідкого і газоподібного гелію. Мало і поверхнєве натягнення рідкого гелію. Теплота випаровування його надзвичайно низка, що має суттєве значення для криогенної техніки.

Гелій виконує важливу місію у процесі сучасного виробництва електронного обладнання. Виробництво чистих кристалів для напівпровідників не обходиться без його застосування.

6.7 Неон

Іноді як криогенний хладагент застосовується рідкий неон, температура кипіння якого лише ненабагато перевершує температуру кипіння водню. Для неону, як і для інших інертних газів, характерна вельми мала відмінність між температурою кипіння і температурою плавлення.

Хімічна інертність неону складає його перевагу перед вибухонебезпечним воднем. Проте неон дуже дорогий.

І гелій, і неон знайшли застосування у вигляді гелій-неонового лазера (HeNe-лазер). Це тип газового лазера, активне середовище якого містить суміш 85 % гелію та 15 % неону в невеликій капілярній трубці. Зазвичай цей лазер збуджується електричним розрядом прямого струму. Найбільше відомі та найбільше використовуються HeNe-лазери, що працюють на довжині хвилі 632,8 нм, у червоній частині видимого спектра.

Активне середовище лазера є сумішшю гелію та неону в газовому стані у співвідношенні приблизно 10:1 у скляній посудині з низьким тиском (рисунок 6.11).

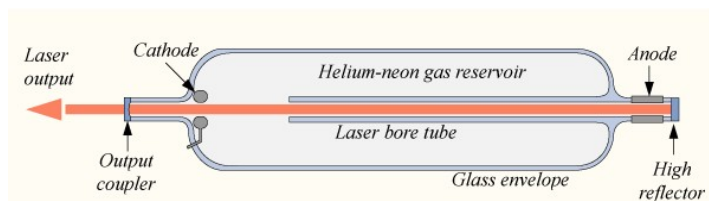


Рисунок 6.11 – Схематична діаграма гелій-неонового лазера

В основному суміш містить гелій, і збуджуються в першу чергу саме атоми гелію. Збуджені атоми гелію стикаються з атомами неону й передають збудження частині з них, змушуючи їх випромінювати світло з довжиною хвилі 632,8 нм. Для

функціонування лазера потрібен постійний струм, зазвичай від 3 до 20 мА. Резонатор лазера зазвичай складається з двох увігнутих дзеркал, або одного плоского й одного увігнутого, що мають дуже високий (типово 99.9 %) коефіцієнт відбиття. Вихідне дзеркало дозволяє приблизно 1 % пропускання світла.

Червоні гелій-неонові лазери знайшли численні застосування в промисловості та науці. До винаходу дешевих лазерних діодів червоні HeNe-лазери широко використовувалися для зчитування штрих кодів у супермаркетах. Ще одним застосуванням, яке можна вважати минулим, були програвачі Laserdisc фірми Pioneer.

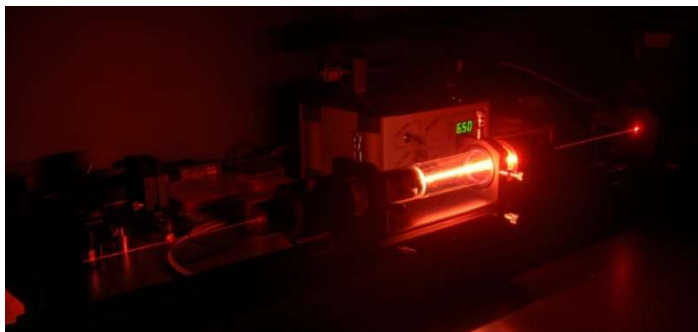


Рисунок 6.12 – Гелій-неоновий лазер у лабораторії Хемніцького технологічного університету, Німеччина

HeNe-лазери продовжують працювати в освітніх та дослідницьких лабораторіях. Перевагами цих лазерів є відносна дешевизна та простота обслуговування порівняно з іншими лазерами видимого діапазону, що мають аналогічні вихідні промені високої просторової когерентності.

Питання для самоперевірки:

1. Наведіть приклади газоподібних діелектриків.
2. Які основні властивості газоподібних діелектриків роблять їх придатними для використання в електротехніці?
3. Назвіть основні переваги і недоліки газових діелектричних матеріалів.
4. Який газоподібний діелектрик найпоширеніший в герметизованих установках? Які його основні недоліки, зокрема з екологічної точки зору?
5. Які фактори впливають на діелектричну міцність повітря, і як її можна підвищити в умовах роботи електротехнічного обладнання?
6. Які переваги азоту над повітрям в якості газоподібного діелектрика? У яких випадках його застосування є доцільним?
7. У яких сферах застосовуються газоподібні діелектрики на основі фреону, і які їхні особливості порівняно з іншими газами?

РОЗДІЛ 7. РІДКІ ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Для виготовлення рідких діелектриків використовують ароматичні сполуки, фторовані й хлоровані вуглеводні, розплави деяких халькогенідів, дистильовану воду, зріджені гази, кремнійорганічні сполуки (поліорганосилоксани). Рідкі діелектрики застосовують для просочування ізоляції конденсаторів, кабелів; у циркулярних системах охолодження трансформаторів, випрямних установок і турбогенераторів; для гасіння електричної дуги в масляних вимикачах; для заливання компонентів у блоках радіо- й електротехнічної апаратури.

Рідкі класифікують діелектрики за:

- ступенем горючості (горючі, негорючі);
- призначенням (для конденсаторів, трансформаторів, кабелів, контакторних пристроїв управління напругою під час навантаження; ізоляції обладнання високої напруги; систем циркуляційного охолодження);
- хімічною основою (нафтові масла; синтетичні рідини);
- максимально допустимою робочою температурою – поділені на кілька груп з температурами від +70 до +250 °С. За температури до +95 °С підходять нафтові масла, тоді як за вищих температур використовують тільки синтетичні рідкі діелектрики.

Конкретні вимоги до рідкого діелектрика визначають конструкцією та умовами застосування електрообладнання, у якому його застосовують, ступенем екологічної небезпеки. Тому під час вибору ізолювальної рідини потрібно дотримуватися таких вимог:

- сумісність із наявними матеріалами;
- висока електрична міцність; високий питомий опір;

- малі діелектричні втрати; стабільність властивостей в умовах тривалої експлуатації;
- висока стійкість до впливу електричного поля;
- висока стійкість проти окиснення;
- пожежна й екологічна безпека.

Не всі рідкі діелектрики задовольняють ці вимоги, тому в кожному конкретному випадку перевагу віддають тим властивостям, які забезпечують необхідну стабільність параметрів, надійність і довговічність виробу.

Для забезпечення вимог екологічності останнім часом токсичні поліхлоровані дифеніли (ПХД) практично повністю витіснені замінниками, які характеризуються значно більшим ступенем горючості.

Відомо, що відмови в роботі електрообладнання часто супроводжуються іскрінням і дугоутворенням, від чого може зайнятися рідина або газоподібні продукти її випаровування чи розкладання. Для гарантування безпеки експлуатації рідких діелектриків конструкція електроустаткування проєктується так, щоб знизити ймовірність його пошкодження в надзвичайних ситуаціях.

Абсолютно чисті рідкі діелектрики отримати дуже важко. Постійними домішками в них є вода, гази та найдрібніші механічні частинки. Наявність домішок посилює явище пробоя рідких діелектриків. Бульбашки газу, які в них є, йонізуються, виділяють енергію, котра перегріває рідину. Це призводить до утворення газових каналів між електродами та до пробоя рідини. Крім газових включень, електричну міцність, яка нижча, ніж в очищених рідин рідких діелектриків, знижує вода, краплини якої також утворюють ланцюжки з підвищеною провідністю. На неї значно впливають і тверді домішки.

Найбільш поширені в електротехнічних пристроях нафтові (мінеральні) електроізоляційні масла й синтетичні рідини. **Мінеральні масла** отримують природним шляхом. Фактично це те, що залишається від нафти після її переганання в бензин і дизель. Наступний процес – рафінування, або очищення, нафтового дисциляту (продукту переганання) від хімічно нестійких домішок (сірки, азоту тощо). **Синтетичне масло** – це повністю штучний продукт, отриманий у результаті синтезу нафтового газу.

В залежності від родовища нафтові масла складаються із суміші різних вуглеводнів парафінового (метанового), нафтового та ароматичного рядів, для покращення експлуатаційних властивостей до них додається до 1% присадок, які підвищують їх стійкість до теплового та електричного старіння під дією часткових розрядів.

7.1 Природні рідкі діелектрики

Рослинні масла – це в'язкі рідини, які одержують при віджиманні насіння різних рослин. До масел, що висихають відносять **лляне** та **тунгове**. Густина лляного масла $D = 930\text{--}940 \text{ кг/м}^3$, тунгового – $D = 940 \text{ кг/м}^3$. Ці масла 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 масел застосовують сикативи, тобто речовини, що прискорюють процес висихання.

Рослинні масла використовуються для виготовлення ізоляційних лаків та лакотканин, вони міцні та вологостійкі. Недолік цих масел – здатність до старіння та низька стійкість до ароматичних вуглеводнів (бензолу).

До масел, що не висихають, відноситься **рицинове масло**. Його густина становить $D = 950-970 \text{ кг/м}^3$, діелектрична проникність $\epsilon = 4-4,5$; $\text{tg}\delta = 0,01-0,03$. Ricciновe масло не розчиняється в бензині, але розчиняється в етиловому спирті, не викликає набухання гуми.

Недоліком рицинового масла є низька термічна стабільність і здатність до загусання. Використовують рицинове масло використовується для просочування паперових конденсаторів.

Касторове масло – це масло також рослинного походження. Основна область використання – просочення паперових конденсаторів для роботи в імпульсних умовах. Густина касторової олії $950-970 \text{ кг/м}^3$, температура застигання від -10°C до -18°C . Його діелектрична проникність при 20°C становить $4,0-4,5$; $\text{tg}\delta$ при 20°C дорівнює $0,01-0,03$, а при 100°C $\text{tg}\delta = 0,2-0,8$; $E_{\text{пр}}$ при 20°C дорівнює $15-20 \text{ МВ/м}$.

Касторове масло не розчиняється в бензині, але розчиняється в етиловому спирті. На відміну від нафтових масел касторове не викликає набрякання звичайної гуми. Цей діелектрик відноситься до слабополярних рідких діелектриків, його питомий опір при нормальних умовах становить $10^8-10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

7.2 Трансформаторне масло

Трансформаторне масло – це рідина від світло- до темно-жовтого кольору, яка за хімічним складом є сумішшю різних вуглеводнів (нафтових і парафінових). Свіже трансформаторне масло має легкий запах гасу. Під час експлуатації воно темніє. Сильне потемніння масла під час експлуатації зумовлене його

перегріванням. Присутність сірки в маслі не допустима, оскільки сірка сприяє корозії металів.

Головне призначення – заповнювати пори у волокнистій ізоляції, проміжки між проводами обмоток і між обмотками й баком трансформатора, що значно підвищує електричну міцність ізоляції (рис.7.2). По-друге, трансформаторне масло поліпшує відведення тепла, що виділяється за рахунок втрат в обмотках і магнітопроводі трансформатора. Лише деякі силові й вимірювальні трансформатори виготовляють без заливання маслом (так звані «сухі» трансформатори).



Рисунок 7.1 – Трансформаторне масло

Ще одна важлива галузь застосування трансформаторного масла – масляні вимикачі високої напруги, де масло виконує функцію дугогасіння. У цих апаратах розрив електричної дуги між контактами, що розходяться, відбувається в маслі або в газах, які виділяє масло під дією високої температури дуги. Це сприяє охолодженню каналу дуги й швидкому її гасінню.

Трансформаторне масло застосовують також для заливання маслonaповнених ввідів апаратів, у деяких типах реакторів і реостатів.

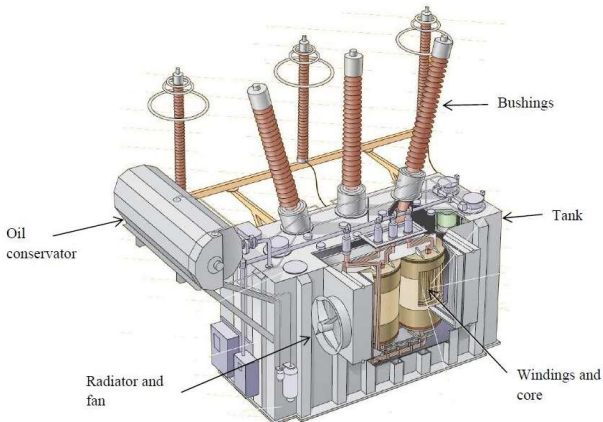


Рисунок 7.2 – Застосування масла в трансформаторах

Основні властивості трансформаторного масла:

- температура застигання: $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (важливо за низьких температур навколишнього середовища);
- електрична міцність: $10\text{--}25\text{ МВ/м}$, зазвичай не встановлюється стандартами, оскільки вона надзвичайно чутлива до зволоження;
- теплоємність і теплопровідність (у $25\text{--}30$ разів інтенсивніша, ніж у повітря);
- густина трансформаторного масла повинна бути якомога меншою ($D = 850\text{...}900\text{ кг/м}^3$), якщо це не впливає на інші його характеристики. При зменшенні густини домішки, що присутні в маслі опускаються на дно баку трансформатора. 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 °С та частоті 50 Гц $\epsilon = 2,2\text{--}2,3$;

- тангенс кута діелектричних втрат при температурі 20 °С та частоті 50 Гц $\text{tg}\delta \geq 0,003$.

- питомий об'ємний опір $\rho_v = 10^{12}\dots 10^{13}$ Ом·м.

- електрична міцність $E_{\text{пр}} = 25\text{--}30$ МВ/м.

- температура спалаху $T_{\text{сп}} = 135\text{--}140$ °С, що уможливорює безпечну роботу в умовах перевантаження;

- температура застигання $T_{\text{заст}} \leq -35\text{--}-45$ °С.

- кінематична в'язкість при 20 °С $\leq 17\text{--}18,5$ м²/с

Недоліками трансформаторного масла є його «старіння» в процесі експлуатації, гігроскопічність (потрібно зберігати в щільно закритій тарі), а також займистість і горючість.

Швидкість «старіння» трансформаторного масла зростає:

- при доступі повітря, оскільки «старіння» масла значною мірою пов'язане з його окисненням на повітрі;

- за підвищеної температури (зазвичай найвищою робочою температурою масла вважають +95 °С);

- при зіткненні масла з деякими металами (мідь, залізо, свинець) та іншими речовинами – каталізаторами «старіння»;

- у разі впливу світла;

- у разі впливу електричного поля.

Для відновлення властивостей трансформаторного масла використовують кілька способів:

- пропускають під тиском крізь фільтрувальний папір у спеціальних установках;

- видаляють механічні домішки й воду за допомогою центрифуги;

- безперервно фільтрують крізь адсорбенти (силікагель, алюмосилікати, синтетичні цеоліти);

- вводять інгібітори – спеціальні антиокиснювальні присадки (іонол, пірамідон);
- застосовують відстоювання – найпростіший метод очищення, оскільки позбавлення від води й механічних домішок відбувається шляхом природного осадження.

7.3 Кабельне масло

Кабельне масло використовують у виробництві силових електричних кабелів. Просочуючи паперову ізоляцію кабелів, масло підвищує її електричну міцність, а також сприяє відведенню тепла втрат. Для підвищення в'язкості в кабельне масло додають каніфоль (масляно-каніфольний компаунд) або синтетичний загусник.

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 маслonaповнених 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.



Рисунок 7.3 – Маслонаповнений кабель

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.

Основні параметри кабельних нафтових масел:

- густина $D = 840 \dots 900$ кг/м³;
- кінематична в'язкість при $t = 20^\circ\text{C}$ $\nu = 40$ м²/с (МН-4),
 $\nu = 800$ м²/с (С-220);
- кислотне число КМ = 0,02...0,07 мгКОН/г;
- тангенс кута діелектричних втрат при $t = 20^\circ\text{C}$ та $f = 50$ Гц
 $\text{tg}\delta = 0,002 \dots 0,005$;
- електрична міцність $E_{\text{пр}} = 15 \dots 21$ МВ/м.

7.4 Конденсаторне масло

Конденсаторне масло слугує для просочення ізоляції паперових конденсаторів, особливо силових, призначених для компенсації індуктивного зрушення фаз. Конденсаторне масло

подібне до трансформаторного, але вимагає особливо ретельного очищення адсорбентами.



Рисунок 7.4 – Приклади застосування масла в конденсаторах

При просоченні паперового діелектрика підвищуються його діелектрична проникність та електрична міцність; це дає змогу зменшити габарити, масу й вартість конденсатора при заданій робочій напрузі, частоті та ємності.

7.5 Синтетичні рідкі діелектрики

Синтетичні рідкі діелектрики використовують тоді, коли вони за своїми властивостями перевершують нафтові електроізоляційні масла.

Хлоровані вуглеводні виходять з різних вуглеводнів шляхом заміни в їх молекулах деяких (або навіть всіх) атомів водню атомами хлору. Найбільш широке застосування мають полярні продукти хлорування **дифеніл**, що має загальний склад

$C_{12}H_{10-n}Cl_n$. Найчастіше застосовуються суміші різних ізомерів хлорованих дифенілів з середнім ступенем хлорування від 3 до 6.

З числа більш вживаних хлорованих дифенілів є совол. **Совол** – прозора безбарвна рідина, найбільш уживаний хлорований дифеніл, за складом подібний до пентахлордифенілу $C_{12}H_5Cl_5$. Він стабільніший при роботі в електричному полі, ніж мінеральне масло, негорючий, не окиснюється, температура спалаху в межах +205–230 °С, електрична міцність – 14–18 МВ/м. Діелектрична проникність соволу за нормальної температури й під час низької частоти струму $\epsilon \approx 5$, тобто більше ніж удвічі перевищує проникність нафтового масла. Заміна нафтового масла соволом у виробництві силових паперових конденсаторів дає змогу понизити об'єм конденсатора під час однакової реактивної потужності приблизно вдвічі. Це дає чималий економічний зиск, хоча совол удесятеро дорожчий за масло. Недоліком конденсаторів, просочених соволом, є значне зменшення ємності під час зниження температури нижче 0 °С. Температура застигання соволу: +5 °С.

Сприятливі температурні властивості мають суміші хлорованих дифенілів з іншими хлорованими сполуками.

Совтол – суміш соволу з трихлорбенzenом, застосовують для ізоляції вибухобезпечних та інших трансформаторів, для низьковольтних конденсаторів. Совтол-10 – негорюча, стабільна до окиснення, синтетична, електроізолювальна рідина зі зниженою в'язкістю та низькою температурою застигання -25 °С. Хлоровані дифеніли негорючі. Проте їхнім недоліком є висока токсичність як самих рідин, так і їхньої пари, тому потрібно забезпечувати захист шкіри й вентиляцію повітря. У багатьох країнах використання хлорованих дифенілів заборонено

законом. Основні характеристики синтетичних рідких діелектриків подано в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Основні характеристики синтетичних рідких діелектриків

Характеристика	Совол	Совтол -2	Совтол-10	ПЕСЖ (ПЕС-Д)
Густина, кг/м ³	1560	1520	1510...1530	960
В'язкість при $t=20$ °C, м ² /с	$70 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$36 \cdot 10^{-6}$	$70 \cdot 10^{-6}$
В'язкість при $f=50$ Гц, м ² /с	$30 \cdot 10^{-6}$	$10 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-6}$	$60 \cdot 10^{-6}$
Температура спалаху парів, °C	–	200	200	150
Температура застигання, °C	+5	–40	–7	–60
Питомий об'ємний опір при $t=20$ °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 діелектричних втрат при $f=50$ Гц	0,002	0,08	0,06	0,003
Електрична міцність при $t=20$ °C, МВ/м	18	20	20	18...25



2001 року більшість європейських країн підписали Стокгольмську конвенцію з метою захисту людського здоров'я та довкілля від стійких органічних забруднювачів (СОЗ), які можуть накопичуватися в живих організмах та мати шкідливий вплив на здоров'я людей і екосистеми. Учасники цієї конвенції взяли на себе зобов'язання повністю знешкодити ПХБ, що є у своїх країнах, до 2028 року. Галовакс і совтол належить групі поліхлорованих біфенілів (ПХБ), які за ступенем токсичності входять до 1-го класу небезпечних речовин. Вони вкрай небезпечні для людини і здатні завдати непоправної шкоди довкіллю.

7.6 Кремнійорганічні рідини

Кремнійорганічні рідини – рідкі діелектрики, які належать до елементоорганічних речовин, в основному молекулярному ланцюзі мають послідовно з'єднані атоми кремнію та кисню (силоксановий зв'язок).

В залежності від радикалу, що приєднаний до атому кремнію, тобто від особливостей структури і хімічного складу розрізняють чотири основних види кремнійорганічних діелектриків:

- поліметилсилоксанові (ПМС, група $-\text{CH}_3$),
- поліетилсилоксанові (ПЕС, група $-\text{C}_2\text{H}_5$),
- поліметилфенілсилоксанові (ПМФС, група $-\text{CH}_3$ та $-\text{C}_6\text{H}_5$),
- поліхлорорганосилоксанові (ПХОСР) або поліфторорганосилоксанові (ПФОСР).

За рахунок високої енергії зв'язку кремній-кисень (374 кДж/моль) кремнійорганічні рідини можуть працювати до температур $+250\text{ }^\circ\text{C}$ (тривало) і до $+350\text{ }^\circ\text{C}$ (короткочасно). Вони мають дуже малий кут діелектричних втрат: $\text{tg } \delta = 0,0001\text{--}0,0003$, високий питомий опір $\rho = 10^{12}\text{ Ом}\cdot\text{м}$, низьку гігроскопічність, слабо виражену залежність в'язкості від температури, є практично неполярними – при частоті 1 кГц $\epsilon=2,5\text{--}3,3$, електрична міцність $E_{\text{пр}} = 14\text{--}18\text{ кВ/мм}$.

Кремнійорганічні діелектрики мають велику стабільність електричних і фізико-хімічних параметрів. Вони досить дорогі (в десятки-сотні разів вища, ніж вартість нафтових масел), що обмежує їхнє застосування. Використовують для просочення й заливання конденсаторів та інших пристроїв, які мають працювати за підвищених температур. До недоліків, крім високої

вартості, можна віднести легку займистість кремнійорганічних рідин.

7.7 Фторорганічні рідини

Фторорганічні рідини відносяться до карболанцюгових сполук з фтором у бокових відгалуженнях. Вони неполярні $\epsilon=2,2...2,5$, мають малий $\text{tg}\delta = 0,0001 - 0,0002$, питомий опір $\rho = 10^{12}-10^{14}$ Ом·м, електричну міцність $E_{\text{пр}} = 12-19$ кВ/мм, гранично малу гігроскопічність, високу нагрівостійкість (до 300 °С), малу в'язкість, повну негорючість, високу дугостійкість, але також високу (в тисячу раз дорожчі за нафтові масла) вартість. При використанні фторорганічних рідин необхідно враховувати також їх дію на гуму і взаємодію з міддю і окисом заліза, що приводить до їхнього забруднення і знижує характеристики.

Характерними їхніми властивостями є низький поверхневий натяг (що сприяє кращому просоченню пористої ізоляції), високий температурний коефіцієнт об'ємного розширення (значно більший, ніж у понад 50 інших електроізоляційних рідин), порівняно висока летючість, що вимагає герметизації апаратів, які заливують фторорганічними рідинами. Важливою перевагою фторорганічних рідин порівняно з кремнійорганічними є повна негорючість і висока дугостійкість. Застосовують для просочення та заливання конденсаторів і трансформаторів, під час випробування елементів радіоелектроніки. Як і кремнійорганічні сполуки, фторорганічні рідини дуже дорогі.

Питання для самоперевірки:

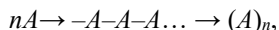
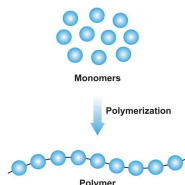
1. Як можна класифікувати рідкі діелектрики.
2. Яких вимог необхідно дотримуватися при виборі ізолювальної рідини.
3. Які масла є найпоширенішими в електротехнічних пристроях?
4. Назвіть природні рідкі діелектричні матеріали.
5. З чим пов'язана швидкість старіння трансформаторного масла?
6. Які за в'язкістю бувають кабельні масла? Де вони використовуються?
7. Які діелектрики є синтетичними? Наведіть приклади та сфери застосування.
8. Що вам відомо про кремній- та фторорганічні рідини? Які їхні характерні особливості?

РОЗДІЛ 8. ВИСОКОМОЛЕКУЛЯРНІ ОРГАНІЧНІ ТА ЕЛЕМЕНТООРГАНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

До високомолекулярних органічних діелектриків відносяться полімери, пластмаси (полімери з добавками), еластomers. Для підвищення характеристик, необхідних для використання високомолекулярних органічних діелектриків як ізоляційних чи конденсаторних матеріалів, в них вводять у невеликих кількостях відповідні добавки: стабілізатори, пластифікатори, барвники тощо. Враховуючи різноманітність характеристик і напрямків використання високомолекулярних органічних діелектриків їх класифікація досить широка. **За походженням** розрізняють:

- природні речовини (деревина, бавовна, шовк тощо);
- штучні матеріали, що отримують шляхом хімічної обробки природних високомолекулярних речовин (ефіри целюлози);
- синтетичні високомолекулярні діелектрики (полімери, пластмаси, еластomers тощо).

За характером технологічного процесу діелектрики можуть бути **полімеризаційними**, тобто такими, що утворюються в процесі об'єднання молекул мономера в молекулу полімера за рахунок розкриття подвійних зв'язків без утворення побічних продуктів. Схематично процес полімеризації може бути відображений такою схемою:



де n – ступінь полімеризації.

Полімеризація – процес з'єднання молекул газоподібного чи рідкого мономера в велику молекулу, в результаті якого елементарний склад речовини не змінюється. Наприклад, утворення полістиролу із стиrolу C_8H_8 :

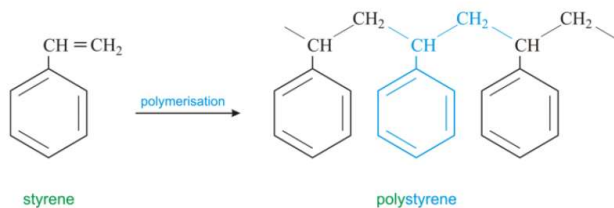


Рисунок 8.1 – Схематичне пояснення процесу полімеризації

Кількість молекул мономера, що об'єдналися при утворенні полімера називають **ступенем полімеризації**. Для полістиролу вона може сягати 6000, для поліетилену – до 10^6 .



Термін "полімер" був вперше використаний у 1833 році **Йенсом Якобом Берцеліусом** – шведським хіміком. Він запропонував цей термін для опису речовин, які мають однаковий елементний склад, але відрізняються молекулярною масою та структурою. Термін походить від двох грецьких слів: *πολύ-* – «багато» та *μέρος* – «частина».



Сучасне розуміння полімерів розвинулося значно пізніше, коли у 1920-х роках німецький хімік **Герман Штаудінгер** висунув ідею, що полімери складаються з довгих ланцюгів повторюваних структурних одиниць, пов'язаних між собою ковалентними зв'язками. Його робота заклала основи сучасної науки про полімери, що призвело до розробки синтетичних полімерів (пластмаси, каучуки тощо).

Поліконденсація – процес з'єднання молекул мономерів, що приводить до утворення полімерів з одночасним виділенням будь-якого низькомолекулярного продукту (водяна пара, аміак, спирт тощо). Поліконденсаційні діелектрики мають електроізоляційні властивості нижчі, ніж полімерні, внаслідок залишків мономерів при локальній нестехіометричності компонентів та пористості структури, що зумовлена виходом побічних продуктів з діелектрика в процесі його отримання.

Полімерний стан з термодинамічної точки зору нерівноважний. За певних умов (підвищена температура) може виникати обернена реакція, тобто полімер може **деполімеризуватися** – розкластись на речовини з меншим ступенем полімеризації. Цей процес відбувається при тепловому старінні полімерів.

За будовою полімери поділяють на три групи:

- **лінійні** – молекули мають вигляд ланцюжків (відношення довжини молекули до її поперечного розміру > 1000);

- **розгалужені** – від основного молекулярного ланцюга відходять бокові ланцюжки того ж складу, що і основний ланцюг; відгалуження перешкоджають щільному упакуванню макромолекул (поліізобутилен);

- **просторові (тривимірні, сітчасті)** – мають розвинуту систему внутрішніх зв'язків (зшивань) між частинами однієї і тієї ж і іншими молекулами, внаслідок чого матеріал перетворюється фактично на одну величезну молекулу.

8.1 Лінійні полімери

Найпростіша архітектура полімеру – це лінійний ланцюг: єдиний хребет без відгалужень. Молекулярні ланцюги лінійних

полімерів є хімічно інертними один відносно одного і зв'язані між собою лише силами Ван-дер-Ваальса. Такі полімери мають молекулярну будову й складаються з окремих макромолекул. Під час нагрівання в'язкість таких полімерів зменшується, і тоді вони можуть зворотно переходити спочатку у високоеластичний, а потім й у в'язкотекучий стан.

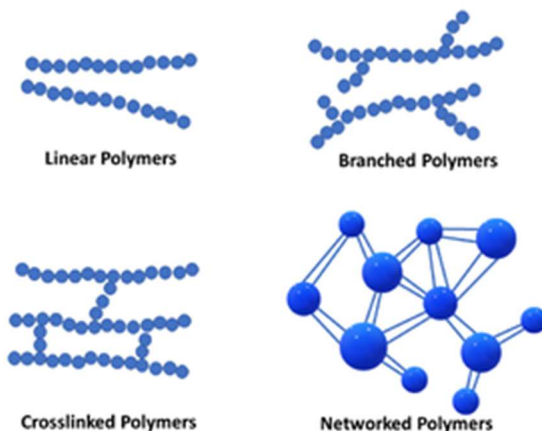


Рисунок 8.2 – Типи будови полімерів

Лінійні полімери – аморфні або аморфно-кристалічні термопластичні речовини, гнучкі та еластичні, при підвищеній температурі розм'якшуються і плавляться, здатні розчинюватися у близьких за полярністю розчинниках, але не у воді, мало гігроскопічні, мають, як правило, низьку температуру склування, всі лінійні полімери, крім політетрафторетилену і поліілідів горять. Для виробництва негорючої ізоляції в них вводять **антипірени**, речовини, що при горінні виділяють велику кількість негорючих газоподібних продуктів, що знижують

концентрацію кисню в зоні горіння до таких значень, при яких горіння стає не можливим.

Оскільки єдиним наслідком нагрівання є зміна пластичності, лінійні полімери називають **термопластичними**. Термопластичні полімери можна не лише плавити, а й розчиняти, тому що зв'язки Ван-дер-Ваальса легко руйнуються під дією реагентів або розчинника. Дослівно термін «лінійні» не вказує на прямолінійність; навпаки, для них більше характерна наявність фрагментів зі спіральною конформацією, що надає таким полімерам механічної міцності. До лінійних полімерів відносять поліаміди, полікарбонати, поліестери, полісилоксани. З біополімерів до типу лінійних належить целюлоза.

8.2 Розгалужені полімери

Розгалужені полімери також мають молекулярну будову й складаються з окремих макромолекул. Контрольоване розгалуження ланцюгів є одним з головних промислових методів модифікації властивостей термопластичних полімерів. Такі полімери є міцнішими за лінійні. До розгалужених полімерів належать т. зв. зіркові полімери (типу дендритів) та амілопектин.

Дендримери – особливий випадок полімерів, де кожна мономерна субодиниця має розгалуження. Ця тенденція знижує внутрішню заплутаність ланцюга та кристалічність. альтернативно, деревоподібні полімери – не так добре розгалужені, але частка подібних властивостей з дендримерами відповідає їх високому рівню розгалуження. Дендронізовані полімери можуть містити декілька тисяч дендронів в одній макромолекулі і мають видовжену анізотропну структуру. Цим вони більш-менш відрізняються від приблизно сферичних дендримерів, у яких декілька дендронів приєднано до малого,

точкового кору (ядра) в загалом ізотропній структурі. Залежачи від генерації дендрону, полімери різняться товщиною.

Дендронізовані полімери синтезовано з різними типами базового ланцюга. Наприклад, відомі дендронізовані поліметиметакрилати, полістироли, поліацетилени, поліфенілені, поліфлуорени, полі(феніленвінілени), полі(феніленацетилени), полісилоксани, поліоксанорборнени, полі(етиленіміни).

Дендримери 3-го та наступних поколінь характеризуються високою густиною молекулярної структури і мають близьку до сферичної форму. Їх властивості в багатьох випадках визначаються типом функціональних груп на їх поверхні. наприклад, дендримери з гідрофільними кінцевими групами (зокрема, карбоксильними) розчинні у воді, а з флуоровмісними – у надкритичному CO₂. Нині дендримери активно досліджують у найрізноманітніших галузях. наприклад, вони можуть слугувати своєрідними контейнерами для створення металічних наночасточок практично однакового розміру, що їх можна використовувати як каталізатори хімічних реакцій, у виготовленні електронних пристроїв, спеціальних покриттів. Завдяки контрольованим і відтворюваним з великою точністю розмірам макромолекул дендримери вже використовують для калібрування в мас-спектрометрії, електронній та атомній спектроскопії, ультра-фільтрації. Ті з них, що містять важкі метали, застосовують у медичній діагностиці як рентгеноконтрастні речовини.

8.3 Сігчасті та просторові полімери

У полімерній хімії розгалуження відбувається шляхом заміни замісника, наприклад атома гідрогену, на мономерну

субодиницю іншим ковалентно зв'язаним ланцюгом цього полімеру або у випадку привитого кополімеру – на ланцюг іншого типу. Полімер може набути сітчастої структури, й спонтанно, наприклад під дією світла або кисню, відбудеться старіння із втратою еластичності.

Сітчаста структура характерна тим, що ланцюги зв'язані один з одним, а це сильно обмежує рух і спричиняє зміни як механічних, так і хімічних властивостей. Такі полімери міцніші за лінійні, оскільки крос-зв'язування збільшує силу опору полімеру зовнішньому впливу. Крос-зв'язування – утворення ковалентних зв'язків між ланцюгами. Під час крос-зв'язування вихідний полімер, що мав обмежену кількість контактів між ланцюгами, еволюційно переходить у сітчастий, а в разі подальшого збільшення крос-контактів – у просторовий, утворюючи на кожному етапі множину матеріалів, що різняться між собою фізико-хімічними властивостями.

Внаслідок великої реакційної здатності молекул, що виявляється з підвищенням температури, такі полімери називають термореактивними, або реактопластами. нагрівання різко й незворотно спричиняє реакції, що змінюють властивості матеріалу.

Під час нагрівання таких зразків функції взаємодіють, з'єднуючись безліччю поперечних міцних зв'язків, полімер виявляється зшитим, тобто набуває просторової структури, міцності й високої в'язкості, стає нерозчинним і неплавким. «Молекулярна маса» частинки такого полімеру збігається з масою зразка. У просторових полімерах поняття молекули чи навіть макромолекули як найменшої частинки, що зберігає властивості речовини, втрачає свій звичний сенс і набуває певної умовності.

Однією із технологій підсилення механічних та інших властивостей каучуків є процес вулканізації, що ґрунтується на крос-зв'язуванні за допомогою сірки. Звичайна гума є м'якою, але внаслідок вулканізації сіркою утворюються ковалентні зв'язки типу S–S, і міцність зростає.

У крос-зв'язаних шляхом вулканізації каучуків короткі сульфур-розгалужені зв'язки поліізопренових ланцюгів (або їх синтетичних варіантів) входять у багатократно розгалужений термоеластомер. Автомобільна гума, наприклад, має надзвичайно велику кількість крос-зв'язків для того, щоб знизити витік повітря з шини й підвищити термін її використання. Водночас каучук якісної канцелярської гумки не має крос-зв'язування, завдяки чому відділяються шари гуми і запобігається руйнування паперу. Крос-зв'язування пропонує пункт відгалуження, з якого виходять (чотири або більше) індивідуальні ланцюги. У крос-зв'язаних каучуках шляхом вулканізації короткі гілки сірки зв'язують поліізопренові ланцюги (або синтетичний варіант) у багатократно розгалуженому еластомері під час термообробки. Каучук може також бути цілковито вулканізованим і перетвореним на жорсткий твердий матеріал.

До сітчастих полімерів належать вовна, фенолоформальдегідні, гліфталеві полімери та алкідні, меламінформальдегідні, сечовиноальдегідні, фенолоальдегідні смоли. а крос-зв'язані полікарбонатні ланцюги можуть утворити найтвердіший, удароміцний термостабільний пластик, що його використовують як безпечне скло. До типу сітчастих відносять багато неорганічних полімерів (алмаз, кварц).

До сітчастих відносять також і пластинчасті полімери, що мають площинну двомірну будову (наприклад, графіт).

У зразку просторового полімеру неможливо розрізнити окремі молекули, оскільки атоми сполучені між собою в єдину тривимірну сітку.

За реакцією на нагрівання полімерні матеріали бувають:

– **термопластичні** – плавляться при нагріванні, при охолодженні знову твердіють, але не втрачають цієї властивості при повторних операціях.

Прикладами термопластів є поліетилен і нейлон.

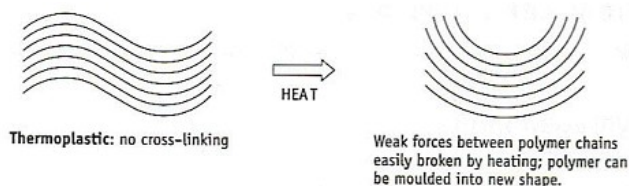


Рисунок 8.3 – Термопластичні матеріали

– **термореактивні (реактопласти)** – при нагріванні полімеризуються в просторовий полімер і втрачають здатність повторно плавитися і розчинятися.

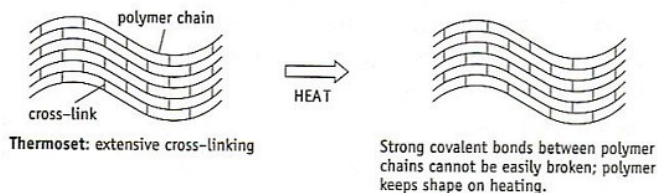


Рисунок 8.4 – Термореактивні матеріали

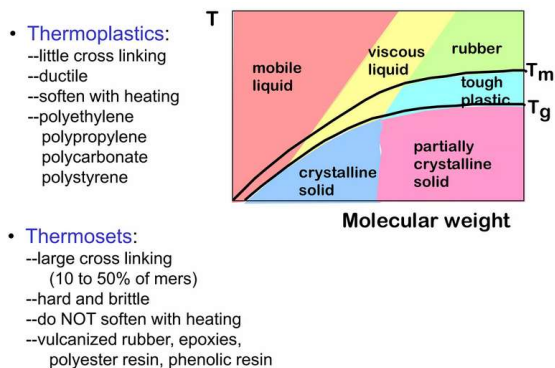


Рисунок 8.5 – Порівняння термореактивних та термопластичних матеріалів

За характером деформації:

- склоподібні,
- вискоеластичні,
- в'язкоплинні.

За реакцією на електричне поле високомолекулярні діелектрики діляться на полярні і неполярні.

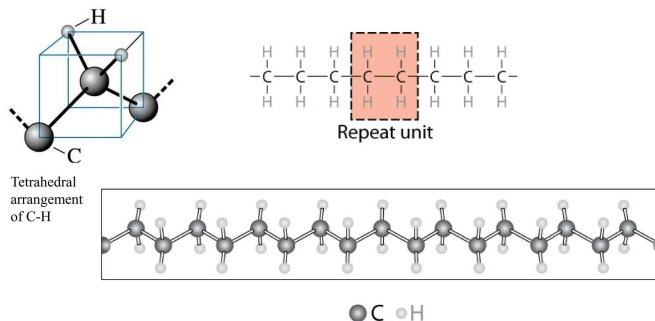
Розглянемо властивості найбільш вживаних високомолекулярних діелектриків.

8.4 Неполярні полімеризаційні термопластичні синтетичні діелектрики

8.4.1 Поліетилен

Поліетилен — безбарвний, частково прозорий термопластичний матеріал, що отримують полімеризацією газоподібного мономера — етилену. Молекулярна маса від $8 \cdot 10^4$ до $3,5 \cdot 10^6$. Має високу водостійкість, не розчиняється при кімнатній температурі, при температурах вище 70°C

розчиняється в ксилолі і інших хлорованих і ароматичних розчинниках.



- Polyethylene is a long-chain hydrocarbon.
- Top figure shows repeat unit and chain structures.
- Other figure shows zigzag backbone structure.

Рисунок 8.6 – Хімічна структура поліетилену

Поліетилен виробляють з чистого етилену при високих тисках (ПЕВТ) – 1470...2500 атм, 180... 270 °С; або з каталізаторами при середніх тисках (ПЕСТ) – 34...39 атм і 150 °С і низьких тисках (ПЕНТ) – 3...5 атм, 70...80 °С і отримують матеріал з низькою ПЕНГ (910 – 930 кг/м³) і високою густиною ПЕВГ (від 950 до 960 кг/м³ для ПЕНТ і від 960 до 970 кг/м³ для ПЕСТ відповідно). ПЕВТ має меншу густину, жорсткість, механічну міцність і степінь кристалічності, ніж ПЕСТ і ПЕНТ, через більшу кількість бокових відгалужень (до 36 на 1000 ланок молекули), але кращі електрофізичні характеристики через відсутність залишків каталізаторів і більші питому ударну в'язкість і стійкість до теплового старіння.

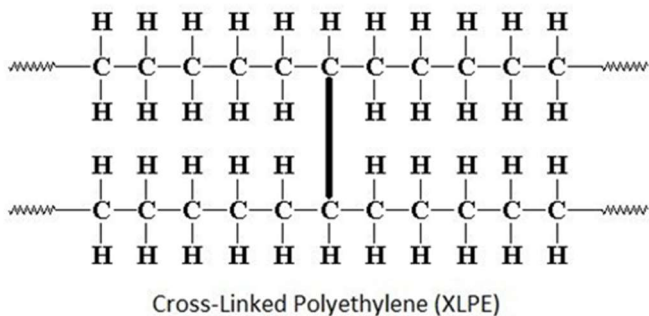
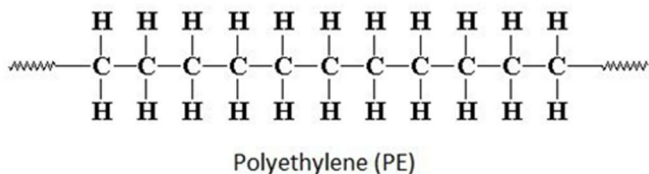


Рисунок 8.7 – Хімічна структура поліетилену та зшитого поліетилену

Температури склування і крихкості для поліетилену близькі за значенням одна до одної і можуть змінюватися в широких межах від -70°C (ПЕСТ) до -150°C (ПЕНТ). Поліетилен добре горить, тому для ізоляції з поліетилену в залежності від призначення може бути потрібним захист від горіння.

Температура плавлення ПЕВТ $105\text{--}108^{\circ}\text{C}$, тому для ізоляції високовольтних кабелів застосовують зшитий радіаційно або хімічно, з допомогою перекисів, поліетилен, що має нагрівостійкість 105°C , а короткочасно може витримувати температуру до 200°C .

Електричні властивості поліетилену:

- $\rho = 10^{14} - 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 20°C ;
- $\text{tg}\delta = 0,0001\ldots 0,0005$;

- $E_{пр} = \text{до } 60 \text{ кВ/мм}$ при напрузі 50 Гц і товщині 1 мм і до 250 кВ/мм при товщині, меншій 0,1 мм;
- $\epsilon = 2,2 \dots 2,4$;
- температурний діапазон від -70°C до $+(55 \dots 60)^\circ\text{C}$, зшитого до 105°C .



Рисунок 8.8 – Приклади застосування поліетилену

Механічні характеристики: межа міцності при розтягуванні 10 – 33 МПа, відносне подовження перед розривом 200 – 800 %.

Застосовують поліетилен для ізоляції високовольтних кабелів і проводів, обкладинок конденсаторів, для виготовлення термоусадних трубок (використовують ефект пам'яті форми, коли деформована радіаційно зшита трубка при нагріванні відновлює попередній розмір).

8.4.2 Полістирол

Полістирол – продукт полімеризації стиролу (вінілбензолу), твердий аморфний прозорий (пропускає до 90% видимого світла) матеріал з високими електроізоляційними властивостями, стійкий до озону, кислот, лугів, солей і спиртів.

Розчиняється в чотирехлористому вуглеці і бензолі, нестійкий до дії аліфатичних, ароматичних і хлорованих вуглеводнів. Густина полістиролу 1050...1070 кг/м³.

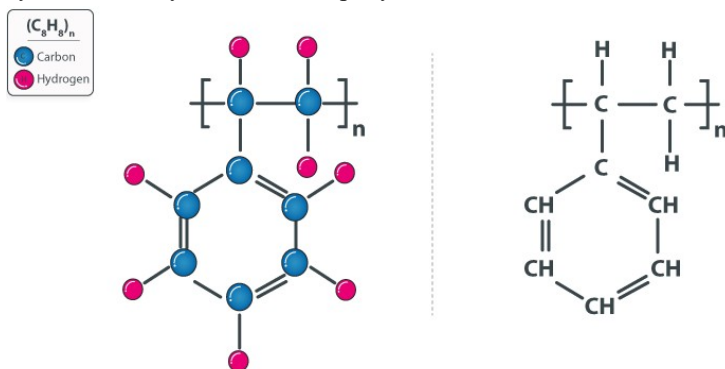


Рисунок 8.9 – Полістирол

Виготовляють в залежності від особливостей технології блоковий, суспензійний, емульсійний та з використанням каталізаторів ізотактичний полістирол.

До переваг полістиролу відноситься стабільність його електрофізичних характеристик. Вони практично не залежать від частоти напруги в інтервалі від 10^2 до 10^9 Гц, температури – від -80 до 90 °C і від вологості навколишнього середовища.



Рисунок 8.10 – Приклади застосування полістиролу

Електричні характеристики полістиролу:

- $\rho = 10^{14} - 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ при 20°C ;
- $\epsilon = 2,4 \dots 2,6$;
- $\text{tg} \delta = 0,0001 \dots 0,0003$;
- $E_{\text{пр}} = 25 - 35 \text{ кВ/мм}$ при напрузі 50 Гц і товщині 1 мм ;
- температурний діапазон від -60°C до $+(65 \dots 80)^\circ \text{C}$.

До основних недоліків полістиролу відносяться невисока нагрівостійкість, схильність до утворення тріщин і крихкість. Ударна в'язкість полістиролу сягає всього $16 - 22 \text{ кДж/м}^2$, відносне подовження перед розриванням – $1,5\%$. Для підвищення нагрівостійкості в полістирол вводять до 30% кварцового або слюдяного борошна, білої сажі (кремнієва кислота), тальку тощо, армують скловолокном. Зниження крихкості досягають сополімеризацією полістиролу з каучуком (до 8%), що дає можливість підвищити ударну в'язкість до $30 - 60 \text{ кДж/м}^2$ (удароміцний полістирол). Застосовують полістирол для ізоляції височастотних кабелів, виготовлення лаків, компаундів, каркасів котушок індуктивності, панелей електронних ламп,

ізоляторів для електровимірювальних приладів. Для ізоляції електричних конденсаторів виготовляють двоосно орієнтовано полістирольну плівку – стирофлекс товщиною від 6 до 200 мкм (звичайно до 50 мкм).

8.4.3 АБС-пластик

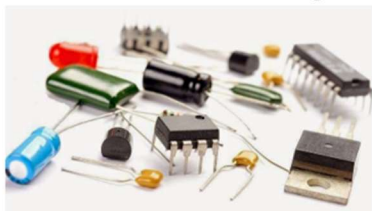
АБС-пластик – сополімер акрилонітрилу, бутадієну і стиролу (перші букви компонентів використані у назві). Він має вищу на 10% ніж полістирол нагрівостійкість, хорошу термостабільність і хімічну стійкість, ударну в'язкість на рівні 70 кДж/м², але гірші електрофізичні характеристики ($\text{tg}\delta = 8 \cdot 10^{-3}$). Використовують для виготовлення корпусів приладів і окремих деталей.



ABS mobile charger



ABS power socket



ABS electronic component



ABS keyboard

Рисунок 8.11 – Приклади застосування АБС-пластику

8.4.4 Поліпропілен

Поліпропілен – безбарвний, прозорий кристалічний (ступінь кристалічності 90–95%) продукт полімеризації пропілену з використанням каталізаторів, молекулярна маса $(8 - 20) \cdot 10^4$, густина 900 – 910 кг/м³. Стійкий до дії кислот, лугів, мінеральних і рослинних олій, органічних розчинників при кімнатній температурі. Розчиняється в органічних розчинниках тільки при температурах вище 80 °С. За властивостями близький до поліетилену, але має низьку морозостійкість. Температури склування і крихкості – (5 – 15) °С. При прямій дії сонячного світла окиснюється.

Використовують плівки поліпропілену в електричних конденсаторах.

Це один із найуніверсальніших видів пластику, доступних на ринку. У контексті виробництва, особливо з адитивними процесами, такими як 3D-друк, поліпропілен пропонує кілька переваг, які можуть підвищити виробничі можливості та якість продукції.

Переваги поліпропілену в процесах адитивного виробництва:

1. Гнучкість і міцність: поліпропілен відомий своєю чудовою гнучкістю та міцністю, що робить його ідеальним для створення деталей, які вимагають хороших шарнірних властивостей або мають витримувати часті згини без руйнування.

2. Хімічна стійкість: його стійкість до різноманітних хімічних розчинників, лугів і кислот дозволяє виготовляти контейнери, труби та фітінги, які можуть витримувати агресивні хімічні середовища. Ця властивість особливо цінна в таких галузях, як хімічне виробництво, автомобілебудування та медичне обладнання.

3. Низька щільність: РР має нижчу щільність порівняно з іншими пластиками, що означає, що деталі, виготовлені з поліпропілену, легші, що вигідно для застосувань, де зниження ваги є критичним, наприклад, у автомобільних та аерокосмічних компонентах.

4. Гігієнічність і нетоксичність: він безпечний для контакту з їжею та напоями, що робить його придатним для виготовлення контейнерів, упаковки та інших предметів, для яких потрібні харчові матеріали.

5. Висока термостійкість: поліпропілен може витримувати більш високі температури, ніж багато інших пластиків, що робить його придатним для застосувань, які вимагають термостійкості, наприклад, споживчі товари, які можна мити в посудомийній машині, і автомобільні деталі, які піддаються впливу високих температур.

6. Можливість вторинної переробки: поліпропілен придатний для вторинної переробки, що підтримує тенденції виробництва до сталого розвитку та екологічної відповідальності. Деталі, виготовлені з поліпропілену, можна подрібнити та використати повторно, зменшуючи відходи та потре

7. Економічна ефективність: порівняно з іншими полімерами, поліпропілен є відносно недорогим і пропонує хороший баланс між властивостями та вартістю, що робить його привабливим варіантом для широкого спектру застосувань.

У адитивному виробництві або 3D-друку поліпропілен можна використовувати в кількох формах, включаючи нитку для моделювання плавленого осадження (FDM), порошок для селективного лазерного спікання (SLS) або гранули для технологій 3D-друку на основі гранул. Поліпропілен є одним із

небагатьох пластиків, які можна стерилізувати парою, що робить його ідеальним матеріалом для медичних і харчових застосувань.



Рисунок 8.12 – Приклади застосування поліпропілену в медицині

8.4.5 Поліізобутилен

Поліізобутилен – безбарвний аморфний продукт полімеризації ізобутилену. Виготовляють низько-, середньо- і високомолекулярний поліізобутилен. Високомолекулярний поліізобутилен має молекулярну масу $(20 - 25) \cdot 10^4$, густину $910 - 930 \text{ кг/м}^3$. Він стійкий до дії кислот і лугів, розчиняється у сірководні, аліфатичних, ароматичних і хлорованих вуглеводнях. Електричні властивості поліізобутилену близькі до властивостей поліетилену, але $\text{tg}\delta$ трохи більший, а електрична міцність значно (майже в 3 рази) нижча. Основними недоліками поліізобутилену є мала стійкість до ультрафіолету, низька механічна міцність і висока холодоплинність, що не дає можливості використовувати його в чистому вигляді.

Для підвищення стійкості до ультрафіолету в поліізобутилен вводять до 150% сажі, графіту. Щоб збільшити твердість використовують наповнювачі. Застосовують поліізобутилен в композиції з полістиролом для виготовлення ізоляційних стрічок, вводять до складу кабельного поліетилену

для підвищення гнучкості, стійкості до розтріскування і зниження вологопроникності.



Рисунок 8.13 – Поліізобутилен

Низькомолекулярний поліізобутилен знаходиться в рідкому стані. Його застосовують для просочення паперових конденсаторів та для виготовлення клеючих лаків.

8.4.6 Політетрафторетилен

Політетрафторетилен (фторопласт – 4) – молочно-білий непрозорий продукт полімеризації тетрафторетилена з молекулярною масою $(14 - 50) \cdot 10^4$, густиною $2150 - 2240 \text{ кг/м}^3$ і ступенем полімеризації 80 – 85% є найнеполярнішим полімером з відносною діелектричною проникністю 1,9. За кордоном має назву тефлон.

Чотири атоми фтору настільки ефективно екранують атоми вуглецю, що на політетрафторетилен при нормальних температурах не діють ніякі кислоти (навіть царська горілка) і луги.



Рисунок 8.14 – Приклади застосування політетрафторетилену

При нагріванні при 327 °С кристаліти у політетрафторетилені плавляться і він стає напівпрозорим, але зберігає механічну міцність, і тільки при 415 °С починає переганятися, тобто переходити у газоподібну фазу обминаючи рідинну, з виділенням отруйних газів – фтору і фосгену.

Політетрафторетилен може працювати при температурах від –260 до 260 °С, короткочасно – до 300 °С. Його властивості практично незмінні в інтервалі температур від –60 до 200 °С і частот до надвисоких (10^9 Гц) включно. Це єдиний матеріал, який зберігає пластичність і може використовуватися як ущільнюючий при гелієвих температурах.

Електричні властивості дуже високі:

- $\rho = 10^{15} - 10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м};$
- $\varepsilon = 1,9 - 2,2;$
- $\text{tg}\delta = 0,0002 - 0,00025;$
- $E_{\text{пр}} = 40 \text{ кВ/мм}$ при 250 °С і товщині 1 мм.

Основними недоліками політетрафторетилену є відсутність переходу у в'язкоплинний стан, що дуже ускладнює технологію його переробки у виробі: унеможливорює екструзію, лиття під тиском, що використовуються для інших полімерів.

Вироби з нього виготовляють обточуванням на токарному станку спресованих при підвищених значеннях температури і тиску монолітних блоків. Крім того, для політетрафторетилену характерна холодоплинність, а головне дуже низькі радіаційна стійкість і стійкість до дії часткових розрядів.

Застосовують політетрафторетилен у виробництві термо- і вологостійкої ізоляції проводів і кабелів, у термостабільних конденсаторах, для пазової та виткової ізоляції електричних машин та як високочастотну ізоляцію. Крім того, його застосовують для виготовлення установлювальних деталей.

8.5 Полярні полімеризаційні термопластичні синтетичні діелектрики

Для полярних термопластичних високомолекулярних діелектриків характерні підвищені значення відносної діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат, що сильно залежать від температури. Значення питомого опору і електричної міцності у них менші, ніж у неполярних полімерів. Тому полярні полімери є низькочастотними діелектриками, які працюють на постійній напрузі і при змінних напругах низьких частот.

8.5.1 Полівінілхлорид

Полівінілхлорид (поліхлорвініл) – аморфний, напівпрозорий, з жовтуватим відтінком, продукт полімеризації газоподібного вінілхлориду в присутності перекису водню. Молекулярна маса $(5 - 10) \cdot 10^4$, густина – 1350 – 1370 кг/м³.

Практично негорючий (горить тільки в полум'ї з виділенням токсичних HCl і Cl₂). Стійкий до дії води, лугів, розведених кислот, олив, бензину й спирту. Розчиняється при нагріванні в органічних розчинниках.



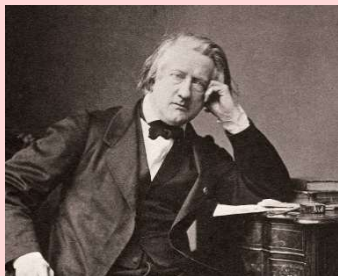
Рисунок 8.15 – Приклади застосування полівінілхлориду

За нормальних умов чистий полівінілхлорид перебуває в склоподібному стані ($T_c = 78 - 105^\circ\text{C}$) і випускається під назвою **вініпласт**. Вініпласт легко зварюється, має хорошу адгезію до металів. З нього виготовляють акумуляторні баки, конструкційні деталі, що стійкі до вібрації та ударів, корпуси трубчастих розрядників (при нагріванні з полівінілхлориду інтенсивно виділяються газу, що прискорюють гасіння дуги).

Для зниження температури склування у полівінілхлорид вводять до 50% пластифікаторів (дибутилфталат, діоктилсебацинат), що дозволяє знизити температуру склування до -40°C , але погіршує електричні властивості. Чистий полівінілхлорид має відносну діелектричну проникність 3,2–3,6, пластифікований 5–6, а $\text{tg}\delta$ полівінілхлоридного пластикату може сягати 0,15.

Електричні властивості полівінілхлориду:

- $\rho = 10^{11} - 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- $\varepsilon = 3,5 - 4,5$;
- $\text{tg}\delta = 0,015 \dots 0,08$;
- $E_{\text{пр}} = 20 - 45 \text{ кВ/мм}$;
- теплостійкість $60 \dots 70^\circ\text{C}$;
- морозостійкість $-25 \dots -50^\circ\text{C}$.



Полівінілхлорид (ПВХ) – один з найбільш універсальних і широко використовуваних пластиків у світі. Його винайшли випадково: в 1835 році французький хімік **Анрі Віктор Реньо** помітив, що білий порошок утворився в пробірці з хлорованим етиленом, коли вона залишалася під сонячним світлом. Але тільки у 1920-х роках інші вчені знайшли спосіб зробити цей

матеріал корисним. Сьогодні ПВХ використовують для виготовлення всього: від труб і віконних рам до кредитних карток і іграшок. Одна з цікавих властивостей ПВХ полягає в тому, що його можна зробити дуже гнучким або жорстким, змінюючи склад добавок, що додаються під час виробництва.

Застосовують пластифікований полівінілхлорид для виготовлення установних проводів, захисних оболонок кабелів, ізоляції негорючих кабелів, липкої стрічки, трубок, рулонних матеріалів тощо.

8.5.2 Політрифторхлоретилен

Політрифторхлоретилен (фторопласт-3) – слабополярний продукт полімеризації трифторхлоретилену білого кольору. Молекулярна маса $(2-36) \cdot 10^4$, густина 2090 – 2160 кг/м³, ступінь кристалічності 40 – 70%. Кристалічна фаза плавиться при 215 °С, температура склування аморфної фази 50 °С. На відміну від фторопласта-4 не холодоплинний, негорючий, але при температурі близько 300 °С починає розкладатися і набуває від темно-коричневого до чорного кольору.

Має дещо гірші електрофізичні характеристики в порівнянні з фторопластом-4:

- $\rho = 10^{14} - 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- $\varepsilon = 2,5 - 3$;

- $\text{tg}\delta = 0,01 - 0,015$;
- $E_{\text{пр}} = 20 - 25 \text{ кВ/мм}$;
- робоча температура до 120°C , але більш високі еластичність, питому ударну в'язкість, радіаційну стійкість і більш просту технологію переробки.



Рисунок 8.16 – Приклади виробів з полівінілхлориду

Застосовують в кабельній техніці і виробництві конденсаторів, а також для виготовлення складних за формою радіотехнічних деталей, панелей ламп тощо.

8.5.3 Поліметилметакрилат

Поліметилметакрилат (органічне скло, плексиглас) – термопластичний, аморфний, прозорий (пропускає 90 – 99% видимого світла, 75% ультрафіолету, для порівняння силікатне скло пропускає 0,6 – 3% ультрафіолету) продукт полімеризації метилефіру метакрилової кислоти. Має гарну холодо-, оливо- і

лугостійкість. Практично не поглинає води. Розчиняється в дихлоретані, ацетоні. Горить з виділенням великої кількості газів CO_2 , CO , H_2 , H_2O , що сприяє гасінню дуги.

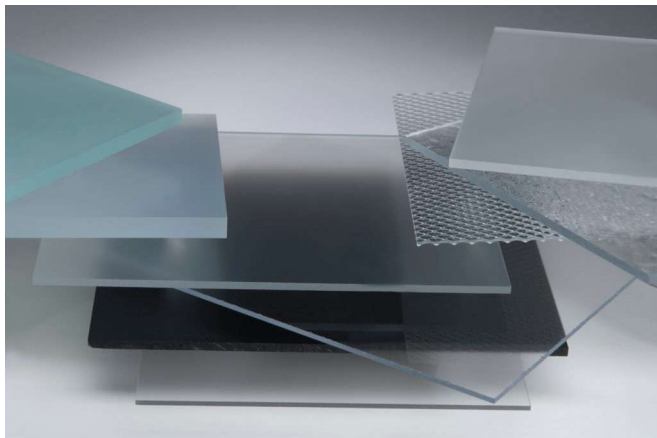


Рисунок 8.17 – Поліметилметакрилат

Електричні властивості:

- $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- $\epsilon = 2,8 - 4,5$;
- $\text{tg}\delta = 0,02 - 0,06$;
- $E_{\text{пр}} = 18 - 35 \text{ кВ/мм}$;
- теплостійкість $60 - 80 \text{ }^\circ\text{C}$;
- морозостійкість $-80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Виготовляють прокатуванням при температурі вище $120 \text{ }^\circ\text{C}$ у вигляді листів товщиною $0,8 \dots 24 \text{ мм}$ і вище, стрижнів, порошків. Застосовують як конструкційний матеріал для виготовлення шкал, лінз, плівок, клеїв, лаків та як електроізоляційний матеріал при низьких частотах, у вимикачах та розрядниках високої напруги.



Рисунок 8.18 – Приклади застосування плексигласу

Як заміник прозорого скла плексиглас часто використовується для акваріумів, оглядових портів на підводних човнах, автомобільних лінз, захисту глядачів на спортивних ковзанках, вікон літаків, поліцейських транспортних засобів боротьби з масовими заворушеннями, лінз для маяків тощо. Він також використовується в ряді медичних галузей, включаючи деякі операції, стоматологічні матеріали та окуляри.

8.5.4 Полііміди

Полііміди – група слабополярних аліфатичних (ступінь кристалічності до 60%), аморфних ароматичних, лінійних і тривимірних полімерів від світло-золотавого до темно-червоного кольорів, що мають у своєму складі імідну групу, яка і визначає властивості цих матеріалів. Молекулярна маса їх досягає $2 \cdot 10^5$, густина 1430 кг/м^3 . Не стійкі до дії лугів і деяких органічних речовин, стійкі до дії озону і радіації.

Вони належать до найбільш нагрівостійких полімерів; їх тривала робоча температура не менша $+220 \text{ }^\circ\text{C}$, а у вакуумі і інертному середовищі – до $500 \text{ }^\circ\text{C}$. Плівка із поліімідних смол не розм'якшується і не плавиться при температурі до $+800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Температура склування ароматичних поліімідів 500 °С. Мають високу механічну міцність (межа міцності при розриванні 160 – 180 МПа), яка практично не змінюється до криогенних температур (–269 °С), але підвищене водопоглинання (0,8% при 100 °С за 30 діб).



Рисунок 8.19 – Поліімідні матеріали Dусоуа

Електрофізичні характеристики поліімідів:

- $\rho = 10^{15} - 10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- $\varepsilon = 3,5$;
- $\text{tg}\delta = 0,0006 - 0,0016$;
- $E_{\text{пр}} = 160 - 200 \text{ кВ/мм}$ при товщині зразків 20 – 100 мкм.

Полііміди використовують у виробництві пластмас, лаків. Плівки з них застосовують для пазової і виткової ізоляції, у виробництві кабелів, обмотувальних проводів, друкованих плат, конденсаторів, плівкових електроізоляційних матеріалів.

У сучасному машинобудуванні використання новітніх високоефективних полімерів, зокрема поліімідних матеріалів, має ключове значення для вдосконалення технологічних застосувань. Ці матеріали відомі своєю винятковою термічною здатністю, стабільністю розмірів з мінімальним температурним розширенням, цікавими електричними властивостями та

видатними механічними властивостями, що робить полііміди незамінними в умовах високого навантаження, суворих і високих температур.

8.6 Поліконденсаційні органічні діелектрики

8.6.1 Поліаміди

Поліаміди (капрон або поліамід 6, найлон або поліамід 6,6, ϵ -капролактам) – непрозорі, полярні продукти поліконденсації гексаметилендіаміну з адипіновою кислотою. Колір від безбарвного до жовто-коричневого. Молекулярна маса $(8-25) \cdot 10^3$, густина 1120–1140 кг/м³. Розчиняються тільки в концентрованих сірчаній, соляній, азотній і мурашиній кислотах, фенолах і амідах. Руйнуються в розчинах лугів. Стійкі до дії жирів, нафтопродуктів і спиртів.

Поліаміди плавляться без розкладання. Температура плавлення 210 – 215 °С. Температура крихкості від –30 °С до –70 °С. Добре обробляються різанням, литтям під тиском і гарячим пресуванням.

Електрофізичні характеристики поліамідів суттєво залежать від температури, частоти напруги і вмісту вологи. Вони, як і механічні властивості, різко погіршуються внаслідок термо- і фотодеструкції.

Для поліпшення механічних характеристик, зменшення водопоглинання і ТКЛР в поліаміди вводять наповнювачі (тальк, аеросил (мелений кварцовий пісок), скляні волокна, графіт).

Електричні і теплові властивості поліамідів:

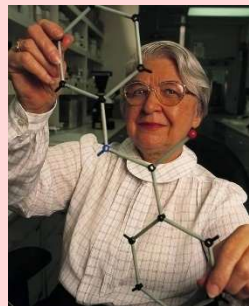
- $\rho = 10^{11} - 10^{12}$ Ом·м;
- $\epsilon = 4 - 6$;
- $\text{tg}\delta = 0,022 - 0,08$;
- $E_{\text{пр}} = 18...25$ кВ/мм;
- теплостійкість 50 – 60 °С,

- робоча температура наповнених поліамідів від -60 до 120°C .

Нейлон був винайдений американським хіміком Уоллесом Карозерсом (Wallace Carothers) та його командою в лабораторіях компанії DuPont у 1935 році. Це був перший повністю синтетичний полімер, створений без використання природних матеріалів. Під час Другої світової війни нейлон використовувався для виготовлення парашутів, мотузок і військового спорядження.

Нейлон став одним із перших синтетичних матеріалів, що масово використовуються для виготовлення ізоляції електропроводів. Завдяки своїй стійкості до зносу, нейлон ідеально підходить для ізоляції в умовах, де кабелі піддаються механічним впливам, наприклад, у моторних відсіках автомобілів.

Крім того, нейлон має високу стійкість до вологи, що робить його відмінним матеріалом для використання в умовах підвищеної вологості, де інші матеріали можуть втрачати свої ізоляційні властивості.



Відкрила волокно, що було в 5 разів міцніше за сталь на одиницю ваги. Винахід був настільки унікальним, що DuPont швидко зрозуміла його потенціал для інших застосувань.

Кевлар – один з найміцніших поліамідів, який використовується для виготовлення куленепробивних жилетів, касок, в аерокосмічній галузі для зміцнення корпусів літаків і космічних апаратів. Кевлар у 5 разів міцніший за сталь, але при цьому дуже легкий. Кевлар був винайдений в 1965 році хіміком Стефані Кволек (Stephanie Kwolek), яка працювала в компанії DuPont. Вона шукала нові легкі, але міцні матеріали для використання в автомобільних шинах, і несподівано



Використовують при виготовленні литої ізоляції трансформаторів струму, деяких компаундів, лаків і емалей, штучних волокон, пластмас, різних установних і несучих елементів.

У 1965 році вчені фірми Дюпон розробили новий метод виробництва майже досконалого полімерного витягнутого ланцюга. Полімер поліпарабензаміда був отриманий у формі рідкого кристалічного розчину, завдяки простій повторюваності молекулярних структур. Ключова структурна вимога до основи полягала в тому, що орієнтовані в пара-положенні бензольні кільця формувалися в паличкоподібні молекулярні структури. Ця розробка надалі втілювалася в створенні волокна KEVLAR®.

Ілюстрація відмінностей між рідкокристалічними жорстколанцюговими і гнучколанцюговими полімерами, які отримуються в розчині, представлено на рис. 8.20. Для гнучколанцюгових полімерів в розведених розчинах характерний випадковий розподіл ланцюгів, потім, у міру концентрування розчину, ланцюгові клубки добре агрегуються, і при витяжці розплаву відбувається орієнтація ланцюгів, яка може бути досить досконалою, але все одно не буває абсолютною. Для жорстколанцюгових молекул, таких як поліпарабензамід, існують паличкоподібні молекули, що являють собою добре сформовані орієнтовані ланцюги вже в розбавленому розчині, при високій концентрації їх форма не змінюється. Потім, при накладенні на розчин зсувних напружень, формується добре орієнтована молекулярна структура, яка представлена на рис. 8.21.

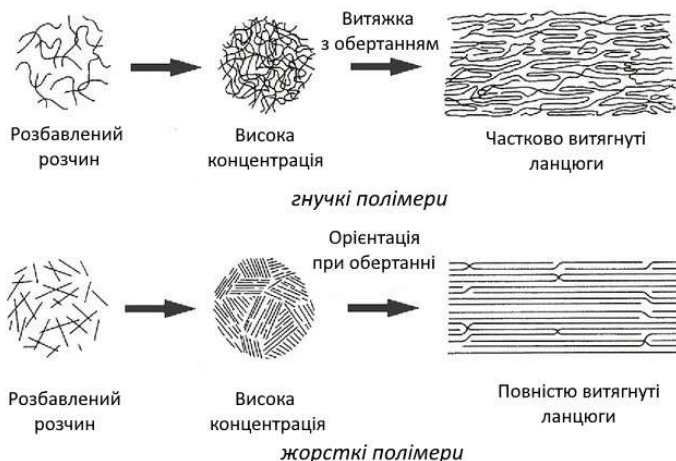


Рисунок 8.20 – Відмінності між рідкокристалічними жорстколанцюговими і гнучколанцюговими полімерами при отриманні в розчині

Пов'язані водневими зв'язками по амідних групах ланцюги покладені в площину, а потім ці площини збираються в пачки і утворюють паличковидну структуру (рис. 8.21). Фактично жорстколанцюгова структура полімерної молекули призводить до отримання досконалої орієнтації вже і в матеріалах в формі волокна. Саме на цій структурній основі при формуванні таких надмолекулярних структур фірма Дюпон отримала можливість створити технологію волокна з поліпарафенілентерефталаміда, яке було введено в асортимент як високоміцне арамідне волокно KEVLAR® в 1971 році.

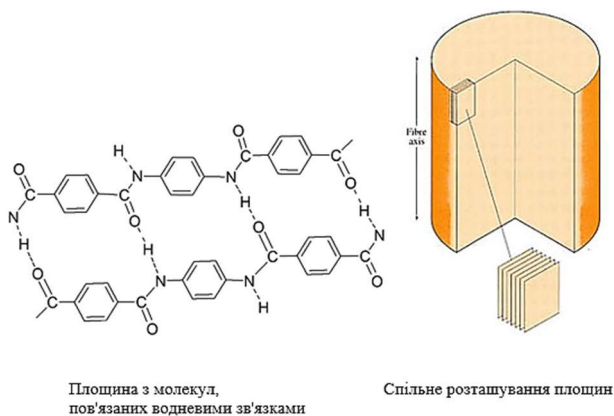


Рисунок 8.21 – Циліндрична структура волокна, радіально складеного з площин, пов'язаних водневими зв'язками

На схемі рис. 8.22 видно, що вихідне сире волокно подається спочатку на попереднє покриття, потім сушиться в печі, потім на нього наноситься зовнішнє покриття, після чого відбувається сушка з одночасною витяжкою. Залежно від технологічних умов витяжки можливе отримання двох основних різновидів волокна KEVLAR® – або матеріал з великим модулем пружності і меншим відносним подовженням, або матеріал з великим відносним подовженням і меншим модулем пружності. Ці матеріали отримали торгові марки KEVLAR® 29 і KEVLAR® 49.

Високоміцні волокна, одержувані переробкою сірчаноокислотних рідкокристалічних розчинів найпростішого з арамідів – поліпарафенілентерефталаміда (ПФТА) є більш економічними, ніж параполіамідні волокна. Відомо, що саме ПФТА застосовуються за кордоном для отримання високоміцних

ниток Кевлар і Тварон, переваги яких обумовлені не тільки використанням більш дешевої сировини, але і більшою концентрацією прядильних розчинів. Крім того, формування ПФТА волокон через повітряний прошарок здійснюється з високою швидкістю.

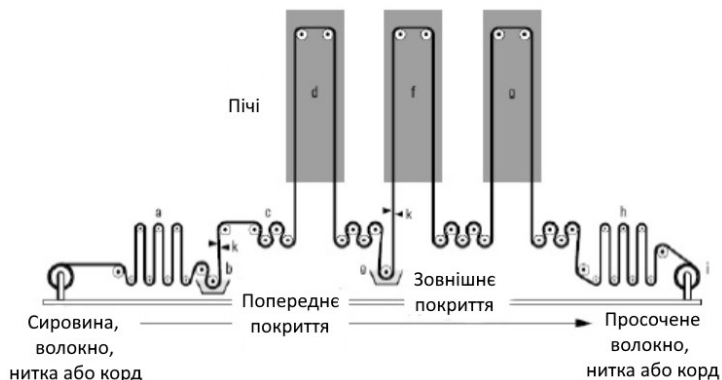


Рисунок 8.22 – Схема отримання високоміцних жорстколанцюгових волокон

Використовується для посилення проводів запалювання, комунікаційних кабелів (наприклад, проводів для навушників і побутових кабелів), композитних матеріалів (наприклад, для морського, космічного, наземного транспорту і виробів для спорту і відпочинку), конструкційних пластиків для електричної, електронної і автомобільної промисловості.

В таблиці 8.1 наведені характеристики армуючих синтетичних високомолекулярних ниток типу Тварон (виробництво фірми AKZO NOBEL, Голандія), що застосовуються в оптичних кабелях для забезпечення високої стійкості до розтягуючих зусиль, гнучкості та міцності на розрив, стійкості до деформації вигину і крутіння.

Таблиця 8.1 – Порівняльний аналіз властивостей синтетичних високомолекулярних ниток типу Тварон

Параметри	Арамідний Тварон 2420.	Арамідний Тварон 1052.	«Е» скло	Сталь
Щільність, г/см ³	1,45	1,45	2,54	7,85
Міцність на розрив, МПа	2900	2900	1300	2200
Модуль Юнга, Е, ГПа	115	125	60	160
Відносне подовження, %	2,7	2,5	1,7	2,0



AIRFRAME MATERIALS

Main and tail rotor blades are made of composite materials

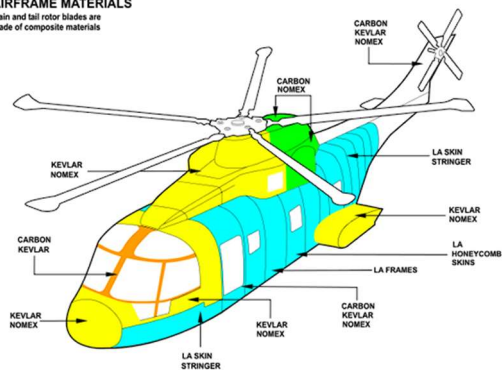


Рисунок 8.23 – Застосування поліамідів (кевлару)

Наявність в конструкції оптичних кабелів високомолекулярних армуючих ниток, що здатні витримувати великі лінійні навантаження при малому відносному подовженні, забезпечують надійний захист оптичного волокна від деформацій. Для синтетичних високомолекулярних ниток характерні високі діелектричні властивості, стабільність розмірів, висока стійкість до повзучості, міцність і стійкість до зовнішніх пошкоджень, високі балістичні властивості і хороша втомна характеристика. негативний температурний коефіцієнт лінійного розширення (при підвищеній температури лінійні розміри ниток зменшуються на відміну від самого оптичного волокна та інших конструктивних елементів кабелю). І як слід, подовження кабелю буде менше.

8.6.2 Поліетилентерефталат

Поліетилентерефталат (лавсан, майлар, терилен, хостафан, дакрон) – слабополярний, прозорий в аморфному і частково прозорий в закристалізованому стані продукт поліконденсації етиленгліколю і терефталевої кислоти. Молекулярна маса $(5 - 8) \cdot 10^4$, густина 1380 кг/м^3 . Кристалічність може сягати 70%. Мало гідрофільний, розчиняється в дихлоретані, фенолах, хлорованих фенолах, мурашиній кислоті і не розчинний у звичайних органічних розчинниках ацетоні, ксилолі, діоксані, етилацетоні. Руйнується концентрованими лугами і сірчаною кислотою.

Робочий інтервал температур від -60 до $150 \text{ }^\circ\text{C}$, температура плавлення $235 - 265 \text{ }^\circ\text{C}$, температура крихкості – $80 \text{ }^\circ\text{C}$, температура склування $80 - 90 \text{ }^\circ\text{C}$.

Електричні характеристики:

$$- \rho = 10^{13} - 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м};$$

- $\varepsilon = 3,1 - 3,5$;
- $\operatorname{tg} \delta = 0,002 - 0,02$;
- $E_{\text{пр}} = 30 - 180 \text{ кВ/мм}$.
-



Рисунок 8.24 – Вироби з поліетилентерефталату

Використовують поліетилентерефталат у вигляді волокон для обплітання проводів і плівок. Плівки використовують для міжшарової ізоляції в обмотках трансформаторів і дроселів, для виготовлення конденсаторів з більшою питомою ємністю, ніж паперові, і з більшою робочою температурою.

8.6.3 Полікарбонат

Полікарбонат (дифлон) – слабополярний, прозорий (може випускатися також у вигляді непрозорих гранул від ясно-жовтого до темно-коричневого кольору) продукт поліконденсації дифенілпропану і фосгену. Молекулярна маса $(20 - 50) \cdot 10^4$, густина $1170 - 1220 \text{ кг/м}^3$. Стійкий до дії аліфатичних вуглеводнів, вищих спиртів, олив, води, кислот, слабких лугів.

Розчиняється в хлорованих вуглеводнях, фенолах, тетрагідрофурані.

Плавиться дифлон без розкладання при температурі 270 °С, температура склування – 150 °С, зберігає гнучкість до – 100 °С.

Має гарні і стабільні в широкому інтервалі температур (до 140°С) механічні і електричні ($\rho = 10^{14} - 10^{15}$ Ом·м; $\epsilon = 3 - 3,2$; $\text{tg}\delta = 0,0006 - 0,008$; $E_{\text{пр}} = 30$ кВ/мм) властивості.

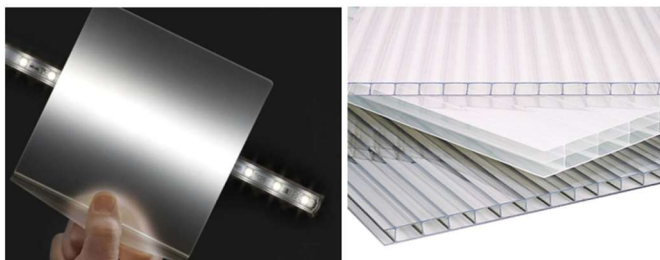


Рисунок 8.25 – Полікарбонат

Полікарбонат використовують для виготовлення установлювальних деталей, конденсаторних плівок, застосовують як в'язучий матеріал у виробництві склопластиків.

8.6.4 Поліуретани

Поліуретани – полярні термопластичні чи термореактивні полімери, що містять уретанову групу і мають дуже широкий спектр властивостей, в тім числі і електричних ($\rho = 10^{12}$ Ом·м; $\epsilon = 4,5 - 5$; $\text{tg}\delta = 0,02 - 0,03$; $E_{\text{пр}} = 26$ кВ/мм).

З поліуретанів виготовляють компаунди для просочення і герметизації високовольних трансформаторів, напівпровідникових випрямлячів, конденсаторів і інших виробів, лаки

для емалювання проводів, що не вимагають флюсів при паянні, клеї для склеювання металів, пластиків, силікатних і органічного стекл, кераміки, гуми і інших матеріалів.

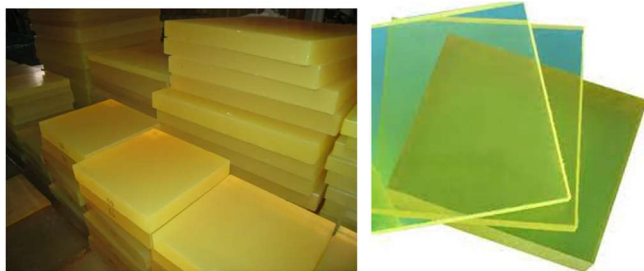


Рисунок 8.26 – Поліуретан

8.6.5 Полівінілацеталі

Полівінілацеталі – продукти поліконденсації полівінілового спирту з альдегідами. При поліконденсації полівінілового спирту з формальдегідом отримують полівінілформаль, яку використовують для виробництва емаль-лаків вініфлекс і металвїн для ізоляції обмоточних проводів, що мають високу механічну міцність, більш високі значення у порівнянні з оливними лаками температури розм'якшення, жорсткості і твердості.



Рисунок 8.27 – Полівінілацеталі

8.7 Пластмаси (пластики)

Пластмаси представляють собою складні за складом системи, побудовані на полімерній основі. Властивості систем визначаються видом, кількістю й співвідношенням компонентів. У переважній більшості випадків полімер поєднує компоненти в єдине ціле й тому називається зв'язуючим. Як зв'язуюче можуть викорис товуватися всі різновиди полімерів, тобто термопластичні й термореактивні, олігомери й співолігомери, полімери, співполімери й високополімери.

В'язуча речовина (зв'язувач, зв'язуюче) – органічна речовина, тобто смола природна, синтетична термопластична чи термореактивна або неорганічна (цемент, скло), що утворює дисперсійне середовище – матрицю, яка об'єднує пластмасу в один матеріал і значною мірою зумовлює його властивості. Зв'язуюче визначає основні термодформаційні й технологічні властивості пластмас. Крім полімеру до складу пластичної маси зазвичай входять складові, вміст яких може змінюватися в різних межах (табл. 8.2).

Наповнювачі – неорганічні чи органічні волокнисті (скловолокно, довговолокнистий азбест, базальтове волокно, сульфатна целюлоза, текстильні і паперові часточки, синтетичні волокна), порошкові (мелені слюда, пісок і гірські породи, тальк, каолін, кальцит, феромагнітний порошок, кварцове борошно, деревне борошно, лігнін і дисперсні полімери) чи листові (слюда, склотканина, тканина, папір) речовини, що істотно знижують вартість, підвищують механічні характеристики і нагрівостійкість матеріалу. Однак, слід пам'ятати, що при введенні наповнювачів, особливо органічних, може зростати гігроскопічність, а також погіршуватися електричні характеристики.

Тверді компоненти пластмас (крім зв'язуючого) зазвичай мають форму дисперсних частинок або коротких волокон, що дає змогу переробляти пластмаси різноманітними методами й передусім безперервними, зокрема екструзією та каландруванням.

При цьому різноманітні спеціальні добавки можуть визначати або посилювати певну технологічну або експлуатаційну властивість пластмаси. Наприклад, такими добавками можуть бути різні поверхнево-активні речовини, що впливають на гідрофільність або гідрофобність пластмас, триботехнічні добавки, що знижують або підвищують коефіцієнт тертя й підвищують опір стиранню, добавки, що регулюють адгезію полімерів до певних матеріалів або підвищують їхню вогнестійкість та ін.

Таблиця 8.2 – Діапазон вмісту компонентів у пластмасах

Тип складової	Вміст, % (за масою)
Наповнювач	до 95,0
Пластифікатор	до 45,0
Отверджувач (для реактопластів)	до 10,0
Мастило	до 2,0
Реологічні добавки	до 3,0
Барвники або пігменти	до 2,0
Стабілізатори та інгібітори, зокрема:	0,1–5,0
– антиоксиданти та світлостабілізатори;	до 2,0
– антистарителі;	до 3,0
– антиради	до 1,0
Антипірени	до 30,0
Антистатики	до 3,0
Антисептики	до 2,0

Пластифікатори вводяться для поліпшення технологічних і експлуатаційних характеристик пластмас. Вони знижують температури склування і крихкості, розширюють інтервал високоеластичного стану матеріалу.

Затверджувачі (зшиваючі компоненти) вводять в пластмасу для утворення поперечних зв'язків в молекулах і між молекулами полімера.

Стабілізатори забезпечують захист від руйнівної дії тепла (термостабілізатори), світла (фотостабілізатори) і кисню (антиоксиданти).

Змашувальні речовини (парафін, віск, силіконові рідини та інші) збільшують плинність і зменшують прилипання пластмаси до стінок обладнання в процесі виготовлення і формування виробів.

Для пластмас характерний широкий спектр різноманітних властивостей і областей застосування. Вони можуть використовуватися як електроізоляційні і як конструкційні матеріали, що забезпечується високим рівнем електрофізичних і механічних властивостей, стійкістю до дії високих і низьких температур, хімічною та вологостійкістю, еластичністю, невеликою густиною та легкістю переробки у вироби.

Основні способи переробки пластмас:

- переробка у в'язкоплинному стані – лиття під тиском, екструзія (видавлювання через отвір відповідної форми у матриці), гаряче пресування тощо;

- переробка у високоеластичному стані – гаряче штампування, пневмо- і вакуумне формування, обробка різанням тощо;

– переробка в склоподібному стані – розділове штампування, обробка різанням тощо; виготовлення виробу шляхом полімеризації рідкої суміші в спеціальній формі.

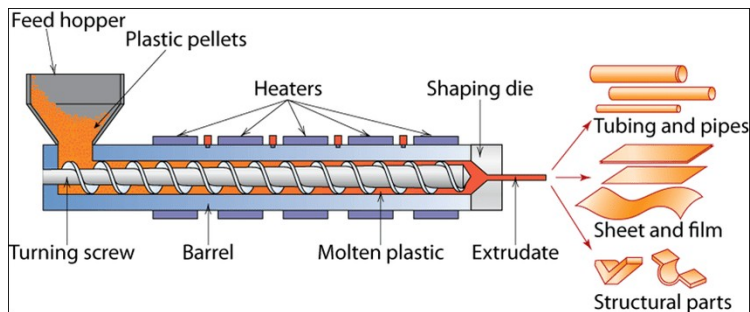


Рисунок 8.28 – Екструзія пластику з пластифікуючим компонентом

Прес-порошки – вихідний матеріал для отримання пластмас у вигляді тонко подрібнених, висушених і розмішаних компонентів. Їх отримують:

– сухим способом – подрібнюють та змішують в твердому стані;

– мокрим – попередньо просочують наповнювач розчином в'язучого в певному розчиннику, далі нагрівають для випаровування розчинника та подрібнюють одержаний матеріал. При такій технології забезпечується більша однорідність прес-порошку.

Промисловість виготовляє 54 марки прес-порошків, що поділяються на 7 груп:

- загального призначення,
- електроізоляційні,
- волокнисті (для колекторів електромашин),
- з підвищеною водо- та нагрівостійкістю,

- з підвищеною хімічною стійкістю,
- з підвищеною міцністю на удар (для цоколів електроламп),
- особливого призначення (рентген-апарати).

Вироби із прес-порошків отримують методом відливання під тиском (підігрівають зовні прес-форми і нагнітають прес-порошок в прес-форму під тиском), шприцюванням і екструзією (виготовляють стрижні, трубки, стрічки).

Прикладом прес-порошків можуть бути **фенопласти** – матеріали на основі фенол-формальдегідної (бакеліт) або новолачної смоли. З них виготовляють корпуси електроапаратів.

Електричні властивості фенопластів:

- $\rho = 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- $\text{tg}\delta = 0,01 \dots 0,09$;
- $E_{\text{пр}} = 12 \dots 17 \text{ кВ/мм}$;
- $\varepsilon = 5,5 \dots 7,0$;
- теплостійкість $110 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Під дією дуги на поверхні утворюється струмопровідний шар. Найширше застосування знайшли шаруваті пластмаси з листовим заповненням – гетинакс і текстоліт.



Рисунок 8.29 – Фенопласт

8.7.1 Гетинакс

Гетинакс – листовий шаруватий матеріал товщиною від 0,2 до 50 мм, в якому наповнювачем є кабельний папір (0,12 мм) в кілька шарів, просочений бакелітом або крезолоформальдегідною смолою і пресований при температурі 160...165 °С і тиску 6 – 10 МПа з часом пресування 2–5 хвилин на 1 мм товщини. Відзначається гетинакс великою неоднорідністю властивостей – питомий об'ємний опір уздовж шарів в 50 – 100, а електрична міцність в 5 – 8 разів менші, ніж поперек шарів.



Рисунок 8.30 – Гетинакс

Недоліком гетинаксу, як і інших матеріалів на основі фенолоформальдегідної смоли, є низька стійкість до дії поверхневих розрядів (трекінгостійкість).

Зараз випускають гетинакс на основі епоксидної смоли та поліетилентерефталатного паперу (гетинакс марки ЛГ), а також гетинакс, облицьований по обидва боки шаром поліетилентерефталатного паперу, просоченого епоксидною смолою. Гетинакс марки ЛГ відзначається високими показниками вологостійкості, механічних і електричних властивостей. Добре переробляється методом штампування.

В обмежених кількостях виготовляють гетинакс на основі склопаперу – **склогетинакс**.

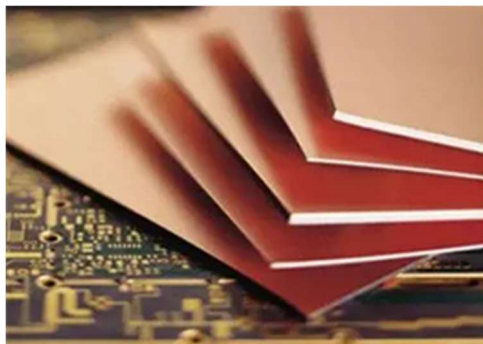


Рисунок 8.31 – Фольгований гетинакс

Для виготовлення низькочастотних друкованих плат використовують **фольгований гетинакс**, покритий з однієї або з двох сторін мідною (99,9% міді) фольгою товщиною 5, 18, 25, 35, 50, 70 і 105 мкм. Чим тонша фольга, тим щільніший монтаж можна забезпечити на даній платі.

8.7.2 Текстоліт

Текстоліт отримують за такою ж технологією, що і гетинакс, але наповнювач бавовняна, скляна (склотекстоліт), поліетилентерефталатна (лавсановий текстоліт), азбестова (азботекстоліт) тканина або нетканий матеріал.

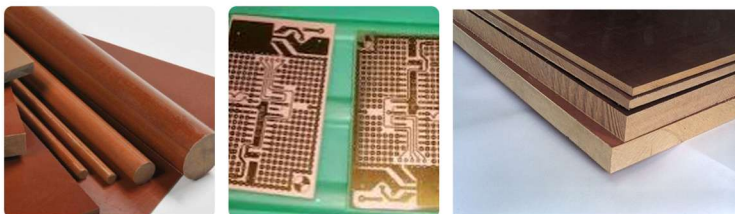


Рисунок 8.32 – Текстоліт



Текстоліт знайшов застосування в музиці, зокрема у виробництві гітарних медіаторів та деталей для гітар. Текстолітові медіатори відомі своєю довговічністю та специфічним звуком. Завдяки високій щільності та зносостійкості матеріалу, такі медіатори забезпечують яскравий і дзвінкий звук, який

особливо цінують гітаристи, що грають на електрогітарах.

Текстоліт має цікаве застосування у виробництві броньованих елементів. Завдяки своїм властивостям, таким як висока міцність, легка вага та стійкість до ударів, текстоліт використовується як один із шарів у багатошарових броньованих пластинах. Завдяки своїй структурі текстоліт здатен ефективно розсіювати кінетичну енергію



удару, зменшуючи ризик проникнення куль або осколків. Верхні лобові деталі корпусів деяких танків мали схему бронювання "60 мм + 105 мм + 50 мм". Світлі шари між сталевими листами – броньовий склотекстоліт.

Текстоліт, наповнений бавовняною тканиною, має більш високі значення питомої ударної в'язкості, стійкості до стирання і опору розколюванню з торця. Електричні характеристики такі ж, як у гетинаксу, за виключенням електричної міцності, яка помітно нижча. Вартість текстоліту в кілька разів вища за вартість гетинаксу.

При виробництві склотекстоліту використовують склотканину з алюмоборосилікатного скла зі вмістом окислів лужних металів не більше 0,5%. Як в'яжуче застосовують кремнійорганічні лаки або композиції кремнійорганічних лаків з

епоксидною смолою Електрична міцність склотекстоліту в три рази вища, ніж бавовняного текстоліту.

Фольгований склотекстоліт має більшу, ніж фольгований гетинакс, стійкість до підвищених температур і вологості, високу тропікостійкість.

8.8 Еластомери

Еластомер – речовини, що мають надзвичайно велику пружну деформацію (до 500%) при температурах до $-(40-60)^\circ\text{C}$, що зумовлено зигзагоподібною, шарнірною формою молекул, які при деформації випрямляються, структура стає близькою до кристалічної, а при знятті зусилля повертаються в початкову форму.

Еластомери мають також широкий інтервал між температурами склування і плинності.

До еластомерів належать, перш за все, гуми, а також деякі поліуретани, кремнійорганічні полімери, суміш 90% поліетилену і 10% поліізобутилену, пластифікований полівінілхлорид тощо.

8.8.1 Каучуки та гуми

Каучуки – це натуральні або синтетичні еластомери, що характеризуються еластичністю, водонепроникністю та електроізоляційними властивостями та з яких вулканізацією одержують гуми та ебоніти.

Натуральний (природний) каучук – це високомолекулярний вуглеводень $(\text{C}_5\text{H}_8)_n$, цис-полімер ізопрену, отримують з особливих рослин – каучуконосів, які містять каучук у соку (латексі), що є суспензією у воді дрібних частинок округлої форми (глобул), глобули мають тонку оболонку з білкових речовин і жирних кислот. Каучук виділяється під час коагуляції латексу й видаленні домішок.

Коли натуральний каучук нагрівають до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, він втрачає еластичні властивості, розм'якшується і стає липким, а за низьких температур – крихким. Розчиняється у вуглеводнях і сірководнеці. Розчин каучуку в бензині називають гумовим клеєм, який застосовують для склеювання каучуку й гуми.



Рисунок 8.33 – Процес видобування натурального каучуку

За температури вище $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ натуральний каучук розкладається з утворенням низькомолекулярних вуглеводнів. У разі його взаємодії із сіркою, хлористою сіркою або органічними пероксидами відбувається з'єднання через атоми сірки довгих макромолекулярних зв'язків з утворенням сітчастих структур (тобто відбувається процес вулканізації). Це надає каучуку високої еластичності в широкому інтервалі температур. Натуральний каучук переробляють на гуму. У сирому виді застосовують не більше 1 % натурального каучуку (здебільшого у вигляді гумового клею). Понад 60 % натурального каучуку використовують для виготовлення автомобільних шин. У промислових масштабах натуральний каучук одержують в Індонезії, Малайзії, В'єтнамі й Таїланді.

Обсяги добутого натурального каучуку недостатні для задоволення потреб у ньому. Тому вчені створили синтетичний каучук, який успішно замінює природний.

Синтетичний каучук (СК) є продуктом полімеризації вуглеводневого, бутадієнового, силоксанового мономерів та інших типів переважно за участю каталізаторів. Молекули синтетичних каучуків відрізняються від молекул натуральних каучуків більшим ступенем розгалуженості, а поєднання різних ланок при полімеризації дає змогу отримувати велику різноманітність сополімерів із широким набором фізико-механічних і спеціальних характеристик. Основними видами СК, які мають найбільше практичне значення, є бутадієнові (полібутадієни – продукти полімеризації бутадієну) і бутадієнстирольні, що належать до групи синтетичних каучуків загального призначення, а також кремнійорганічні, поліуретанові й каучуки інших видів, які зараховують до синтетичних каучуків спеціального призначення.

Основні типи синтетичних каучуків:

- ізопренові;
- бутадієнові;
- бутадієн-стирольні й бутадієн-метилстирольні;
- бутилкачуки (ізобутілен-ізопренові співполімери);
- етилен-пропіленові;
- бутадієн-нітрильні (бутадієн-акрилонітрильні співполімери);
- хлоропренові;
- фторкачуки;
- уретанові;
- акрилові;
- силоксановий;
- полісульфідні;
- тіоколи.



Рисунок 8.34 – Приклади виробів з каучуку

У ракетній техніці синтетичні каучуки використовуються як полімерна основа для виготовлення твердого ракетного палива, у якому вони відіграють роль пального, а як наповнювач застосовується порошок калійної або аміачної селітри чи перхлорату амонію, які в паливі відіграють роль окисника.

Ізопренові каучуки – це синтетичні каучуки, одержувані полімеризацією ізопрену в присутності каталізаторів – металевого літію, перекісних сполук. На відміну від інших синтетичних каучуків ізопренові каучуки, як і натуральний каучук, мають високу клейкість і незначно поступаються йому в еластичності.

Через малу стійкість до дії підвищених і знижених температур та розчинників чистий каучук для виготовлення електричної ізоляції не вживають. У ракетній техніці синтетичні каучуки використовуються як полімерна основа для виготовлення твердого ракетного палива, у якому вони

відіграють роль пального, а як наповнювач застосовується порошок калійної або аміачної селітри чи перхлорату амонію, які в паливі відіграють роль окисника.

Головне застосування майже всіх каучуків – перероблення на гумово-технічні матеріали та вироби. Основним процесом перероблення каучуків на гуму є **вулканізація** – це процес перетворення сирого природного (натурального) або синтетичного каучуку на гуму шляхом нагрівання його із сіркою до $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, що приводить до утворення просторово-сітчастої структури. Вулканізація сприяє підвищенню нагріво- й холодостійкості гуми, механічної міцності та стійкості до розчинників. Вміст каучуку істотно впливає на електричну міцність гуми: при збільшенні відсотка каучуку електрична міцність гуми зростає. Для отримання ізоляційної гуми в гумову суміш уводять специфічні наповнювачі (крейду, тальк, мелену слюду тощо), а для фарбування – пігменти й барвники (сажу, цинкові білила тощо).

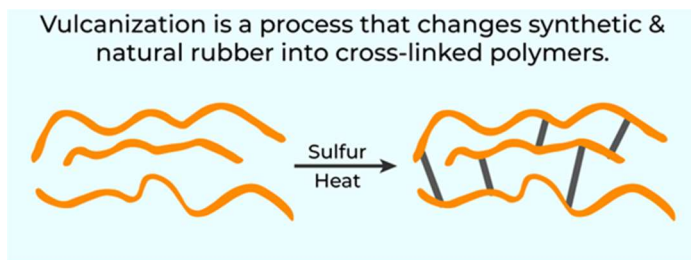


Рисунок 8.35 – Процес вулканізації каучуку

За ступенем вулканізації гуми поділяють на:

- м'яку (0,8...4,0 % сірки),
- напівтверду (напівебоніт; 12...20 % сірки);
- тверду (ебоніт; 30...50 % сірки)

Крім сірки гума може мати у своєму складі до 60% інших речовин, таких як наповнювачі (крейда, тальк, каолін, окис цинку тощо) для поліпшення механічних властивостей та здешевлення гуми (наповнювачі в 20 – 75 разів дешевші, ніж каучук), пом'якшувачі (стеарин, парафін) для покращення технологічних властивостей, прискорювачі вулканізації, антиоксиданти, барвники і інші компоненти.



Альтернативною сировиною для виробництва гуми може стати кульбаба, а точніше – сік її коріння, де міститься каучук. Наприкінці 2018 р. німецький виробник шин та автокомпонентів Continental відкрив науково-випробувальну лабораторію Taraxagum Lab Anklam з виробництва натурального каучуку в м. Анклам. Дослідження у цій галузі концерн веде у співпраці з Вестфальським університетом імені Вільгельма у Мюнстері, Інститутом молекулярної біології та прикладної екології Товариства імені Фраунгофера, а також з Інститутом Юліуса Кюна з 2011 року. Німецькі біотехнологи дійшли висновку: найкращі показники у липкої кульбаби кок-сагиз, яка у природних умовах зростає в Центральній Азії, на території Казахстану, Киргизії та Узбекистану.



Плантації кульбаби у парниках дослідницької лабораторії

М'яка гума має високі електроізоляційні, еластичні, волого- та водостійкі властивості. Її недоліки: низька нагрівостійкість, здатність до старіння, нестійкість до розчинників, хімічна взаємодія сірки з металами, що мають контакт з гумою. Електричні властивості неполярної м'якої гуми

– високі електроізоляційні, еластичні, волого- та водостійкі властивості.

Недоліки: низька нагрівостійкість, здатність до старіння, нестійкість до розчинників, хімічна взаємодія сірки з металами, що мають контакт з гумою.

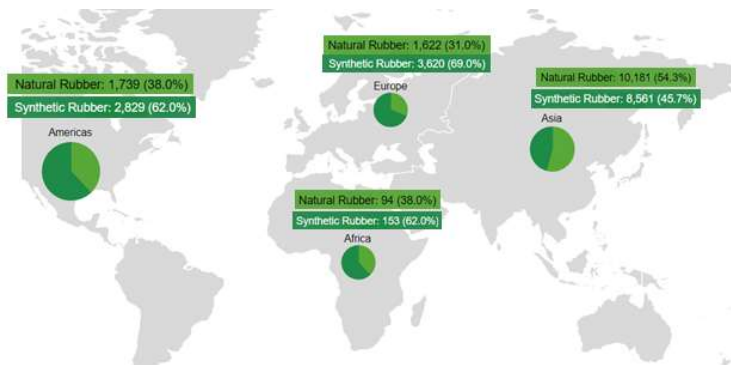


Рисунок 8.36 – Світове споживання натурального та синтетичного каучуку в натуральному вираженні, тис.тон (за даними 2019 р.)

Електричні властивості неполярної м'якої гуми:

- $\rho = 10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м};$
- $\varepsilon = 3 - 7;$
- $\text{tg}\delta = 0,02 \dots 0,1;$
- $E_{\text{пр}} = 20 \dots 30 \text{ кВ/мм};$

полярної:

- $\rho = 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м};$
- $\varepsilon = 8 - 10,0;$
- $\text{tg}\delta = 0,3;$
- $E_{\text{пр}} = 12 \dots 22 \text{ кВ/мм}$

З твердої гуми (ебоніту) виготовляють прутки, трубки, конструкційні матеріали. Недоліками твердої гуми є мала

теплостійкість, зниження електроопору під дією світла (для запобігання цьому поверхню промивають нашатирним спиртом).

Електричні властивості твердої гуми:

- $\rho = 10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{м};$
- $\text{tg} \delta = 0,01 \dots 0,015;$
- $\varepsilon = 2,7 \dots 3,0.$

Тіурамова гума (замість чистої сірки застосовують сірчисте з'єднання – тетраметилтіурамдисульфід, скорочена назва тіурам) має зменшений вплив сірки на метал та підвищену нагрівостійкість. Така гума відзначається високою стійкістю до впливу агресивних хімічних середовищ, зокрема до дії мастил, олій, кислот та лугів. Це робить її ідеальною для використання в автомобільній та промисловій сферах: її широко використовують у виробництві шин, прокладок, шлангів, рукавичок, та інших виробів, де потрібна висока міцність і стійкість до агресивних умов.

Бутадієновий каучук (ескапон) при температурі 200 – 300 °С може бути полімеризований без додавання сірки чи її аналогів. Ескапон – твердий продукт за механічними властивостями схожий на ебоніт, але більш стійкий до теплового старіння, кислот і органічних розчинників. Його електричні властивості:

- $\rho = 10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{м};$
- $\varepsilon = 2,7 - 3,0;$
- $\text{tg} \delta = 0,0005.$

Бутадієн-стірольний каучук, відомий також як SBR (Styrene-Butadiene Rubber), являє собою синтетичний каучук, одержуваний шляхом кополімеризації стиролу та бутадієну. Він був розроблений як альтернатива натуральному каучуку і сьогодні є одним з каучуків, що найбільш широко

використовуються. Бутадієн-стирольний каучук має низку унікальних властивостей, що роблять його придатним для широкого спектру застосувань: характеризується високою стійкістю до зносу, що робить його ідеальним для виробництва шин та інших виробів, схильних до інтенсивного тертя. Цей матеріал відрізняється хорошою стійкістю до старіння, особливо при правильній обробці та додаванні антиоксидантів. Завдяки своїй структурі SBR забезпечує хорошу еластичність і гнучкість, навіть при низьких температурах, SBR стійкий до впливу багатьох кислот, лугів та солей.



Рисунок 8.37 – Бутадієн-стирольний каучук

Бутадієн-стирольний каучук легко переробляється і може бути модифікований різними добавками для досягнення бажаних властивостей. Він піддається вулканізації, що покращує його механічні характеристики та стійкість до старіння. Його застосовують для виготовлення різних промислових виробів, таких як конвеєрні стрічки, шланги, прокладки, підосви взуття та різні ущільнювачі.

Гума використовується у виробництві шин різних транспортних засобів (автомобілів, літаків, сільськогосподарських і дорожньо-будівельних машин, мотоциклів, мопедів, велосипедів), а також гумотехнічних виробів (транспортні стрічки, приводні паси, напірні й напірно-всмоктувальні рукави (зокрема дюритові рукави – гумові шланги, армовані волокнистим або дрововим обплетенням), технічні пластини, гумові кільця різних ущільнювачів, віброізоляторів і демпферів, гумових покриттів підлог, а також гумового взуття і спеціального одягу.

У хімічній промисловості для ущільнення елементів обладнання, а також трубопроводів і трубопровідної арматури застосовують ущільнювальні прокладки з пароніту, одержуваного змішуванням термостійкої гуми з неорганічними наповнювачами (азбестові волокна, оксид свинцю), який випускають у вигляді листів завтовшки від 0,2 до 6 мм.

Розрізняють такі види гум:

- маслобензостійкі;
- кислотостійкі;
- агресивостійкі;
- теплостійкі;
- температуростійкі;
- озоностійкі.

Ебоніт (давньогрецьк. ἔβενοϛ – чорне дерево) – високовулканізований каучук з великим умістом сірки (30–50 % за мас.), зазвичай темно-бурого або чорного кольору; хімічно інертний, має високі електроізоляційні властивості.

На відміну від м'якої гуми, ебоніт не проявляє високої еластичності за звичайних температур і нагадує тверду пластмасу. Ебоніт стає високоеластичним за температури понад

55 °С. Він руйнується сильними окисниками, ароматичними та хлорованими вуглеводнями. Також ебоніт окиснюється на яскравому світлі, набуваючи зеленуватого відтінку.

Натепер ебоніти майже витиснуті пластмасами, що перевершують ебоніти за діелектричними властивостями, хімічною й температурною стійкістю (ебоніти застосовувалися як електроізолятори й кислотостійкі матеріали у виробництві електроізоляційних деталей приладів, для гумування ємностей для агресивних рідин та ін.; також ебоніти використовувалися як замітники дорогих матеріалів типу чорного дерева, слонячої кістки, рога або черепахового панцира).

Питання для самоперевірки:

1. Які полімери називають термопластичними, а які – термореактивними? Наведіть приклади.
2. Які компоненти входять до складу пластмас?
3. Що таке високомолекулярні органічні матеріали, і які їхні основні характеристики, що відрізняють їх від інших видів діелектриків?
4. Поясніть різницю між лінійними, розгалуженими та сітчастими полімерними структурами.
5. У чому полягають переваги лінійних полімерів, таких як поліетилен, у використанні в електротехніці?
6. Які основні властивості політетрафторетилену, що забезпечують його популярність у високовольтних пристроях?
7. Поясніть, у чому різниця між гетинаксом і текстолітом як пластмасами. У яких випадках кожен із цих матеріалів доцільніше використовувати?

РОЗДІЛ 9. ТВЕРДІЮЧІ ДІЕЛЕКТРИКИ: ЛАКИ, ЕМАЛІ, КОМПАУНДИ, КЛЕЇ, ГЕРМЕТИКИ

9.1 Лаки. Класифікація за застосуванням

Лаки – колоїдні розчини смол, бітумів, масел, що висихають, і подібних речовин, які утворюють так звану лакову основу в розчинниках (еластичну плівку). Для досягнення більшої еластичності плівки в лак додають пластифікатори, для прискорення сушіння – сикативи (каталізатори хімічних процесів твердіння). Для розбавлення лаків, що загустіли, вводять розчинники, що відрізняються від первісних розчинників більш повільним випаровуванням. Лаки використовують у рідкому стані, а експлуатують у твердому, тобто при використанні агрегатний стан матеріалу змінюється.



Рисунок 9.1 – Електроізоляційні лаки

Електроізоляційні лаки поділяють за застосуванням на такі групи:

- просочувальні;
- покривні;
- клеючі;

– спеціальні (для емалювання обмоточних проводів).

Один і той же лак може використовуватись як просочувальний і покривний, або як покривний і клеючий.

9.1.1 Просочувальні лаки

Просочувальні лаки використовують для просочення пористої, волокнистої ізоляції (папір, картон, пряжа, тканина, ізоляція обмоток електричних машин та апаратів). Після просочення пори в ізоляції заповнюються не повітрям, а лаком, який має значно вищу електричну міцність й теплопровідність, ніж повітря. Унаслідок просочення підвищується пробивна напруга, зростає теплопровідність, зменшується гігроскопічність і вологопроникність, поліпшуються механічні властивості ізоляції, підвищується нагрівостійкість.

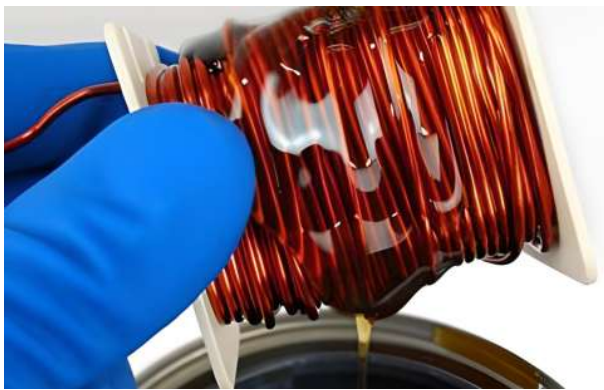


Рисунок 9.2 – Просочувальний лак

Просочувальні електроізоляційні лаки добре цементують витки обмоток електричних машин (особливо обертових), оптимально швидко висихають, характеризуються високими діелектричними властивостями, теплостійкі, еластичні. В

окремих випадках просочувальний лак повинен мати підвищену вологостійкість і стійкість до впливу тропічних умов, маслостійкість і хімічну стійкість. До просочувальних електроізоляційних лаків належать також лаки для просочення паперу й тканин під час виготовлення шаруватих пластиків (у цьому випадку лаки також склеюють окремі аркуші паперу або тканини під час виробництва лакотканин і лакопаперів).

Вимоги, які висуваються до просочувальних лаків:

- добра просочувальна здатність (визначається за кількістю просочених шарів батисту за 15 хвилин);
- відсутність шкідливого впливу на ізоляцію провідникових матеріалів;
- високі електроізоляційні властивості;
- добра вологостійкість, хімічна стійкість, нагрівостійкість;
- достатня механічна міцність;
- додаткові вимоги щодо розчинників, олиव, стійкості до мікроорганізмів.

До просочувальних лаків відносяться кремнійорганічні (КО-921, КО-910), оливо-бітумні (БТ-980, БТ-987), оливо-гліфталеві (ГФ-95). Букви визначають основу лаку, перша цифра 9 говорить про те, що лак електроізоляційний, інші цифри – порядковий номер лаку у групі.

9.1.2 Покривні лаки

Покривні лаки використовують для утворення механічно міцної, гладенької, блискучої, вологостійкої плівки на поверхні виробів. Нерідко ними покривають тверду пористу ізоляцію, попередньо вже просочену. Покривні лаки захищають обмотки від дії мастил, механічних пошкоджень, атмосферних впливів, щіткового пилу, хімічних реагентів тощо. Це поліпшує

властивості твердої ізоляції (зокрема, підвищує напругу поверхневого розряду й поверхневого опору, посилює захист ізоляції від дії вологи або хімічно активних речовин), а також поліпшує зовнішній вигляд виробу.

Покривні лаки повинні мати високу липкість – адгезію, особливо важливими є певна швидкість висихання, здатність лакової плівки в деяких випадках бути еластичною.

До покривних відносять кремнійорганічні лаки (КО-928, КО-938В тощо), поліуретановий (УЛ-1), оливний (масляний) (МЛ-1) поліамідний (АД-9113), поліімідний (ПАК-1) лаки, а також емаль-лак на полівінілацеталевій основі (ВЛ-941).



Рисунок 9.3 – Покривний лак

Деякі види покривних лаків наносять не на тверду ізоляцію (лакування обплетення монтажних проводів), а безпосередньо на метал, утворюючи на його поверхні електроізоляційний шар (ізоляція листів електротехнічної сталі, магнітопроводів трансформаторів, електричних машин та апаратів).

9.1.3 Клейкі лаки

Клейкі лаки застосовують для склеювання твердих електроізоляційних матеріалів (наприклад, склеювання листочків розщепленої слюди при виготовленні міканітів), приклеювання до основи плівкових матеріалів та електроізоляційних матеріалів до металу, виготовлення різних композиційних електроізоляційних матеріалів тощо. Вони повинні мати добру адгезію, не розм'якшуватись при робочій температурі, бути вологостійкими та мати високі електроізоляційні властивості.

До клейких лаків відносяться клеї на основі фенолоформальдегідної смоли (БФ-2, БФ-4 і БФ-6), поліуретановий клей (ПУ-2), епоксидний гарячого (ЕП, ЕПР) і холодного (ВР) твердіння, епоксидно-кремнійорганічний холодного твердіння (КО-400) тощо.

Класифікація лаків за складом та способом сушіння:

За складом лаки можуть бути:

- олійні;
- олійно-бітумні;
- смоляні;
- кремнійорганічні тощо.

За способом сушіння розрізняють електроізоляційні лаки:

- холодного (повітряного) сушіння – утворення плівки при кімнатній температурі (шелачні, ефір целюлозні);
- гарячого (пічного) сушіння – процес відбувається при температурі від 70°C і вище. В цих лаках застосовують термореактивні плівкоутворюючі речовини (гліфталеві, резольні смоли), тому вони вимагають умов для полімеризації. У них вищі механічні та електричні характеристики, ніж у лаків холодного сушіння.

Лаки й емалі гарячого сушіння, як правило, мають вищі діелектричні, механічні й інші властивості.

Для поліпшення характеристик лаків та емалей повітряного сушіння, а також для прискорення затвердіння їх сушать іноді за підвищених температур (+40–80 °C).

Основа лаку – смоляна, оливна, бітумна, оливно-смоляна, оливно-бітумна, ефіроцелюозна тощо – визначає його електроізоляційні і інші властивості.

Основа **олійних лаків** – висихаючі олії – лляна, тунгова. Висихання олійних лаків полягає не у видаленні розчинника, а є результатом полімеризації, що зумовлена розкриванням подвійних зв'язків в молекулах олії, чому сприяє кисень, що є у повітрі, температура, сикатив (каталізатор) та дія інфрачервоного випромінювання. Швидкість сушіння залежить від вмісту сикативу. Підвищена кількість його дозволяє застосовувати холодне сушіння, але отримана таким способом плівка швидко старіє, розтріскується. Для високоякісної електричної ізоляції лаки виготовляють з малою кількістю сикативів і проводять гаряче сушіння. Застосовують для виготовлення світлих лакотканин, лакопаперів, просочування обмоток машин і апаратів, ізоляції листів магнітопроводу електромашин (гаряче сушіння ≈ 500 °C).

Олійно-смоляні лаки – це лакові композиції на основі висихаючих олій і природних та синтетичних смол. Широко застосовуються для просочування обмоток оливонаповнених трансформаторів, обмоток апаратів, що зазнають дії парів кислот і хлору, для покриття ізоляції, що має фенолоформальдегідні смоли. Можна відзначити **оливно-гліфталевий лак**, що має нагрівостійкість до 130 °C і характеризується зниженою гігроскопічністю і маслостійкістю.

Олійно-бітумні (чорні) лаки крім бітуму мають в своїй основі висихаючі олії. Займають проміжне положення між чисто бітумними і чисто олійними лаками. Порівняно з олійними лаками мають кращі електричні властивості, але менш еластичні та нагрівостійкі, розчиняються в оліях, хоча і менше, ніж чисто бітумні.

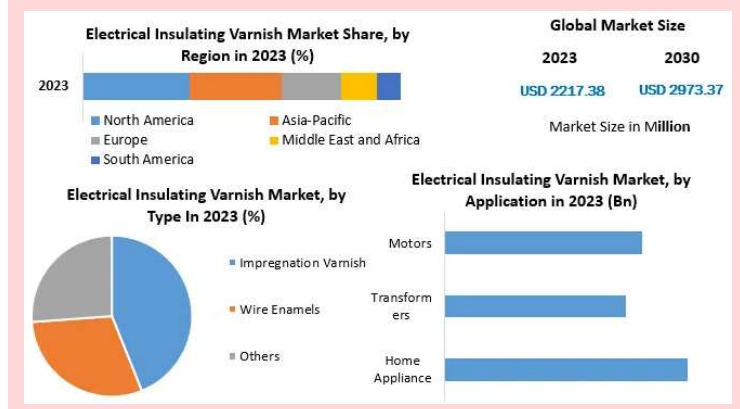
Кремнійорганічні лаки й емалі відрізняються високою нагрівостійкістю, можуть довго працювати за температур у межах $+180-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, тому їх застосовують у поєднанні зі скловолокнистою і слюдяною ізоляцією. Крім того, плівки мають високу вологостійкість і стійкість до електричних іскор.

Лаки й емалі на основі поліхлорвінілових смол стійкі до води, нагрітого масла, до кислих і лужних хімічних реагентів, тому їх застосовують як покривні для захисту обмоток, а також металевих деталей від корозії. Необхідно звернути увагу на слабе прилипання поліхлорвінілових лаків та емалей до поверхонь. Тому останні спочатку ґрунтують й лише потім покривають лаком або емаллю на основі поліхлорвінілових смол. Ці лаки й емалі сушать за температури $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а також $+50-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Недоліками таких покриттів є їхня невисока робоча температура ($+60-70\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Лаки й емалі на основі епоксидних смол відрізняються високою клейкою здатністю та підвищеною нагрівостійкістю (до $+130\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Лаки на основі алкідних і фенольних смол (**фенолоалкідні лаки**) добре висихають у товстих шарах, утворюючи еластичні плівки, здатні довго працювати за температур $+120-130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плівки цих лаків волого- й маслостійкі.

Глобальний звіт про ринок електроізоляційних лаків компанії з дослідження ринку та бізнес-консалтингу Maximize Market Research



Водно-емульсійні лаки – це стійкі емульсійні лакові основи, розчинені у водопровідній воді. Їх виготовляють із синтетичних смол, а також із масел, що висихають, і їхніх сумішей. Водно-емульсійні лаки пожежо- і вибухобезпечні, тому що в складі їх немає легкозаймистих органічних розчинників. Через малу в'язкість такі лаки мають добру здатність просочувати матеріали й вироби. Їх застосовують для просочення нерухомих і рухомих обмоток електричних машин та апаратів, які тривалий час працюють за температури до +105 °С.

9.2 Емалі

Емалі – це різновид лаків, до складу яких уведено пігменти – неорганічні наповнювачі (цинк оксид, титан оксид, залізний сурик ін.), що надають лакам відповідного кольору. Пігменти також підвищують твердість, механічну міцність, вологостійкість та інші властивості лакових плівок. Емалі належать до покривних матеріалів.

Якщо в покривний лак ввести пігмент (барвник), то отримаємо емаль пічного чи повітряного сушіння. Як пігменти використовують неорганічні речовини, головним чином, оксиди цинку, титану, залізний сурик. У процесі висихання емалей, пігмент вступає в хімічну реакцію з лаковою основою і утворює щільні покриття.

Введення пігменту збільшує твердість покриття, нагрівостійкість, вологостійкість та лугостійкість.

Емаль-лаки використовують для ізоляції емальованих проводів та листової електротехнічної сталі; пігментовані емалі (пігмент – вуглець (сажа)) застосовують в лобових частинах високовольтних електричних машин для покращення форми електричного поля шляхом вимушеного його перерозподілу.



Рисунок 9.4 – Емалі

9.3 Компаунди

Компаунди – це суміші різних ізоляційних речовин (смол, бітумів, естерів, восків, масла тощо), які в момент застосування знаходяться в рідкому стані, а після охолодження або в результаті

хімічних процесів, що відбуваються в них, набувають твердого стану. Компаунди відрізняються від лаків відсутністю в їхньому складі розчинника. Якщо компаунди у початковому стані тверді, їх перед уживанням нагрівають до необхідної температури, щоб отримати масу низької в'язкості. За призначенням електроізоляційні компаунди ділять на просочувальні, заливальні, кабельні, обмазувальні.

Просочувальні компаунди застосовують для заповнення пор, капілярів і повітряних включень в електроізоляційних матеріалах, здебільшого для обмоток електричних машин, котушок апаратів, трансформаторів та інших електротехнічних конструкцій. Після просочення підвищується електрична міцність матеріалу й усієї конструкції в цілому, поліпшуються теплопровідність, тепловіддача обмоток, що дає змогу збільшити потужність електричних машин та апаратів при тих же розмірах, зростають механічна міцність, вологостійкість, термін використання всієї конструкції.

Заливні компаунди застосовують для заповнення порожнин конструкцій, проміжків між різними деталями, захисту ізоляції від вологи, збільшення пробивної напруги, поліпшення тепловідведення й підвищення механічної міцності тощо.

Обмазувальні компаунди використовують для обмазування лобових частин обмоток електричних машин.

Кабельні компаунди застосовують для просочування паперової ізоляції електричних кабелів (використовують суміш мінеральної оливи з каніфоллю, що додається для збільшення в'язкості оливи).

Щодо нагрівання електроізоляційні компаунди поділяють на термопластичні й термореактивні.

Термопластичні компаунди

– тверді за нормальної температури, під час нагрівання розм'якшуються, стають пластичними й переходять у рідкий стан, а під час охолодження знову тверднуть. Розплавлення та затвердіння цієї групи компаундів можна повторювати багаторазово.

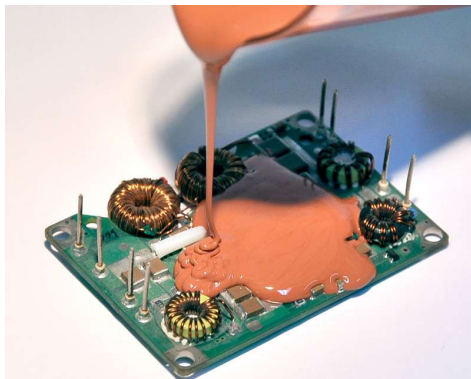


Рисунок 9.5 – Електроізоляційний заливний теплопровідний компаунд

Для їхнього виготовлення часто застосовують нафтові бітуми в поєднанні з рослинними оліями й мінеральними маслами, каніфоллю та деякими термопластичними полімерами.

Термореактивні компаунди в момент їхнього застосування перебувають у рідкому стані, а потім тверднуть у результаті хімічних реакцій, які відбуваються в них. Затвердіння компаундів цієї групи відбувається під дією отверджувача (каталізатора). Після затвердіння термореактивний компаунд стає неплавким і нерозчинним у звичайних розчинниках. Ця група компаундів є гарячого й холодного затвердіння. Компаунди гарячого затвердіння переходять у твердий стан під час спеціального термічного оброблення, а компаунди холодного

затвердіння переходять у твердий стан лише під дією затверджувача.

З термореактивних компаундів найбільш поширені в електронній техніці епоксидні компаунди, що відрізняються високою механічною міцністю, високою нагрівостійкістю, а також хорошими електричними властивостями. Однак під час роботи з епоксидними компаундами необхідно пам'ятати, що в незатверділому стані смоли й пари затверджувачів є токсичними речовинами, тому потрібно захищати відкриті ділянки шкіри обличчя і рук від потрапляння смоли, а технологічний процес проводити під витяжкою. Затверділі епоксидні композиції нетоксичні.

Компаунди широко використовують для просочення та заливання окремих вузлів електро- й радіоапаратури: трансформаторів, дроселів, конденсаторів. Їх застосовують також для герметизації й опресовування дискретних напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем.

Деякі різновиди епоксидних компаундів мають високу оптичну однорідність і прозорість до випромінювання у видимій і ближній інфрачервоній ділянках спектра. Завдяки цим властивостям їх використовують як оптичні узгоджувальні середовища під час виведення випромінювання зі світлодіодів.

До компаундів висувають такі вимоги:

- широкий температурний діапазон роботи ($-45^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$);
- добра адгезія;
- вологонепроникність;
- висока електрична міцність і малі діелектричні втрати;
- мала усадка в діапазоні $-45^{\circ}\text{C} \dots +100^{\circ}\text{C}$.

В результаті компаундування збільшується електрична міцність ізоляції, зменшуються діелектричні втрати, ізоляція стає більш стійкою проти дії оточуючого середовища, підвищується теплопровідність, і відповідно тепловіддача.

При просоченні ізоляції компаундом часто доводиться використовувати вакуумування та компресію. Наприклад, компаундування обмоток електромашин високої напруги складається з таких технологічних операцій:

- сушіння обмоток при атмосферному тиску в котлі;
- сушіння обмоток у вакуумі (45...50 мм рт.ст.);
- сушіння обмоток при атмосферному тиску, але при підвищеній температурі;
- впуск компаунду при вакуумі 15...20 мм рт.ст. протягом 1...2 годин;
- компаундування при тиску 7...8 атм протягом 3...5 годин;
- випуск компаунду з робочого котла.

Тривалість компаундування обмоток електромашин високої напруги становить від 6 до 26 годин в залежності від роду ізоляції. Такий технологічний процес забезпечує незначну усадку компаунда, що забезпечує можливість більш почного виготовлення ізоляції, і незначну пористість, що підвищує стійкість до часткових розрядів.

Для нанесення тонкого ізоляційного шару на поверхню використовують вихрове напilenня подрібненого компаунда в посудині з пористим дном, через яке продувається стиснене повітря, що піднімає і завихрює порошок, утворюючи так званий киплячий шар. В цей шар вносять нагрітий виріб. Частинки порошку прилипають до гарячої поверхні, утворюючи покриття. При необхідності нанесений шар може бути підданий термообробці.

Широке застосування одержали компаунди на основі бітумів, так, наприклад, для просочення обмоток електричних машин широко застосовується бітумний просочувальний компаунд №225 з характеристиками: щільність 0,92-1,10 г/см³ температура розм'якшення (по методу кільця й кулі) 98-112°C, морозостійкість -25°C, об'ємна усадка 7 – 8%, $\rho = 10^{13}$ - 10^{14} Ом·см; $E_{пр} = 18$ -20 кВ/мм. В результаті просочення виходить монолітна ізоляція обмоток з підвищеною механічною й електричною міцністю, стійка до парів води.

9.4 Клеї

Клеї – композиції на основі речовин, здатних з'єднувати (склеювати) тверді тіла завдяки утворенню між поверхнями, що сполучаються, і клейовим прошарком міцних адгезійних зв'язків. До складу клейової композиції входять затверджувачі й домішки (наповнювачі, розчинники, стабілізатори, пластифікатори тощо). Домішками регулюють специфічні властивості клею – липкість (здатність клею «зчіплюватися» з поверхнею деталі за кімнатної температури), в'язкість, швидкість затвердіння, збереження життєздатності (час, протягом якого клей придатний для застосування), а також експлуатаційні властивості клейового прошарку – міцність, жорсткість, термо-, морозо-, атмосферостійкість тощо.

За типом основи клеї поділяють на органічні та неорганічні. **До неорганічних клеїв** належать клеї на основі речовин неорганічної природи, що належать до груп мінеральних і металевих клеїв. Мінеральні клеї виготовляють у вигляді порошків, розчинів та дисперсій, переважно на основі оксидів і силікатів металів. Керамічні клеї – композиції на основі оксидів Mg, Al, Si, Zr та оксидів лужних металів із високою

температурою плавлення. Технологія їхнього виготовлення складається з операцій сплаву компонентів, швидкого охолодження сплаву у воді, сушіння, подрібнення та змішування з наповнювачами й іншими модифікаторами. Клей наносять на поверхні виробів, які сполучають при невеликому тиску й за температури, що на $+20-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ перевищує температуру плавлення композиту. Такі клейові з'єднання можуть працювати за температури до $+3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ і застосовуються для склеювання кераміки, металів, графіту й інших термостійких матеріалів в авіаційній та електронній промисловості.

Силікатні клеї – водні розчини силікатів натрію або калію (рідке скло) чи дисперсії на їхній основі, які можуть містити наповнювачі (глина, CuO , SiO_2) і домішки (P_2O_5 або ін.). Силікатні клеї тверднуть за кімнатної температури або за температури до $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в результаті випаровування води та коагуляції дисперсної фази. Клейові з'єднання здатні працювати за температури до $+1100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Їх використовують у радіоелектроніці, авіаційній промисловості для склеювання кераміки, скла, металів, картону, паперу й інших матеріалів.

Металеві клеї поділяють на пасти, порошки та клеї-плівки. Клеї-пасти отримують на основі рідкого металу, наприклад галію ($t_{\text{пл}} \approx 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), та порошку більш тугоплавкого металу (Cu , Al , Fe , Ni , Mg).

Компоненти клею змішують безпосередньо перед застосуванням за температури, яка незначно перевищує температуру плавлення рідкого металу.

Пасту наносять на поверхні склеюваних деталей, які попередньо притирають одну до одної. У результаті дифузії рідкого металу в поверхневий шар тугоплавких частинок і фізико-хімічної взаємодії компонентів у клейовому шарі

утворюються міжметалічні сполуки та тверді розчини, які мають високі температури плавлення. Пасти переходять у твердий стан за кімнатної або підвищеної (+120–140 °C) температур.

Клеї-порошки виготовляють із легкоплавких сплавів на основі Bi, Pb, Sn, Cd.

Клеї-плівки – це попередньо спечені стрічки з тугоплавких металів, які перед використанням просочують рідким металом. Металеві клеї надають клейовому шву високу міцність (до 30 МПа при рівномірному відриві), тепло- та електропровідність. Використовують у радіотехнічній, авіаційній та інших галузях промисловості для склеювання металів, кварцу, скла, а також для з'єднання металів із керамікою, кремнієм і феритами.

Органічні клеї поділяють на природні й синтетичні. Природні клеї виготовляють на основі клейких природних полімерів тваринного й рослинного походження. Вони можуть містити домішки: розчинники (вода), антисептики (саліцилова або борна кислота), стабілізатори (луги, рідке скло), а також смоли, що підвищують липкість (каніфоль).

Тваринні клеї отримують із матеріалів, багатих на колаген, а також із казеїну й продуктів його перероблення. Клеї застосовують для склеювання деревини, шкіри, фанери, паперу, картону, паперу зі склом, деревини з тканиною, для приготування клейових фарб. Міцність клейових з'єднань при зсуві не менше 6 МПа, теплостійкість +50 °C, клеї нетоксичні. Їхній недолік – низька водостійкість і гниття під дією мікроорганізмів.

Найбільш поширені рослинні клеї виготовляють на основі крохмалю, декстрину й натурального каучуку. Клеї на основі крохмалю використовують переважно для склеювання паперу. Декстринові клеї застосовують для склеювання паперу, картону, паперу зі склом і деревиною.

Гумові клеї – розчини натурального каучуку в бензині або його водні суспензії, зазвичай містять агенти вулканізації й модифікатори. Застосовують для склеювання шкіри, тканин, паперу та гуми. Органічні синтетичні клеї виготовляють на основі синтетичних мономерів, олігомерів, полімерів або їхніх сумішей. Порівняно з іншими клеями, синтетичні клеї найбільше поширені в електронній техніці завдяки можливості спрямованої зміни їхніх властивостей. Сфера застосування синтетичних клеїв дуже широка. Їхньою головною перевагою є здатність поєднувати різноманітні матеріали, забезпечуючи герметичність і стійкість з'єднання до впливу довкілля. Найбільше практично застосовують такі синтетичні клеї: на епоксидній, поліуретановій, фенолформальдегідній основі (з температурним діапазоном застосування до +100 °C); на епоксидній основі з термостійкістю до +150 °C; на основі фенольних смол і кремнійорганічних сполук із термостійкістю до +700 °C і вище для склеювання металевих і неметалевих елементів конструкцій.

Технологія отримання клейових з'єднань складається з таких операцій: приготування клею, підготування поверхонь деталей, що склеюються, нанесення (іноді з витриманням для видалення розчинника й заповнення клеєм мікродефектів поверхні), контакт з'єднуваних поверхонь, затвердіння клейового шару. При затвердінні клейове з'єднання, як правило, витримують під тиском.

9.5 Герметики

Герметики (герметизуючі склади) – пастоподібні або в'язкотекучі композиції на основі полімерів або олігомерів, які твердіють у зазорах конструкцій з утворенням еластичних прошарків, що запобігають витоку робочих середовищ. За

консистенцією герметики – це замазки, пасти або розчини в органічних розчинниках. За пружністю герметики поділяють на еластичні та пластичні. Крім того, їх класифікують за теплостійкістю (+50–70 °С; +100–150 °С; понад +200 °С). Найбільш поширені герметики – синтетичні високомолекулярні каучуки. Основні експлуатаційні характеристики герметиків: життєздатність – період часу до використання, протягом якого зберігаються їхні технологічні властивості; газонепроникність за робочих температур у різних середовищах; адгезія до поверхонь деталей з'єднання; руйнівне напруження під час розтягування та відносне подовження під час розриву; щільність герметизуючого прошарку, а також технологічність процесу герметизації. Процес герметизації включає приготування герметика, підготовку поверхонь деталей, що утворюють герметичне з'єднання, нанесення герметика, його вулканізацію або затвердіння.

У сучасній техніці герметики широко використовують для ущільнення болтових, клепаних, різьбових, фланцевих та інших нерухомих з'єднань; герметизації корпусів побутових машин. Їх застосовують також для забезпечення непроникності трубопроводів, апаратів, контейнерів з електроприладами й радіоапаратурою.

Питання для самоперевірки:

1. Що таке твердіючі діелектрики, і які основні типи матеріалів до них належать?
2. Які основні групи електроізоляційних лаків існують за їхнім застосуванням, які функції виконує кожна група?
3. Які властивості мають просочувальні лаки, як вони впливають на ізоляцію електротехнічного обладнання?

4. Чому кремнійорганічні лаки вважаються найкращими для високотемпературного обладнання?

5. Чим емалі відрізняються від лаків, які властивості емалей підвищуються завдяки введенню пігментів?

6. Які види компаундів існують за їхнім призначенням, яку роль відіграють заливні компаунди в електротехнічних конструкціях?

7. Чим відрізняються термопластичні компаунди від термореактивних, які їхні переваги та недоліки?

8. Які властивості повинен мати клей для використання в електротехніці? Наведіть приклади найбільш поширених синтетичних клеїв.

9. Які вимоги висуваються до герметиків для захисту електротехнічних конструкцій, які їх основні сфери застосування?

РОЗДІЛ 10. ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНЕ СКЛО, РАДІО- ТА ЕЛЕКТРОКЕРАМІЧНІ МАТЕРІАЛИ

10.1 Скло

Скло – аморфна неорганічна речовина, яка утворюється при швидкому охолодженні силікатного розплаву. Сировиною для отримання скла є кварцовий пісок, борна кислота, бура, крейда, вапняк, мармур, доломіт, сода, поташ, з яких отримують основні склоутворювальні матеріали. Якщо оксид одного елемента може утворювати скло, то він називається склоутворюючим і його назва є похідною від назви елемента, наприклад силікатне SiO_2 , борне B_2O_3 , фосфорне P_2O_5 тощо, якщо оксид вводиться у скло для придання йому якихось властивостей, то він називається оксидом-модифікатором, є також проміжні оксиди. Однак назви "молібденове", "вольфрамове", "титанове" і "платинітове" скло дані не за складом, а за можливістю впайки в скло даних металів (коефіцієнти температурного лінійного розширення скла та відповідних металів близькі за значенням).

Приклад маркування скла: C50-2, де С – скло, 50 – $\text{TKLP} \cdot 10^7$, цифра після дефісу – порядковий номер розробки.

Основні властивості скла:

1. Густина – 2000 – 8100 кг/м^3 .

2. Механічні властивості: механічна міцність на стискання 6 – 21 ГПа, при розтягуванні – 20–50 МПа. Механічну міцність скла можна суттєво збільшити термічною обробкою (гартуванням) і хімічною обробкою. Гартування – нагрівання до температур, близьких до точки розм'якшення, і швидке рівномірне охолодження поверхні в потоці повітря або в маслі. При цьому в поверхневих шарах виникають стискаючі

напруження, які збільшують міцність скла у 2-4 рази. Хімічна обробка полягає у протравленні поверхневого шару розчином плавикової кислоти, яка видаляє поверхневі дефекти. Ще більший ефект досягається при комбінованій хіміко-термічній обробці.

3. Теплові властивості – скло не має різко вираженої температури плавлення і його в'язкість поступово знижується при підвищенні температури від 400 до 1600°C. Температура розм'якшення стекол, при якій в'язкість досягає значення $10^7 - 10^8$ Па·с дуже різна – від 300°C для лужно-борного скла до 1740°C – для кварцового.

Теплопровідність скла незначна і для різних його типів складає від 0,711 до 13,39 Вт/(м·К). Теплопровідність віконного скла 0,96 Вт/(м·К).

Скло є термостійким матеріалом, який може працювати до температури склування. Недоліком скла є те, що при швидкому нагріванні або охолодженні скла (термоударі) виникають температурні напруження, які призводять до його розтріскування і руйнування. Тонкостінні скляні вироби більш стійкі до різкої зміни температур, ніж товстостінні.

4. Оптичні властивості. Перевагою скла є його прозорість у видимому діапазоні довжин хвиль світла. Звичайне листове скло пропускає до 90%, відбиває близько 8% і поглинає біля 1% видимого світла. Ультрафіолетові промені майже повністю поглинаються силікатним склом. Показник заломлення 1,47...1,96.

Стекла з оксидами елементів з малими атомними масами прозорі для рентгенівських променів. Стекла з оксидами важких металів, наприклад з оксидом свинцю, навпаки, інтенсивно поглинають рентгенівські промені. Домішки оксидів

модифікаторів надають склу певний колір: оксид кобальту – синій, оксид хрому – зелений, оксид урану – жовтий.

5. Гідролітичні властивості. Гідролітична стійкість (стійкість до дії вологи) оцінюється за кількістю складових частин скла, що переходять у розчин з одиниці поверхні скла при тривалому контакті з водою. Розчинність скла збільшується при зростанні температури і концентрації лужних оксидів у склі. Найвищу гідролітичну стійкість має кварцове скло.

6. Електричні властивості стекол коливаються в дуже широких межах:

$$\rho = 10^6 - 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\text{tg}\delta = 0,0002 \dots 0,01;$$

$$\epsilon = 3,8 \dots 16,2 \text{ (для кварцу } \rho = 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м, } \epsilon = 3,8; \text{tg}\delta = 0,0002).$$

Електрична міцність скла сильно залежить від кількості порожнин у ньому і становить близько 40 кВ/мм. Скло, переплавлене у вакуумі, має електричну міцність, що сягає 500 кВ/мм.

10.2 Основні види скла за хімічним складом

Структура і властивості скла визначаються його хімічним складом, умовами варіння, охолодження і термічної обробки. За хімічним складом залежно від природи склоутворюючих оксидів розрізняють силікатне, алюмосилікатне, боросилікатне, алюмоборосилікатне тощо.

Найпоширенішими стеклами є силікатні. Базовий метод отримання силікатного скла полягає в плавленні суміші кварцевого піску (SiO_2), соди (Na_2CO_3) і вапна (CaO). В результаті виходить хімічний комплекс зі складом $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{CaO}\cdot 6\text{SiO}_2$.

За хімічним складом серед силікатного скла виділяють три групи:

1 – лужне скло без важких оксидів (віконне, для пляшок) має малий коефіцієнт температурного розширення, стійке до термоударів, але має високу електропровідність через те, що одновалентні лужні метали, такі як натрій та калій, створюють дефекти (обривання) структури скла – просторової сітки. При одночасному введенні у склад скла двох різних лужних металів має місце нейтралізаційний або полілужний ефект, що приводить до збільшення питомого опору та $\text{tg}\delta$ на пів порядку.

2 – лужне скло з великою кількістю важких оксидів, в якому двохвалентні іони забезпечують цілісність просторової сітки, використовується як оптичне та електроізоляційне. Має високу діелектричну проникливість та малий $\text{tg}\delta$.

3 – безлужне кварцове скло, яке використовується як термостійкий електроізоляційний і оптичний матеріал, а також для різних спеціальних цілей.

Борсилікатне скло (пірекс) отримують включення оксиду бору замість лужних складових. Це надає склу тугоплавкості, стійкості до різких температурних перепадів і агресивних середовищ. Має малий коефіцієнт температурного розширення – до $0,33 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Це дозволяє склу не тріскатися при різких змінах температури. Цим зумовлено його застосування у випадках, коли потрібна термічна стійкість. Застосовується як матеріал для виготовлення лабораторного посуду, посуду для відкритого вогню, а також для хімічної промисловості. З боросилікатного скла виготовляють дзеркала для телескопів-рефлекторів. Однак воно значно дорожче за звичайне силікатне скло.

Свинцеве скло (кришталі) – різновид скла, що містить значну кількість оксиду свинцю PbO чи окисел барію BaO . Воно досить м'яке і плавке, але важке. Відрізняється сильним блиском і високим коефіцієнтом світозаломлення, розкладаючи світлові промені на усі барви веселки. Добавка оксиду свинцю збільшує показник заломлення скла і дисперсію світла (гра кольору). Добавка оксиду барію в основному збільшує тільки показник заломлення. Добавка оксиду свинцю також збільшує пластичні властивості скла і, відповідно, можливості його механічної обробки – огранення, різблення і тому подібне.

Виготовляють свинцеве скло сплавленням оксиду свинцю PbO з кремнеземом, а також з з'єднаннями натрію або калію (содою або поташем) і малими добавками інших оксидів. З кришталевого скла виготовляють високоякісний посуд і декоративні вироби.

Кварцове скло отримують плавленням кремнеземної сировини високої чистоти (зазвичай кварцит, гірський кришталі), його хімічна формула – SiO_2 . Залежно від способу отримання буває двох типів: оптично прозоре і непрозоре. Кварцове скло відрізняється високою жаростійкістю (до $1400^{\circ}C$), низьким температурним коефіцієнтом лінійного розширення ($0,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$), високою термічною і хімічною стійкістю, особливо до дії кислот (окрім плавикової) і води. Кварцове скло має високі діелектричні характеристики, прозоре у видимій, ультрафіолетовій і частково інфрачервоній областях. Застосовується для виготовлення тиглів, електровакуумних виробів, хімічно стійкої тари, труб, лабораторного посуду. Для захисту деталей від корозії при температурах до $500-600^{\circ}C$ використовують склоемалі з кварцового скла.

Піноскло отримують введенням газотворних речовин (подрібнених вапняку, крейди, вугілля) до рідкої скляної маси при високій температурі. Піноскло має малу густину, низьку теплопровідність і характеризується високим звукопоглинанням. Це негорючий, термостійкий і хімічно стійкий матеріал.



Рисунок 10.1 – Піноскло

Ситал – новий перспективний вид склоподібних матеріалів, що отримують шляхом майже повної кристалізації скла спеціального складу (назва "ситал" – скорочення слів "силікат" і "кристал"). Ситал займає проміжне положення між звичайним склом і керамікою (тому іноді ситал називають склокерамікою).

Міцність ситалу залежить від температури: до температури 700-780 °С міцність матеріалу зменшується незначно, при більш високих температурах швидко падає. Жароміцності ситалу під навантаженням становить 800-1200° С. Максимальна температура розм'якшення становить 1250-1350 °С. Ударна в'язкість ситалу вище, ніж ударна в'язкість скла (4,5-10,5 кДж/м²), проте вони відносяться до крихких матеріалів. Твердість їх наближається до твердості загартованої сталі (мікротвердість 7000-10500 МПа). Вони дуже зносостійкі, коефіцієнт лінійного розширення лежить в межах $(7-300) \cdot 10^{-7}$

1/°C. По теплопровідності ситал в результаті підвищеної щільності перевершує скло $\lambda=2-7$ Вт/м·К. Термостійкість висока ($\Delta t=500-900^\circ\text{C}$). Ситал характеризується високою хімічною стійкістю до дії кислот і лугів і не схильний до корозії при нагріванні до високих температур. Ситал абсолютно не поглинає вологу.

З ситалу виготовляють підшипники ковзання, що працюють без мастила при температурі до 550°C , поршні і деталі вихлопу двигунів внутрішнього згоряння, хімічну апаратуру, філь'ери для витягування синтетичних волокон, робочі колеса і лопатки насосів, що перекачують агресивні рідини з абразивами. Ситал використовують як жаро- і зносостійкі емалі для захисту металевих деталей, які працюють при температурах до $800-900^\circ\text{C}$.



Численні дослідження у сфері протезування зубів займають одне з провідних місць у стоматології. Ситали мають підвищену механічну міцність, зносостійкість і хімічну стійкість, склад і досконалу структуру, що дозволяє отримувати характеристики матеріалів з урахуванням

біологічної сумісності і робить їх незамінним матеріалом. Структура ситалів, зазвичай, ізотропна, дрібнокристалічна. Кристали мають розміри $0,1-1,0$ мкм і не дозволяють поширенню тріщин у матеріалі, що дуже важливо при протезуванні.

Триплекс є комбінованим склом, що складається з двох і більше загартованих шарів, склеєних прозорою полімерною плівкою. Має високу статичну і динамічну міцність. Використовується для виготовлення корпусів приладів, працюючих при підвищеному тиску і ударному навантаженні.

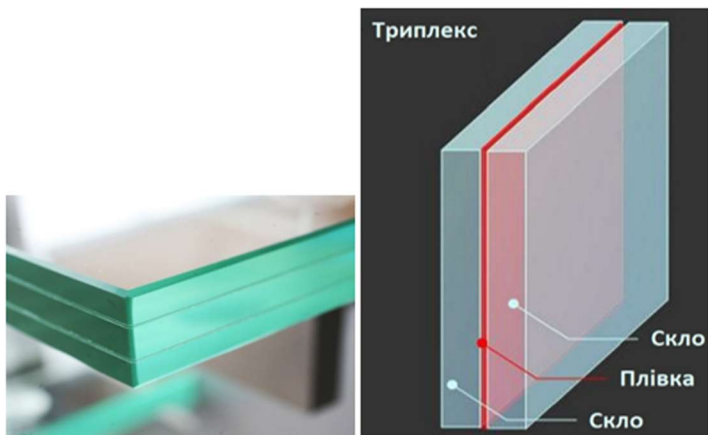


Рисунок 10.2 – Триплекс

10.3 Різновиди скла за призначенням

Хіміко-лабораторне скло – скло, що має високу хімічну і термічну стійкість і використовується для виготовлення хімічного посуду, ємностей, труб тощо. Найчастіше для таких цілей використовують борсилікатне скло.



Рисунок 10.3 – Хіміко-лабораторне скло

Оптичне скло призначене для виготовлення світлопроникних елементів оптичних приладів, наприклад лінз та призм.



Рисунок 10.4 – Оптичне скло

До оптичного скла висувають особливі технічні вимоги, найголовніша з яких – однорідність, що оцінюється на основі експертного аналізу прозорості у заданому діапазоні спектру. Оптичне скло ділять на два типи – крон і флінт, в залежності від показника заломлення світла (у кронів – менше, у флінтів – більше) і коефіцієнта дисперсії.

Основою сучасних оптичних стекол типу флінтів є потрійна система з оксидів кремнію, свинцю і калію. Деякі марки флінтів містять двоокис титану. До складу скла типу крон входить окрім оксиду кремнію натрій (чи калій) і кальцій.

Електротехнічне скло. Об'ємний питомий електричний опір при нормальних умовах може бути в межах $10^6 \dots 10^{15}$ Ом·м.

Розрізняють шість типів електротехнічного скла:

1. Конденсаторне – використовується як діелектрик конденсаторів, застосовуваних у високовольтних фільтрах, в імпульсних генераторах, у коливальних контурах височастотних пристроїв.

2. Монтажне – служить для виготовлення кріпильних деталей, ізоляторів.



Рисунок 10.5 – Скляні ізолятори

3. Лампове – застосовуються для виготовлення балонів освітлювальних і вакуумних ламп, кінескопів.

4. Склоемалі – легкоплавкі непрозорі емалі, що призначаються для покриття поверхонь різних виробів.

5. Скло з наповнювачем – пластмаса гарячого пресування зі скла і слюдяного порошку (мікалексу).

Кольорове скло отримують для виготовлення світлофільтрів, для зменшення світлопроникності скла, для надання склу товарних властивостей.

Скло можна забарвити додаванням тих або інших оксидів металів, які в процесі варіння змінюють його структуру. З'єднання заліза забарвлюють скло в кольори від блакитнувато-зелених і жовтих до червоно-бурих, окисел марганцю – від жовтих і коричневих до фіолетових, окисел хрому – в трав'янисто-зелений, окисел урану – в жовтувато-зелений (уранове скло), окисел кобальту – в синій (кобальтове скло), окисел нікелю – від фіолетового до сіро-коричневого, окисел сурьми або сульфід натрію – в жовтий, колоїдне срібло – в

золотисто-жовтий, окисел міді – в червоний (так званий мідний рубін на відміну від золотого рубіна, що отримується додаванням колоїдного золота). Кістяне скло отримують додаванням до скламаси перепаленої кістки, а молочне – додаванням суміші польового і плавикового шпату.



Майбутнє сонячної енергетики багато в чому спиратиметься на інтегровану фотовольтаїку, одним із напрямків якої є BIPV (Building-integrated photovoltaics) – сонячні панелі, вбудовані в конструкційні матеріали будівель.

Особливо актуально ця технологія може стати для архітекторів, дизайнерів та інженерів, зайнятих у будівельній сфері. Склоані фотоелектричні панелі від німецької компанії Aleo Solar дозволяють спростити використання сонячної енергії в рамках різноманітних проєктів без шкоди для естетики та якості. Напівпрозорі сонячні модулі можна застосовувати для створення сонячних дахів, фасадів та вікон, а також для навісів автостоянок. Сонячні батареї – це монокристалічні осередки, запаяні між двома цілісними скляними панелями розміром 600×950×9мм з товщиною скла 4 мм. Продуктивність однієї панелі становить понад 290 Вт.

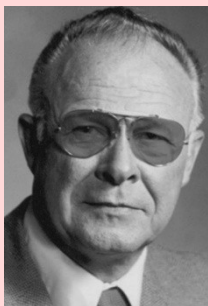
Смарт-скло – клас скляних матеріалів, що є композитом з шарів скла і різних хімічних матеріалів, використовуваний в архітектурі і виробництві для виготовлення світлопрозорих конструкцій (вікон, перегородок, дверей і т. п.), що змінює свої оптичні властивості (матовість, коефіцієнт пропускання світла, коефіцієнт поглинання тепла і т. д.) при зміні зовнішніх умов,

наприклад, освітленості, температури або при подачі електричної напруги.



Рисунок 10.6 – Скловолокно та склотканина

Скловолокно і склотканина. Із скла отримують тонкі і гнучкі нитки – скловолокна – різного призначення. У сучасній техніці скловолокно із спеціальних марок скла використовується у волоконній оптиці для виготовлення композиційних (фіберглас), електроізолюючих (наприклад, склотканина, склотекстоліт) і теплоізолюючих (скловата) матеріалів.



У 2020 році загальний світовий попит на скловолокно склав 10,7 мільярда фунтів. А лише 100 років тому загальний попит був майже нульовим. Випадкове відкриття, зроблене **Дейлом Клейстом**, стало вирішальним проривом, необхідним для виробництва скляних волокон. Об'єднавшись із Геймсом Слейтером і Джеком Томасом для створення кращої технології скла, Клейст намагався з'єднати архітектурні блоки шляхом плавлення та наплення скла. Випадкові бризки розплавленого скла утворили крихітні скляні волокна. Для фахівців це стало несподіванкою, оскільки звичайне скло після охолодження твердне, а тонкі нитки зберегли гнучкість і не ламалися під час деформації.

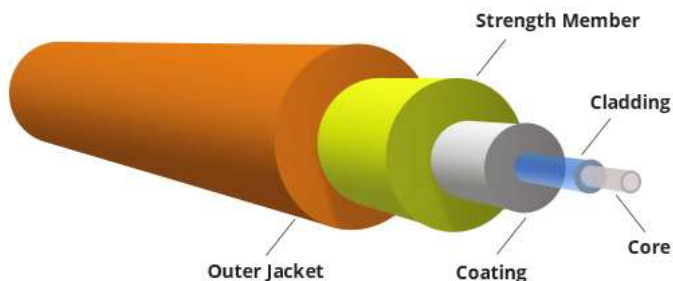


Рисунок 10.7 – Структура оптичного волокна

Оптоволоконний кабель – це принципово інший тип кабелю в порівнянні з іншими типами електричних або мідних кабелів: інформація передається не електричним сигналом, а світловим. Головний його елемент – це прозоре скловолокно, яким світло проходить на величезні відстані (до десятків кілометрів) з незначним ослабленням.

Структура оптоволоконного кабелю дуже проста і схожа на структуру коаксіального електричного кабелю, тільки замість центрального мідного дроту тут використовується тонке (діаметром близько 1-10 мкм) скловолокно, а замість внутрішньої ізоляції – скляна або пластикова оболонка, що не дозволяє виходити за межі скловолокна.

Скло, що використовується в даному типі волокон, складається з надчистого надпрозорого діоксиду кремнію (SiO_2) чи плавленого кварцу. На відміну від звичайного скла, яке складається з суміші різних компонентів, кварцове скло складається тільки з оксиду кремнію, а кількість домішок інших хімічних елементів надзвичайно мала. Це призводить до того, що кварцове скло характеризується широким спектром

пропускання, малим поглинанням світла, високою оптичною гомогенністю (однорідністю), стійкістю до іонізуючих випромінювань і лазерного випромінювання високої інтенсивності, низьким коефіцієнтом термічного розширення, високою робочою температурою (більше 1200 °С при 350-450 °С для звичайного скла). У скло додають домішки, щоб отримати необхідний показник заломлення. Наприклад, германій і фосфор збільшують показник заломлення, а бор і фтор, навпаки, зменшують його. Крім того, у склі присутні інші домішки, не видалені в процесі очищення. Вони також впливають на властивості волокна, збільшуючи загасання, обумовлене розсіюванням і поглинанням світла.

10.4 Процес виготовлення заготовки для оптоволокна

Перший етап технології оптичного волокна – отримання заготовки, яка являє собою скляний стержень довжиною близько метра і діаметром близько 10...20 мм.

Готова стержнева заготовка (незалежно від способу її виготовлення) витягується в волокно. Це відбувається в спеціальній витяжній вежі висотою близько 12 м. Нижній кінець заготовки нагрівають до температури 2000°С з допомогою нагрівального елемента, так що можна витягати волокно вниз із заготовки, що плавиться. Для того щоб діаметр волоконного світловода залишався постійним і потрібної величини, необхідно забезпечити можливість точного регулювання швидкості витяжки (зазвичай 300 м/хв) і подавального механізму за допомогою системи автоматичного управління.

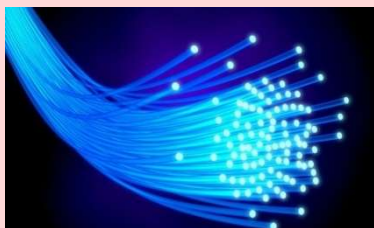


Рисунок 10.8 – Виготовлення оптичного волокна

Остаточний діаметр волокна перевіряється вимірювальним приладом з лазерним управлінням. Цей прилад знаходиться відразу ж під піччю. Отримані значення передаються в систему контролю, яка і регулює швидкість витяжної шпильової лебідки, що знаходиться в нижній частині вежі. Збільшення діаметра волокна приводить до збільшення швидкості витягування, і навпаки. Зазвичай діаметр волокна

становить 125 ± 2 мкм, а швидкість витягування – 3...10 м/с. Волокно охолоджується навколишнім повітрям.

Безпосередньо після контролю діаметра на волокно наноситься первинне захисне покриття.



У японському Національному інституті інформаційних та телекомунікаційних технологій (NICT) встановили новий рекорд швидкості передачі даних кабелем з одномодовими волокнами. Фахівцям вдалося передати дані на 51,7 км зі швидкістю

1,02 Пбіт/с (1 петабіт еквівалентний мільйону гігабіт, а це означає, що швидкість передачі даних приблизно в 100 000 разів швидше, ніж найвища швидкість домашнього інтернету доступна для споживачів).

Полімер покликаний захистити волокно від механічних впливів і від навколишнього середовища, насамперед від водню й води. Справа в тому, що вода прискорює утворення тріщин, а водень, дифундує вглиб волокна, підвищує коефіцієнт загасання. Це покриття полімеризується під впливом тепла або ультрафіолетового випромінювання. Проте по-справжньому можуть захистити скло тільки два покриття: металеве і вуглецеве. Багато фірм-виробників зараз починають покривати склоподібним вуглецем кожне волокно окремо. Для досягнення повного захисту найкраще поміщати вже готовий кабель у герметичну металеву оболонку, але це реалізується на практиці тільки в найбільш дорогих кабелях для трансокеанських ліній.

Світловод повинен витримувати це навантаження до того, як він буде намотаний на циліндричний барабан. Розраховані певні стандартні зусилля, за яких волокно не повинно рватися.

10.5 Кераміка

Кераміка — твердий неорганічний матеріал, який отримують спіканням формувальної маси заданого хімічного складу з мінералами й оксидами металів. Її властивості залежать від хімічного та фазового складів, макро- і мікроструктури та від технологічних прийомів виготовлення.

Переваги кераміки перед іншими електроізоляційними матеріалами в тому, що з неї можна виготовляти ізолятори складної конфігурації, крім того, вона має широкий інтервал спікання. Сировинні матеріали недефіцитні, технологія виготовлення виробів відносно проста. Багато керамічних електроізоляційних матеріалів мають високу механічну міцність, дуже малий кут діелектричних втрат, значну нагрівостійкість та інші цінні властивості. Порівняно з органічними електроізоляційними матеріалами кераміка, як правило, стійкіша до електричного й теплового «старіння», не дає залишкових деформацій у разі тривалого механічного навантаження.

10.6 Електротехнічний фарфор

Електротехнічний фарфор — основний керамічний матеріал, який використовують у виробництві низьковольтних і високовольтних ізоляторів та інших ізоляційних елементів із робочою напругою до 1150 кВ змінного й до 1500 кВ постійного струму. Електрофарфор має досить високі електроізоляційні, механічні, термічні властивості в розрізі робочих температур; він витримує поверхневі розряди, слабо схильний до старіння, стійкий до впливу атмосферних опадів, багатьох хімічних речовин, сонячних променів і радіаційного випромінювання.

У зв'язку з передачею енергії високої й надвисокої напруги на далеку відстань різко зросли вимоги до якості

високовольтних ізоляторів, переважно – до механічної міцності. Останнім часом випускають надійні високоміцні ізолятори оптимізованої конструкції з високоякісного електрофарфору.

Технологія виготовлення фарфорових виробів:

- подрібнення сировини, змішування та отримання однорідної ущільненої пластичної маси;
- отримання з фарфорової маси одним зі способів: обточуванням, пресуванням, відливанням у гіпсові форми, вичавлюванням через отвір потрібної конфігурації.



Рисунок 10.9 – Вироби з електротехнічного фарфору

З електротехнічного фарфору виготовляють електричні лінійні підвісні ізолятори для високої напруги, штирьові й опорні ізолятори, вводи, різні фасонні апаратні вироби для трансформаторів, вмикачів тощо. У деяких випадках вироби з електрофарфору покривають глазур'ю, що зменшує можливість забруднення, поліпшує електричні й механічні властивості, а також зовнішній вигляд виробу.

Порцеляна (один із видів фарфору) – це матеріал, що складається здебільшого із SiO_2 , Al_2O_3 і K_2O . Як сировину використовують білу глину (каолін), кварцовий пісок і польовий шпат. Порцеляну отримують високотемпературним термічним обробленням цієї суміші. Порцеляна має зовсім невелику пористість, через що вона непроникна для газів і води, має доволі високу механічну міцність, термостійкість, хороші електроізоляційні властивості: $\rho = 10^{11}\text{-}10^{13} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon = 5\ldots 7$; $\text{tg}\delta=0,025$; $E_{\text{пр}} = 25\text{-}30 \text{ кВ/мм}$; водопроникність – відсутня; гранична міцність: при розтягуванні 35-55 МПа, при згинанні 80-100 МПа, при стисканні 400-500 МПа, $\sigma_{\text{уд}}=1,8\text{-}2,2 \text{ кДж/м}^2$.

10.7 Стеатитова кераміка

Для вироблення високочастотних високовольтних ізоляторів застосовують стеатитову кераміку, оскільки фарфор має залежність електричних характеристик від температури через наявність великої кількості скла й польового шпату з підвищеною електропровідністю.

Стеатит – високовольтна кераміка підвищеної механічної міцності. Виготовляється на основі тальку $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$ з додаванням глинистих речовин (до 10%) та оксиду барію (до 15%). Тальк полегшує пресування, а оксид барію, як зерногранична фаза, зменшує діелектричні втрати, що зростають внаслідок введення глини. Основними компонентами стеатиту є кліноенстатит (метасилікат магнію) $\text{MgO}\cdot \text{SiO}_2$ і муліт $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$. Стеатит не потребує глазурування. Технологія виготовлення виробів із стеатиту складніша, ніж з фарфору, і вимагає вищої температури випалювання.

Основні властивості стеатиту: $\rho = 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon = 5\ldots 7,5$; $\text{tg}\delta=0,002\text{-}0,003$; $E_{\text{пр}} = 25\text{-}30 \text{ кВ/мм}$; механічна міцність при

розтягуванні $\sigma_p=45-60$ МПа, при згинанні $\sigma_z=100-160$ МПа, при стисканні $\sigma_c=500-700$ МПа, ударна в'язкість $\sigma_{уд}=2,2-2,6$ кДж/м², ТКЛР = $(3-8) \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. Стеатитова кераміка має високі механічні властивості, стабільні параметри в разі впливу різних зовнішніх факторів (вологи, температури, високої напруги тощо).

Завдяки високим електромеханічним властивостям стеатитові матеріали застосовують для виготовлення високочастотних настановних деталей, високовольтних і низьковольтних конденсаторів тощо.



Рисунок 10.10 – Вироби зі стеатиту

10.8 Конденсаторна кераміка

Конденсаторна кераміка відрізняється великими значеннями діелектричної проникності. Використовують для виготовлення компактних конденсаторів. Основним її компонентом є рутил (двоокис титану TiO_2 , титанові білила); використовують також сполуки оксидів титану з оксидами кальцію, магнію, цинку з невеликими домішками глинистих речовин.

10.9 Сегнетокераміка

Серед керамічних матеріалів особливе місце займає барій титанат ($BaTiO_3$) (сполука оксидів барію й титану), що є

сегнетоелектриком. Сегнетокераміка має високу діелектричну проникність, що сильно змінюється з температурою, а також нелінійну залежність поляризації від величини прикладеної напруги, що дає можливість її використовувати в різних електротехнічних, радіотехнічних пристроях та в електронній апаратурі.

З сегнетоелектриків виготовляють **вариконди** – особливий тип конденсаторів, ємність яких нелінійно залежить від прикладеної напруги.

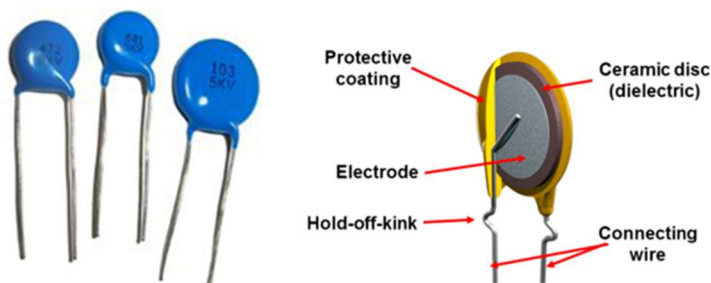


Рисунок 10.11 – Керамічний конденсатор

10.10 Ультрафарфор

В електричній та радіоелектронній промисловості керамічну технологію широко застосовують для виготовлення діелектричних, магнітних, напівпровідникових, п'єзоелектричних, металокерамічних та інших виробів. Наразі з електроізоляційної кераміки виготовляють десятки тисяч найменувань виробів масою від десятих часток грама до сотень кілограмів і розмірами від кількох міліметрів до кількох метрів.

Найбільш перспективним є корундовий фарфор – ультрафарфор (радіофарфор). Він має підвищену механічну

міцність і теплопровідність, менший тангенс кута діелектричних втрат. Використовують для виготовлення деталей складної конфігурації, високовольних конденсаторів, вакуумних спаїв із металами, радіотехнічних плат.

На відміну від радіофарфору ультрафарфор характеризується значним вмістом Al_2O_3 і при радіочастотах має такі характеристики: $\rho = 5 \cdot 10^{11} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\varepsilon = 7 \dots 8$; $\text{tg}\delta = 0,001$; $E_{\text{пр}}$ до 20 кВ/мм.

Механічна міцність на розтягування в 2 рази, а на згинання в 4 рази більша, ніж у звичайного ізоляційного фарфору. Зміна температури дуже мало впливає на властивості, але при підвищеній температурі помітно зменшується електрична міцність і питомий об'ємний опір. З ультрафарфору виготовляють опорні, прохідні та підвісні ізолятори, різні плати та втулки.

10.11 Високотемпературна надпровідна кераміка

Високотемпературна надпровідна кераміка вперше була створена на основі лантану, барію і оксиду міді ($\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$). Вона мала відносно високу в порівнянні з відомими надпровідниковими матеріалами температуру надпровідного переходу $T_{\text{нп}} = 35 \text{ К}$. Більш високі показники має надпровідна кераміка на основі іттрій-барій-оксиду міді $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, у якої $T_{\text{нп}} = 93 \text{ К}$. В наш час створено велику кількість надпровідних керамік, які містять у своєму складі рідкоземельні елементи Y, Ba, La, Nd, Sm, Eu, Cd, Ho, Er, Tm, Lu. Температура надпровідного переходу цих керамік знаходиться в інтервалі температур від 86 до 135 К. Температура 135 К, що є набагато вищою за температуру зрідженого азоту (77 К), досягнута для ртутної кераміки $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$.

Відкриття цих матеріалів роблять надпровідність перспективною для практичного застосування, наприклад, при виготовленні надпотужних ліній електропередач, генераторів і електромагнітів.

10.12 Кераміка спеціального призначення

До кераміки спеціального призначення відносять надпровідну кераміку, кераміку для виготовлення контейнерів для тривалого зберігання радіоактивних відходів, броньованого захисту військової техніки і теплового захисту головних частин ракет і космічних кораблів.

Одним із стримуючих чинників розвитку ядерної енергетики є складність утилізації радіоактивних відходів. Для виготовлення контейнерів для зберігання радіоактивних відходів застосовують кераміку на основі оксиду бору B_2O_3 і карбїду бору B_4C в суміші з оксидом свинцю PbO або з'єднаннями типу $2PbO \cdot PbSO_4$. Після спікання такі суміші утворюють щільну кераміку з малою пористістю. Вона характеризується сильною поглинаючою здатністю до радіаційного опромінення.

При польоті в щільних шарах атмосфери головні частини ракет, космічних кораблів, кораблів багаторазового використання, що нагріваються до високої температури, потребують надійного теплозахисту. Матеріали для теплового захисту повинні мати високу теплостійкість і міцність у поєднанні з мінімальними значеннями коефіцієнта термічного розширення, теплопровідності і щільності.

Дослідницький центр NASA розробив теплозахисні волокнисті керамічні плити, призначені для космічних кораблів багаторазового використання. Середній діаметр волокон в них 3-

11 мкм. Вони витримують до 500 десятихвилинних нагрівів в плазмі електродуги при температурі 1670 °С.

Питання для самоперевірки:

1. Що таке скло, як воно утворюється? Назвіть основні види скла виділяють за хімічним складом?
2. Які основні сфери застосування кварцового скла?
3. Що таке ситал, які його основні властивості та застосування?
4. Які різновиди скла використовуються в електротехнічній галузі? Наведіть приклади.
5. Які основні переваги кераміки як електроізоляційного матеріалу порівняно з органічними матеріалами?
6. Чому електротехнічний фарфор при виготовленні ізоляторів покривають глазур'ю?
7. Яка головна перевага стеатитової кераміки над електрофарфором, і для яких виробів вона застосовується?
8. Які особливі властивості має сегнетокераміка?
9. Чим ультрафарфор відрізняється від звичайного електроізоляційного фарфору?
10. Які переваги високотемпературної надпровідної кераміки?

РОЗДІЛ 11. СЛЮДА ТА МАТЕРІАЛИ НА ЇЇ ОСНОВІ

Мінеральні електроізоляційні матеріали можна розбити на дві групи:

1. Слюди – мінерали, що мають властивість розщеплятися на дуже тонкі листочки. Недолік: присутність мінеральних або газових домішок, хвилястість, складчастість та погнутість листів.

2. Гірські породи (мармур, шифер, талькохлорит) застосовують у вигляді брусків, дощок, що отримують механічною обробкою вихідних матеріалів. Електричні властивості відносно невисокі, застосовують при низькій напрузі та частоті. Зараз втратили своє значення та замінюються штучними матеріалами.

11.1 Слюдяні матеріали

Слюда – природний матеріал з характерною шаруватою будовою, що дозволяє розщеплювати кристали слюди на листочки товщиною до 0,5 – 5 мкм, і суттєвою анізотропією властивостей. За хімічним складом слюди є алюмосилікатом лужних і лужноземельних металів.

Завдяки її цінним якостям – високій електричній міцності, нагрівостійкості, вологостійкості, механічній міцності – слюду застосовують як відповідальну ізоляцію в електричних машинах високої напруги й потужності (зокрема, у великих турбогенераторах і гідроенергетичних агрегатах, тягових електродвигунах тощо), як діелектрик – у деяких конструкціях конденсаторів.

Використовують як штамповані фасонні вироби для кріплення та електричної ізоляції, як тепловий захист цоколів потужних електричних ламп розжарювання. Слюда належить до електроізоляційних матеріалів вищого класу нагрівостійкості.

Із широкої групи природних слюд для електричної ізоляції застосовують тільки два види слюди: **мусковіт** ($K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$) і **флогопіт** ($K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$). Тонкі пелюстки слюди склеюють смолами або лаками (лужними, олійно-бітумними тощо) й отримують тверду або гнучку слюдяну ізоляцію.

Мусковіт – калієва слюда з приблизним складом $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$. До її складу можуть входити невеликі кількості таких окислів як Fe_2O_3 , TiO_2 , Cr_2O_3 , MnO , CaO , Na_2O . Колір сріблястий, зеленкуватого або червонуватого відтінку. Тонкі листочки (0,01...0,05 мм) прозорі, мають високу гнучкість, пружність, високу міцність на розривання, хімічно стійкі до лугів і розчинників. Сірчана та хлорна кислоти розчинюють мусковіт тільки при нагріванні.



Рисунок 11.1 – Мусковіт

Електричні властивості:

- $\rho = 10^{12} - 10^{14}$ Омм;
- $\text{tg}\delta = 0,0004 \dots 0,008$ при частоті 50 Гц;
- $E_{\text{пр}} = \text{до } 250 \text{ кВ/мм}$ при товщині 0,025 мм;

- $\varepsilon = 6,1 - 8,4$;
- густина $d = 2700 - 3000 \text{ кг/м}^3$; суттєво не змінює свої механічні властивості до $500...600^\circ\text{C}$, коли починає відщеплюватися кристалізаційна вода; для зневодненого мусковіту $T_{\text{плав}} = \text{до } 1300^\circ\text{C}$.

Флогопіт (від грецького флогопос – вогнеподібний) калієво-магнезійна слюда приблизного складу $\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Колір флогопіту змінюється від чорного, коричневого до бурштинового та інколи сріблясто-світлого. Має меншу пружність та хімічну стійкість, ніж мусковіт. Реагує з кислотами, але луги на нього не діють.



Рисунок 11.2 – Флогопіт

Із слюди готують сировину для електроізоляційних матеріалів. Раніше випускали слюдяні конденсатори марок КСО, КГС і СГМ, в яких застосовували мусковіт (прямокутні листочки $a=7...60 \text{ мм}$, $b=4...50 \text{ мм}$), з флогопіту виготовляли бокові захисні пластинки. Зараз в конденсаторах замість слюди використовують синтетичні полімери, наприклад фторопласт-4. В вакуумних приладах і зараз застосовують мусковіт.

Електричні властивості флогопіту при тих же умовах:

- $\rho = 10^{11} - 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- $\text{tg}\delta = 0,0006...0,015$;
- $E_{\text{пр}} = \text{до } 150 \text{ кВ/мм}$;
- $\varepsilon = 5...7$;
- густина $d = 2,7...2,8 \text{ г/см}^3$. Не змінює властивостей до $800...900 \text{ }^\circ\text{C}$.



В основному порошкоподібна слюда використовується в продуктах з ефектом сяйва: хайлайтерах, мерехтливих тінях, пудрах. Фторофлогопіт надає відмінну інтенсивність різним відтінкам різноманітної декоративної косметики.

Фторфлогопіт має високу оклюзію – утворює плівку на поверхні шкіри, тому тіні з вмістом фторфлогопіту, забезпечують чітку виражену і стійку пігментацію і блиск.

Також фторфлогопіт використовується для досягнення необхідної консистенції продукту. Його також часто використовують як засіб, що підвищує в'язкість водорозчинних речовин. Фторфлогопіт рекомендується використовувати в косметичі в концентраціях від 0,05 до 2% (продукти у вигляді аерозолів), а також від 0,6 до 67% (у порошкових формулах). Найбільша його концентрація (до 67%) міститься в таких продуктах: лак для нігтів, тіні для повік, блиск для губ, підводка.

Фторфлогопіт – синтетична слюда, яку, крім природної слюди, використовують в електроізоляційній техніці. Гідроксильні групи -ОН у фторфлогопіті заміщені іонами фтору. Отримують його, розплавляючи в високотемпературній печі шихту спеціального хімічного складу з подальшою кристалізацією розплаву при повільному охолодженні. Має

більшу хімічну, нагріво- та радіаційну стійкість, ніж природний флогопіт, питомий опір в 15...20 раз більший, ніж у флогопіту, пробивна напруга – в 1,5 рази вища, $\text{tg}\delta$ в 2 рази менший. Однак кристали фторфлогопіту важко розщеплюються, а тому він не може бути повним замінником природної слюди. Застосовують для внутрішньої ізоляції в електронних лампах, нагрівостійкої ізоляції спеціальних електромашин.

Матеріали на основі слюди поділяють на міканіти і слюденіти. **Міканіт** – це листовий або рулонний матеріал завтовшки 0,5–5 мм, який отримують шляхом склеювання лаками, сухою смолою інколи з застосуванням волокнистої підкладки з паперу або тканини з одного боку або з двох боків.

Таблиця 11.1 – Електричні та фізичні параметри слюди

Параметр	Мусковіт	Флогопіт
		
Питома вага, г/см^3	2,76-3,0	2,78-2,85
Максимальна температура, $^{\circ}\text{C}$	500-600	900-1000
Діелектрична проникність, ϵ	6-7	5-6
Діелектричні втрати при $f = 1$ МГц	$(0,1-0,3)^{-10}$	$(1-5)^{-10}$
Питомий опір, Ом-м	$10^{11}-10^{12}$	$10^{11}-10^{12}$

Маркування міканітів: К – колекторний, П – прокладковий, Ф – формувальний, Г – гнучкий, М – мікафолій, Л – мікастрічка; друга літера маркування – тип слюди для виготовлення міканіту: М – мусковіт, Ф – флогопіт, С – суміш

мусковіту та флогопіту; третя та наступні літери й цифри – вид речовини для склеювання і додаткові характеристики матеріалу.

Колекторний міканіт – це листовий матеріал, виготовлений із листочків слюди, склеєних за допомогою лужних або гліфталевих смол або лаків на основі цих смол. При виготовленні вводять 4...6% зв'язувальної речовини (гліфталева або інша смола, шелак). Після склеювання піддають неодноразовому гарячому просоченню, фрезеруванню та шліфуванню для одержання заданих розмірів. Швидкість стирання колекторного міканіту співпадає з швидкістю стирання мідних колекторних пластин, що дозволяє уникнути проточування колектора в процесі експлуатації машини. Його застосовують як штамповані заготовки, які прокладають між мідними пластинами колекторів електричних машин постійного струму. Завдяки високому тиску під час пресування міканіт має хороші механічні властивості, що забезпечує міцність колектору під час роботи машини.



Рисунок 11.3 – Колекторний міканіт

Прокладковий міканіт – твердий листовий матеріал. Виготовляють із мусковіту, флогопіту та їхньої суміші. У ньому 75–95 % слюди та 25–5 % речовини для склеювання. Після

склеювання листи прокладкового міканіту піддають пресуванню. Застосовують для виготовлення електроізоляційних прокладок і шайб.



Рисунок 11.4 – Прокладковий міканіт

Формувальний міканіт – листи товщиною від 0,1 до 0,5 мм з вмістом слюди 80 – 95%, решта в'язуча речовина. Використовують для виготовлення колекторних манжет (ізоляція колектора від валу електромашини), фланців, каркасів котушок, трубок та інших фасованих виробів.

Нагрівостійкий (термотривкий) міканіт завтовшки 0,2–1,0 мм, не містить органічних речовин. Застосовують для ізоляції електронагрівальних приладів і в інших випадках, де температура сягає кількох сот градусів Цельсія.

Гнучкий міканіт товщиною від 0,15 до 0,5 мм виготовляють з використанням оливо-бітумних, оливо-гліфталевих та кремнійорганічних лаків. Вміст слюди 75...90% (з підкладкою – не менше 50%). Застосовують для ізоляції міжкотушечних з'єднань в машинах високої напруги та для ізоляції апаратів спецпризначення.

Різновид гнучкого міканіту – **мікастрічка** – шар пластинок слюди, наклеєний одним або обома боками на

паперову або тканинну основу. Пластинки слюди з наклеюються з перекриттям на $1/3$. Є основною ізоляцією обмоток великих електричних машин високої напруги. Мікастрічка на паперовій основі має назву мікафолій, на шовку – мікашовк, на тканині – мікаполотно. Як речовини для склеювання використовують олійно-бітумні, олійно-гліфталеві, кремнійорганічні лаки та розчини каучуків. Товщина мікастрічок – $0,08\text{--}0,21$ мм. Їх застосовують для виткової та корпусної ізоляції електричних машин, де потрібна велика гнучкість ізоляційного матеріалу. При пересиханні мікастрічок їх потрібно витримати в парі розчинника.



Рисунок 11.5 – Гнучкий міканіт

Мікафолій – рулонний або листовий електроізоляційний матеріал, який формують у нагрітому стані, різновид формувального міканіту, що має з одного боку підкладку з паперу, склотканини або склосітки. Вміст слюди більше 50%. Випускають мікафолій товщиною від $0,15$ до $0,3$ мм в листах або рулонах. Електрична міцність мікафолію з міканіту $15\text{--}16$ кВ/мм, з флогопіту – 13 кВ/мм. Застосовують для виготовлення

твердої ізоляції стрижнів якірних обмоток електромашин високої напруги.

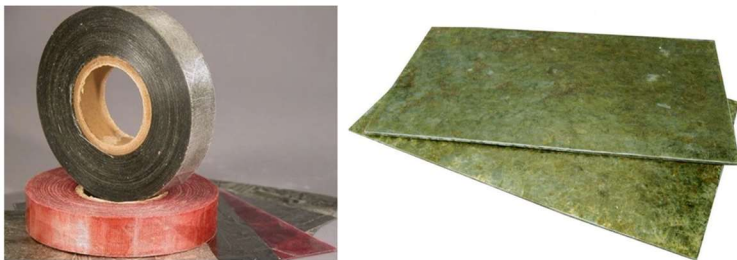


Рисунок 11.6 – Мікафолій

Мікашовк – рулонний електроізоляційний матеріал, що гнеться за кімнатної температури. Має підвищену механічну міцність на розрив. Складається з одного шару листочків щипаної слюди, склеєних між собою та обклеєних з одного боку полотном із натурального шовку, а з іншого – папером. Як матеріали для склеювання використовують олійно-гліфталеві або олійно-бітумні лаки, що утворюють гнучкі плівки.

Мікаполотно – рулонний або листовий електроізоляційний матеріал, що гнеться за кімнатної температури. Складається з кількох шарів щипаної слюди, склеєних між собою й обклеєних з обох боків бавовняною тканиною (перкаль) або папером з одного боку й тканиною – з іншого.

Мікалекс – твердий матеріал темно-сірого кольору, що складається із порошкоподібної слюди та легкоплавкого борно-свинцевого або борно-барієвого скла (до 40%), що отримують шляхом гарячого пресування суміші порошкоподібної слюди (мусковіту) та легкоплавкого скла. Пресування здійснюють за

температури орієнтовно $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тиску 60 МПа. Мікалекс має високу нагрівостійкість, дугостійкість, механічну міцність, придатний для всіх видів механічного оброблення. Випускають мікалекс у вигляді листів або стрижнів різного перетину, з яких методами різання, фрезерування та свердління отримують вироби, такі як панелі потужних ламп, каркаси котушок індуктивності, плати перемикачів тощо. Використовують також для запресування металевих частин, що вимагають ізоляції їх від інших металевих частин обладнання.

Під час розроблення природної слюди та виготовлення електроізоляційних матеріалів на основі щипаної слюди залишається чимало відходів. Їхня утилізація дає змогу отримати нові електроізоляційні матеріали – **слюденіти**. Їх виготовляють зі слюдинітового паперу. Шляхом спеціального оброблення його перетворюють на пульпу, з якої папероутворювальна машина виготовляє папір, який використовують як напівфабрикат. Далі шляхом гарячого пресування отримують тверді або гнучкі слюдинітові електроізоляційні матеріали. Вони більш монолітні й однорідні за товщиною, мають вищу електричну міцність і робочу температуру. Сфери застосування слюдинітових матеріалів ті самі, що й міканіту (колектори, прокладки, стрічки, фасонні вироби).

11.2 Слюденіти та слюдопласти, їх застосування

Трудомісткість виготовлення щипаної слюди, а також велика кількість відходів призвели до розробки нових матеріалів – слюдяного паперу. Два основних види слюдяного паперу – це слюденіти та слюдопласти.

Слюденіти (за кордоном мають назву саміка) отримують за таким технологічним процесом: мусковіт піддають

термообробці при температурі до 900 °С, зневоднені кристали слюди, що втратили цілісність, обробляють лугами та кислотними розчинами і промивають, отриману пульпу відливають на сітку папероробної машини і отримують слюденітовий папір товщиною 10 – 150 мкм або слюдопластовий – товщиною 40 – 200 мкм ($E_{пр}$ = до 20 МВ/м) і потім просочують його в'язучою речовиною на основі епоксидної, кремнійорганічної чи іншої смоли. Недоліки: понижена вологостійкість, низькі механічні властивості при розриванні.

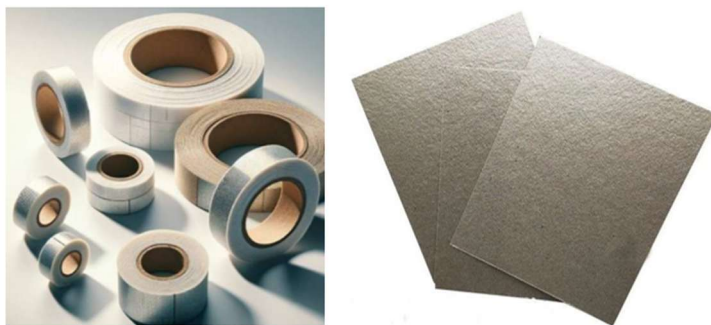


Рисунок 11.7 – Слюденіти

Слюдопласти мають більшу механічну міцність і стійкість до часткових розрядів, ніж слюденіти. Якщо до слюденітів чи слюдопластів з однієї чи з обох сторін підклеїти підкладку, то дані матеріали будуть заміниками міканітів. Практично у всіх типах електромашин з класом нагрівостійкості *B*, *F*, *H* слюденіти та слюдопласти являються основою термореактивної системи ізоляції.



Рисунок 11.8 – Слюдапласти

Питання для самоперевірки:

1. Які існують основні групи мінеральних електроізоляційних матеріалів?
2. Що є основною перевагою слюди як електроізоляційного матеріалу?
3. Які два види слюди використовуються для електричної ізоляції?
4. В чому полягає різниця між властивостями мусковіту та флогопіту?
5. Що таке міканіт, як він виготовляється?
6. Які типи міканітів ви знаєте, для чого вони використовуються?
7. Як утворюються слюденіти і слюдопласти? Яка основна різниця між слюденітами та слюдопластами?

РОЗДІЛ 12. АКТИВНІ ДІЕЛЕКТРИКИ

Активними (керованими) діелектриками називають діелектрики, що дозволяють, за рахунок зміни в широких межах їх властивостей в результаті дії на них електричного і магнітного полів, температури, механічної напруги, світлового потоку тощо, генерувати, підсилювати, модулювати і перетворювати електричні сигнали. На відміну від пасивних діелектриків, від яких вимагається стабільність властивостей, вимоги до активних абсолютно протилежні: чим сильніше змінюються його властивості при зовнішніх впливах, тим краще активний елемент може виконувати функції управління енергією або її перетворення. Активні діелектрики дозволяють здійснити генерацію, посилення, модуляцію електричних і оптичних сигналів, а також запам'ятовування і перетворення інформації. Слід зазначити, що чіткої межі між активними і пасивними діелектриками не існує. Іноді один і той же матеріал в різних умовах експлуатації може виконувати пасивні функції (ізолятора, конденсатора) або активні функції елемента керування, перетворення.

До числа активних діелектриків відносять: п'єзо-, піро-, сегнетоелектрики; електрети; рідкі кристали; матеріали лазерної електроніки; електро-, магніто- і акустооптичні матеріали; діелектричні кристали з нелінійними оптичними властивостями і інші матеріали. Властивостями активних діелектриків можуть володіти не тільки тверді, але й рідкі і навіть газоподібні речовини (наприклад, активне середовище газових лазерів). За хімічним складом це можуть бути органічні і неорганічні матеріали. За будовою і властивостями активні діелектрики можна поділити на кристалічні і аморфні, полярні і неполярні.

Кристалічні діелектрики, у яких йони різного знака розташовані в певному порядку, можуть поляризуватися й за відсутності зовнішнього електричного поля. У звичайних діелектриках така поляризація не відбувається, тому що електричне поле, що створюється всередині них, компенсується полем вільних зарядів, що натікають на поверхню зразка ззовні та зсередини. Порушення такої компенсації, що приводить до тимчасової появи електричного поля в кристалі, відбувається в п'єзоелектриках (під час певних деформацій) і в піроелектриках (під час зміни температури кристалу). Різновидом піроелектриків є сегнетоелектрики, поляризація яких може істотно змінюватися під впливом зовнішніх чинників. Наведена в зовнішньому полі поляризація може довго зберігатися в діелектриках (наприклад, у полімерах і кераміці) після зняття поляризуючого поля (так звані електрети).

12.1 Сегнетоелектрики

Сегнетоелектрики – кристалічні діелектрики, що володіють в певному інтервалі температур спонтанною поляризацією, а також нелінійною залежністю поляризації від напруженості прикладеного електричного поля.

Спонтанна поляризація – це поляризація, яка виникає в діелектрику під впливом внутрішніх процесів, без зовнішніх впливів. Це явище пов'язане з особливостями сегнетоелектриків.

12.1.1 Механізм виникнення спонтанної поляризації у сегнетоелектриках

Нехай є ланцюжок атомів, які здатні поляризуватися (рисунк 12.1). Припустимо, що один з атомів перетворився на диполь. Поле диполя, направлене вздовж ланцюжка, перетворить на диполі сусідні атоми. Якщо розглядати, як будуть ці сусідні

атоми впливати полем своїх диполів на вихідний атом, то виявиться, що поля сусідів підсилюють його поляризацію. Таким чином, в ланцюжку існує позитивний зворотний зв'язок: чим більше вихідний дипольний момент, тим більше поле діє на сусідні атоми і їх поляризує. Ці атоми, в свою чергу, збільшують початковий дипольний момент. За рахунок цього зв'язку ланцюжок атомів може перетворитися в ланцюжок диполів, процес може відбуватися спонтанно, без зовнішнього поля.

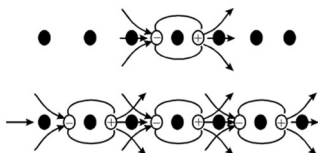


Рисунок 12.1 – Схема виникнення спонтанної поляризації

Під достатньо сильним зв'язком варто розуміти визначене співвідношення між відстанню між атомами a і їх поляризованістю β . Диполі виникли завдяки спонтанній поляризації атомів з поляризованістю β .

На прикладі титанату барію BaTiO_3 розглянемо структуру і властивості сегнетоелектриків. Хімічні зв'язки в BaTiO_3 – іонно-ковалентні. Титанат барію кристалізується в структуру типу перовскит. Елементарну комірку решітки такого типу можна представити таким чином: основу структури складають кисневі октаедри, в центрі яких розташовані іони титану. У свою чергу, іони кисню центрують грані куба, складеного з іонів барію (рис. 12.2).

Розміри елементарної комірки більше подвоєної суми іонних радіусів іонів титану та кисню. Тому іон титану має деяку свободу переміщення в кисневому октаедрі. При досить високих

температурах теплова енергія іона титану достатня для того, щоб він безперервно перекидався від одного іона кисню до іншого, тому усереднене положення іона титану знаходиться в центрі елементарної комірки, і елементарний осередок є симетрично-кубичним.

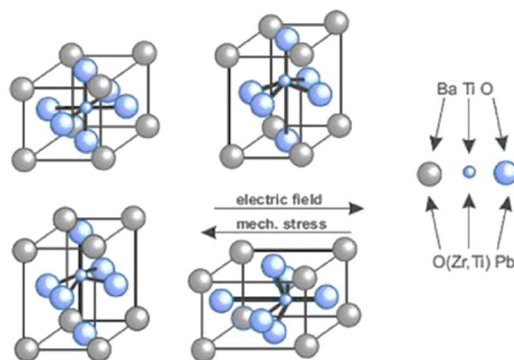


Рисунок 12.2 – Кубічна (параелектрична) і тетрагональна (сегнетоелектрична) структура PZT і BaTiO_3 до і після застосування електричного поля або дії механічної напруги

Зниження температури веде до зниження кінетичної енергії іона титану і при деякій температурі (нижче 120°C) він локалізується поблизу одного з іонів кисню. У результаті симетрія в розташуванні заряджених частинок порушується, і елементарний осередок набуває дипольного моменту. У сусідній елементарній комірці іон титану зміщується до негативного полюсу, що утворює диполь. Таким чином, сусідні елементарні осередки стають спонтанно поляризованими. Одночасно зі спонтанною поляризацією йде деформація кристалічної решітки, і кубічна решітка стає ромбоєдричною. Отже, нижче деякої температури (температури Кюрі) сегнетоелектрики мимовільно

поляризуються, і при цьому деформується їх кристалічна решітка.

Сегнетоелектрична точка Кюрі – температура, за якої виникає (під час охолодження) або зникає (під час нагрівання) спонтанна поляризація. Діелектрична проникність ϵ речовини за температури точки Кюрі T_k максимальна. Після досягнення точки Кюрі відбувається фазовий перехід із сегнетоелектричного стану в параелектричний, коли $P_C = 0$.



У 2020 році виповнилося 100 років від дня відкриття першого представника класу сегнетоелектриків - сегнетової солі (Rochelle Salt).

Сегнетова сіль була синтезована з винного каменю в 1655 французькими аптекарями з міста Ларошель - братами Єном і Елі Сеньє. Це подвійна сіль винної

кислоти – натрій калієвий тарtrat тетрагідрат $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Протягом багатьох років вона використовувалася як універсальні ліки. У 1920 році сегнетова сіль стала родоначальником нового класу речовин. Американський фізик Джозеф Валашек вперше виявив її унікальні властивості: петлю діелектричного гістерезису, подібну до магнітної, а також величезні значення діелектричної проникності та п'єзоелектричного відгуку в температурному діапазоні від -18 до $+24$ °C. Під час Другої світової війни сегнетову сіль використовували для виготовлення ларингофонів, мікрофонів, апаратів для підводної локації та зв'язку, п'єзоелектричних підричників та репродукторів.

У наші дні сегнетову сіль стали використовувати у харчовій промисловості як харчову добавку (антиоксидант) E337, емульгатор у сироварінні та як розпушувач у складі пекарських порошків.

На цей час вчені синтезували сотні сегнетоелектриків. Освоено виробництво монокристалічних тонких плівок ніобату літію та танталату літію субмікронної товщини. Перетворювачі з такими плівками знаходять застосування в квантовому зв'язку, телекомунікації (високоєфективні одноканальні перетворювачі), спектроскопії (джерела лазерного випромінювання без резонатора).

Діелектрична проникність ε і тангенс кута діелектричних втрат $\tan\delta$ дуже залежать від частоти, особливо в ділянці високих частот.

Вище температури Кюрі сегнетоелектрики переходять в параелектричний стан, і кристалічна решітка стає симетричною. Величина спонтанної поляризації зазвичай сильно залежить від температури в області фазового переходу і в самій точці переходу зникає або стрибком (**фазовий перехід першого роду**, наприклад в титанаті барію BaTiO_3), або безперервно (**фазовий перехід другого роду**, наприклад в сегнетовій солі). З наближенням до точки Кюрі діелектрична проникність різко зростає. Сильна температурна залежність (в полярній і неполярній фазах) спостерігається не тільки у діелектричній проникності, а і у п'єзоелектричних та інших термодинамічних коефіцієнтів сегнетоелектриків. З наближенням до точки Кюрі діелектрична проникність ε різко зростає. При температурах, вищих точки Кюрі T_c , сегнетоелектрик перетворюється у звичайний діелектрик, а його діелектрична проникність зменшується за **законом Кюрі-Вейсса**

$$\varepsilon = 1 + \frac{\alpha}{T - T_c}, \quad (12.1)$$

де α – стала величина.

Якщо помістити сегнетоелектрик у зовнішнє електричне поле $\vec{E}$ і збільшувати його, то вектор поляризації зразку різко зростатиме, разом з ним зростає і вектор електричної індукції:

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P} = \varepsilon\vec{E}. \quad (12.2)$$

У різних сегнетоелектриках T_c сильно розрізняються (табл. 12.1).

У сегнетоелектриків можуть існувати дві точки Кюрі (сегнетова сіль): T_{C1} і T_{C2} . При $T > T_{C1}$ речовина є параелектриком,

тобто діелектриком з нелінійною безгістерезисною залежністю P (E). При охолодженні до T_{C1} відбувається перехід речовини в впорядкований сегнетоелектричний стан, а нижче T_{C1} знову виникає параелектричний стан кристала.

Таблиця 12.1 – Характеристики деяких сегнетоелектриків

Речовина	Формула	Температура фазового переходу T_C , °C	Поляризація насичення P_s , 10^{-6} Кл/см ²
Титанат барію	BaTiO ₃	133	25
Сегнетова сіль	KNaC ₄ H ₄ O ₆ · 4H ₂ O	−18; +24	0,25
Дигідрофосфат калію	KH ₂ PO ₄	−150	5,1
Ніобат літію	LiNbO ₃	1210	50
Фторбериллат амонію	(NH ₄) ₂ BeF ₄	−97	0,15
Молібдат гадолінію	Gd ₂ (MoO ₄) ₃	159	0,18
Сульфат амонію	(NH ₄)SO ₄	−49	0,45

Різка зміна поляризації зразка під дією електричного поля за рахунок зміщення доменних границь обумовлює високі значення діелектричної проникності ϵ багатодомених сегнетоелектриків. Діелектрична проникність досягає десятків тисяч одиниць. Величина ϵ в сегнетоелектриках істотно залежить від напруженості електричного поля. Значення ϵ тим більше, чим слабкіше закріплені доменні границі на дефектах і на поверхні кристала.

Утворення доменів в кристалах сегнетоелектриків пов'язано з тим, що в тому випадку, коли всі сусідні елементарні осередки кристала поляризовані в одному і тому ж напрямку, навколо кристала з'являється зовнішнє електричне поле.

Наявність електричного поля підвищує енергію системи і для зниження енергії кристал мимовільно розбивається на домени (рис. 12.3).

Оскільки нижче температури Кюрі симетрія кристалічної решітки зменшується, то число напрямків, уздовж яких вигідна спонтанна поляризація сусідніх кристалічних решіток, порівняно мало. Відповідно сусідні домени можуть бути разорієнтованими на 180 або на 90 градусів.

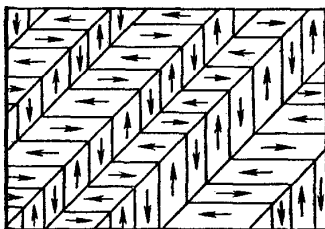


Рисунок 12.3 – Розбиття кристала сегнетоелектрика на домени

Оскільки сумарні електричні моменти сусідніх доменів антипаралельні або перпендикулярні, то в цілому кристал сегнетоелектрика не володіє електричним моментом. Важливо відзначити, що на границях доменів відбувається поступовий поворот дипольних моментів з одного напрямку в інший, аналогічно тому, як відбувається цей поворот в феромагнетиках. У цьому ще одна схожість сегнетоелектриків з феромагнетиками. Границі доменів в сегнетоелектрику взаємодіють зі структурними недосконаlostями решітки так само, як і у феромагнетиків.

Таким чином, окремі ділянки структури сегнетоелектрику мають власні електричні моменти, викликані зміщенням іонів або полярних груп атомів. При цьому моменти сусідніх ділянок

взаємно орієнтуються в одному напрямку в межах макроскопічної області, званої доменом (рис.12.4, *а*). *Домени* – це макроскопічні області, що володіють спонтанною поляризацією, яка виникає під впливом внутрішніх процесів в діелектрику. Лінійні розміри доменів складають 0.001 – 1 мм. Напрямок електричних моментів у різних доменів різний. В результаті сумарний вектор поляризації зразка в цілому дорівнює нулю. Звичайні (пасивні) діелектрики не мають таких областей. Тільки дуже дрібні кристали можуть бути одно доменними. В монокристалах відносна орієнтація електричних моментів доменів визначається симетрією кристалічної решітки.

Зовнішнє електричне поле змінює напрямок електричних моментів доменів, відбувається процес зародження і зростання нових доменів за рахунок зміщення доменних меж. В результаті відбувається переорієнтація вектора спонтанної поляризації в напрямку зовнішнього поля (рис.12.4, *б*).

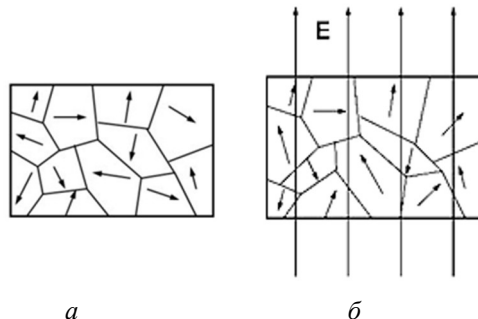


Рисунок 12.4 – Спонтанна поляризація в сегнетоелектрику при відсутності (*а*) та наявності (*б*) зовнішнього електричного поля

Це створює ефект дуже сильної поляризації і обумовлює надвисокі значення діелектричної проникності

сегнетоелектриків (до сотень тисяч). Залежність поляризації P від напруженості електричного поля E – нелінійна і при циклічній зміні E має вигляд петлі діелектричного гістерезису (рис. 12.5).

При напруженості поля $E = 0$ поляризованість зразка, що складається з одного домену, дорівнює $+P_C$ або $-P_C$. Зі збільшенням напруженості поля, прикладеного в напрямку P_C , поляризованість зростає лінійно завдяки звичайним механізмам поляризації (електронній, йонній, дипольній). Якщо прикласти електричне поле протилежного знака, то при деякому значенні напруженості поля E_C відбувається переполяризація, тобто зміна напрямку вектора P_C на протилежний. Напруженість поля, під час якої відбувається зміна напрямку спонтанної поляризованості, називають **коерцитивною силою** H_C .

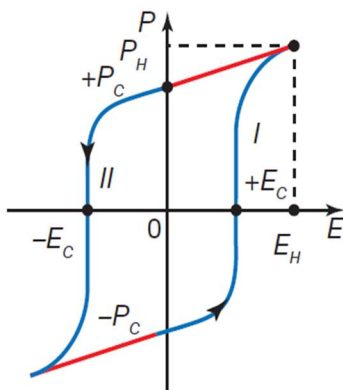


Рисунок 12.5 – Петля діелектричного гістерезису сегнетоелектрика:
 P_m – поляризація насичення; P_r – залишкова поляризація;
 E_C – коерцитивна сила

Діелектричний гістерезис зумовлений незворотним зміщенням доменних меж під дією поля і свідчить про додаткові

витрати енергії, пов'язаних з орієнтацією доменів. Залишкова поляризація P_r і коерцитивна сила E_c залежать від природи діелектрика і визначаються факторами, що впливають на рух доменних стінок, – розміром кристалітів, наявністю домішок і дефектів. *Площа петлі гістерезису* пропорційна енергії, що розсіюється в діелектрику за один період. Тому сегнетоелектрики характеризуються великим значенням тангенса кута діелектричних втрат ($\operatorname{tg}\delta = 0.1$).

Конденсаторна сегнетокераміка, як і будь-який діелектрик, для виробництва звичайних конденсаторів повинна мати більшу величину діелектричної проникності з малою залежністю від температури, незначні втрати, невелику залежність ϵ і $\operatorname{tg}\delta$ від напруженості електричного поля (малу нелінійність), високі значення питомого опору та електричної міцності. Поблизу точки Кюрі діелектрична проникність сегнетоелектриків максимальна, але нестабільна. Одним з найважливіших методів отримання оптимальних властивостей в заданому температурному інтервалі є використання твердих розчинів і сумішей різних кристалів. Зміною концентрації компонентів в твердому розчині можна регулювати значення діелектричної проникності, зміщувати температуру Кюрі (рис. 12.6), змінювати нелінійність поляризації і таке інше.

У твердих розчинах, в порівнянні з простими речовинами, можна отримати більш згладжені температурні залежності ϵ , що має важливе значення для виробництва конденсаторів. У більшості випадків конденсаторні сегнетокерамічні матеріали містять кілька кристалічних фаз. При «розмитому» фазовому переході нелінійні властивості діелектриків виражені порівняно слабо.

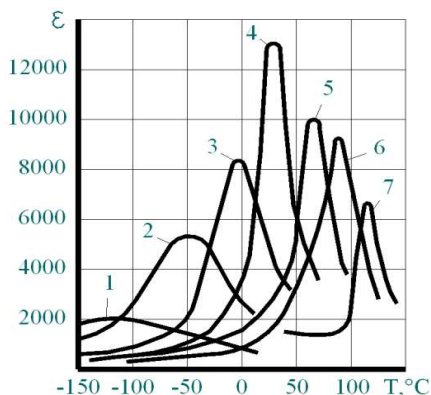


Рисунок 12.6 – Температурні залежності відносної діелектричної проникності на частоті 1 кГц твердих розчинів $\text{BaTiO}_3 + \text{BaZrO}_3$: крива 1 – 60 % BaTiO_3 ; крива 2 – 70 %; крива 3 – 75 %; крива 4 – 80 %; крива 5 – 85 %; крива 6 – 90 %; крива 7 – 100 %

Матеріал T-900 ($\epsilon \approx 900$) являє собою твердий розчин титанатів стронцію SrTiO_3 і вісмуту $\text{Bi}_4\text{TiO}_{12}$. Залежність діелектричної проникності від температури виражена слабо. Точка Кюрі $T_c = -140^\circ\text{C}$ розташована в області негативних температур.

Для матеріалу СМ-1 (ϵ близько 3000) на основі титанату барію з добавкою оксидів цирконію і вісмуту характерна згладжена залежність діелектричної проникності від температури. З нього виготовляють низьковольтні малогабаритні конденсатори.

Матеріал T-8000 (ϵ близько 8000) застосовується для виготовлення конденсаторів, в тому числі і високовольтних, що працюють в неширокому інтервалі температур на основі твердого розчину $\text{BaTiO}_3 + \text{BaZrO}_3$ (рис.12.6). Відрізняється

високим значенням діелектричної проникності при кімнатній температурі (поблизу точки Кюрі).

Для виготовлення нелінійних конденсаторів застосовуються інші сегнетоелектричні матеріали, що мають різко виражені нелінійні властивості – сильну залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля (рис. 12.7). Такі матеріали називаються **варикондами**.

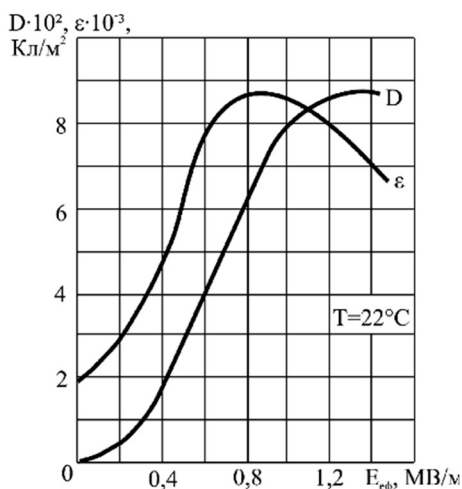


Рисунок 12.7 – Залежність вектора електричного зміщення D і діелектричної проникності ϵ від напруженості електричного поля для сегнетоелектрику

Вариконди призначені для управління параметрами електричних ланцюгів за рахунок зміни їх ємності. Одна з основних характеристик варикондів – коефіцієнт нелінійності K , який визначається як відношення максимального значення діелектричної проникності при деякій, характерній для даного матеріалу, напруженості електричного поля до початкового

значення діелектричної проникності. Чисельне значення коефіцієнта нелінійності для різних марок варикондів може бути від 4 до 50.

Нелінійні конденсатори, зазвичай в тонкоплівковому виконанні, є основою різноманітних радіотехнічних пристроїв – параметричних підсилювачів, низькочастотних підсилювачів потужності, фазообертачів, помножувачів частоти, модуляторів, стабілізаторів напруги, керованих фільтрів та інших пристроїв. Основою кристалічної фази в таких матеріалах є тверді розчини $\text{Ba}(\text{Ti} + \text{Sn})\text{O}_3$ або $\text{Pb}(\text{Ti} + \text{Zr} + \text{Sn})\text{O}_3$.

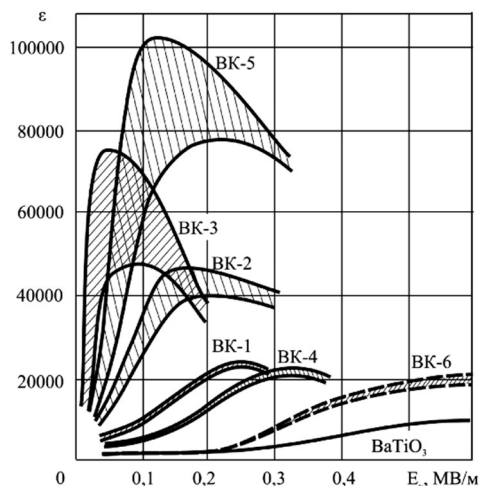


Рисунок 12.8 – Залежність ϵ матеріалів для варикондів від напруженості змінного електричного поля (для порівняння наведено відповідну залежність для BaTiO_3)

Кристали деяких сегнетоелектриків і антисегнетоелектриків мають сильно виражений електрооптичний ефект. Електрооптичний ефект полягає в

зміні показника заломлення середовища, яку викликано зовнішнім постійним електричним полем. При зміні показника заломлення пропорційно першого ступеня напруженості електричного поля електрооптичний ефект – лінійний – **ефект Поккельса**. При квадратичній залежності показника заломлення від напруженості електричного поля електрооптичний ефект – квадратичний – **ефект Керра**. Електрооптичні властивості сегнетоелектричних кристалів використовуються для модуляції лазерного випромінювання, здійснюваного електричним полем, прикладеним до кристалу (рис.12.9). В комірці Керра кристал сегнетоелектричного матеріалу знаходиться між двома схрещеними поляроїдами – поляризатором і аналізатором. Дія модулятора заснована на залежності повороту площини поляризації світлового променя, що проходить скрізь сегнетоелектрик, від напруженості електричного поля, створюваного джерелом сигналу. Для електрооптичних модулаторів світла використовують кристали ніобату літію LiNbO_3 , дигідрофосфату калію KH_2PO_4 , прозору сегнетокераміку системи ЦТСЛ, що представляє собою тверді розчини цирконату-титанату свинцю з оксидом лантану.

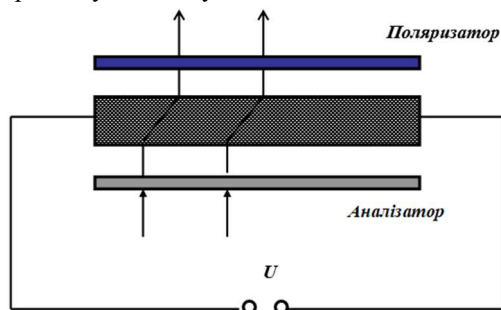


Рисунок 12.9 – Електрооптичний модулятор (комірка Керра)

При легуванні сегнетоелектричної кераміки BaTiO_3 і твердих розчинів $\text{Ba}(\text{Ti}, \text{Sn})\text{O}_3$ і $(\text{Ba}, \text{Pb})\text{TiO}_3$ неодимом і марганцем отримують матеріали, які за своїми властивостями відносяться до **сегнетонапівпровідників**. У таких матеріалах, завдяки легуванню, виникають донорні і акцепторні рівні, і провідність підвищується в мільярди разів до значень, що відповідають типовим напівпровідникам. Однак висока провідність спостерігається лише в полярній фазі при температурах нижче точки Кюрі. Поблизу точки Кюрі провідність різко зменшується – в $10^2 \div 10^6$ разів, і лише при нагріванні багато вище точки Кюрі вона знову починає рости зі збільшенням температури. Такий ефект називається позисторним. Керамічні елементи – **позистори** (рис.12.10) мають низький «холодний» і високий «гарячий» опір. Вони широко застосовуються в системах теплового контролю, вимірювальної техніки, в пускових системах двигунів, для автоматичного регулювання в інших пристроях.

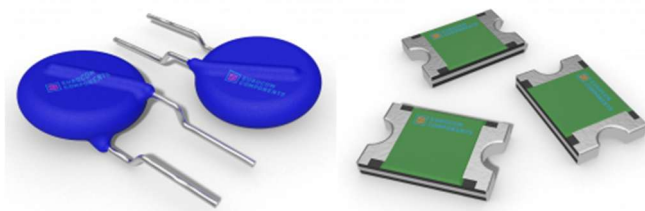


Рисунок 12.10 – Вивідні та SMD позистори

Залежно від галузі застосування у варикондах використовують два види діелектричної нелінійності – ефективну й реверсивну.

Ефективна нелінійність – це зміна ємності залежно від амплітуди прикладеної напруги (синусоїдальної, імпульсної або

будь-якої іншої форми). Вона існує лише на низьких частотах. На високих частотах ємність вариконда не залежить від напруженості електричного поля. Ефективну нелінійність використовують у стабілізаторах змінної напруги, пристроях іскрогасіння.



Реверсивна нелінійність – це зміна ємності в змінному полі іншим, керуючим, електричним полем. Керуючу напругу

прикладають до вариконда одночасно зі змінною. Керуюче поле може бути постійним або повільно мінливим. Частота напруги керуючого поля менша за частоту напруги змінного поля, а амплітуда керуючої напруги вища за амплітуду змінної напруги. Реверсивну нелінійність сегнетоелектриків використовують у діелектричних підсилювачах, стабілізаторах напруги, пристроях автоматики.

Терморезистивна сегнетокераміка використовує ефект, який полягає в різкому зростанні питомого електричного опору ρ при підвищенні температури поблизу точки Кюрі.

Сегнетоелектрики з прямокутною петлею гістерезису, наприклад, такі, як тригліцинсульфат, застосовують у запам'ятовуючих пристроях для електронно-обчислювальних машин. Під час відсутності зовнішнього поля сегнетоелектрик з прямокутною петлею гістерезису має два стійких стани, що відповідають різним напрямкам залишкової електричної індукції.

Один з цих станів в осередках пам'яті електронно-обчислювальних машин означає зберігання одиниці, а інший – зберігання нуля. Подаючи зовнішню напругу різної полярності, сегнетоелектрик можна переводити з одного стану в інший. На цьому засновано запис, зчитування і стирання інформації.

Пам'ять на основі тонких шарів сегнетоелектриків заснована на тому, що ці матеріали можна розбити на невеликі домени, поляризація всередині яких може бути незалежною від поляризації в навколишній речовині. Для кодування в доменах нулів та одиниць поляризацію можна спрямовувати вгору або вниз усередині шару. Однією з основних проблем технології є відсутність надійного способу запису інформації – зміни поляризації домену. У існуючих методиках для запису

інформації домен необхідно доторкнутися до нього гострою зарядженою голкою. Це створює сильне електричне поле, що змінює поляризацію у матеріалі. Разом з тим, фізичний дотик ушкоджує тонкий шар сегнетоелектрика або голку, що з часом погіршує працездатність пам'яті. Зчитування інформації можна здійснити без її руйнування, наприклад, оптичним методом або вимірюванням опору тонкої напівпровідникової плівки, нанесеної на поверхню сегнетоелектрика.

Для характеристики властивостей сегнетоелектриків в різних умовах роботи застосовують два визначення діелектричної проникності. **Статична діелектрична проникність** визначається

$$\varepsilon_{cn} = \frac{D_i}{\varepsilon_0 E_i}, \quad (12.1)$$

де D (Кл/м²), E (В/м) – координати точок основної кривої поляризації – залежності вектора електричного зміщення (електричної індукції) D від напруженості E електричного поля, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна.

При одночасному впливі постійного та змінного електричного поля змінення поляризації сегнетоелектрика характеризується **диференційною діелектричною проникністю**, котра залежить від значення напруженості зовнішнього поля

$$\varepsilon_{cn} = \frac{dD}{\varepsilon_0 dE}. \quad (12.2)$$

В лінійних діелектриках статична і диференційна діелектрична проникність не залежать від напруженості електричного поля і дорівнюють одна одній.

Структура сегнетоелектричних кристалів різноманітна. За типом хімічного зв'язку і будовою все сегнетоелектрики поділяють на **іонні** та **дипольні**.

У **іонних** сегнетоелектриків характерним структурним елементом кристалічної решітки є кисневий октаедр, всередині якого компактний атом титану або іншого елемента може займати кілька стійких положень. До іонних сегнетоелектриків відносяться титанат барію BaTiO_3 , титанат свинцю PbTiO_3 , ніобат калію KNbO_3 , ніобат літію LiNbO_3 , танталат літію LiTaO_3 , йодат калію KIO_3 , барій-натрієвий ніобат $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ або скорочено – «банан» і ін.

У **кристалів дипольних сегнетоелектриків** є готові полярні групи атомів, здатні займати різні положення рівноваги. До дипольних сегнетоелектриків відносяться сегнетова сіль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, тригліцинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$, дигідрофосфат калію KH_2PO_4 , нітрит натрію NaNO_2 . Саме в кристалах сегнетової солі вперше були виявлені особливості поведінки діелектриків, обумовлені спонтанною поляризацією.

Іонні і дипольні сегнетоелектрики істотно розрізняються за фізичними властивостями і особливостями застосування.

Речовини, електричні моменти сусідніх ділянок яких спрямовані зустрічно (антипаралельно), називають **антисегнетоелектриками**. В їх кристалах електричні моменти сусідніх елементарних осередків виявляються врівноваженими, отже, спонтанна поляризованість кожного домену дорівнює нулю. Однак при нагріванні вище температури Кюрі ця рівновага порушується і антисегнетоелектрики можуть мати високу діелектричну проникність. Прикладами антисегнетоелектриків є цирконат свинцю PbZrO_3 , ніобат натрію NaNbO_3 , дигідрофосфат амонію $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ і ін.

12.2 П'єзоелектрики

П'єзоелектриками називають діелектрики, в яких під дією механічної напруги з'являється поляризація, а під дією

електричного поля п'єзоелектрики пружно деформуються. Тобто п'єзоелектрики є електромеханічними перетворювачами, які перетворюють механічну енергію в електричну і навпаки.

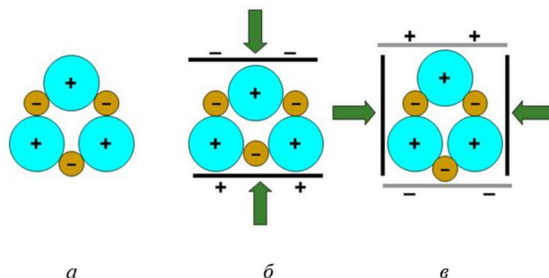


Рисунок 12.11 – Пояснення до виникнення електричної поляризації в п'єзоелектриках (а – початковий стан, до дії механічної деформації)

П'єзоелектричними властивостями можуть володіти тільки іонні кристали, що не мають центра симетрії (рис. 12.12).

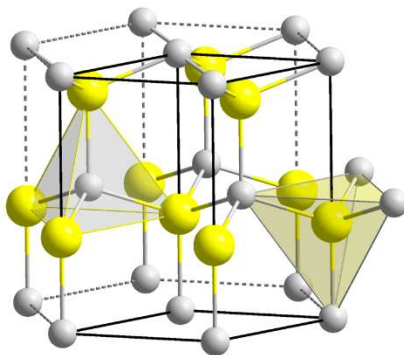


Рисунок 12.12 – Оксид цинку ZnO зі структурою вюрциту

Відносне зміщення підґраток позитивних і негативних іонів при деформації приводить до поляризації кристалів. Але не

всі іонні кристали мають ці властивості. Якщо підґратки деформуються однаково, то їх відносне зміщення не відбувається, і п'єзоелектричний ефект не спостерігається. До таких кристалів належать, наприклад, кристали з кубічною ґраткою типу NaCl або CsCl. Для існування п'єзоефекту необхідно, щоб іонний кристал не мав центру інверсії, тобто такої точки, відображення в якій суміщає кристал із самим собою (в ідеальному кристалі центр інверсії є завжди). В кристалі, в якому немає центру інверсії, існують так звані полярні осі, тобто такі осі, два напрями яких нерівнозначні. Поворот кристалу на 180° навколо будь якої прямої, перпендикулярної до полярної осі, не суміщає його із самим собою. Деформація іонного кристалу вздовж цих осей приводить до його поляризації.

Як приклад кристалу, який має п'єзоелектричні властивості, розглянемо кварц SiO_2 , який знаходить широке практичне застосування. Кварц належить до ромбоєдричної сингонії. В ґратці кварцу є одна вісь 3-ого порядку і три перпендикулярні до неї осі 2-ого порядку під кутом 120° одна до одної. Саме ці осі є полярними. Ґратка кварцу складається з позитивно заряджених іонів кремнію Si і негативно заряджених іонів кисню O. Іони в ґратці кварцу розташовані по спіралі. В першому наближенні іони кремнію і кисню розташовані в шестигранних комірках, на кожну з яких приходяться по три молекули SiO_2 . Вигляд згори на одну таку комірку наведено на рисунку 12.13. Фактично атом кремнію знаходиться у центрі тетраедра, у вершинах якого розташовані атоми кисню.

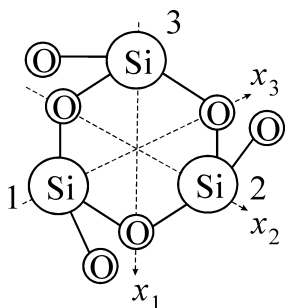
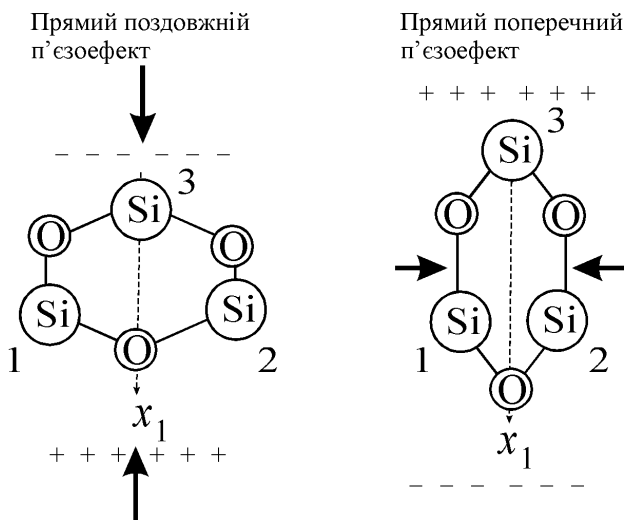


Рисунок 12.13 – Схема елементарної комірки ґратки кварцу

При цьому іон кремнію 1 розташований вище іону кремнію 2, а той, в свою чергу, вище іону 3. Комірка електрично нейтральна і не має дипольного моменту. Три осі x_1, x_2, x_3 є полярними. Якщо стиснути кристал вздовж осі x_1 , то внаслідок асиметрії комірки, іон кремнію 3 і протилежний йому іон кисню зміщуються більше, ніж іони кремнію 1 і 2 та відповідні їм іони кисню. В результаті комірка набуває дипольного моменту, а на площинах кристалу, перпендикулярних до осі x_1 , з'являються зв'язані заряди. Виникає так званий **прямий поздовжній п'єзоэффект**.

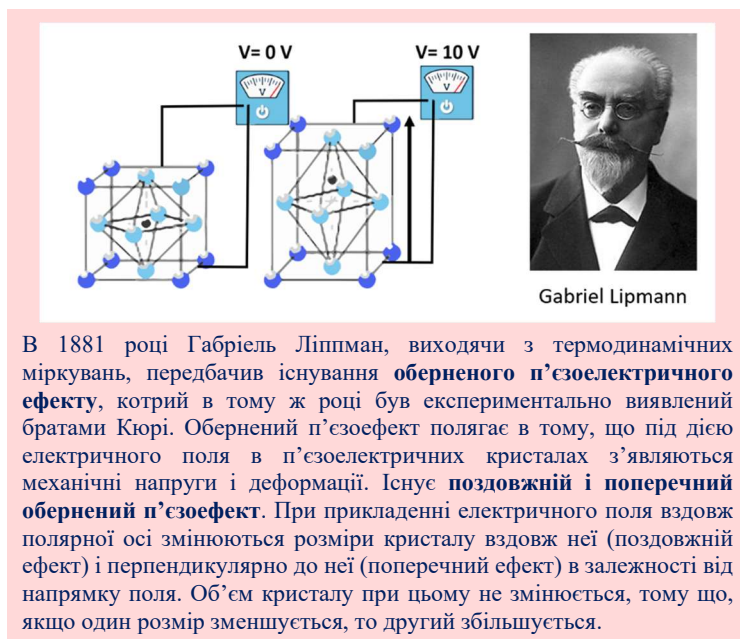
При стисканні вздовж осі, перпендикулярній до x_1 , відбувається розтягування комірки в напрямку осі x_1 , перпендикулярному до прикладених сил. Виникає **прямий поперечний п'єзоэффект**. При однаковому знакові деформації знаки зарядів при поздовжньому і поперечному п'єзоэффектах різні. Зміна знаку деформації (розтягнення замість стиснення) приводить і до зміни знаку поляризаційних зарядів.



12.14 – Схематичне пояснення прямого поздовжнього та поперечного п'єзоефекту

При малих деформаціях поляризаційні ефекти пропорційні деформації, а, значить, за законом Гука пропорційні прикладеній силі. Деформація вздовж осі 3-ого порядку, перпендикулярної до площини рисунку, не дає п'єзоефекту.

Для того, щоб використати поляризаційні заряди, пластинки з п'єзоелектрика, вирізані перпендикулярно до однієї з полярних осей, покривають шаром металу, утворюючи плаский конденсатор. При деформації заряди, які з'являються на гранях кристалу, паралельних до пластин, наводять на металі заряди протилежного знаку. Появу заряду на такому конденсаторі можна потім використати. Наприклад, при тиску на кристал 10^6 дин/см² (приблизно 1 атм) і товщині пластини 0,5 см виникає різниця потенціалів ~ 120 В.



Зміна товщини пластини Δl не залежить від її лінійного розміру l , а тільки від прикладеної різниці потенціалів. Дійсно, при збільшенні товщини пластини l в напрямку поля Δl повинно було б збільшитись, але при заданій різниці потенціалів зменшується поле E , яке відповідає за деформацію. Знак оберненого п'єзоефекту визначається правилом: якщо для отримання на поверхні кристалу негативного заряду необхідне стиснення, то для його одержання на металічну пластину треба подати позитивний заряд. Тобто механізм оберненого п'єзоефекту такий: при подаванні різниці потенціалів на пластини конденсатора поле, що виникає, зміщує позитивні та негативні іони в протилежні боки, комірка і кристал

деформуються. Знак електрично індукованої деформації змінюється при зміні знаку електричного впливу. Величина деформації кристалу лінійно змінюється зі змінням величини поля: $x=dE$. Ця ознака п'єзоефекту – лінійність ефекту – дуже важлива, оскільки відрізняє зворотний п'єзоефект від **електрострикції**, при якій деформація діелектрику, викликана електричним полем, знаходиться в **квадратичній** залежності від величини напруженості E цього поля.

Електрострикційна деформація не змінюється зі зміною знака E . Електрострикція відрізняється від п'єзоефекту ще й тим, що вона не має зворотного ефекту, тобто ефект є винятково електромеханічним, але не «механоелектричним». У разі прямого п'єзоефекту електричний момент (поляризація) виникає за рахунок зміщення пов'язаних заряджених частинок нецентросиметричного діелектрика. У центросиметричному діелектрику зміщення заряджених частинок під дією механічної сили не призводить до поляризованого стану діелектрика саме в силу наявності в його структурі центру симетрії: відбувається компенсація електричних моментів, створюваних зміщенням позитивно та негативно заряджених частинок. Тому електрострикція не має зворотного ефекту. Якщо для прояву п'єзоефекту діелектрик неодмінно повинен бути нецентросиметричним, то **електрострикція не має обмежень по симетрії і проявляється в будь-яких діелектриках**.

Відомо більше тисячі речовин, що володіють п'єзоелектричними властивостями, в тому числі всі сегнетоелектрики, однак практично застосовують обмежене коло матеріалів. Загалом п'єзоелектричні матеріали поділяються на категорії кристалів, кераміки та полімерів. Найважливішим

п'єзоелектриком є монокристалічний кварц, великі прозорі кристали якого називають «гірський кришталь».

Еволюцію п'єзоелектричних матеріалів можна побачити на рис. 12.15.

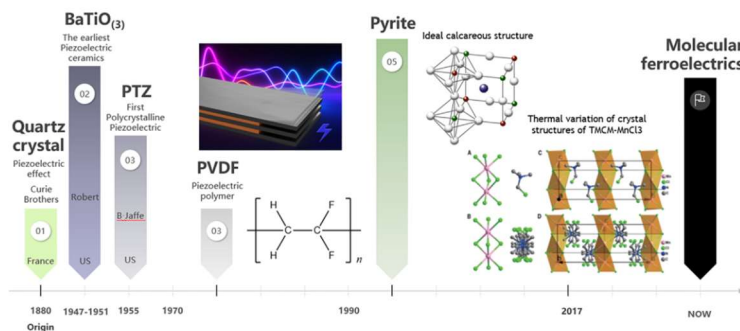


Рисунок 12.15 – Еволюція п'єзоелектричних матеріалів

Кількісною характеристикою п'єзоефекту є сукупність п'єзоконстант (п'єзомодулей) – коефіцієнтів пропорційності d в співвідношеннях між електричними (напруженість електричного поля E , поляризація P) і механічними величинами (механічні напруги σ , відносна деформація ϵ). Так як механічні напруги можуть бути представлені як сукупності шести незалежних величин (стиснення / розтягування уздовж трьох осей і зсуву в площинах, перпендикулярних цим осям), а вектор поляризації має три незалежні компоненти, то в загальному випадку може бути 18 незалежних різних п'єзоконстант.

Феноменологічна теорія п'єзоефекту заснована на тензорних співвідношеннях між складовими векторів P і E та компонентами тензорів напруг σ і деформацій ϵ в кристалі. Для прямого п'єзоефекту

$$P_i = d_{ik} \sigma_{ki}, \quad (12.3)$$

де i змінюється від 1 до 3, а k – від 1 до 6; d_{ik} – тензор третього рангу п'єзомодулей, який в матричній формі має вигляд

$$d_{ik} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix}. \quad (12.4)$$

Величини п'єзоконстант сильно розрізняються для кристалів різних типів і для різних кристалографічних напрямків: від одиниць до сотень пікокулон на ньютон (пКл/Н). Речовинами з добре вираженими п'єзоелектричними властивостями є монокристали, природні або штучно вирощені (кварц, дигідрофосфат калію і амонію, сегнетова сіль і ін.), і полікристалічні тверді розчини, піддані попередній поляризації в електричному полі (п'єзокераміка). У таблиці 12.2 наведені значення п'єзомодуля деяких п'єзоелектриків.

Таблиця 12.2 – Основні параметри п'єзоелектричних матеріалів

Матеріал	Щільність, 10 ³ кг/м ³	Діелектрична проникність	П'єзомодуль d_{ik} , пКл/Н
Кварц	2,66	4,5	2,31 (d_{11})
Турмалін	2,9 – 3,2	8,2	3,6 (d_{15}), 1,9 (d_{33})
Сегнетова сіль	1,77	4000*	790 (d_{14}), 53 (d_{25})
Титанат барію ТБ-1	5,3	1500	45 (d_{31}), 100 (d_{33})
П'єзокераміка на основі цирконату- титанату свинцю:			
– ЦТБС-3	7,2	2300	125 (d_{31}), 320 (d_{33})
– PZT-5	7,5	3400	274 (d_{31}), 590 (d_{33})
Полівініліденфторид (PVDF)	1,76	11	20 (d_{31})

*Максимальне значення в точці Кюрі при $T = 24^\circ \text{C}$

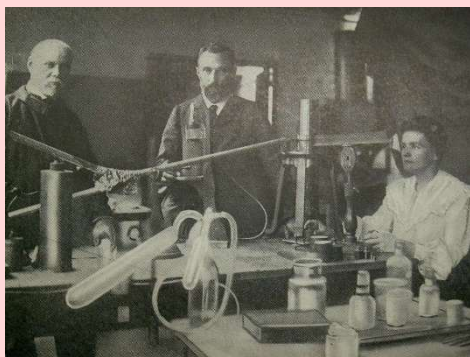
Плоскопаралельна полірована кварцова пластинка з електродами і держателем представляє п'єзоелектричний резонатор, тобто коливальний контур. Резонансна частота коливань залежить від товщини пластини і напрямку кристаллографічного зрізу. Перевагами кварцових резонаторів є малий $\operatorname{tg} \delta$ і висока механічна добротність (дуже малі механічні втрати). У кращих кристалах кварцу механічна добротність може становити 10^6 - 10^7 . Це забезпечує високу частотну вибірковість кварцових резонаторів. Якщо в такому резонаторі порушити коливання на резонансній частоті, то їх загасання буде відбуватися протягом тривалого часу. Кварцовий п'єзоелемент, вставлений в схему електричного генератора, нав'язує йому власну резонансну частоту. Завдяки високій добротності кварцові резонатори використовуються в якості фільтрів з високою селективною здатністю, а також для стабілізації частоти генераторів (наприклад, в радіолокаційних станціях, в електронному годиннику і тому подібне). Зважаючи на обмежені запаси природного кварцу основні потреби п'єзотехніки задовольняють завдяки штучно вирощеним кристалом.

Крім кварцу в різних п'єзоперетворювачах застосовують кристали сульфату літію $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, сегнетової солі, дигідрофосфату амонію, а також ніобату і танталату літію (LiNbO_3 , LiTaO_3), які перевершують кварц по добротності в діапазоні високих і надвисоких частот. Для надання п'єзоелектричних властивостей сегнетоелектричні кристали LiNbO_3 і LiTaO_3 переводять в моноклоновий стан шляхом відпалу в сильному електричному полі при температурі трохи нижче точки Кюрі.

Найбільш широке застосування в якості п'єзоелектричного матеріалу знаходить сегнетоелектрична п'єзокераміка.

У звичайному стані сегнетокераміка не проявляє п'єзоактивності, оскільки є ізотропним середовищем внаслідок хаотичного розташування окремих кристалічних зерен і поділу їх на домени з різним напрямком спонтанної поляризованості. Однак, якщо піддати сегнетокераміку впливу сильного електричного поля, то поляризованість доменів отримає переважну орієнтацію в одному напрямку. Після зняття поля зберігається стійка залишкова поляризація, матеріал стає текстурованим.

За своїми властивостями поляризований сегнетокерамічний зразок близький до однодоменного кристалу і має високу п'єзоактивність.



У 1880 р. брати П'єр Кюрі і Жак Кюрі працювали лаборантами на факультеті наук в Парижі. Вони виявили, що застосування тиску до таких кристалів, як кварц, турмалін і сегнетова сіль, створює електричні заряди на поверхні цих матеріалів. Це

перетворення механічної енергії в електричну називається **прямим п'єзоелектом**. Слово «п'єзо» походить від грецького «тиснути».

Основним матеріалом для виготовлення п'єзокерамічних елементів є тверді розчини цирконат-титанат свинцю або скорочено ЦТС ($\text{PbZrO}_3 + \text{PbTiO}_3$). Ця кераміка широко використовується для створення потужних ультразвукових

випромінювачів в широкому діапазоні частот для цілей гідроакустики, дефектоскопії, механічної обробки матеріалів.

Такі ультразвукові генератори застосовуються також в хімічній промисловості для прискорення різних процесів (емульсифікатори, полімеризатори, стерилізатори і тому подібне), в напівпровідниковій технології для ефективного відмивання і знежирення напівпровідникових пластин за допомогою ультразвукової ванни.

П'єзокераміка застосовується в малогабаритних мікрофонах, телефонах, гучномовцях (високочастотних), детонаторах (для зброї), різних пристроях підпалу в газових системах. П'єзокерамічні елементи можна використовувати в якості датчиків тиску, деформацій, прискорень і вібрацій. Подвійне перетворення енергії (електричної в механічну і навпаки) покладено в основу роботи п'єзорезонансних фільтрів, ліній затримки і п'єзотрансформаторів.

П'єзотрансформатори призначені для отримання високої напруги. Їх зазвичай виконують у вигляді пластини або бруска, одна половина якого (збудник коливань) поляризується по товщині h , а інша половина (генератор) – по довжині бруска l (рис. 12.16).

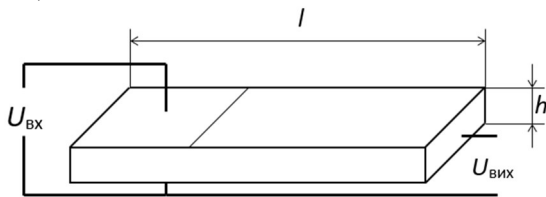


Рисунок 12.16 – Схема високонвольного п'єзоелектричного трансформатора

Змінне електричне поле, що підводиться до затискачів збудника, викликає резонансні механічні коливання по довжині бруска. У свою чергу, механічні коливання, що виникають в генераторній частині, призводять до появи вихідної електричної напруги. Трансформатори можуть бути виготовлені для роботи на частоті 10–500 кГц. На більш високих частотах їх розміри виявляються занадто малими, а на низьких – великими. Коефіцієнт трансформації напруги, пропорційний відношенню l/h , може досягати значень 50 і більше. П'єзокерамічні трансформатори використовують в схемах живлення електронно-променевих трубок, газорозрядних приладів, лічильників Гейгера і для генерування високовольтних імпульсів. Перевагами таких джерел живлення є відсутність магнітного поля, простота і надійність конструкції, мала маса і габаріти.

Деякі природні органічні кристали та полімери також виявляють п'єзоелектричні властивості:

кристали (рис. 12.17):

- кварц (SiO_2) – кристал природного походження з чітко вираженим і сильним п'єзоелектричним ефектом;

- топаз;

- турмалін;

- рошельська (сегнетова) сіль (тартрат натрію калію, $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) відома своїми сильними п'єзоелектричними властивостями, але має обмежене промислове використання через її розчинність у воді та стійкість до низьких температур;

- ортофосфат галію (GaPO_4) – схожий на кварц за своїми п'єзоелектричними властивостями, але з вищою температурною стабільністю.

- сахароза ($C_{12}H_{22}O_{11}$, столовий цукор): генерує електричний заряд у відповідь на механічний вплив, як у чистій, так і в нечистій (тростинний цукор) формах;

- титанат свинцю ($PbTiO_3$);

кераміка:

- титанат цирконат свинцю (PZT, $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$): синтетична кераміка, яка демонструє один із найзначніших п'єзоелектричних ефектів і широко використовується в різних сферах застосування.

- титанат барію ($BaTiO_3$), відомий своїм використанням у конденсаторах і нелінійній оптиці на додаток до своїх п'єзоелектричних властивостей.

- оксид цинку (ZnO): Структура монокристалів Вюрцита є п'єзоелектричною.

полімери:

- полівініліденфторид (PVDF) – термопластичний полімер із п'єзоелектричними властивостями, який використовується в гнучких датчиках;

- полівініліденфторид-трифторетилен ($P(VDF-TrFE)$): сополімер PVDF, який посилює п'єзоелектричний ефект;

- полі-L-молочна кислота (PLLA): біологічно розкладаний полімер, який використовується в медицині завдяки його п'єзоелектричним характеристикам;

- колаген, який міститься в кістках і сухожиллях, також виявляє природні п'єзоелектричні властивості;

- целюлоза (певні форми целюлози, особливо в її кристалічній формі) демонструють п'єзоелектричні ефекти;

- гліцин – амінокислота, яка виявляє п'єзоелектричність у специфічних кристалічних формах;

- ДНК виявляє легку п'єзоелектрику завдяки своїй спіралі.

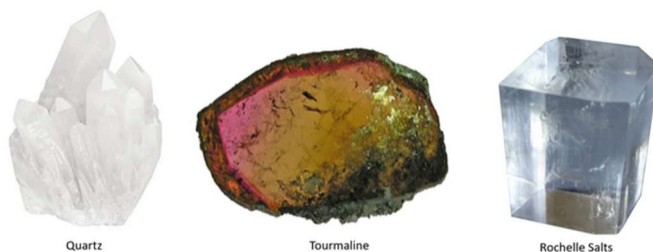


Рисунок 12.17 – П'єзоелектричні матеріали (кристали)

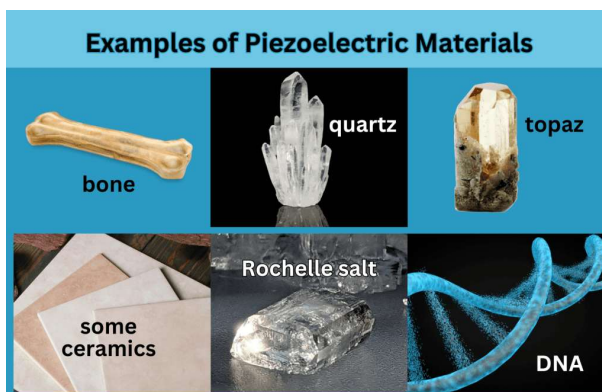


Рисунок 12.18 – Приклади п'єзоелектричних матеріалів

Практичне застосування прямого і оберненого п'єзоефекту дуже широке (рис. 12.19): п'єзоелектричні манометри, стабілізатори частоти і фільтри в радіотехніці, п'єзоелектричні датчики в автоматиці і телемеханіці, віброметри, звукознімачі, мікрофони, телефони, навушники, кварцові годинники тощо.

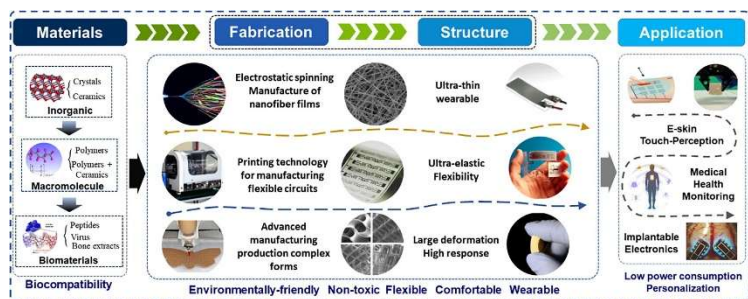


Рисунок 12.19 – Застосування п'єзoeлектриків

В автомобільній галузі також можна зустріти застосування п'єзоefекту – в датчиках детонації для вдосконалених систем керування двигуном. Велике значення для військових та аерокосмічної сфери має запропонований Ланжевенон п'єзoeлектричний випромінювач ультразвукових хвиль та їх приймач, які використовуються у гідролокації, в системах наведення та моніторингу вібрації.

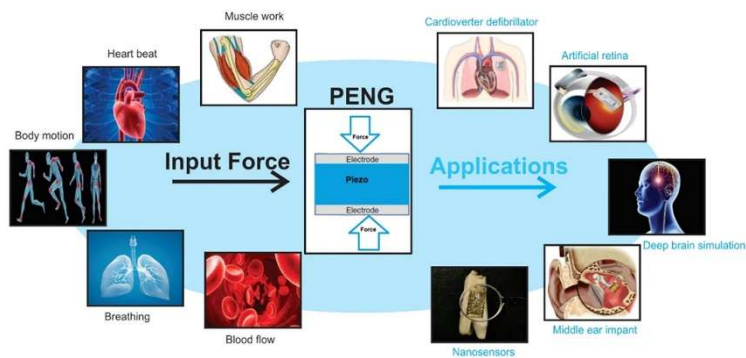


Рисунок 12.20 – П'єзoeфект в медицині

Варто згадати і медичне застосування пристроїв, які використовують п'єзoeфект (рис. 12.20): прикладом є

ультразвукове зображення, де п'єзоелектричний ефект допомагає генерувати та виявляти звукові хвилі. Окрім того, п'єзоелектрика є фундаментальним аспектом деяких біологічних процесів. Одна з найвідоміших біологічних функцій п'єзоелектрики – це кісткова тканина. Кістка є п'єзоелектричною, а це означає, що вона генерує електричний потенціал під час механічного впливу. Ця властивість відіграє важливу роль у ремоделюванні та зростанні кісток, коли електричні сигнали, що генеруються п'єзоелектрикою, стимулюють утворення або резорбцію кістки остеобластами та остеокластами відповідно. Подібно до кісток, сухожилля також демонструють п'єзоелектричні властивості. Коли сухожилля розтягуються або стискаються, вони генерують електричні сигнали. Така п'єзоелектрична поведінка може сприяти процесам відновлення та росту сухожиль, а також відігравати важливу роль у передачі сигналів і комунікації всередині тканини.

Людське вухо також «співпрацює» з п'єзо ефектом: наприклад, п'єзоелектричний ефект у вушній раковині допомагає перетворювати механічні коливання (звукові хвилі) в електричні сигнали, які мозок інтерпретує як звук.

12.3 Піроелектрики

В деяких п'єзоелектриках ґратки позитивних і негативних іонів зміщені одна відносно одної за рахунок будови кристалів. Такі кристали виявляються поляризованими за відсутності електричного поля або зовнішніх сил. Ці кристали мають спонтанну поляризацію завдяки своїй будові, однак, виявити її зазвичай не вдається. Іони, які завжди присутні у повітрі, осідають на заряджених поверхнях кристалів і компенсують їх заряд.

Якщо змінити температуру кристалу, то внаслідок теплового розширення підґратки позитивних і негативних іонів додатково зміщуються, змінюється спонтанна поляризація, на поверхні з'являється некомпенсований заряд. Якщо стабілізувати температуру на новому рівні, то через деякий час знову відбудеться компенсація зарядів іонами повітря. Виникнення поверхневих поляризаційних зарядів при зміні температури називається **піроелектричним ефектом**, а кристали, які мають такі властивості — **піроелектриками**. З термодинамічних міркувань випливає існування **оберненого піроелектричного ефекту** — зміна електричного поля, прикладеного до піроелектрика, змінює його температуру.

Перша згадка про піроелектричний ефект (від грецького слова «піро-» - вогонь) міститься в записках Теофраста, датованих 314 р. до н. е., який помітив, що нагріті кристали турмаліну притягують до себе соломинки та частинки попелу. Пізніше про подібні властивості кристалів гранату написав Аль-Біруні у своїй фундаментальній праці «Мінералогія».

Зв'язок явища піроелектрики з іншими електричними явищами в кристалах був доведений і розвинений Францом Епінусом і Йоханом Вільке в 1757 році. Дослідивши зразки дорогоцінного турмаліну, вони докладно описали піроелектричний ефект, вперше пояснивши явище поляризації. Через 127 років німецький вчений Август Кундта, розігрівши кристал турмаліну, запилив його сумішшю двох дрібнодисперсних порошоків: сірки та сурика, попередньо пропустивши їх через шовкове сито. У процесі просіювання (тертя) об шовк яскраво-жовті частинки сірки заряджалися негативно, а червоно-жовтогарячі частинки сурика, навпаки, позитивно. При охолодженні кристала турмаліну полюси змінилися, і відповідно, у зворотному порядку змінилися і кольори.

Будь-який піроелектрик має п'єзоелектричні властивості, тобто є п'єзоелектриком. Однак, не будь-який п'єзоелектрик є піроелектриком. Щоб бути піроелектриком, кристал повинен

мати напрямок, в якому є спонтанна поляризація. Від сегнетоелектриків піроелектрики відрізняються тим, що в піроелектриках зовнішнє поле не може змінити напрямок спонтанної поляризації, а в сегнетоелектриках це можливо. Спонтанна поляризація – результат розбіжності «центрів тяжіння» позитивних і негативних зарядів в діелектрику. Сама спонтанна поляризація компенсується в піроелектрику полями вільних носіїв зарядів, що натікають на поверхню зразка зсередини і ззовні. Зміна спонтанної поляризованості ΔP_0 при швидкій зміні температури ΔT (так званий прямий піроелектричний ефект)

$$\Delta P_{0i} = p_i \Delta T, \quad (12.5)$$

де p_i – піроелектричні коефіцієнти, котрі можна розглядати як компоненти вектора $p(p_1, p_2, p_3)$. Типові значення піроелектричних коефіцієнтів $10^{-5} - 10^{-6}$ Кл/(м²·К) (таблиця 12.3).

Таблиця 12.3 – Електричні властивості деяких п'єзоелектриків

Кристал	Значення відносної діелектричної проникності ϵ	Значення піроелектричних коефіцієнтів p 10 ⁻⁶ Кл/(м ² ·К)
Силеніти	40	20-30
Евлітини	16	10-20
Арсенід галію	12	1,5-2,5
Кварц	4,5	2,6

Підвищення або зниження температури полярного діелектрика змінює інтенсивність теплового руху часток в ньому та орієнтацію і відстань між полярними комплексами, що призводить до змінення спонтанної поляризованості. Внаслідок цього на поверхні полярного діелектрика з'являються некомпенсовані електричні заряди. При підключенні

піроелектричного елементу до «навантаження» в колі буде протікати піроелектричний струм. У випадку розімкнутого кристалу на ньому з'являється піроелектрична напруга. Але якщо температура піроелектрика не змінюється, то піроелектричний струм (або піроелектричний потенціал) поступово зменшується.

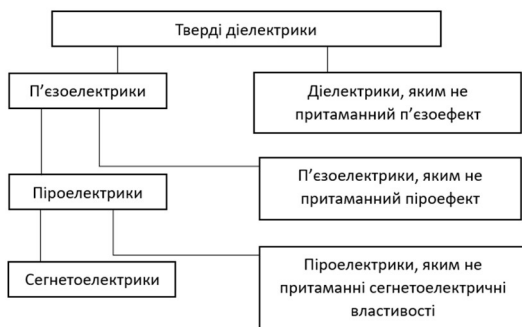


Рисунок 12.21 – Класифікація твердих діелектриків за ознакою поляризації

Поляризаційні заряди можуть виникати при неоднорідному нагрівання – це так званий **третинний піроелектричний ефект**. **Зворотний піроелектричний ефект** полягає в тому, що змінення електричного поля у відсутності теплообміну (адіабатичний процес) супроводжується зміненням температури кристалу. При нагріванні відбувається деформація, котра може супроводжуватися п'єзоелектричним ефектом, що зазвичай перевищує первинний піроелектричний ефект. Така електризація називається **вторинним піроелектричним ефектом**.

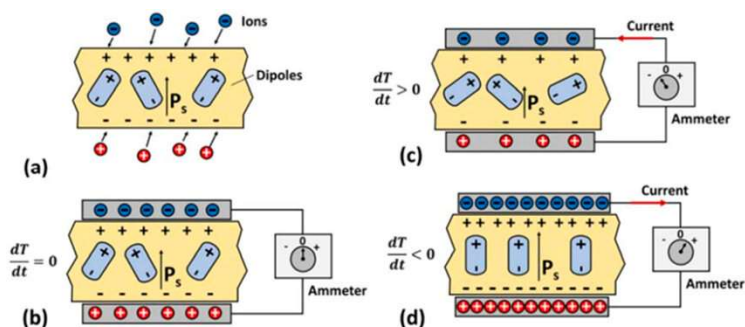


Рисунок 12.22 – Схематичний фізичний механізм піроелектричного ефекту. (а) Спонтанна поляризація піроелектричних матеріалів, індукована внутрішніми електричними диполями.

(б) Механізм піроелектричного ефекту для піроелектричного матеріалу в умовах стабільної температури. Коли температура підтримується постійною ($dT/dt = 0$), внутрішнє електричне поле, викликане спонтанною поляризацією в піроелектричному матеріалі, та індуковане зовнішнє електричне поле в двох електродах перебувають у рівновазі, і струму в стаціонарному стані немає.

(с) Механізм піроелектричного ефекту для піроелектричного матеріалу в умовах нагрівання. Коли температура підвищується ($dT/dt > 0$), виникає чистий дипольний момент і спонтанна поляризація зменшується, що спричинить міграцію електронів у зовнішньому контурі.

(д) Механізм піроелектричного ефекту для піроелектричного матеріалу в умовах охолодження. Коли температура знижується ($dT/dt < 0$), спонтанна поляризація посилюється, електричний баланс знову порушується, що викликає зворотну міграцію електронів.

Піроелектричними властивостями володіють керамічні сегнетоелектрики, поляризовані в електричному полі, а також деякі полімери (таблиця 12.4).

Таблиця 12.4 – Піроелектричні коефіцієнти кристалічних матеріалів при температурі $T = 300 \text{ K}$

Матеріал	$p, 10^{-6} \text{ Кл}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
Турмалін	4
Сегнетоелектричні монокристали:	
– LiTaO_3	210
– LiNbO_3	40
– $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$	50
Керамічні сегнетоелектрики:	
– BaTiO_3	230
– титанат-цирконат свинцю PZT-5	60–500
Полімери	
– полівінілфторид (PVF)	10
– полівініліденфторид (PVDF)	40

Піроелектричні властивості притаманні деяким лінійним діелектрикам (наприклад, турмаліну, сульфату літію) і всім сегнетоелектричним матеріалам в монодомнізованому стані, для якого характерна однакова орієнтація спонтанної поляризованості всіх доменів. Значний пірофект в сегнетоелектриках використовується для створення теплових датчиків і приймачів променевої енергії, призначених, зокрема, для реєстрації інфрачервоного і надвисокочастотного випромінювання.

Специфічними властивостями піроелектричних фотоприймачів є відсутність вибірконості по спектру випромінювання. Суттєва перевага їх полягає в тому, що вони не потребують охолодження при детектуванні випромінювання навіть у далекій інфрачервоній області спектра. Здатні працювати в межах інтервалу частот до 10 МГц, однак по чутливості поступаються напівпровідниковим фотоприймачам.

Максимальний прояв піроелектричного ефекту спостерігають в сегнетоелектриках з точкою Кюрі, близькою до кімнатної температури. До їх числа відносяться кристали ніобату барію-стронцію $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{Nb}_2\text{O}_6$ і триглицинсульфата. Підвищеною чутливістю на високих частотах характеризуються кристали ниобату LiNbO_3 і танталату LiTaO_3 літію. Піро- і п'єзоелектричні властивості виявлені у деяких полімерів, зокрема, у поляризованих плівок полівінілденфториду і полівінілденхлориду, що відрізняються простотою технології виготовлення, невисокою вартістю і малою інерційністю піроефекту на високих частотах.



Рисунок 12.23 – Піроелектричні датчики

12.4 Електрети

Електретами називають діелектрики, які тривалий час зберігають поляризацію і створюють в навколишньому його просторі електричне поле. Електрети є формальним аналогом постійного магніту, здатними створювати електричне поле в навколишньому просторі протягом багатьох місяців і навіть років. Час життя електретів швидко зменшується з підвищенням температури і вологості навколишнього середовища.

Існує кілька способів отримання електретів (рис. 12.24). Стабільні електрети отримують, нагріваючи, а потім охолоджуючи діелектрик в сильному електричному полі (термоелектрети, рис. 12.25), висвітлюючи його в сильному електричному полі (фотоелектрети), опромінюючи радіоактивним випромінюванням (радіоелектрети), поляризацією в сильному електричному полі без нагрівання (електроелектрети) або в магнітному полі (магнітоелектрети), механічною деформацією (механоелектрети), тертям (трібоелектрети), дією поля коронного розряду (короноелектрети), поляризацією полімерів в контактi з електродами з різнорідних металів (металополімерні електрети).

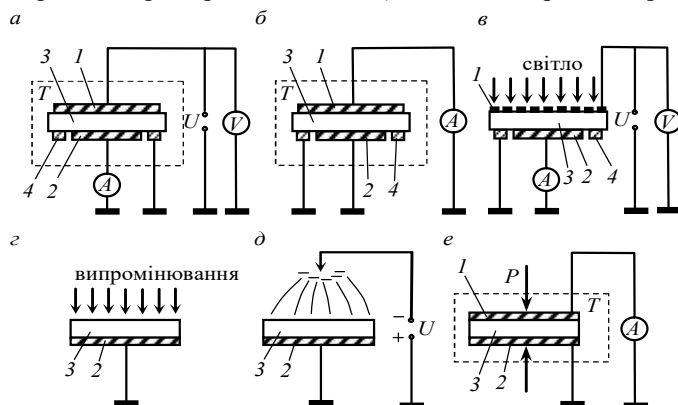


Рисунок 12.24 – Принципові схеми виготовлення електретів: *a* – термоелектретів, *б* – металополімерних електретів, *в* – фотоелектретів, *г* – радіоелектретів, *д* – короноелектретів, *е* – механоелектретів 1, 2 – електроди, 3 – поляризований діелектрик, 4 – охоронне кільце, U – джерело напруги, A – вимірювач струму, V – вольтметр, P – тиск, T – термостат.

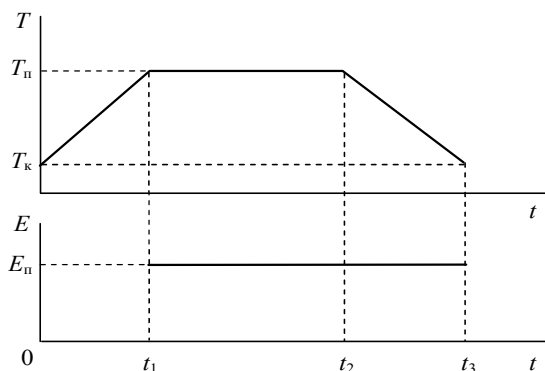


Рисунок 12.25 – Типовий режим поляризації при виготовленні термоелектрету: T_n – температура поляризації, T_k – кімнатна температура, E_n – напруженість поляризуючого поля, t_1 – час початку поляризації, t_2 – початок охолодження зразка, t_3 – кінець поляризації, $t_n = t_3 - t_1$ – час поляризації

Електретний ефект притаманний монокристалічним неорганічним діелектрикам (лужно-галоїдні монокристали, корунд, рутил), неорганічним полікристалічним діелектрикам (титанати лужноземельних металів, ультрафарфору, керамічні діелектрики), полімерам (політетрафторетилен, поліметилметакрилат, полівінілхлорид, полівініліденхлорид та інші), тканини живого організму (біоелектрети). Електрети можна отримати практично з усіх діелектриків, а електретний ефект – таке ж загальне фізичне явище, як поляризація і провідність. Для виникнення електретного стану необхідно, щоб тверде тіло містило досить глибокі рівні захоплення електронів і досить глибокі потенційні ями для іонів і дипольних молекул, а також мало б не дуже велику електропровідність (не більше $10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$).

Виникнення електретного стану в діелектриках пов'язано з дипольною поляризацією, зміщенням зарядів всередині молекул або доменних структур, утворенням просторового або поверхневого заряду.

Залежно від того, чи збігається знак заряду на поверхні електрету з полярністю електрода, що поляризує, або протилежний йому, розрізняють гомо- і гетерозаряд. Відповідно, електрети отримали назви гомозаряджених і гетерозаряджених (рис. 12.26). Гетерозаряд виникає в діелектрику внаслідок орієнтації диполів, іонної (або електронної) поляризації молекул, а також зміщення носіїв заряду в об'ємі зразка.

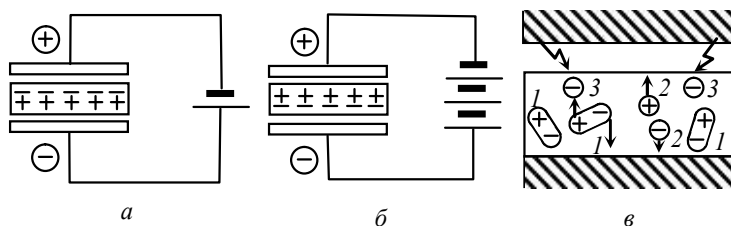


Рисунок 12.26 – Гетерозаряджений (а) і гомозаряджений (б) електрет; в – види зарядів в електреті: 1 – орієнтовані диполі, 2 – зміщені заряди; 3 – інжектовані носії заряду

Це обумовлює формування просторового заряду внаслідок локалізації позитивних зарядів у катода, негативних – у анода. Гомозаряд формується при інжекції носіїв заряду з електродів в поверхневий шар діелектричного зразка. Для електретів характерний об'ємний розподіл заряду: гетерозаряд, як правило, рівномірно розподілений в зразку; гомозаряд сконцентрований в поверхневих шарах, прилеглих до електродів (рис. 12.26).

Сумарний заряд в розрахунку на одиницю площі електрету $q = Q/S$ визначається як

$$q = \sigma_1 + \sigma_2 + \int_0^h \rho \, dx. \quad (12.6)$$

Відповідно до сучасної феноменологічної теорії електретів, ефективна поверхнева щільність заряду $\sigma_{\text{еф}}$ складається з двох компонентів – вільного заряду σ_p (гомозаряд) і залишкової поляризації P_s (гетерозаряд)

$$\sigma_{\text{еф}}(t) = \sigma_p(t) - P_s(t). \quad (12.7)$$

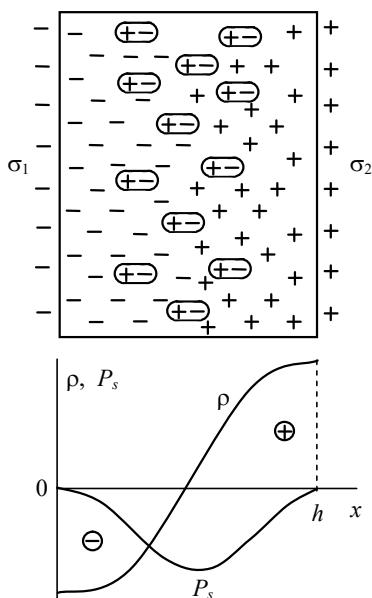


Рисунок 12.27 – Розподіл заряду в електретній пластині: ρ – густина об’ємного заряду; P_s – залишкова поляризація; σ_1 і σ_2 – щільності поверхневих зарядів з обох сторін пластини; h – товщина пластини

На відміну від «істинної» поверхневої густини заряду, яка визначає величину заряду на поверхні електрету, $\sigma_{\text{еф}}$ характеризує не тільки поверхневий заряд, а й розподіл об’ємного

заряду ρ . Ефективна поверхнева щільність заряду еквівалентна електретний різниці потенціалів U_e на пластині товщиною h

$$U_e = \int_0^h E(x) dx = \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2} h + \int_0^h \rho \left(x - \frac{h}{2} \right) dx + \int_0^h P_S dx \right], \quad (12.8)$$

де ε – діелектрична проникність матеріалу електрету. У таблиці 12.5 наведені режими виготовлення і початкові щільності заряду для деяких видів електретів.

Таблиця 12.5 – Режимы виготовлення і заряди електретів

Матеріал електрету	Товщина зразка, мм	T_n , °C	t_n , хв.	E_n , кВ/см	$\sigma_{\text{еф}}$, 10^{-5} Кл/м ²
<i>Термоелектрети</i>					
MgTiO ₃	1,000	300	480	50–80	8–15
CaF ₂	1,200	190	300	10	до 50
Полівінілхлорид	0,400	70–130	6	10	до 5
Полістирол	0,025	120	30	30	5–7
Поліамід-6	1,600	200	80	25	5
<i>Металевополімерні електрети (електроди мідь – алюміній)</i>					
Полівінілбутираль	0,2	134	65	–	15
Полістирол	0,3	140	85	–	7
Поліамід-6	0,5	220	80	–	8
<i>Радіоелектрети</i>					
Боросилкатне скло ¹	17,5	20	–	–	до 90
Карнаузький воск ²	2,0	20	–	5	до 40
Поліетилентерефталат ³	0,01	20	–	–	140
Політетрафторетиле ³	0,01	20	–	35	88
<i>Механоелектрети</i>					
Полікарбонат ⁴	0,7	190	60	–	4,15
Поліетилентерефталат ⁴	0,7	190	60	–	1,20

¹ опромінення електронним пучком з енергією 2 МеВ;

² β -опромінення від джерела ⁹⁰Sr (доза 80 кГр);

³ γ -опромінення від джерела ⁶⁰Co (доза 300 Гр); ⁴ тиск 10 МПа

Згодом заряд електрету зменшується. Аналіз експериментальних даних дозволив виділити три види спаду заряду в часі (рис. 12.28): гетерозаряд електрету протягом часу

зменшується до нуля або якоїсь постійної величини (крива 1); гетерозаряд спадає до нуля, переходить у гомозаряд, величина якого проходить через максимум (по абсолютній величині) і стабілізується (2); гомозаряд проходить через максимум і потім мало змінюється (3).

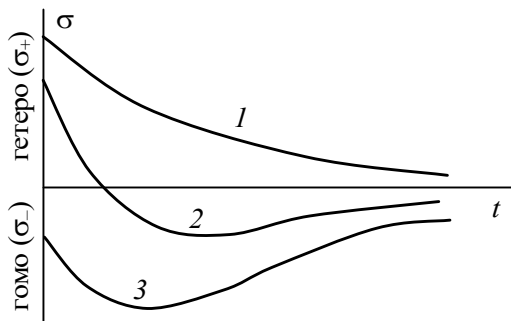


Рисунок 12.28 – Кінетика змін гетеро- і гомозаряду після поляризації діелектрика

Експериментально встановлено, що для діелектриків з невисокою діелектричною проникністю вид залежності на рис. 5.20 визначається величиною поля, що поляризує. Якщо $E_n < 5$ кВ/см, зміна заряду електрету описується переважно кривою 1. При $E_n > 10$ кВ/см утворюється в основному гомозаряд (крива 3). У проміжку між цими значеннями E_n можлива зміна знаку заряду (крива 2).

Поляризаційні заряди можуть виникати при неоднорідному нагрівання – це так званий **третинний піроелектричний ефект**. **Зворотний піроелектричний ефект** полягає в тому, що змінення електричного поля у відсутності теплообміну (адіабатичний процес) супроводжується зміненням температури кристалу. При нагріванні відбувається деформація, котра може супроводжуватися п'єзоелектричним ефектом, що

зазвичай перевищує первинний піроелектричний ефект. Така електризація називається **вторинним піроелектричним ефектом**.



У 1892 р. британський вчений **Олівер Гевісайд** першим ввів термін електрет і обговорив його властивості.



У 1919 р. японський вчений **Мототаро Егучі (Eguchi Mototaro)** першим виготовив електрет, розплавивши рівні частини карнаубського воску (видобутого з бразильської пальми карнауби) і смоли з невеликою кількістю бджолиного воску. Внутрішня поляризація електретних дисків, отриманих цим методом зберігалася протягом багатьох років. Електрети, виготовлені за методом Егучі, сьогодні називаються термоелектретами, оскільки вони утворюються в основному термічним процесом.

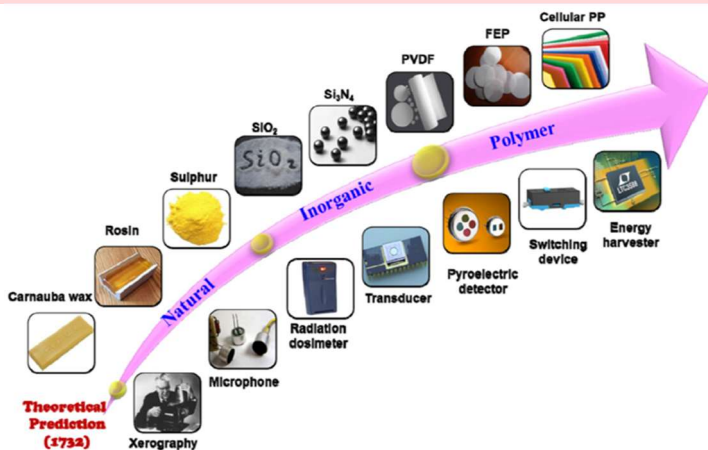


Рисунок 12.29 – Електретні матеріали та їх практичне застосування

Електрети можуть бути використані для виготовлення мікрофонів і телефонів, вимірювання механічних вібрацій, як пиловловлювачі, дозиметри радіації, вимірники атмосферного тиску і вологості, електрометри, в клавішах обчислювальних машин, в електрофотографії і в багатьох інших випадках.

Для спостереження розподілу об'ємного заряду в діелектриках застосовуються методи, що пов'язані з реєстрацією наведених електричних або прямих акустичних сигналів, які виникають, коли через діелектрик проходить акустична хвиля. Хвиля, що розповсюджується зі швидкістю звука в діелектрику (таблиця 12.6), зміщує просторові заряди, внаслідок чого протікає наведений струм.

Таблиця 12.6 – Електричні та акустичні властивості матеріалів

Матеріал	Швидкість звуку, м/с	Щільність, кг/м ³	Акустичний імпеданс, кг/(м ² ·с)	Відносна діелектрична проникність
Зшитий поліетилен (термореактивний)	2000	900	$1,8 \cdot 10^6$	2,3
Полістирол	2300	1200	$2,8 \cdot 10^6$	3,3
Поліетилен низької щільності (термопластичний)	2000	900	$1,8 \cdot 10^6$	2,2
PVDF	2260	1780	$4,0 \cdot 10^6$	8,5
Алюміній	6420	2690	$17,3 \cdot 10^6$	2,3

Для вимірювання сигналів акустичної емісії, генерованих об'ємним зарядом, використовують датчики на основі термоелектрету, наприклад, плівки полівініліденфториду (PVDF)

- полярного полімеру з високими п'єзоелектричними властивостями. Методом термоелектретування отримують стабільний електрет. При нагріванні до 120 °С в електричному полі напруженістю 60 – 120 МВ/м PVDF легко поляризується, а при охолодженні тривалий час зберігає стан поляризації. Поверхнева щільність зарядів плівки товщиною 10 мкм становить 10^{-4} Кл/м². На плівку шляхом вакуумного випарювання металу наносять електроди. При деформації плівки акустичною хвилею на електродах наводиться електрорушійна сила. Можливо застосування також плівки сегнетоелектрику на основі ніобату літія LiNbO₃ товщиною 9 мкм.

Основний метод вивчення електретів – електретно-термічний аналіз (ЕТА) – заснований на вимірюванні струму термостимульованої деполяризації (ТСД) електретного зразка. Залежність струму ТСД від температури являє собою спектр термостимульованих струмів (ТСС), тому метод ЕТА має ще одну назву – термоактиваційно-струмова спектроскопія.

Об'єкт дослідження (зразок діелектрика) попередньо поляризується в закороченому стані і нагрівається по відповідному закону в режимі лінійного нагріву. В об'єкті створюється просторово неоднорідне розподілення носіїв зарядів і (або) анізотропія орієнтації полярних молекул. Поляризація створюється шляхом прикладання електричного поля (іноді – в сукупності з опроміненням видимим або ультрафіолетовим світлом). Під дією електричного поля полярні молекули орієнтуються по полю. При цьому електричне поле призводить до зміщення (міграції) вільних носіїв зарядів на макровідстань з подальшим закріпленням на пастках. В результаті на електродах індукуються заряди протилежного знаку і по ланцюгу тече струм (рис. 12.30, а). Спектр ТСС залежить від природи діелектрика,

умов її порушення і швидкості росту температури, наявності або відсутності повітряного зазору між вимірювальним електродом і поверхнею електрету. Якщо деполаризація електрету відбувається з різним часом релаксації дипольних груп або вільних зарядів, то кожному релаксаційному процесу відповідає максимум струму ТСД (рис. 12.30, б). Тому, вимірюючи струм ТСД поляризованого зразка, що рівномірно нагрівається, можна по числу піків ТСС і їх положенню на температурній шкалі визначити кількість і вид поляризаційних механізмів, відповідальних за електретний стан.

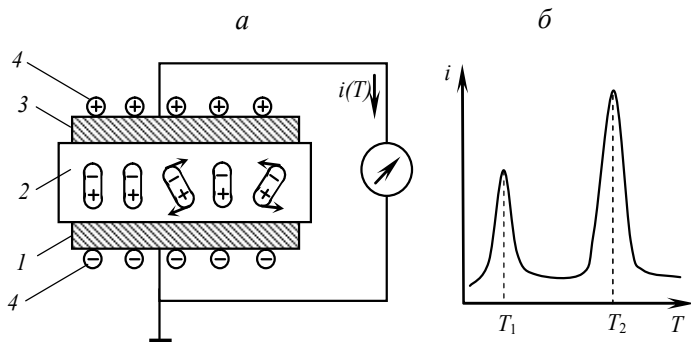


Рисунок 12.30 – Схема реєстрації термостимульованного струму (а) і характерний вигляд спектра ТСС електрету з двома температурами (T_1 і T_2) вивільнення носіїв заряду з пасток (б)

1 і 3 – електроди; 2 – електрет; 4 – індуковані заряди

В даний момент метод ЕТА визнаний одним з високоінформативних спектроскопічних методів вивчення електричних явищ в електричній ізоляції силових високовольтних кабелів, напівпровідників, елементах інтегральних схем, а також в біологічних об'єктах. Він дозволяє отримати інформацію про рухливості макромолекул, визначити просторовий розподіл зарядів, величини гетеро- і гомозаряду,

параметри електрично активних дефектів (концентрацію, енергію активації і тому подібне), що є пастками для носіїв заряду. Переваги методу – висока чутливість і роздільна здатність, а також можливість зареєструвати релаксаційні процеси, пов'язані з фазовими переходами.

12.4.1 Фотоелектрети і радіоелектрети

Формування електричного заряду в таких електретах залежить як від електричного поля, так і від освітленості. На освітлених ділянках фоточутливого діелектрика носії заряду звільняються внаслідок фотоэффекту й потім дрейфують у діелектрик, розподіляючись у ньому відповідно до освітлених і тінювих ділянок (осідаючи на пастках і утворюючи гоморозряд).

У результаті цього після вимикання електричного поля та світла поблизу поверхні діелектрика-фотоелектрета залишається електричне зображення, яке можна або зчитувати електронним променем, або знаходити осадженням забарвленого порошку, частинки якого притягуються до заряджених ділянок фотоелектрету за допомогою електростатичних сил. Фотоелектричне зображення можна ліквідувати («стерти») сильним електричним полем або суцільним засвічуванням фоточутливого діелектричного шару.

Як матеріали для фотоелектретів використовують фоточутливі діелектрики (селен, оксид цинку, сульфіді і селеніди цинку та кадмію), зручні для виготовлення великих пластин. Фотоелектричного ефекту можна досягти у досить широкому колі полікристалів і кристалів, таких як сірка, антрацен, нафталін, силікоسیленіт ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$). Фотоелектрети широко застосовують у техніці ксерографії («суха» фотографія), що використовується в сучасних фотокопіювальних пристроях.



Вперше фотоелектрет був отриманий болгарським ученим Георгієм Наждаковим в 1937 році. Він наніс на металевий лист, що був нижнім електродом, шар сірки. Через верхній сітчастий електрод сірка освітлювалася. За рахунок внутрішнього

фотоелекту в сірці утворювалися електрони і дірки, які розносилися діючим зовнішнім полем до відповідних електродів. Після зняття зовнішнього поля навколо плівки сірки з'являлася ЕРС.

Типовий ксерографічний процес відрізняється від процесу поляризації фотоелектрета тим, що у ньому виникає деполіризація електрета світлом. Електрофоточутливу пластину яка становить провідну підкладку, вкриту тонким шаром фотоелектрета, заздалегідь заряджають у темряві коронним розрядом, а потім на цю пластинку проєктують зображення для репродукції. Завдяки низькій темновій провідності гомозаряди сформованого електрета зберігаються достатньо довго. В освітлених місцях заряди релаксують, створюючи приховане електричне зображення, яке потім за допомогою пігментних порошків переносять на папір.

При опромінюванні діелектриків γ -квантами і потоками швидких електронів вони також електризуються. Такі діелектрики прийнято називати **радіоелектретами**. Як правило, радіоелектрети готують на основі неорганічного скла.

12.4.2 Трибоелектрети

Трибоелектретами (від грецького слова τρίβω – «тертя») прийнято називати матеріали, що електризуються при терті. Матеріали, які здатні виявляти **трибоелектричний ефект**, можна розмістити в так званий трибоелектричний ряд (рисунки 12.31): скло, плексиглас, нейлон, шерсть, шовк, целюлоза, бавовна, бурштин, поліуретан, полістирол, тефлон, каучук, поліетилен. На початку ряду є умовно «позитивні» матеріали, наприкінці – умовно «негативні». Якщо взяти два матеріали з цього ряду, і потерти їх один про одного, то той матеріал, який знаходиться ближче до «позитивної» сторони, зарядиться позитивно, а інший негативно. Вперше трибоелектричний ряд ще у 1757 році склав шведський фізик Йоганн Карл Вільке.

При терті одна про одну пари хімічно однакових діелектриків позитивний заряд отримає щільніший з них. У рідких діелектриків позитивно зарядженою виявиться речовина з більшою діелектричною проникністю або більшим поверхневим натягом. Метали при терті о поверхню діелектрика можуть електризуватися як позитивно, і негативно.

Ступінь електризації тіл, що труться одне об одного, тим значніше, чим ширші площі їх поверхонь. В твердих тілах носії заряду переміщуються з одного тіла до іншого. У напівпровідників і металів трибоелектричний ефект обумовлений переміщенням електронів від матеріалу з меншою роботою виходу до матеріалу, у якого робота виходу більша.

При терті діелектрика о метал, трибоелектрична електризація виникає завдяки переходу електронів з металу до діелектрика. При взаємному терті пари діелектриків явище виникає через взаємне проникнення відповідних іонів та електронів.

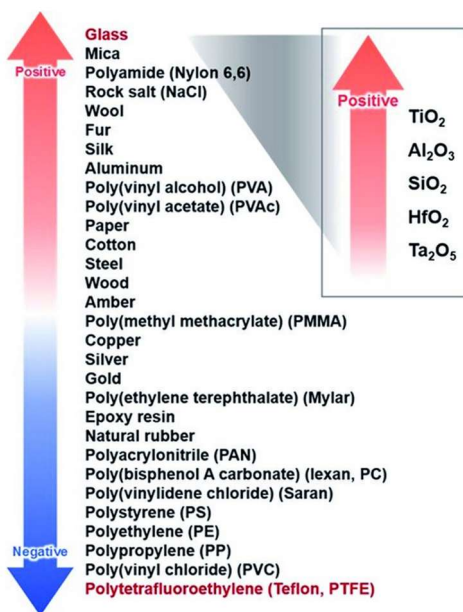


Рисунок 12.31 – Трибоелектричний ряд

Значний внесок у вираженість трибоелектричного ефекту може зробити різний ступінь розігріву тіл у процесі їх тертя один про одного, оскільки цей факт викликає переміщення носіїв з локальних неоднорідностей більш розігрітої речовини – "справжню" трибоелектрику. Крім того, до трибоелектричного ефекту може призводити механічне видалення окремих елементів поверхні п'єзоелектриків або піроелектриків.

Що стосується рідин, прояв трибоелектричного ефекту пов'язаний з виникненням подвійних електричних шарів на поверхні розділу двох рідких середовищ або на межі рідини та

твердого тіла. При терті рідин о метали, трибоелектрика виникає за рахунок поділу зарядів на межі між металом і рідиною.

Причина електризації тертям двох рідких діелектриків – це наявність подвійних електричних шарів на поверхні розділу рідин, діелектричні проникності яких різні. Рідина з меншою діелектричною проникністю заряджається негативно, а з більшою – позитивно. Трибоелектричний ефект при розбризкуванні рідин внаслідок удару об поверхню твердого діелектрика або поверхню рідини, обумовлений руйнуванням подвійних електричних шарів на межі рідини і газу (електризація у водоспадах відбувається саме за таким механізмом).



Група дослідників з китайського Національного центру нанонаук та нанотехнологій (National Center for Nanoscience and Technology) розробила те, що вони назвали подібним до шкіри трибоелектричним наногенератором (Skin-like triboelectric nanogenerator, STENG). В основі роботи

цього генератора лежить трибоелектричний ефект, який дозволяє отримати електричний струм у момент зіткнення або поділу двох різних матеріалів. А літера «S» у назві STENG висунута на перший план, щоб підкреслити подібність електричного генератора до людської шкіри.

Основою генератора є еластомер, змішаний із іонним гідрогелем. Еластомер виступає в ролі «електростатичного» матеріалу, що виробляє електрику, а гідрогель виступає як відвід електродів. Новий генератор має підвищені здібності до розтягування та деформації, які на 1000 % вищі, ніж у інших еластичних трибоелектричних генераторів (TENG).

Хоча трибоелектрика і приводить у деяких ситуаціях до небажаного накопичення електричних зарядів у діелектриках, як наприклад на синтетичній тканині, проте трибоелектричний ефект застосовується сьогодні при дослідженні енергетичного спектру електронних пасток у твердих тілах, а також у мінералогії для дослідження центрів люмінесценції, мінералів, умов утворення порід та їхнього віку.

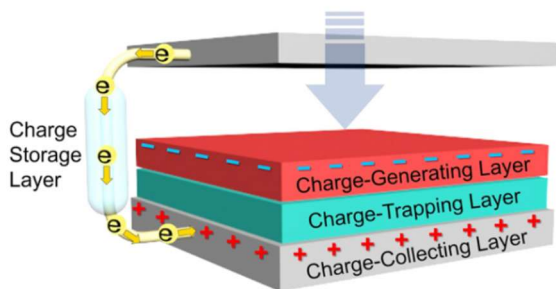


Рисунок 12.32 – Типові компоненти трибоелектричного наногенератора, що впливають на вироблення трибоелектричної енергії. Шар генерації заряду (червоний), шар уловлювання заряду (зелений), шар збору заряду (сірий) та шар накопичення заряду (білий) можуть впливати на вироблення електроенергії

Група вчених із Технологічного університету штату Джорджія винайшла перспективу для створення практичних та високопродуктивних трибоелектричних наногенераторів (TENG) для заряджання портативної електроніки енергією, що отримується по суті від повсякденних механічних рухів тіла людини. Зокрема, коли два види матеріалів знаходяться в контакті один з одним під дією зовнішньої сили, поверхня матеріалів вироблятиме позитивні або негативні заряди через різну полярність трибоелектричних матеріалів. Коли два матеріали розділені, позитивні та негативні статичні заряди, що

генеруються контактним електричним зарядом, також відокремлюються, тому індукований потенціал відповідно створюється різниця на електродах.



Якщо два електроди знаходяться під навантаженням або в стані короткого замикання, електрони, що приводяться в рух різницею потенціалів, будуть текти у зовнішніх ланцюгах, таким чином перетворюючи механічну енергію на електричну. Різниця у поверхневому потенціалі істотно впливає на трибоелектричні властивості (рисунок 12.32).

12.5 Рідкі кристали

Рідкокристалічним (мезоморфним) станом речовини називається такий стан, властивості якого є проміжними між властивостями твердого кристала і рідини. Відповідно до законів термодинаміки, агрегатні стани речовин поділяються на три види: тверде, рідке і газоподібне, проте такий поділ не відображає внутрішню будову речовини, ступінь упорядкованості його частинок. Деякі речовини (скло, смоли) мають властивості характерні як для твердих, так і для дуже в'язких переохолоджених рідин. Зокрема, деякі органічні матеріали переходять з твердого стану в рідке через ряд переходів, що включають утворення нової фази, яку називають рідкокристалічним станом (рідким кристалом). Ця речовина плавиться в дві стадії: спочатку утворюється каламутний розплав, а подальше підвищення температури перетворює цей розплав в прозору рідину. При дослідженні оптичних властивостей цієї речовини було виявлено, що при нагріванні вона переходить з кристалічної фази в рідку через проміжну форму з анізотропними оптичними властивостями. Інтервал цього переходу досить великий і становить 34 °С. Холестерилбензоат не унікальна речовина. Було знайдено ще багато таких же речовин і було запропоновано дати їм назву рідкі кристали (РК), а саму анізотропну фазу назвати мезофаза (від грецького слова мезос – проміжний).

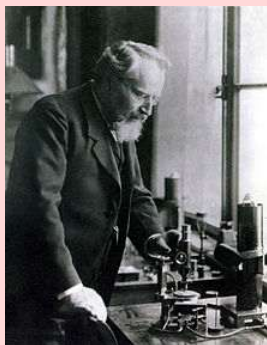
Довгий час рідкі кристали залишалися екзотичними об'єктами досліджень фізиків і хіміків, але в 1963 в США був запатентований метод реєстрації інфрачервоного і НВЧ (надвисокочастотного) випромінювань за допомогою тонкої плівки рідкого кристала, який змінював колір з нагріванням. Цей метод дозволив створити виробництво надійних і економічних

цифрових і буквених індикаторів, заснованих на тому, що тонкий шар рідкого кристала поміщається в відповідний плоский осередок з прозорими електродами. Під впливом електричного поля, що подається на електроди, РК змінює свій колір і тим самим викликає індикацію. З цих пір РК знаходять все нові і часто несподівані практичні застосування. Останнім часом встановлено, що РК мають велике значення також і для вирішення фундаментальних проблем в біології та медицині.

Таким чином, рідкі кристали – речовина в мезоморфному стані, анізотропна рідина, являють собою речовини в стані, проміжному між твердим кристалічним і ізотропним рідким. Зберігаючи основні властивості рідини, перш за все, текучість, вони виявляють характерну для твердих кристалів анізотропію. За відсутності зовнішніх впливів в рідких кристалах анізотропні діелектрична проникність, діамагнітна сприйнятливість, електропровідність і теплопровідність.

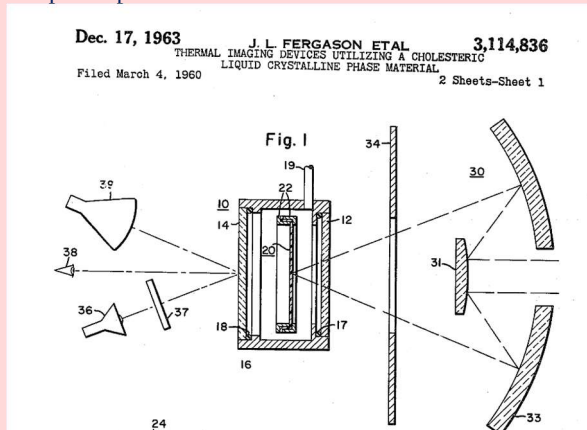
Структура рідких кристалів утворена молекулами подовженої або дископодібної форми. В результаті міжмолекулярної взаємодії вони шикуються в певному порядку. Тепловий рух перешкоджає цьому, і при підвищених температурах рідкі кристали перетворюються в звичайну рідину. На діаграмі стану температурний інтервал існування рідких кристалів обмежений температурою плавлення твердих кристалів і так званою температурою просвітління, при якій рідкокристалічні каламутні зразки стають прозорими внаслідок плавлення і зникнення мезофази.

Розрізняють термотропні і ліотропні рідкі кристали (РК). Термотропні рідкі кристали утворюються при розплавленні твердих кристалів або при охолодженні ізотропної рідини і існують у вузькому інтервалі температур і тиску.



Рідкі кристали відкрив 1888 року австрійський ботанік Фрідріх Рейнітцер (Friedrich Reinitzer). Він звернув увагу, що кристали холестерилбензоату і холестерилацетату мали дві точки плавлення і, відповідно, два різні рідкі стани – каламутний і прозорий. Довгий час фізики та хіміки в принципі не визнавали рідких кристалів, тому що їх існування руйнувало теорію про три стани речовини: твердий, рідкий і газоподібний. Вчені відносили рідкі кристали то до колоїдних розчинів, то до

емульсій. Науковий доказ було надано професором університету Карлсруе **Отто Леманном** (Otto Lehmann) після багаторічних досліджень, але навіть після появи в 1904 написаної ним книги "Рідкі кристали", відкриття не знайшло застосування. В 1963 р. американець Дж. Фергюсон (James Fergason) використовував найважливішу властивість рідких кристалів – змінювати колір під впливом температури - для виявлення невидимих неозброєним оком теплових полів. Після того як йому видали патент на винахід, інтерес до рідких кристалів різко зріс.



Фразмент намену US Patent 3114836 Thermal imaging devices utilizing a cholesteric liquid crystalline phase material

Ліотропні рідкі кристали виникають при розчиненні твердих органічних речовин у воді або інших розчинниках. Представляють собою двох або більш компонентні системи, що утворюються в сумішах стрижеподібної молекули даної речовини і води (або інших полярних розчинників). Ці стрижеподібні молекули мають на одному кінці полярну групу, а велика частина стрижня являє собою гнучкий гідрофобний вуглеводневий ланцюг. Такі речовини називаються амфіфілами (амфі – грецькою означає з двох кінців, філос – люблячий, прихильність). Прикладом амфіфілів можуть служити фосфоліпіди. Амфіфільні молекули, як правило, погано розчиняються у воді, схильні утворювати агрегати таким чином, що їх полярні групи на границі розділу фаз спрямовані до рідкої фази. При низьких температурах змішування рідкого амфіфілу з водою призводить до розшарування системи на дві фази. Одним з варіантів амфіфілів зі складною структурою може служити система мило-вода. Тут є аліфатичний аніон $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{n-2}-\text{CO}_2$ (де $n \sim 12-20$) і позитивний іон Na^+ , K^+ , NH_4^+ і ін. Полярна група CO_2 прагне до тісного контакту з молекулами води, тоді як неполярна група (амфіфільний ланцюг) уникає контакту з водою. Це явище є типовим для амфіфілів.

Термотропні і ліотропні рідкі кристали зазвичай містять кілька рідкокристалічних фаз, температурний інтервал існування яких може перебувати як при низьких (до 60 °C), так і високих (до 400 °C) температурах. Термотропні РК ділять на три групи.

Нематичні рідкі кристали. У цих кристалах відсутній дальній порядок в розташуванні центрів тяжіння молекул, у них немає шаруватої структури, їх молекули ковзають безперервно в напрямку своєї довгої осі, обертаючись навколо них, але при цьому зберігають орієнтаційний порядок: довгі осі направлені

уздовж одного переважного напрямку (рис. 12.33, *а*). Вони поведуться подібно до звичайних рідин. Нематичні фази зустрічаються тільки в таких речовинах, у молекул яких немає відмінності між правою і лівою формами, їх молекули тотожні свого дзеркального зображенню (*ахіральні*).

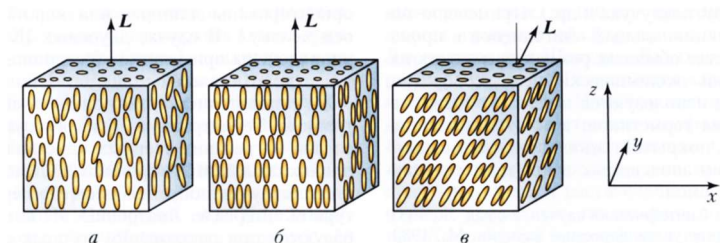


Рисунок 12.33 – Схематичне представлення термотропних рідких кристалів: нематична (*а*), смектична (*б*) та холестерична (*в*) фази

Для опису далекого орієнтаційного порядку в рідких кристалах використовують вектор L , названий директором, який вказує напрямок, уздовж якого орієнтовані осі молекул. Фаза з щільністю $\rho = \text{const}$ і $L = \text{const}$ названа **нематичним рідким кристалом**.

Довгі осі його молекул мають фіксовану орієнтацію, а центри їх тяжкості розподілені хаотично (рис. 12.33, *а*). Завдяки сильному розсіюванню світла за рахунок теплових флуктуацій, що порушують орієнтацію молекул, нематичний рідкий кристал виглядає як каламутна непрозора рідина. За допомогою поляризаційного мікроскопа в ньому видно тонкі нитки, від яких пішла назва цього кристала: нема – по-грецьки – нитка. Вони утворюють лінії, названі **дисклінацією**, на яких напрямок орієнтації молекул (L) не визначене.

Смектичні рідкі кристали (від грецького *smegma* – мило) – найбільш впорядковані 2-х мірні кристали. Мають шарувату структуру, на відміну від нематиків і холестериків. Шари смектичних РК можуть переміщатися одна відносно одної. Товщина смектичного шару визначається довжиною молекул (переважно, довжиною парафінового «хвоста»), проте в'язкість смектиків значно вище ніж у нематиків і щільність по нормалі до поверхні шару може сильно змінюватися. У смектичних рідких кристалів $L = \text{const}$, а щільність $\rho(r)$, де r – просторова координата, змінюється періодично вздовж осі z і постійна в площині xy (рис. 12.33, б). Молекули розташовані шарами, які легко ковзають щодо один одного, але при навантаженні вздовж осі z подібні до твердого тіла. Смектичні рідкі кристали зазвичай мають кілька модифікацій – смектичних фаз, що розрізняються симетрією розташування молекул і кореляційними функціями $\rho(r)$: A - з подвійними шарами; C - довгі осі молекул, щодо шару, знаходяться під певним кутом; B - структурними шарами.

Холестеричні рідкі кристали володіють властивістю спіральності, тобто в них відсутня центральна симетрія. Іншими словами, вони мають хиральність. Холестерична фаза існує тільки у речовин, молекули яких не мають дзеркальної симетрії. Тому при нагріванні або охолодженні холестерики не можуть стати ні нематиками, ні смектиками. Якщо крок холестеричної спіралі великий – близько декількох мікрон, – то при нагріванні такий кристал перетворюється в ізотропну рідину. Якщо ж крок холестеричної спіралі малий – близько долі мікрона, – то ізотропна рідина не може при охолодженні відразу стати холестериком. У вузькому інтервалі температур, від долі градуса до декількох градусів, система проходить через ряд проміжних фаз і тільки потім стає холестериком. Ці проміжні фази носять

назву блакитних фаз, оскільки при освітленні білим світлом холестерики в цих фазах збоку виглядають яскраво-блакитними.

Фізична природа і структура блакитних фаз до кінця не з'ясовані. В даний час це один з найцікавіших об'єктів дослідження у фізиці рідких кристалів. **Щільність холестерических рідких кристалів** $\rho(r) = \text{const}$. Їх шарувата структура характеризується тим, що вектор L в кожному шарі повернуто щодо напрямлення L в сусідньому шарі на деякий кут, утворюючи спіраль (рис. 12.33, в). У площині xy холестерические рідкі кристали мають таку ж в'язкість, що і нематичні, а вздовж осі z їх механічні властивості подібні до властивостей смектичних рідких кристалів.

Фазові переходи в рідких кристалах супроводжуються критичними явищами, що спостерігаються поблизу критичних точок рідин. Так, при переході рідких кристалів нематичного типу в смектичну (фаза A) аномально зростає теплоємність. При охолодженні деяких органічних сполук нижче температур існування первинних (нематичних, холестеричних, смектичних) фаз виникають так звані зворотні рідкокристалічні фази.

Всі форми життя так чи інакше пов'язані з діяльністю живої клітини, багатоструктурні ланки якої схожі на структуру рідких кристалів. Володіючи чудовими діелектричними властивостями, рідкі кристали утворюють внутрішньоклітинні гетерогенні поверхні, регулюють взаємини між кліткою і зовнішнім середовищем, а також між окремими клітинами і тканинами, надають необхідну інертність складовим частинам клітини, захищаючи її від ферментативного впливу.

Властивості рідких кристалів характеризуються спонтанною анізотропією. Анізотропні їх електричні, магнітні і механічні властивості. Анізотропія пружності викликана тим, що

неоднорідність поля директора $L(r)$ обумовлює орієнтаційну деформацію рідких кристалів – закручування, поздовжній або поперечний вигин.

Оптичні властивості одноосьових рідких і твердих кристалів сильно відрізняються в області високих інтенсивностей світла. Електричне поле світлової хвилі викликає переорієнтацію молекул рідких кристалів. З цієї причини рідкі кристали є предметом дослідження нелінійної оптики, яка вивчає явища, викликані нелінійним відгуком речовини на світлове поле. Особливий інтерес представляють спіралевидні структури холестеричних і хіральних смектичних С-фази. Для рідких кристалів властива оптична активність, тобто властивість обертати площину поляризації при проходженні через них світла. Обертання площини поляризації залежить від структури рідкого кристала, довжини шляху світла в зразку і не залежить від інтенсивності світла.

Анізотропія електричних і оптичних властивостей рідких кристалів в поєднанні з притаманною їм в'язкістю обумовлюють різноманіття електрооптичних ефектів. Найбільш важливі ті з них, які не пов'язані з протіканням струму через кристал. У зовнішньому полі відбувається переорієнтація директора, і молекули рідких кристалів орієнтуються так, щоб напрямком, в якому їх діелектрична проникність максимальна, збігся з напрямком поля. Це призводить до зміни напрямку оптичної осі кристала і, отже, до зміни практично всіх його оптичних властивостей – подвійного променезаломлення, поглинання світла, обертання площини поляризації та ін. Зміна напрямку оптичної осі рідких кристалів під дією зовнішніх електричного або магнітного полів названо *переходом Фредерікса*.

У чорно-білих індикаторах інформації реалізують так званий твіст-ефект. Він являє собою перехід Фредерікса в рідкому кристалі, підданому попередньо деформації кручення. У кольорових пристроях використовують ефект, викликаний переорієнтацією молекул барвника («гість»), введених в рідкокристалічну матрицю («господар»), що супроводжується трансформацією самої матриці (ефект «гість-господар»).

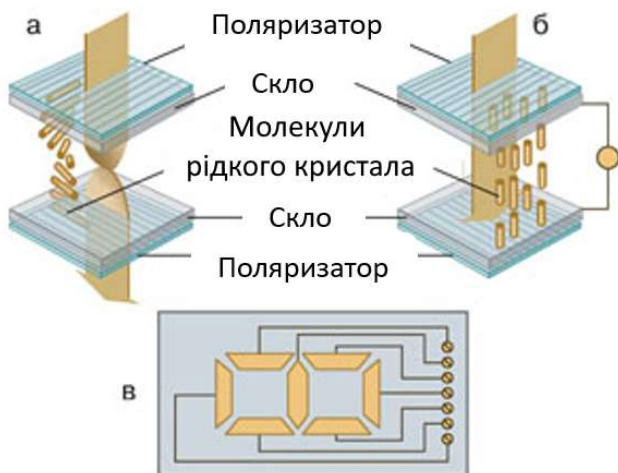


Рисунок 12.34 – Схема роботи РК-індикатора електронного годинника: а – до включення електричного поля, б – після включення поля, – сегментний буквено-цифровий електрод, керований електричним полем

Кожному виду рідких кристалів (холестеричні, нематичні, смектичні) притаманні характерні тільки для них специфічні електрооптичні ефекти. Більшість перерахованих електрооптичних ефектів має свої магнітооптичні аналоги.

Розташування молекул в рідких кристалах змінюється під дією таких факторів, як температура, тиск, електричні і магнітні поля; зміни ж розташування молекул призводять до зміни оптичних властивостей, таких, як колір, прозорість і здатність до обертання площини поляризації світла, що проходить. На цьому засновані численні застосування рідких кристалів. Наприклад, залежність кольору від температури використовується для медичної діагностики. Наносячи на тіло пацієнта деякі рідкокристалічні матеріали, лікар може легко виявляти порушені хворобою тканини зі зміни кольору в тих місцях, де ці тканини виділяють підвищені кількості тепла. Температурна залежність кольору дозволяє також контролювати якість виробів без їх руйнування. Якщо металевий виріб нагрівати, то його внутрішній дефект змінить розподіл температури на поверхні. Ці дефекти виявляються по зміні кольору нанесеного на поверхню рідкокристалічного матеріалу.

Тонкі плівки рідких кристалів, укладені між пакетами скла або листками пластмаси, знайшли широке застосування в якості індикаторних пристроїв (прикладуючи низьковольтні електричні поля до різних частин відповідним чином обраної плівки, можна отримувати видимі оком фігури, утворені, наприклад, прозорими і непрозорими ділянками). Рідкі кристали широко застосовуються у виробництві наручних годинників і невеликих калькуляторів. Створюються пласкі телевізори з тонким рідкокристалічним екраном. Порівняно недавно було отримано вуглецеве і полімерне волокно на основі рідкокристалічних матриць.

Питання для самоперевірки:

1. Що таке сегнетоелектрики? Який механізм виникнення спонтанної поляризації в сегнетоелектриках?
2. Яка температура називається сегнетоелектричною точкою Кюрі?
3. В чому полягає електрооптичний ефект?
4. Де застосовують сегнетоелектрики з прямокутною петлею гістерезису?
5. Що таке п'єзоелектрики, які матеріали мають п'єзоелектричні властивості?
6. Поясніть явище п'єзоефекту.
7. Які основні властивості піроелектриків?
8. Що таке електрети і де вони використовуються?
9. Як змінюється поляризація фотоелектретів під впливом світла?
10. Які особливості трибоелектретів?
11. Що вам відомо про рідкі кристали? До чого призводить зміна розташування молекул?

РОЗДІЛ 13. ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

13.1 Мідь

Мідь (Cu) – в'язкий метал рожево-червоного кольору. Переваги міді, що забезпечують її широке застосування як провідникового матеріалу:

- питомий опір: $\rho = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$;
- досить висока механічна міцність;
- задовільна стійкість до корозії (інтенсивне окиснення відбувається тільки за підвищених температур);
- висока технологічність в обробленні (з міді прокатують листи, стрічки, фольгу й протягують дроти перерізом в частку міліметра);
- відносна легкість паяння та зварювання.



Рисунок 13.1 – Мідні проводи

Мідь отримують шляхом перероблення сульфідних руд. Електротехнічна мідь обов'язково проходить електролітичне очищення. Наявність домішок негативно позначається не лише на механічних і технологічних властивостях міді, а й значно знижує її електропровідність. Найменший питомий електричний

опір має хімічно чиста мідь. Найбільш небажаними домішками є вісмут і свинець, які майже нерозчинні в міді. Це призводить до того, що мідь під час оброблення тиском за температури $+850$ – 1150 °C розтріскується, зменшується її пластичність, а за низьких температур стає крихкою. Дуже шкідлива присутність у складі міді кисню, що викликає підвищення питомого опору.

Як провідниковий матеріал використовують мідь марок М1 і М0. Мідь марки М1 містить 99,9 % міді, 0,1 % домішок, у яких кисень не має перевищувати 0,08 %. Мідь марки М0 містить 99,95 % міді, 0,05 % домішок, у яких кисень не має перевищувати 0,02 %. Мідь марки МВ – ще чистіший провідниковий метал, який виплавляють у вакуумних індукційних печах. У міді марки МВ не більше 0,01 % домішок.



Мідний кабель у порівнянні з алюмінієвим володіє великою хімічною стійкістю. Мідь належить до благородних (інертних) металів і не вступає у хімічну реакцію з більшістю речовин, тоді як алюміній піддається хімічному впливу та руйнується. У міді коефіцієнт теплопровідності становить $389,6$ Вт/м°C, а у алюмінію – $209,3$

Вт/м°C. Таким чином, мідь майже вдвічі краще розсіює тепло (не нагрівається) у порівнянні з алюмінієм. Це особливо важливо у місцях з'єднань, де провід гріється найсильніше. З точки зору безпеки, мідний силовий кабель є одним з найбезпечніших варіантів для організації електропостачання об'єктів. Мідь не піддається високому циклічному розширенню та стисканню, на відміну від алюмінію. Також температура плавлення мідної жили становить аж 1083 °C. Тому навіть якщо кабель перевантажений, він майже не розплавиться чи не загориться. Це означає, що ризик виникнення пожежі при проблемах з живленням буде мінімальним. З урахуванням усіх цих властивостей, мідь рекомендується для використання у сучасних будинках для проведення електропроводки.

Шляхом холодного протягування отримують тверду (твердотягнену) мідь МТ, яка має високу межу міцності при розтягуванні, твердість і пружність при вигинанні. Дріт із твердої міді здатний пружинити. Тверду мідь застосовують для виготовлення колекторних пластин електромашин, для хвилеводів, шин розподільних пристроїв, жил кабелів, контактних дротів тощо.

При випалюванні міді (нагріванні до кількох сотень градусів із наступним охолодженням) отримують м'яку (відпалену) мідь ММ, яка характеризується пластичністю, малими твердістю та міцністю, вищою питомою електропровідністю. З м'якої міді виготовляють фольгу, жили гнучких обмоткових проводів (у яких важливі гнучкість і пластичність, а міцність і пружність не мають великого значення).

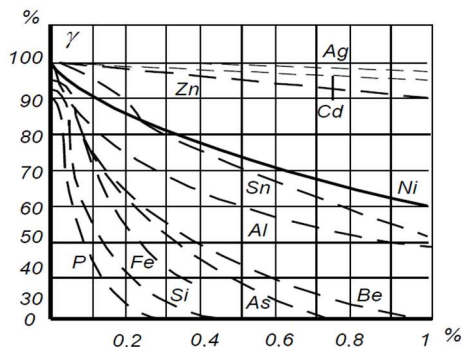


Рисунок 13.2 – Залежності питомої провідності міді від вмісту домішок у % від маси (провідність чистої міді прийнята за 100%, домішки зазначені на кривих)

Однак механічні й хімічні властивості чистої міді в деяких випадках не задовольняють вимог до виробів із неї. Тоді

використовують сплави міді з невеликим вмістом легувальних домішок. При правильному виборі складу сплави міді мають значно кращі механічні властивості, ніж чиста мідь, хоча й поступаються їй в електропровідності.

13.2 Сплави на основі міді

13.2.1 Бронза

Бронза – це сплав, основою якого є мідь. Головні легувальні домішки: олово, кремній, фосфор, берилій, свинець, кадмій, алюміній та ін. (крім цинку). Відповідно бронзу називають *олов'яною, алюмінієвою, берилієвою, кремнієвою, кадмієвою* тощо.

Бронза поступається міді в електропровідності, але переважає за міцністю, пружністю, корозійною стійкістю. За технологічними ознаками бронзи ділять на ливарні та ті, що деформуються. Перші використовують для лиття фасонних (складної форми) деталей, другі добре обробляти тиском (прокатування, штампування).



Рисунок 13.3 – Бронза

Маркують бронзи літерами Бр. Далі в маркуванні йдуть легувальні елементи, які позначають початковою літерою назви цього елемента; за літерами вказують вміст легувальних елементів у відсотках.

Олов'яна бронза БрО4Ц4С2,5 (олова 4 %, цинку 4 %, свинцю 2,5 %, решта 89,5 % – мідь) має високу пластичність і пружність. З неї виготовляють прутки, трубки, стрічки. Але олово – відносно дорогий метал, тому його прагнуть частково або повністю замінити в складі бронзи іншими складовими.

Замінником дорогої олов'яної бронзи є **алюмінієва**. Вона має дещо вищі механічні й технологічні властивості. Однофазна бронза **БрА5, БрА7** (відповідно: алюмінію 5 % і 7 %, решта – мідь) високопластична й одночасно надзвичайно міцна. Алюмінієва бронза добре протистоїть корозії в морській воді й тропічній атмосфері. З неї виготовляють електричні контакти та хімічно стійкі деталі приладів.

Кремнієву бронзу БрКЗМц1 отримують при легуванні міді кремнієм (до 3,5 %), що підвищує міцність і пластичність сплаву. А манган (до 1 %) поліпшує механічні й корозійні властивості. Кремнієву бронзу легко обробляти тиском, різанням і зварювати. Завдяки високим механічним властивостям, пружності й корозійній стійкості її застосовують для виготовлення пружин і пружних деталей приладів і радіоустаткування, що працюють за температури до +250 °С, а також в агресивних середовищах (як у прісній, так і в морській воді).

Кадмієву бронзу БрКд1 (кадмію 1 %, решта – мідь) використовують для виготовлення колекторних пластин, контактних проводів, електродів для контактного зварювання. Додавання до міді кадмію значно підвищує її міцність і твердість при незначному зменшенні питомої провідності.

Берилієва бронза БрВ2 (берилію 2 %, решта – мідь) вирізняється високою твердістю, міцністю, пружністю і зносостійкістю, добре протистоїть корозії, її зварюють та обробляють різанням. Застосовують для виготовлення струмопровідних пружин, щіткотримачів, пружних, штепсельних і ковзних контактів.

Свинцева бронза БрС30 (свинцю 30 %, решта – мідь) має високі антифрикційні властивості (достатня твердість, добра пластичність, здатність утримувати змащувальний матеріал на своїй поверхні). Це зумовлює її широке застосування у виготовленні підшипників ковзання, що працюють із великими швидкостями та при підвищеному тиску.

Таблиця 13.1 – Властивості мідних електротехнічних сплавів

Сплав	Стан	Питома провідність γ , % в порівнянні з провідністю міді	Межа міцності при розриві, МПа	Відносне подовження при розриві, $\Delta l/l$, %
Кадмієва бронза (0,9% Cd)	Тверда Відпалена	83-90..95	До 1050 310	4 До 50
Бронза (0,8% Cd, 0,6 % Sn)	Тверда Відпалена	50-55 55-60	До 730 290	4 До 55
Бронза (2,5% Al, 2 % Sn)	Тверда Відпалена	15-18 15-18	До 970 370	4 До 45
Фосфориста бронза (7% Sn, 0,1% P)	Тверда Відпалена	10-15 10-15	До 1050 400	3 До 60
Латунь (30% Zn)	Тверда Відпалена	25 25	До 880 320-350	5 До 60-70

Порівняно з олов'яною підшипниковою бронзою, теплопровідність бронзи БрС30 учетверо більша, тому вона добре відводить теплоту, що виникає під час тертя.

Фосфориста бронза БрО6,5Ф0,15 (олова 6,5 %, фосфору 0,15 %, решта – мідь) вирізняється низькою електропровідністю, тому з неї виготовляють невідповідальні струмопровідні пружини.

13.2.2 Латунь

Латунь – це сплав міді із цинком. Цинк підвищує міцність і пластичність сплаву, але до певних меж. Найбільшу пластичність має латунь, що містить 30 % цинку, а найбільшу міцність має латунь, що містить 40 % цинку. Крім того, цинк здешевлює сплав, оскільки він дешевший за мідь.

За хімічним складом латунь ділять на *просту* (подвійну), де є тільки мідь і цинк, і *складну* (багатокомпонентну), де для поліпшення різних властивостей додають інші елементи. Найбільш поширені домішки – алюміній, олово, кремній, нікель тощо.



У середні віки виробництво латуні тривало у різних регіонах світу, але мистецтво виробництва сплавів було добре збережено лише у

Візантії та Індії. У Європі виробництво латуні почало відроджуватися за часів Відродження – 14-17 століття. В ці часи вона стала широко використовуватись у мистецтві, архітектурі, виготовленні зброї та музичних інструментів. Згодом латунь була отримана шляхом сплавлення міді з металевим цинком. Цей метод був запатентований а Англії Джеймсом Емерсоном в 1781 році. .

Латунь, завдяки своїм відмінним акустичним властивостям та пластичності, широко використовується для виготовлення духових інструментів, таких як труби, тромбони та флейти.

Фізичні властивості: щільність – $8500\text{--}8700\text{ кг/м}^3$; питома теплоємність при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $0,377\text{ кДж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; питомий електричний опір – $(0,07\text{--}0,08) \cdot 10^{-6}\text{ Ом}\cdot\text{м}$; температура плавлення латуні, залежно від складу, досягає $880\text{--}950\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Латунь характеризується високою електро- та теплопровідністю, корозійною стійкістю, добре обробляється різанням, має досить високе відносне подовження при розтягуванні. Порівняно з мідними, деталі з латуні краще штамнуються і витягуються. Латунь застосовують для виготовлення різних струмопровідних деталей, трубок, гільз, дроту, листів, стрічок. За технологічною ознакою латунь, як і бронзу, ділять на ту, що деформується, та ливарну. Латунь маркують літерою Л.



Рисунок 13.4 – Латунь

У латуні, що деформується, зазначають вміст міді й легувальних елементів, які позначають відповідними літерами (О – олово, А – алюміній, К – кремній, Н – нікель, Мц – манган, Ж – залізо). Вміст елементів подають у відсотках після літерних позначень. Наприклад: латунь **Л63** містить міді 63 %, решта 37 % – цинк; латунь **ЛАЖ 60-1-1** містить міді 60 %, алюмінію 1 %, заліза 1 %.

заліза 1 %, решта 38 % – цинк. У марках ливарної латуні зазначають вміст цинку, а кількість легувальних елементів ставлять після літер, що їх позначають. Наприклад, ливарна латунь **ЛЦ40Мц3А** містить цинку 40 %, мангану 3 %, алюмінію менше 1 %; решта 56 % – мідь.

13.2.3 Нейзильбер

Нейзильбер – це сплав міді й різних металів, більш відомий як мельхіор, у якому Cu – основа, Ni+Co – у межах 13,5–16,5 %, Zn – 18–22 %, а також незначний відсоток Mn, Fe, C, Pb, S. Сплав відрізняється корозійною стійкістю, доступністю для будь-якого виду механічного оброблення, пружністю після деформації.

Нейзильбер – в дослівному перекладі з німецької мови від нім. Neusilber – «нове срібло». Хоча нейзильбер ніколи не був популярним сплавом для карбування монет, іноді вдаються і до нього – випускають ювілейні, обмежені або колекційні серії, а також конкретні поодинокі тиражі.



Пам'ятна монета “Українська бавовна. Нептун”, присвячена українському береговому ракетному комплексу РК-360МЦ “Нептун”, виготовлена з нейзильберу.

Міцність, пружність і термічне протистояння у нейзильберу вищі, ніж у латуні, а ось пластичність менша, так: сплав не боїться окислення у воді із збереженням, при цьому, металевого блиску; не розчиняється у розведених кислотах. Для підвищення деяких властивостей на різних етапах виробництва дроту нейзильбер застосовується його легування наступними хімічними елементами: алюміній (Al), олово (Sn), ванадій (V),

залізо (Fe), свинець (Pb), кобальт (Co) та ін. Введення перерахованих елементів до складу багатокомпонентного металу сприяє зміні його властивостей, наприклад: введення свинцю до 2% забезпечує лиття додаткової міцності при обробці; алюміній сприяє розрідженню сплаву, забезпечуючи тонкостінне лиття; чисте залізо, при введенні до 2,5%, відбілює нейзильбер, проте робить його тендітнішим; введення ванадію посилює щільність, зменшуючи при цьому його пористість; а введення груп Al-Zn або Ca-Zn забезпечує уповільнення затвердіння лиття.

Застосовується нейзильбер в промисловості як конструкційний матеріал для виготовлення деталей точних приладів, медичних інструментів, парової і водяної арматури.

13.3 Алюміній

Алюміній (Al) – другий за значенням (після міді) провідниковий матеріал. Належить до так званих легких металів (приблизно в 3,5 раза легший за мідь). Це м'який, білий і блискучий метал. Алюміній активно окиснюється на повітрі, покривається тонкою оксидною плівкою, яка захищає матеріал від подальшої корозії. Ця ж плівка значно ускладнює паяння алюмінієвих провідників звичайними методами – доводиться використовувати спеціальні флюси, припої та ультразвукові паяльники.

Алюміній пластичний, його легко кувати, прокатувати в тонкі листи (завтовшки до 0,01 мм) і фольгу (до 5–7 мкм). Питомий опір алюмінію: $\rho = 0,026 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, що приблизно в 1,63 раза більше від питомого опору міді: $\rho = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Дуже важливо й те, що алюміній менш дефіцитний, ніж мідь.

У радіоелектроніці застосовують алюміній найвищої чистоти марок А999 та А995 (домішки не більше 0,01 %) під час

виготовлення фольги для конденсаторів, отримання тонких плівок у мікроелектроніці, виготовлення напівпровідників. Менш чистий алюміній (домішки до 0,03 %) марок А95, А97, А99 застосовують для виготовлення захисних кабельних оболонок, корпусів приладів, екранів тощо. Як провідниковий матеріал використовують алюміній марок А0, А5, А6, А7, А8, А85, що містить не більше 0,5 % домішок.



Рисунок 13.5 – Алюмінієвий провід

Таблиця 13.2 – Властивості різних марок міді та алюмінію

Властивості	Мідь		Алюміній	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Межа міцності при розтягуванні, Н/м ²	$(3,6-3,9) \cdot 10^8$	$(2,6-2,8) \cdot 10^8$	$(1,6-1,7) \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^7$
Відносне подовження при розриві, %	0,5-2,5	18-25	1,5-2,0	10-18
Питомий опір, мкОм·м	0,0182	0,0175	0,0295	0,0286

У місці з'єднання алюмінію та міді може з'являтися гальванічна корозія. У разі зіткнення місця контакту з вологою виникає місцева гальванічна пара з доволі високим значенням електрорушійної сили (ЕРС). Тому місця з'єднання мідних провідників з алюмінієвими мають бути якісно захищені від вологи лаковим покриттям.

Наявність домішок зменшує питому електропровідність алюмінію, але підвищує його механічну міцність. На відміну від алюмінію, його сплави характеризуються високою міцністю, що наближається до високоміцної сталі. Їх застосовують як конструкційні матеріали. Інші переваги всіх сплавів алюмінію – це їхня мала щільність, задовільна стійкість проти атмосферної корозії, відносна дешевизна та простота в отриманні й обробленні. Основними легувальними елементами сплавів є Cu, Mg, Cr, Mn, які додають до алюмінію для підвищення його міцності.

13.4 Сплави алюмінію

13.4.1 Дюралюмін

Дюралюмін – сплав алюмінію з міддю, додатково легований магнієм або манганом (сплави на зразок Al–Cu–Mg, Al–Cu–Mn).

Назва походить від німецького міста Дюрен, де в 1909 р. було розпочато його промислове виробництво. Промислові сплави дюралюміну в позначенні містять літеру Д та цифри, що вказують на відсоток домішок. Наприклад, **Д1** – класичний дюралюмін, який має міді 3,5–4,5 %, мангану 0,4–1,0 %, магнію 0,4–0,8 %; **Д16** – дюралюмін підвищеної міцності з більшим (1,2–1,8 %) вмістом магнію; **Д18** – дюралюмін підвищеної пластичності (зі зниженим вмістом легувальних елементів).

Перше застосування дюралюмінію - виготовлення каркасу



дирижаблів жорсткої конструкції Zeppelins LZ 127 Graf Zeppelin, LZ 129 Hindenburg. Починаючи з 1911 року, дюралюміній став широко застосовуватися в інших галузях машинобудування. У роки Першої світової війни склад сплаву та термообробка були засекречені. Починаючи з 1920-х років, завдяки високій питомій найважливішим конструкційним Сплав широко застосовується в поїздів Сінкансен – найшвидших, найпотужніших та найдорожчих електропоїздів в Японії. (проектна швидкість електропоїзда 320 км/год., максимальна службова швидкість – 300 км/год) і в багатьох інших галузях машинобудування (оскільки відрізняється істотно більшою міцністю, ніж чистий алюміній).

міцності, дюралюміній стає матеріалом у літакобудуванні. авіабудуванні, при виробництві



Дюралюмін добре обробляють різанням, має високі ливарні властивості, високу питому міцність, стійкий до корозії, тому його широко застосовують у ракетній техніці, в авіа-, авто, судно- й приладобудуванні.

13.4.2 Силумін

Спочатку силумін розроблявся з метою покращення фізичних властивостей алюмінію. Завдання було створити матеріал, який за міцністю не поступався б латуні, але мав нижчу вартість. Основою для складу сплаву силуміну виступає алюміній – 85-90%, друге місце займає кремній – 5-10% та різні добавки – не більше 10%. За рахунок зміни співвідношення

компонентів цей матеріал буває різних марок. Крім того, існує дві технології виробництва деталей із силуміну:

- шляхом відливу (усі складові елементи майбутнього силуміну додаються до алюмінію, який знаходиться у розплавленому стані; ця технологія дозволяє отримати матеріал, що має міцність і зносостійкість, порівнянну з латунню);

- порошкова металургія (метал не розплавляється, необхідний виріб виготовляється шляхом термічного пресування заздалегідь підготовленої суміші порошків алюмінію, кремнію та допоміжних речовин).

Порошкова металургія дозволила суттєво здешевити процес виробництва силуміну.

Маркують силуміни так: *АЛ2, АЛ4, АЛ9*, де цифра – порядковий номер сплаву. Силумін поєднує високі ливарні та механічні властивості, має малу питому вагу. Типовий силуміновий сплав АЛ2 піддається загартуванню. Силуміни добре зварюються, мають високі пластичні властивості й корозійну стійкість, але невисоку міцність. Сплави цієї групи застосовують як листовий матеріал для виготовлення складних за формою виробів, використовуючи при цьому холодне й гаряче штампування і прокатування.



Рисунок 13.6 – Силумін

13.4.3 Магналій

Магналій – сплав алюмінію з магнієм 9,5–11,5 %. Сплав характеризується поєднанням достатньої міцності, високої пластичності, корозійної стійкості та зварюваності, є стійким до вібрацій. Застосовують для зварних конструкцій і виготовлення стрілок різних електро- та радіотехнічних вимірювальних приладів.

Сплави маркують так: *АМз0,5* (0,4–0,8 % магнію), *АМз2* (1,7–2,4 % магнію), *АМз5* (4,8–5,8 % магнію), *АМз6* (5,8–6,8 % магнію) – зі збільшенням порядкового номера зростає міцність сплаву.

Напівфабрикати з магналію випускають у вигляді виливків, листів, стрічок, дроту, труб. Магналій застосовується як конструкційний матеріал в авіабудуванні, суднобудуванні, машинобудуванні (зварні баки, заклепки, бензо- та маслопроводи), для виготовлення деталей холодильних установок тощо.



Рисунок 13.7 – Застосування магналію

Відомий також зуботехнічний магналій (30 % Mg), що характеризується добрими ливарними властивостями, малою

усадкою, доброю текучістю у розплавленому стані й застосовується для виготовлення тимчасових зубних протезів, виправлення аномалій зубів та при щелепно-лицевому протезуванні. Температура плавлення сплаву 657 °С, твердість за Брінеллем НВ 90 кгс/мм², відносне видовження $\delta = 15 \%$.

Магналій має властивості, схожі до властивостей латуні і бронзи:

- характеризується високою міцністю і стійкістю до корозії у прісній та морській воді;
- стійкий до впливу азотної кислоти з добавками сірчаної, ортофосфатної кислоти а також у середовищах, що містять діоксид сірки (SO₂);
- добре зварюється;
- має високу пластичність;
- легко піддається механічній обробці, добре полірується.

Проте для тривалої роботи при підвищених температурах сплави системи Al-Mg непридатні.

13.4.4 Альдрей

Альдрей – сплав алюмінію з 0,3–0,5 % магнію, 0,4–0,7 % кремнію, 0,2–0,3 % заліза. Він легший за алюміній і близький до нього за питомим електричним опором: питомий опір $3,17 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, густина альдрею 2700 кг/м³, границя міцності 350 МПа;

Альдрей має високі механічні властивості в порівнянні з алюмінієм, цих властивостей він набуває в результаті спеціальної термічної обробки: загартування катанки, охолодження у воді за температури 510–550 °С, волочіння і подальша витримка при температурі близько 150 °С.



Рисунок 13.8 – Проводи з альдрей

Застосовують альдрей для виготовлення малонавантажених повітряних ліній електропередач. Зберігаючи легкість алюмінію і не дуже відрізняючись від нього провідністю, за механічною міцністю альдрей подібний до твердої міді.

13.5 Матеріали високого питомого опору

Матеріали з високим опором: $\rho = 0,4\text{--}0,5$ мкОм·м – це метали (вольфрам, молібден, тантал, ніобій, реній, хром тощо) і металеві сплави (манганін, константант, ніхром, нікелін, фехраль, хромаль тощо).

Вони мають високу механічну міцність і пластичність, що дає змогу виробляти з них дроти та стрічки необхідного перерізу для дрітятих резисторів і реостатів, термопар. Також їх застосовують при виготовленні електровимірювальних приладів та електронагрівальних пристроїв, які мають тривалий час працювати на повітрі за високих температур. Бажано, щоб матеріали високого питомого опору були також технологічні, дешеві, не містили дефіцитних компонентів. Розглянемо властивості та застосування деяких металів із великим питомим опором, які ще називають *тугоплавкими*, тобто вони мають дуже

високу температуру плавлення (понад $+1700\text{ }^{\circ}\text{C}$) і стійкість до зношування.

13.5.1 Вольфрам

Вольфрам (W) – дуже важкий, твердий метал сірого кольору. З усіх металів має найвищу температуру плавлення – $+3422\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура кипіння – $5555\text{ }^{\circ}\text{C}$. У природі зустрічається як сполука. Волокниста структура обумовлює гнучкість вольфрамових ниток. Межа міцності при розтягуванні для тонких ниток – $3000\text{--}4000\text{ МПа}$, а відносне подовження при розриві – 4% , твердість за Брінеллем – 488 кгс/мм^2 ; щільність – $19,3\text{ г/см}^3$; теплопровідність – $173\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Вольфрам з 1890 р. використовують для виготовлення ниток ламп розжарювання.



Wolframium походить від відомого з XVI століття мінералу вольфраміт, що у перекладі з німецької звучало як «вовча піна». При виплавці олова з його руд, що містили вольфрам, між ними відбувалася реакція з

посиленням піноутворенням.

Сплави вольфраму, вироблені методом порошкової металургії, відрізняються твердістю та жароміцністю, кислотостійкістю та стійкістю до стирання. Вони є обов'язковими компонентами кращих марок високолегованих сталей, де літери в назві позначають склад:

WA – з'єднання вольфраму з алюмінієм та кремнієм. Характеризується підвищеною температурою початкової рекристалізації, міцністю після відпалу.



Рисунок 13.9 – Борфрези з карбїду вольфраму

WCu – композиція з міддю використовується для виготовлення високовольтних вимикачів та транзисторів, в установках радіолокації та біполярної електроніки.

WL – добавка оксиду лантану збільшує емісійні властивості.

WLZ – вольфрам з оксидом лантану та оксидом цирконію – ідеальний матеріал для електродів, що працюють під високою напругою.

WZ – вольфрам з оксидом церію використовують як матеріал для зварювальних електродів. Збільшуються характеристики запалення та термін служби.

WM – сплав вольфраму та молібдену. Має високу міцність та допомагає зберегти пластичність після відпау.

WK – вольфрам з добавкою калію отримує хорошу розмірну стабільність та опір повзучості.

WRe – легування ренію дає можливість термоелементам, зробленим із такої сталі, працювати при температурах понад 2000 °C.

З нього виробляють елементи електровакуумної техніки: електроди, підігрівачі, пружини та гачки в електронних лампах,

рентгенівських трубках тощо. Він має найменший температурний коефіцієнт лінійного розширення серед усіх чистих металів. Цю властивість використовують при виготовленні термічно узгоджених з'єднань вольфраму з тугоплавким склом, яке теж має низький температурний коефіцієнт лінійного розширення. Унікальні властивості дозволяють виготовляти найкращі інструменти для хірургії, танкову броню та оболонки снарядів, пластини для бронежилетів, відповідальні частини авіаційної та авіакосмічної промисловості, контейнери для радіоактивних відходів, ємності для вирощування кристалів сапфірів.

13.5.2 Молібден

Молібден (Mo) (лат. molybdenum, від грец. μόλυβδος – «свинець»; названий за схожість його руд зі свинцевими) – метал, за зовнішнім виглядом та технологією оброблення подібний до вольфраму. Він також має високу температуру плавлення +2623 °С.

Відпалений дрібнозернистий молібден характеризується високою пластичністю. Поліпшення структури й підвищення механічної міцності молібдену досягають введенням спеціальних домішок. За кімнатної температури це відносно інертний метал. На повітрі він окиснюється, починаючи з температури +300 °С. Тому молібденові деталі, які нагрівають, мають працювати у вакуумі або відновлювальному середовищі. Серед тугоплавких металів молібден має найменший питомий опір. Висока міцність і пластичність роблять його одним із найкращих провідникових матеріалів для виготовлення деталей складної конфігурації, що працюють за високих температур. З молібдену виготовляють сітки й електроди електронних ламп, рентгенівських трубок і

допоміжні деталі електровакуумних приладів із напруженим тепловим режимом. Молібденові пігменти від червоно-жовтого до яскраво-червоного жовтогарячого використовуються у фарбах, чорнилах, пластмасах та гумових матеріалах.



Рисунок 13.10 – Молібден

13.5.3 Тантал

Тантал (Ta) – метал сріблясто-білого кольору. Завдяки міцній оксидній плівці він подібний до свинця. Метал дуже міцний, твердий, має пластичність, що порівнюють із золотом. Температура плавлення $+3017^{\circ}\text{C}$. З танталу виготовляють листи, стрічки та фольгу завтовшки до 10 мкм. На противагу вольфраму й молібдену, тантал не стає крихким при нагріванні у вакуумі за досить високих температур. Завдяки здатності попередньо дегазованого танталу поглинати гази в діапазоні температур від $+600$ до $+1200^{\circ}\text{C}$, а також тугоплавкості, пластичності й формостійкості він є одним із найважливіших матеріалів для електровакуумної техніки. Та через природну дефіцитність і високу вартість тантал використовують переважно для виробів, що працюють у напруженому тепловому режимі, як-от: аноди та

сітки генераторних ламп, катоди прямого й непрямого розжарювання та інші деталі електровакуумних приладів. На основі танталу виготовляють і широко застосовують електролітичні й тонкоплівкові конденсатори з великою питомою ємністю та тонкоплівкові резистори.

Таблиця 13.3 – Характеристики слюдяних конденсаторів на основі полікарбонату та танталу

Параметр конденсатора	Тип конденсатора	
	на основі полікарбонату	на основі танталу
Діапазон зміни ємності конденсатора	від 10 нФ до 10 мкФ	від 100 нФ до 100 мкФ
Точність (можливий розкид значень ємності конденсатора), %	±20	±20
Робоча напруга конденсаторів, В	63 – 630	6,3 – 35
Стабільність конденсатора	відмінна	достатня
Діапазон зміни температури оточуючого середовища, °С	від -55 до +100	від -55 до +85

Такий метал, як тантал незамінний при виробництві предметів та обладнання, які були б стійкими до появи корозії. У медичній галузі використання танталу давно вже вважається нормою. Фольга та дріт з цього унікального матеріалу застосовуються для того, щоб відновити діяльність тканин, нервів пацієнтів. Також вони активно використовуються для того, щоб накласти потерпілому шви. Через міцність танталу його почали використовувати для виробництва космічних апаратів. Цей матеріал набув широкої популярності у військовій промисловості. З його допомогою створюються бойові припаси, які мають високий рівень міцності; їх практично неможливо пробити.



Рисунок 13.11 – Зразок кристалічного танталу

Тантал відкритий у 1802 році шведським хіміком А. Г. Екебергом у двох мінералах, знайдених у Фінляндії та Швеції. Однак у чистому вигляді виділити його не вдалося. Через труднощі отримання цей елемент було названо на ім'я героя давньогрецької міфології - царя Тантала. Згодом тантал і «колумбій» (ніобій) вважали тотожними. Лише у 1844 році німецький хімік Генріх Розе довів, що мінерал колумбіт-танталіт містить два різні елементи – ніобій та тантал. Пластичний металевий тантал вперше отримано німецьким вченим В. Болтоном в 1903 році. Перший промисловий штабик танталу був отриманий у 1922 році, при цьому він не перевищував за величиною сірникову головку. Тоді елемент почав застосовуватися у випрямлячах струму та радіолампах.

13.5.4 Ніобій

Ніобій (Nb) – метал, за властивостями подібний до танталу. За звичайних умов – сріблясто-білий, блискучий. Температура плавлення – $+2477^{\circ}\text{C}$. Саме завдяки цій якості, а також поєднанню низької хімічної активності й надпровідності, ніобій стає дедалі популярнішим у практичній діяльності.



Рисунок 13.12 – Кристали ніобію

Застосування та виробництво ніобію швидко зростають, що обумовлено здатністю утворювати жароміцні та надпровідні сплави, корозійною стійкістю, низькою роботою виходу електронів, хорошою оброблюваністю тиском на холоді та зварюваністю. Основні галузі застосування ніобію: ракетобудування, авіаційна та космічна техніка, радіотехніка, електроніка, хімічне апаратобудування, атомна енергетика. Щодо електровакуумних приладів, то ніобій застосовують як катоди розжарювання в потужних генераторних лампах.

13.5.5 Реній

Реній (Re) (англ. rhenium, нім. Rhenium – від назви р. Рейн) – один із рідкісних і дуже важких металів із температурою плавлення, близькою до температури плавлення вольфраму, – $+3186\text{ }^{\circ}\text{C}$. Реній і його сплави з вольфрамом застосовують у виробництві електроламп та електровакуумних приладів (замість чистого вольфраму); з нього створюють термопари для вимірювання температур (до $+2800\text{ }^{\circ}\text{C}$) у вакуумі, у водні або інертному середовищі. Реній використовують як покриття для

захисту від корозії і зношування деталей із міді, срібла, вольфраму, молібдену. У радіоелектроніці тонкі плівки ренію застосовують для виготовлення прецизійних резисторів в інтегральних мікросхемах.



Рисунок 13.13 – Реній

Реній використовується в тих галузях, де ніяка інша сировина не може замінити його. Основною формою застосування є численні сплави. Зважаючи на унікальну жароміцність, він затребуваний при виробництві космічної техніки, літаків і ракет в ядерній промисловості, де робочі температури досягають 3000 °С. Цей метал є знахідкою для електронної та електротехнічної галузі. Реній – неодмінний компонент під час виробництва ламп розжарювання, електронно-променевих та рентгенівських трубок, термопар, контактів, деталей точних приладів. Контакти з ренію мають здатність очищатися після окислення. Окис ренію, що утворюється з часом на поверхні контактів, має летючість і сама себе усуває, залишаючи поверхню чистою. Велика роль ренію в нафтохімічній та хімічній галузях. Тут особливо цінуються його каталітичні властивості. Ренієві каталізатори можна відновлювати без серйозних втрат у металі. Як каталізатор, він також є учасником багатьох хімічних реакцій. Порівняно

нещодавно його почали застосовувати як покриття. Ренування – це єдина можливість захистити деталі з менш міцних металів від речовин, що роз’їдають. У ємностях, покритих ренієм, транспортують різні кислоти та агресивні речовини.

13.5.6 Хром

Хром (Cr) – досить поширений у земній корі елемент, що має високу стійкість до окиснення, а тому його використовують для захисного покриття виробів (зокрема, для роботи за підвищених температур). Хром – метал голубувато-білого кольору, найтвердіший з усіх металів. Температура плавлення – +1857 °С.



Рисунок 13.14 – Зразки хрому

Хромування здійснюють електролітично або за допомогою насичення хромом поверхневих шарів сталевих виробів дифузією із зовнішнього середовища. З тонких плівок хрому виготовляють резистори й адгезійні підшари для контактних площадок і струмопровідних з’єднань в інтегральних мікросхемах, а також світлонепроникні шари фотошаблонів. Електричні властивості хромових плівок дуже чутливі до умов нанесення внаслідок поглинання залишкових газів у процесі

осадження. Однак хром має добру адгезію до скляних, ситалових і керамічних основ мікросхем. Крім того, він добре поєднується з будь-яким провідниковим матеріалом. Додатковою перевагою хрому є легкість сублімації (перехід речовини з твердого стану в газоподібний, оминаючи рідкий) під час отримання плівок. Він входить до складу великої кількості сплавів для нагрівальних приладів, термопар, конструкційних нержавіючих, жароміцних сталей і магнітних матеріалів.

13.6 Провідникові резистивні матеріали

Матеріали високого питомого опору за призначенням можна поділити на провідникові резистивні матеріали, плівкові резистивні матеріали, матеріали для термопар.

Провідникові резистивні матеріали – це сплави для виготовлення дрітних резисторів (манганін, константан) та електронагрівальних елементів (ніхром, фехраль, хромаль). Висока нагрівостійкість цих сплавів досягається завдяки додаванню до їхнього складу досить великої кількості металів, які при нагріванні на повітрі утворюють суцільну оксидну плівку (табл. 13.4).



Рисунок 13.15 – Провід з манганіну

13.6.1 Манганін

Манганін – сплав на основі міді (мангану 12 %, нікелю 3 %, решта 85 % – мідь), є основним для виготовлення еталонних резисторів, шунтів і додаткових резисторів для вимірювальних приладів, резистивних датчиків тиску. Найпопулярніший із манганінів сьогодні містить 86% міді, 12% марганцю та 2% нікелю.

Таблиця 13.4 – Властивості деяких сплавів високого опору

Назва сплаву	Щільність, кг/м ³	Питомий опір, мкОм·м	Температурний коефіцієнт питомого опору, 1/°C	Температура робоча, максимальна, °C	Межа міцності при розтягуванні, Н/м ²	Відносна подовження при розриві, %
Манганін	$8,4 \cdot 10^3$	0,48	$(5-30) \cdot 10^{-6}$	100-200	$(4,5-6,0) \cdot 10^8$	15-30
Константан	$8,9 \cdot 10^3$	0,52	$(5-25) \cdot 10^{-6}$	450-500	$(4,0-5,0) \cdot 10^8$	20-40
Ніхром X15H60	$8,3 \cdot 10^3$	1,2	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	1000	$(6,5-7,0) \cdot 10^8$	25-30
Ніхром X20H80	$7,5 \cdot 10^3$	1,1	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	1100	-	-
Хромаль X13Ю4	$7,5 \cdot 10^3$	1,35	$(1-2) \cdot 10^{-4}$	850	$7,0 \cdot 10^8$	20

Манганіни мають характерний світло-оранжевий колір, їх питомий опір $\rho = 0,42\text{--}0,47$ мкОм·м, $t_{пл} = +960$ °C, середня щільність - $8,4$ г/см³. Електричний опір манганіну має малу залежність від температури, а спеціальним термічним обробленням можна забезпечити високу стабільність опору в часі. Щоб стабілізувати манганіни, в них додають трохи заліза, срібла та алюмінію: алюмінію – від 0,2 до 0,5%, заліза – від 0,2 до 0,5%, срібла – 0,1%. Манганін має дуже мале значення термоЕРС

разом із міддю, що дає змогу широко використовувати його під час виготовлення електровимірювальних приладів найвищих класів точності. Випускається як голий манганіновий дріт, так і дріт у високоомісній емалевій ізоляції – для виготовлення обмоток, у шовковій ізоляції, та у двошаровій лавсановій ізоляції.

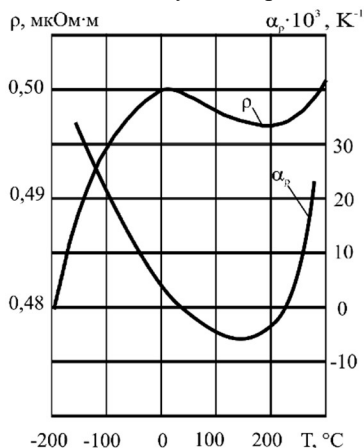


Рисунок 13.16 – Залежності питомого опору і температурного коефіцієнта питомого опору манганіну від температури

13.6.2 Константан

Константан – сплав міді та нікелю (міді 58–60 %, нікелю 32–40 %, мангану 1–2 % та ін.). Назва підкреслює стабільність електричного опору сплаву при зміні температури (з латин. *constans* – постійний, незмінний). Питомий опір: $\rho = 0,45\text{--}0,52$ мкОм·м, $t_{пл} = +1260$ °C. Температурний коефіцієнт опору у константана наближається до нуля - це основна перевага даного металу. Константан відрізняється характерним сріблясто-білим кольором, щільність в середньому близько 8,9 г/см³.

Константан добре піддається механічному обробленню, що свідчить про його високі технологічні властивості. Високі механічні характеристики у поєднанні з пластичністю дають змогу виготовляти із цього сплаву найтонший дріт, стрічки, смуги та фольгу. Промисловістю випускається константановий дріт діаметром від 0,02 до 5 мм. Випускається як константановий дріт без ізоляції, так і обмотувальний дріт у високоміцній емалевій ізоляції, дріт у двошаровій шовковій ізоляції, і дріт у комбінованій ізоляції – один шар емалі і один шар шовку чи лавсану.



Рисунок 13.17 – Провід з константану

Високі значення термоЕРС разом із міддю і залізом успішно використовують при виготовленні резисторів, термопар та електронагрівальних елементів, які працюють за температури +400–500 °С.

13.6.3 Ніхром

Ніхром – сплав нікелю (55–80 %), хрому (15–23 %), мангану (1,5 %) і заліза (решта). Характеризується високим питомим опором: $\rho = 1,04\text{--}1,17 \text{ мОм}\cdot\text{м}$, високою термостійкістю, $t_{пл} = +1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, високотехнологічний, легко протягується в

тонкий дріт або стрічки. Основний недолік – нестійкий до різких перепадів температури, що руйнують захисну оксидну плівку.

Завдяки особливим властивостям матеріалу ніхром широко застосовується в різних областях. Ніхром часто використовується в нагрівальних елементах для побутових приладів, наприклад, фени, тостери, праски, а також у промисловому устаткуванні, такому як печі, котли та пристрої для термообробки металів. Ніхромові сплави використовуються у наукових та дослідницьких лабораторіях для виробництва високотемпературних печей та іншого обладнання, що потребує точного контролю температури, як матеріал для плівкових резисторів інтегральних схем. Ніхром часто використовується для різання пінопласту та інших матеріалів за допомогою термічних методів виробництва.

Ніхромові матеріали використовуються в системах обігріву сидінь, дзеркал та скла сучасних автомобілів. Як і константан, ніхром містить чимало дорогого й дефіцитного нікелю, що обмежує його застосування.



Рисунок 13.18 – Ніхром



Наприкінці 19 ст. в Единбурзі винайшли тостер, але ранні моделі працювали погано, у них ставили сталеві нагрівачі, які швидко перегорали та плавилися. Але в 1905 р. американський інженер Альберт Марш запропонував рішення - сплав нікелю та хрому. Спочатку свій винахід Альберт назвав Хромелем, але пізніше назву змінили на Ніхром. Склад новинки був таким: 80% нікелю та 20% хрому.

Через кілька років і на ринок вийшов перший комерційно успішний електричний тостер із ніхромовими нагрівачами. Після тостерами пішли й інші побутові прилади: праски, чайники, електроплитки та печі. За такий корисний винахід Альберт Марш навіть отримав прізвисько «Батько електроопалювальної промисловості».



Тостер – General Electric Model D-12, 1910-і роки

13.6.4 Фехраль і хромаль

Фехраль і хромаль – це сплави заліза з хромом та алюмінієм у різних пропорціях: фехраль – заліза 82 %, хрому 15 %, алюмінію 3 %; хромаль – заліза 65 %, хрому 30 %, алюмінію

5 %. Мають питомий опір: до 1,39 мкОм•м, $t_{пл} +1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а робочі температури – до $+1400\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 13.19 – Вироби з фехралю

Такі сплави значно дешевші від ніхрому, але менш термостійкі й менш технологічні, більш тверді й крихкі за ніхром, що ускладнює їхнє оброблення для отримання необхідних виробів. Тому дроти й стрічки з них можна виготовити тільки з більшим поперечним перерізом, а отже, їх застосовують в електронагрівальних елементах великої потужності.

13.7 Матеріали для термопар

Термопара (термоелектричний перетворювач температури) – термоелемент, застосовуваний у вимірювальних і перетворювальних пристроях, а також в системах автоматизації.

Міжнародний стандарт МЕК 60584 дає наступне визначення термопари: **термопара** – пара провідників з різних матеріалів, з'єднаних на одному кінці і формуючих частину пристрою, що використовує термоелектричний ефект для вимірювання температури.

Принцип дії заснований на ефекті Зеебека (термоелектричному ефекті): коли кінці провідника знаходяться при різних температурах, між ними виникає різниця потенціалів, пропорційна різниці температур. Коефіцієнт пропорційності називають коефіцієнтом термо-ЕРС.

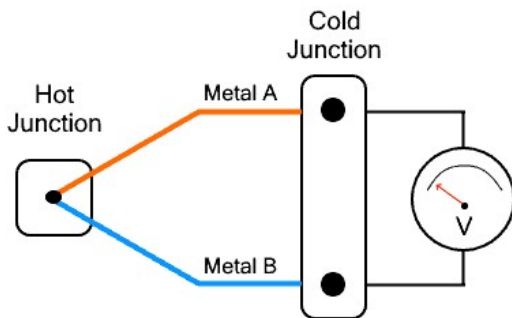
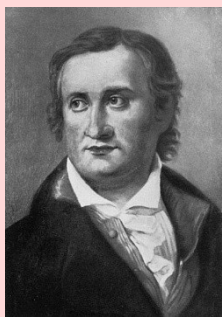


Рисунок 13.20 – Принцип роботи термопар



Ефект Зеебека – явище виникнення електрорушійної сили між двома контактами різних провідників, які перебувають при різних температурах. Явище виникнення напруги в металевому брускі, кінці якого мали різну температуру, випадково відкрив у 1821 р. **Томас Йоганн Зеебек** (нім. Thomas Johann Seebeck).

У 1834 році був відкритий **ефект Пельтьє**, зворотний ефекту Зеебека – явище нагрівання або охолодження контакту між провідниками, коли через нього проходить електричний струм. Якщо контакт нагрівається, то ефект Пельтьє називають позитивним, якщо охолоджується – негативним.

Найбільш поширені два способи підключення термопар до вимірювальних перетворювачів: простий і диференціальний. У першому випадку вимірювальний перетворювач підключається безпосередньо до двох термоелектродів. У другому випадку використовуються два провідники з різними коефіцієнтами термоЕРС, а вимірювальний перетворювач включається в розрив одного з провідників.

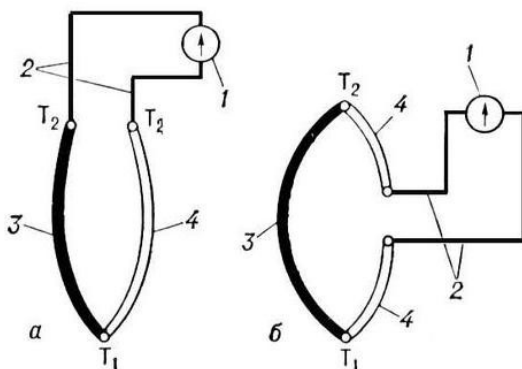


Рисунок 13.21 – Принципова схема включення двох термопар

Матеріали для термопар поділяють на безпосередньо термоелектроди та матеріали для подовжувальних дрітів (табл. 13.5). Щоб отримати чутливу термопару, для термоелектродів обирають матеріали із суттєвою різницею значення термоЕРС.

Матеріали, які утворюють термопару, підбирають так, щоб у діапазоні вимірюваних температур вони мали максимальне значення термоЕРС. Для вимірювання температур можуть застосовуватися такі термопари:

- мідь – константан, мідь – копель (до +350 °С);

- залізо – константан, залізо – копель, хромель – копель (до +600 °C);
- хромель – алюмель (до +900–1000 °C);
- платинородій – платина (до +1600 °C);
- вольфрам – молібден (до +2000 °C);
- вольфрам – реній (до +2800 °C).

Таблиця 13.5 – Характеристики сплавів для виготовлення термопар

Сплав/параметр	Копель	Хромель	Платинородій	Алюмель
Склад сплаву	44% Ni 56% Cu	90% Ni 10% Cr	90% Pt 10% Rh	93-96% Ni, частка інших металів (Al, Mg, Si, Co) не перевищує 2% для кожного
Питомий електричний опір ρ , мкОм·м	0,465	0,66	0,19	0,305
Застосування	Подовжувальні дроти		Електроди термопар	

Більшість термопар стійко працюють в окиснювальному середовищі, але в процесі тривалої експлуатації можна спостерігати поступову зміну термоЕРС термопари. Причини такої нестабільності – забруднення домішками з навколишньої атмосфери, окиснення дротів, летучість компонентів, різкі вигини й механічні деформації, які вносять внутрішні напружки та створюють неоднорідність структури. Найвищу стабільність, точність, відтворюваність, незважаючи на невелике значення термоЕРС, мають платинородієві термопари. Це обумовлено хімічною інертністю та високим ступенем чистоти матеріалу.

13.8 Дорогоцінні метали

Дорогоцінними металами здавна вважали так звані благородні метали за їхній гарний вигляд і стійкість до різних хімічних реагентів і впливів. До них належать золото, срібло, платина, паладій ін. У природі вони трапляються як у різних рудах і мінералах, так і у самородках.

У результаті металургійного, хімічного й електролітичного перероблення отримують метали дуже високої чистоти: срібло – 99,999 %; золото – 99,998 %; платину – 99,9998 %; паладій – 99,94 %. Унаслідок хімічної інертності до впливу агресивного середовища дорогоцінні метали стали незамінними в електроніці при виготовленні контактних виводів реле, конденсаторів, діодів, транзисторів і мікросхем. Їх застосовують в електротехнічній промисловості для виготовлення покриттів електричних контактів приладів, що працюють в агресивних середовищах.

13.8.1 Золото

Золото (Au) – блискучий метал жовтого кольору з високою пластичністю, теплопровідністю та електропровідністю. Золото має виняткову хімічну інертність. Воно стійке на повітрі та у воді.



Рисунок 13.22 – Золото в мікросхемах і елементах електротехніки

З киснем, азотом, воднем, фосфором і вуглецем безпосередньо не взаємодіє. На нього не діють ні розведені, ні

концентровані кислоти. Золото розчиняється тільки в суміші нітратної (65–68 % маси) і хлоридної (32–35 % маси) кислот, узятих у співвідношенні 1:3 за обсягом ($\text{HNO}_3 + 3\text{HCl}$).

Золото стійке до дії атмосферної корозії і не тьмяніє. Межа міцності на розтяг золотого дроту дорівнює 150 МПа, відносне видовження при розриві – приблизно 40 %. Тобто золото має найвищі, порівняно з усіма іншими металами, пластичність і ковкість. Воно легко розплющується на найтонші пластинки – сухозлітки. Так, 1 г золота можна розплющити в пластинку площею 1 м^2 . Товщина найтонших пластинок золота 0,1 мкм.



Науковцям вдалося розробити “голден” – надзвичайно тонкий матеріал, складений з молекул золота. “Голден” створено за аналогічним принципом, що й “графен”, який утворюється з молекул графіту. Графен відзначається високою міцністю та відмінною провідністю тепла та електрики, перевершуючи навіть мідь, що робить його дуже важливим у сучасній технологічній сфері. Новий матеріал може бути корисним у процесі очищення води та в комунікаційних технологіях. Крім того, він може замінити традиційне золото у сучасній електроніці, знижуючи витрати на ці цілі.

За електропровідністю золото посідає третє місце після срібла й міді. Питомий опір золота: $\rho = 2,2 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $t_{\text{пл}} = +1064,5 \text{ }^\circ\text{C}$. В електронній техніці його використовують як контактний матеріал, матеріал для корозієстійких покриттів резонаторів надвисоких частот, внутрішніх поверхонь хвилеводів, гальванічних покриттів контактних поверхонь,

золотих провідників, контактних площадок і роз'ємів друкованих плат.

Мікросхеми можуть містити сотні дріт'яних з'єднань, у кожному з яких є крихітна кількість золота. Тонкі плівки золота застосовують як напівпрозорі електроди у фоторезисторах і напівпровідникових фотоелементах.

Смартфон, ноутбук чи планшет з часом зазвичай викидають на смітєве звалище, де пристрої лежать сотнями років, поки розкладуться. В процесі цього вони неабияк засмічують навколишнє середовище, тому науковці знайшли спосіб повторного використання гаджетів. 7% світового золота зараз зберігається в електроніці. Проте оскільки золото є в обмеженій кількості, науковці хочуть давати йому "друге життя" після викидання гаджетів.

У Королівському монетному дворі поблизу Кардіффа в Південному Уельсі виготовляють мільярди монет для понад 30 країн. Протягом останніх років офіційний виробник монет Великобританії розробляє



Олімпійських іграх у Токіо 2020 року були виготовлені з переробленого електронного сміття

новий спосіб відновлення металів з електронних відходів.

Вчені винайшли та запатентували чистий, енергоефективний спосіб, за допомогою якого можна добути 99% золота з плат викинутих ноутбуків і старих мобільних телефонів.

До речі, усі медалі на Олімпійських іграх у Токіо 2020 року були виготовлені з

13.8.2 Срібло

Срібло (Ag) – білий блискучий метал, стійкий до окиснення при нормальній температурі. Серед металів срібло відрізняється найменшим питомим опором: $\rho = 1,59 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $t_{\text{пл}} = +962 \text{ }^\circ\text{C}$. Межа міцності на розтяг для срібного дроту дорівнює орієнтовно

200 МПа, відносне видовження при розриві – приблизно 50 %. Срібло застосовують у широкій номенклатурі контактів в електричній апаратурі різної потужності. Високі значення питомих теплоємності, теплопровідності й електричної провідності срібла забезпечують, порівняно з іншими металами, найменше нагрівання контактів і швидке відведення тепла від контактних точок. Його використовують і для безпосереднього нанесення на діелектрики (як електроди) у виробництві керамічних і слюдяних конденсаторів. Ним покривають внутрішні поверхні хвильоводів для отримання шару високої провідності. Із цією ж метою срібленню піддають провідники високочастотних котушок, струмопровідні контакти, дроти. Порівняно з іншими дорогоцінними металами, срібло має знижену хімічну стійкість. Зокрема, має схильність до утворення непровідних темних плівок у результаті взаємодії із сірководнем, мізерна кількість якого завжди є в атмосфері. Тому срібні контакти не рекомендовано застосовувати разом із гумою, ебонітом та іншими матеріалами, що містять сірку. Наявність вологи також прискорює перебіг реакції.



Рисунок 13.23 – Роз'єм ATIS BNC (срібло) для передачі відео по коаксіальному кабелю

13.8.3 Платина

Платина (Pt) – сріблясто-білий метал, що практично не сполучається з киснем і дуже стійкий до хімічних реагентів, $t_{пл} =$

+1773,5 °С, питомий опір: $\rho = 10,6 \times 10^{-8}$ Ом·м. Платина чудово піддається механічному обробленню, витягується в дуже тонкі нитки й стрічки. На відміну від срібла, платина не утворює сірчистих плівок при взаємодії з атмосферою, що забезпечує платиновим (як і золотим) контактам стабільний перехідний опір. Платину застосовують для виготовлення термопар, розрахованих на робочі температури до +1600 °С (у парі зі сплавом платинородієм). Через малу твердість її іноді використовують для контактів у чистому вигляді, але вона є основою для деяких контактних сплавів. Найбільш поширені сплави платини з іридієм – вони не окиснюються, мають високу твердість, мале механічне зношення, однак дорогі. Їх застосовують тоді, коли треба забезпечити високу надійність контактів.



Цінність цього металу полягає в тому, що аналогів йому в медицині не існує. З платини, приміром, виготовляють спеціальні хірургічні інструменти, які можна стерилізувати полум'ям спиртового пальника. При такій обробці вони, на відміну від

виготовлених з інших металів, не окислюються. Платина може використовуватися також у стоматології, кардіології та слухопротезування. Часто її застосовують як напилювач при виготовленні інструментів, призначених для лікування зубів. В кардіології та слухопротезуванні використовуються електроди, виготовлені зі сплаву платини з іридієм. Також платина використовується для виготовлення різних ювелірних виробів, зубних протезів, шприців, голок, протезів тощо.

Хоч платина дуже схожа на срібло, але на відміну від останнього платина тугоплавкий, кислотостійкий, стійкий до

корозії метал, завдяки чому й отримала широке застосування в різних галузях промисловості, для виробництва конденсаторів, резисторів, перемикачів, роз'ємів в різних приладах і обладнанні. Вчені порівнюють платину з сіллю, без неї неможливо обійтися в електротехніці, радіотехніці, в точному приладобудуванні, в авіакосмічній промисловості. Практично жодна сучасна технологія не може існувати без Pt.

13.8.4 Паладій

Паладій (Pd) – важкий сріблястий метал, за деякими властивостями подібний до платини й часто є її замінником, тому що дешевший у 4–5 разів.

Метал виділив з руди платинової в 1803 році англійський хімік В. Волластон. Паладій використовують у виробництві таких радіодеталей, як конденсатори, реле, контакти, мікросхеми. Паладій в мікросхемах і конденсаторах знаходиться в вигляді паладієво-платиновий сплав. Цей вибір обумовлений тим, що будь-яка деталь повинна стабільно функціонувати в будь-якому режимі, навіть при високих температурах. У деяких мікросхемах метал використовується і в чистому вигляді. Сучасна промисловість, особливо радіоелектронна, авіакосмічна, хімічна, військова активно застосовують даний елемент. Проводяться дослідження з розширення галузі використання паладію.

Використання паладію в електровакуумній техніці обумовлене його здатністю активно поглинати водень. Останній, на відміну від інших газів, дифундує в паладій, а потім знову виділяється в чистому вигляді під час нагрівання паладію у вакуумі до температури +350–500 °С. Виділеним із паладію чистим воднем наповнюють деякі типи газорозрядних приладів.

Паладій та його сплави зі сріблом і міддю застосовують як контактні матеріали. У відпаленому стані паладій має дуже хороші механічні властивості: межа міцності на розтяг – приблизно 200 МПа, відносне подовження при розриві – до 40 %, температура плавлення +1554 °С. Паладій добре полірується, не тьмяніє, не схильний до корозії, але легше піддається хімічному впливу. Порівняно з іншими платиновими металами менш стійкий до дії окисників, розчиняється в суміші нітратної і хлоридної кислот.

Зростання автомобільного парку та промислової діяльності ставить



виклик у забезпеченні чистого довкілля та збереженні здоров'я населення. Виробники автомобілів прагнуть відповідати дедалі суворішим вимогам щодо викидів, паладієве покриття стало популярним вибором

для використання у виробництві каталітичних нейтралізаторів. Під час проходження вихлопних газів через каталітичний нейтралізатор, шкідливі компоненти зазнають каталітичного окиснення або редукції. Наприклад, оксиди азоту перетворюються на безпечні азот (N_2) та воду (H_2O), а вуглеводні згорають до води та вуглекислого газу (CO_2). Таким чином, каталітичний нейтралізатор допомагає значно знизити рівень шкідливих викидів у повітря, покращуючи якість навколишнього середовища.

13.9 Метали та сплави різного призначення

13.9.1 Залізо

Залізо (Fe) – блискучий, сріблясто-сірий, важкий метал, $t_{пл} = +1538$ °С. Залізо електропровідне, але порівняно з міддю та алюмінієм має вищий питомий опір (приблизно $\rho = 0,1$ мкОм·м),

теплопровідне, досить пластичне. Його легко кують, штамнують, витягують у дріт і вальцюють у тонкі листи.



Рисунок 13.24 – Шматок заліза високої (99,97 %) чистоти

Залізо – один із металів, який найбільше використовують, на нього припадає до 95 % світового металургійного виробництва. Є основним компонентом сталі та чавуну – найважливіших конструкційних матеріалів.

Характерною рисою заліза й інших феромагнітних металів і сплавів є нелінійна залежність питомого опору від температури (рис. 13.25). Ця особливість, обумовлена зміною спонтанної намагніченості в міру наближення до температури Кюрі (T_K), вище якої феромагнітні властивості відсутні. При дуже низьких температурах усі спінові магнітні моменти атомів у феромагнітних металах орієнтовані паралельно. Завдяки такому упорядкованому, періодичному розташуванню вони не викликають розсіювання електронів, що рухаються під дією електричного поля. При підвищенні температури спінова упорядкованість порушується, що викликає додаткове розсіювання електронів провідності. Згідно **правила Маттісена**, різні механізми розсіювання дають адитивний вклад у повний опір: $\rho = \rho_T + \rho_d + \rho_m$, де ρ_T , ρ_d – опір, обумовлений розсіюванням

на теплових коливаннях ґратки і на домішках, ρ_m – магнітний вклад в електроопір обумовлений безпорядком в системі спінів.

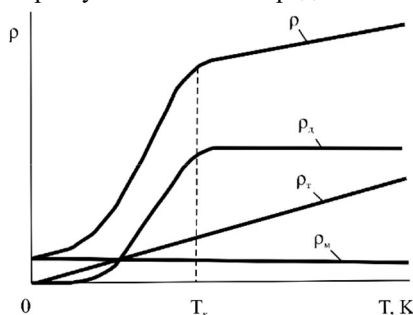


Рисунок 13.25 – Температурна залежність питомого опору феромагнітного металу

Окремі складові питомого опору феромагнітного металу схематично показані на рис. 13.25. Вище температури T_k магнітна складова ρ_m залишається постійною, завдяки чому залежність опору від температури приймає лінійний характер.

Питомий опір заліза, як і інших металів, залежить від вмісту домішок. Як випливає з рис. 13.26, найбільш сильний вплив на електричні властивості заліза робить домішка кремнію. Це використовується при виплавці електротехнічної сталі, що володіє, завдяки підвищеному питомому опору, меншими втратами на вихрові струми в порівнянні з чистим залізом.

Через високу магнітну проникність у залізі й сталях помітно проявляється скін-ефект, навіть у полях промислової частоти.

У сухому повітрі за звичайної температури залізо досить стійке, але у вологому повітрі швидко окиснюється, укриваючись товстим шаром іржі. Тому чисте залізо має досить обмежене застосування. Його використовують при виготовленні сердечників електромагнітів та якорів електромашин, як

каталізатор хімічних процесів, в електровакуумних приладах для виготовлення анодів та екранів, що працюють за температур понад $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому газовиділення із заліза мале і не порушує нормальну експлуатацію приладів.

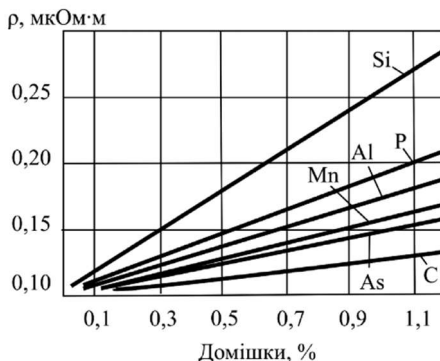


Рисунок 13.26 – Залежність питомого опору заліза від вмісту домішок

13.9.2 Сталь

Сталь (кріця) – сплав заліза (металу) та вуглецю (неметалу), якого в сплаві від 0,025 до 2,24 %. Крім вуглецю, у сплаві містяться інші елементи (легувальні), які додають для отримання тих чи тих властивостей. Технічними сортами є: *маловуглецева* сталь, вміст вуглецю становить 0,01–0,1 %, у *конструкційній* сталі вуглець міститься в кількості 0,1–0,7 %, а в *інструментальній* та *спеціальній (легованій)* сталі – 0,7–1,7 %. Сталь як найбільш дешевий і доступний метал становить інтерес і як провідниковий матеріал. Для виготовлення сталевих проводів застосовують сталь із вмістом вуглецю 0,1–0,15 %. Для захисту від атмосферної корозії сталеві дроти покривають тонким шаром (0,016–0,020 мм) міді або цинку. У лініях електропередачі зазвичай застосовують багатодотові проводи –

сталеалюмінієві. Одно- або багатодровтовий сталевий оцинкований дріт використовують як серцевину (для підвищення механічної міцності на розрив), обвиту алюмінієвими дротами.



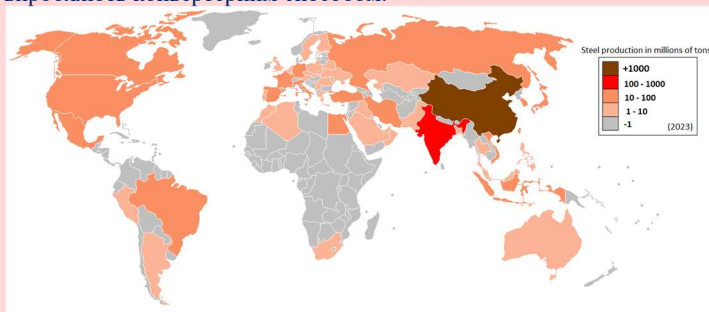
Рисунок 13.27 – Провід сталеалюмінієвий АС

Сталеалюмінієві проводи широко використовують у ЛЕП напругою 110 кВ і вище, їхній переріз досягає 600–700 мм². Сталеві проводи або шини прямокутного перерізу застосовують також як серцевину в біметалевих проводах, забезпечуючи значну економію провідникової міді.



Рисунок 13.28 – Приклади виробів зі сталі: опора ЛЕП, сталевий міст, сталевий посуд і кухонні прилади

Залежно від способу окиснювання вуглецю є різні способи перероблення чавуну на сталь: конверторний, мартенівський і електротермічний. До фінансової кризи в 2008 році Україна залишалася однією з небагатьох країн, де широко використовували мартенівський спосіб виплавляння сталі, що є досить енергозатратним та екологічно шкідливим. Наразі більшість мартенівських печей в Україні виведено з експлуатації, а ті що лишилися, невдовзі також будуть закриті. Таким чином зараз в Україні, як і в усьому світі, переважну більшість сталеву продукцію виробляють конвертерним способом.



Країни-виробники сталі у 2023

Сталь легко намагнічується та розмагнічується. Тому її використовують для виготовлення магнітопроводів електромашин, електроапаратів і трансформаторів, електромагнітів (електротехнічна сталь). Залежно від потрібних властивостей електротехнічна сталь містить різну кількість кремнію, який підвищує її електричний опір, зменшує питомі втрати енергії (на гістерезис і вихрові струми), але знижує індукцію насичення та пластичність.

13.9.3 Чавун

Чавун – це сплав заліза з вуглецем із масовою часткою вуглецю від 2,14 до 6,67 %. Також у чавуні є кремній, манган, сірка, фосфор та інші компоненти.

Характеристики сплаву формуються ще на стадії виробництва. Залежно від параметрів протікання евтектичного перетворення чавуни бувають сірими (вуглець у вигляді графіту), білими (вуглець у вигляді цементиту) і половинчастими. Розмір й конфігурація графітових вкраплень визначають марки чавуну та їх застосування. За формою графітних включень вони поділяються на чавуни з пластинчастим, кулястим, вермікулярним і пластівчастим графітом, а за видом металевої основи – на перлітні, перліто-феритні, феритні, аустенітні, бейнітні та мартенситні. Крім вуглецю в чавуні присутні: сірка – 0,02-0,2%; кремній – 0,5-3,6%; марганець – 0,2-1,5%; фосфор – 0,04-1,5%. Залежно від змісту додаткових добавок чавуни поділяють на нелеговані та леговані. До легованих відносяться сплави, в які для створення специфічних властивостей додані такі елементи, як нікель, хром, мідь, алюміній, титан, ванадій, вольфрам, молібден та ін. В свою чергу леговані чавуни класифікують відповідно до основного легуючого на хромисті, алюмінієві, нікелеві тощо.



Купол Капітолію США – купол, розташований над Капітолієм Сполучених Штатів Америки, який досягає 88 метрів (288 футів) у висоту і 29 метрів (96 футів) у діаметрі. Купол був спроектований Томасом У. Уолтер і побудований в 1855-1866 рр. Матеріалом куполу служить не камінь, а саме чавун, ретельно пофарбований, щоб зробити його схожим на той камінь, з якого збудовано основну будівлю Капітолію.

У чавуні вміст вуглецю перевищує 2,14%, чим і обумовлена крихкість матеріалу. При подальшій переробці в сталеплавильних печах вміст вуглецю скорочується, і в результаті виходить сталь. Найширше чавун застосовують у машинобудуванні для виготовлення різноманітних конструкційних деталей, для провідникових виробів чавун не застосовують.

13.9.4 Нікель

Нікель (Ni) – сріблясто-білий метал із густиною, що дорівнює густині міді, широко застосовують в електровакуумній техніці як матеріал для арматури електронних ламп, деяких типів катодів, так як його досить легко одержати в чистому вигляді (99,99% Ni) і ввести в нього спеціальні легуючі присадки кремнію, марганцю та ін. Нікель одержують із його сірчистих чи кисневих сполук металургійним шляхом і піддають електролітичному рафінуванню. Дуже чистий порошкоподібний нікель можна одержати шляхом термічного розкладання карбонілу нікелю при температурі порядку 220°C.

До позитивних властивостей нікелю варто віднести достатню механічну міцність його після відпалу при великому відносному видовженні ($\sigma_p = 400\text{--}600$ МПа, $\Delta l/l = 35\text{--}50\%$). Він навіть у холодному стані легко піддається усім видам механічної обробки: куванню, пресуванню, прокатці, штампуванню, волочінню. З нікелю можна виготовити різні за розмірами і складні по конфігурації вироби з строго витриманими допусками. З усіх домішок найбільш шкідливою виявляється сірка, що різко знижує механічну міцність матеріалу.

Цінною властивістю нікелю є хімічна стійкість, особливо до розчинів лугів, що не діють на нього навіть у нагрітому стані.

На рис. 13.29 показана температурна зміна питомого опору нікелю. Чітко помітний злам графіка залежності в області точки Кюрі ($T_K = 357^\circ\text{C}$).

Крім застосування в електровакуумній техніці нікель використовують як компонент деяких магнітних і провідникових сплавів, а також для захисного покриття виробів із заліза.

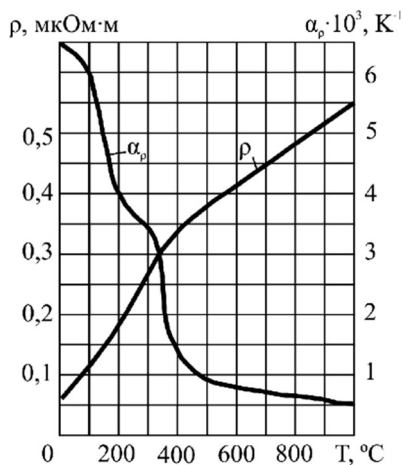


Рисунок 13.29 – Залежність питомого опору і температурного коефіцієнта питомого опору від температури для нікелю

13.9.5 Олово

Олово (*Sn*) – легкий метал сріблясто-білого кольору з блискучою поверхнею, ковкий і пластичний, має добру корозійну стійкість у середовищі органічних кислот і солей. Сучасна промисловість випускає різноманітну продукцію з олова. Найбільш поширені дріт, прутки й аноди.

У виробництві електронних приладів, де дуже часто для з'єднання елементів застосовують паяння, олово входить до

складу багатьох низькотемпературних припоїв. Метал є складовою великої кількості сплавів із міддю. Серед найвідоміших сплавів – бабіти, бронзи. Оловом також покривають мідні жили проводів, де воно захищає мідь від негативного впливу сірки, що міститься в гумовій ізоляції.



Рисунок 13.30 – Олово

Загалом цей метал є безпечним для організму людини. Однак вдихати пари олова або його аерозольних часточок небезпечно. Це може викликати захворювання легень. Крім того, при роботі зі сполуками олова слід використовувати засоби захисту. Велику частину сплавів олова використовують для виготовлення підшипників, фольги, бронзи, проводів тощо. Олово у вигляді фольги дуже поширене для виготовлення конденсаторів, посуду, виробів мистецтва та органічних труб. Крім того, цей метал використовують для нанесення антикорозійного покриття на залізні вироби. При обробці оптичних дзеркал використовують оксид олова. Також цей метал незамінний при виробництві золотистих фарб та барвників для шерсті.

Цікаво, що при зниженні температури повітря до 0 градусів біле олово стає сірим. Крім того, об'єм цієї речовини збільшується майже на четвертину. У такому разі олов'яний виріб тріскається та перетворюється у сірий порошок. Перехід білого β -олова в сіре α -олово супроводжується зміною об'єму на 26 %. Під впливом внутрішніх напружень, що виникають при цьому, компактний метал перетворюється в порошок, який і називають «олов'яна чума». Найшвидший перехід з білого олова в сіре відбувається при -48°C .



β - (ліворуч) і α -Олово (праворуч)

Вважається, що «олов'яна чума» стала причиною загибелі британської експедиції Терра Нова до Південного полюса на чолі з Робертом Скоттом в 1911-1912 роках. Долаючи суворий шлях з



антарктичних льодах полярники залишали склади із запасами пального і продовольства.

Експедиція почала довгий шлях додому, але, дістаючись «схованок», змучені люди все частіше

виявляли каністри з паливом порожніми. Найбільш правдоподібною причиною цього нещастя сучасні історики вважають «олов'яну чуму», оскільки пайку швів на той час робили з олова, і, швидше за все, в умовах полярних морозів каністри потекли. Нестача палива стала справжньою катастрофою, і полярники загинули, не зумівши подолати шлях від підкореного ними полюса.

13.9.6 Свинець

Свинець (Pb) – важкий, м'який, ковкий метал сірого кольору. Хімічно малоактивний, завдяки чому його використовують для виготовлення кабельних оболонок. В електротехнічній і приладобудівній галузях свинець відіграє важливу роль як компонент припійних сплавів, досить поширених завдяки низькій вартості, зручності застосування та хорошим фізичним характеристикам. Метал широко використовують для захисту від гамма-випромінювання.

Основне застосування свинець у цей час знаходить у виробництві свинцево-кислотних акумуляторних батарей для автомобільної промисловості. Оскільки свинець добре поглинає гамма- та рентгенівське випромінювання, він використовується для радіаційного захисту в рентгенівських установках, ядерних реакторах та інших джерел іонізуючої електромагнітної радіації. Крім того, свинець розглядається як теплоносій у проєктах перспективних ядерних реакторів на швидких нейтронах. Значне застосування знаходять сплави свинцю. Припій, що містить 63% Sn та 37% Pb, застосовують в електротехніці. Сплави свинцю з сурмою використовують у виробництві куль та друкарського шрифту, а сплави свинцю, сурми та олова – для фігурного лиття та підшипників. Сплави свинцю із сурмою зазвичай застосовують для пластин електричних акумуляторів.



Рисунок 13.31 – Свинцева оболонка в кабелі

13.10 Неметалеві провідникові матеріали

З твердих неметалевих провідникових матеріалів виготовляють електротехнічні вироби: щітки електричних машин і генераторів, електроди для прожекторів, електроди для дугових електричних печей (завдяки високій електропровідності й хімічній стійкості до практично будь-яких агресивних водних розчинів), розрядники для телефонних мереж і мікрофони, що містять вугільний порошок, численні струмопровідні клеї, пасти, покриття, емалі, а також високоомні недротяні резистори.

Вугільні матеріали використовують для виготовлення щіток, які призначені для утворення ковзного контакту між нерухомою частиною електричної машини й обертовою частиною, а також для підведення (відведення) струму до колектора або контактних кілець.

Природний графіт – одна з алотропних форм чистого вуглецю. У природі вуглець трапляється у двох основних видах: графіт та алмаз (рис. 13.32). Їхня хімічна формула ідентична, але фізичні властивості радикально відрізняються. Саме будова кристалічної ґратки впливає на ці характеристики.



Рисунок 13.32 – Вуглець у двох основних видах: графіт та алмаз

Природний графіт має шарувату структуру. Його фізичні властивості в напрямку шарів і перпендикулярно до них різні,

тому він характеризується анізотропією як електричних, так і механічних параметрів. У напрямку шарів електропровідність графіту має металічний характер ($\rho = 8 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$). Графіт – темно-сірий мінерал, має металевий блиск, добре проводить електричний струм і тепло, дуже м'який, тому легкий у механічному обробленні. Окремі частинки графіту легко відділяються й ковзають по його поверхні. Цю властивість використовують у техніці для виготовлення сухих змазок на основі графіту. Температура плавлення варіює в діапазоні $+3845\text{--}3890^\circ\text{C}$. Графіт – інертна речовина, не розчиняється хімічно активними компонентами. Це можливо тільки в разі потрапляння його в середовище розплавленого металу з високою точкою кипіння. У природі графіт ніколи не трапляється в чистому вигляді.

Його добувають, збагачуючи спеціальні руди. Широко використовують в технології напівпровідникових матеріалів для виготовлення різних нагрівачів та екранів, човників, тиглів, касет тощо. Заготовки графіту мають вигляд брусків і пластин.

Від режиму відпалу залежить форма, у якій вуглець знаходиться у виробі. За високих температур відпалу ($+2400\text{--}2800^\circ\text{C}$) вуглець штучно перетворюється на графіт, розміри кристалів графіту збільшуються, підвищується провідність матеріалу та знижується його твердість. Цей процес називають графітуванням.

Штучний графіт – вуглецевий матеріал, що має кристалічну структуру графіту. Його отримують шляхом кристалізації аморфного вуглецю за температури $+2500^\circ\text{C}$. У багатьох випадках штучному графіту віддають перевагу перед природним завдяки чистоті складу.

Для різних марок щіток характерні певні значення питомого опору, допустимої густини струму, лінійної швидкості на колекторі, коефіцієнта тертя тощо. Розрізняють такі щітки: графітні, вугільно-графітні, електрографітні, металографітні з домішками міді.

Графітні щітки виготовляють з природного графіту. Вони працюють безшумно. Застосовують при швидкостях 20–40 м/с, їхній питомий електричний опір становить: $\rho = 8\text{--}30 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.



Рисунок 13.33 – Щітки графітні

Вугільно-графітні щітки виготовляють із графіту, коксу й зв'язувальних смол. Вони мають підвищену твердість, механічну міцність та абразивність. Застосовують при швидкостях 10–40 м/с. Їхній питомий опір: $\rho = 20\text{--}60 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

Електрографітні щітки виготовляють із графіту, коксу, сажі та зв'язувальних смол. Після пресування та випікання щітки графітизують за температури $+2500^\circ\text{C}$ для збагачення їх графітом і забезпечення підвищеної механічної міцності. Питомий опір: $\rho = 2\text{--}75 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Використовують в електричних машинах із важкими умовами комутації струму. Допустимі колові швидкості – 40–90 м/с.

Металографітні щітки виготовляють із порошків графіту й міді, інколи з домішками порошку олова та срібла. Вони мають низький питомий опір: $\rho = 0,3\text{--}0,8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Застосовують при швидкостях 20–25 м/с.

Сажа – це дрібнодисперсний вуглець із домішками смолистих речовин (рис. 13.34). Її використовують під час виробництва стрижневих електродів. Сажу та графіт змішують із в'язкими матеріалами (кам'яновугільна смола, а інколи рідке скло). Отриману масу прочавлюють крізь стальний мундштук або пресують у відповідних прес-формах і піддають термообробленню. Для сумішей характерний широкий діапазон питомого опору: $\rho = 0,01\text{--}400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.



Рисунок 13.34 – Сажа

Відповідно до вимог, що висуваються до ізолювання та екранування кабелів і проводів, вуглецева сажа повинна легко та швидко диспергуватися в поліетилені та різних еластомерах, демонструвати дуже низькі рівні іонних домішок та забезпечувати цільову провідність для мінімізації діелектричного напруги між провідником та кабельною ізоляцією.

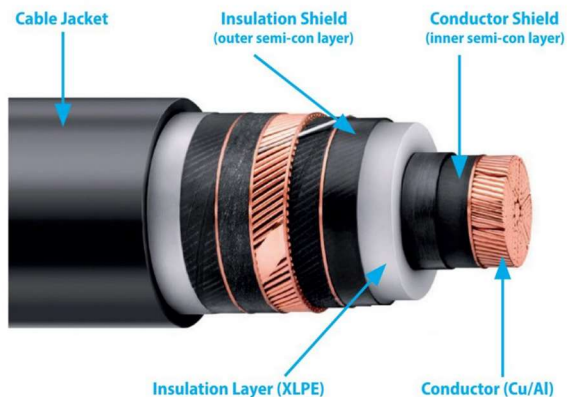


Рисунок 13.35 – Силовий кабель

Компанія Orion Engineered Carbons S.A. (США), провідний виробник технічного вуглецю, представила нову вуглецеву сажу, призначену спеціально для використання у виробництві матеріалів для екранів по ізоляції та жилі кабелів і проводів, а також продукт під назвою PRINTEX карма 70 beads – електропровідну сажу в гранулах для інжекційного формування пластмас застосування у кабельному виробництві.

У пластмасових деталях, отриманих інжекційним формуванням, універсальна електропровідна сажа в гранулах PRINTEX карма 70 особливо підходить для компаундів і продуктів кінцевого застосування, які повинні мати провідність та антистатичні властивості. Гранули PRINTEX карма 70 демонструють чудові результати майже у всіх провідних продуктах та процесах. Вони можуть використовуватися в поліпропілені, полікарбонаті та його сполуках, широкому спектрі конструкційних полімерів, поліолефінах, кополімерах стиролу, полівінілхлориді та інших типах полімерів. Ці гранули також

мають відмінні властивості дисперсії і надають компаундам необхідну плинність розплаву і механічну міцність. Завдяки цій електропровідній сажі укладачі термопластичних сумішей можуть домагатися необхідної електропровідності при низьких концентраціях вуглецевої сажі, а виробники можуть забезпечувати оптимальний баланс між електропровідністю та механічними властивостями своїх продуктів.

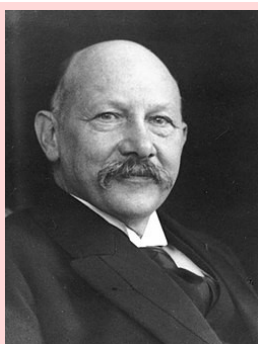
Питання для самоперевірки:

1. Які властивості міді забезпечують її високу електропровідність?
2. Що таке латунь, і в яких галузях вона застосовується?
3. Чим відрізняється нейзильбер від інших сплавів міді?
4. Які переваги має алюміній порівняно з міддю у провідникових матеріалах?
5. Які характеристики роблять вольфрам придатним для виготовлення ниток розжарювання?
6. Чому для резистивних матеріалів використовують манганін і константан?
7. Які сплави алюмінію найчастіше використовуються, і для чого?
8. Для чого в електротехніці застосовують дорогоцінні метали?
9. У чому особливість застосування хромальних сплавів?
10. Які неметалеві провідникові матеріали найбільш поширені?

РОЗДІЛ 14. НАДПРОВІДНИКИ ТА КРІОПРОВІДНИКИ

14.1 Надпровідники

Надпровідники – це матеріали, які при певній температурі починають проводити електричний струм без опору, а отже без виділення тепла. Втім усі підтверджені надпровідники проявляють цю властивість лише при низьких температурах або при екстремальних тисках – або при дії обох чинників.



У 1911 р. нідерландський фізик **Гейке Камерлінг-Оннес** (нід. Heike Kamerlingh Onnes) виявив, що при низьких температурах електричний опір деяких металів повністю зникає. Це явище він назвав надпровідністю і припустив, що пояснення надпровідності дасть квантова теорія. Камерлінг-Оннес був удостоєний Нобелівської премії з фізики 1913 року «за дослідження властивостей речовини при низьких температурах, які привели до виробництва рідкого гелію». Камерлінг-Оннес здобув загальне визнання і заслужив

почесне прізвисько «Пан Абсолютний Нуль»: брав діяльну участь у розробці методів використання низьких температур: зберігання харчових продуктів; створенні вагонів-рефрижераторів і виробництві льоду.

У 1957 р. Джон Бардін, Леон Купер і Дж. Роберт Шріффер запропонували теоретичне пояснення явища надпровідності.

Критичну температуру охолодження, за якої виникає перехід речовини в надпровідний стан, називають **критичною температурою переходу** $T_{\text{кр}}$ (К).

Явище надпровідності має й зворотний характер: за підвищеної температури надпровідність зникає, і речовина переходить у нормальний стан із кінцевим значенням питомої провідності γ .

Відомо 35 надпровідникових металів і понад 1000 сплавів і хімічних сполук різноманітних елементів. Надпровідниками можуть бути не тільки сполуки і сплави металів, яким характерна надпровідність, але й сполуки, до складу молекул яких входять винятково атоми елементів, що не є надпровідниками. На рис. 14.1 показано зміну опору при глибокому охолодженні зразків ртуті і платини, що не належить до надпровідників (по осі абсцис відкладена абсолютна температура в Кельвінах, а по осі ординат – відношення опору зразка при даній температурі R_T до опору R_{273} при температурі $T = 273 \text{ K} = 0^\circ \text{C}$).

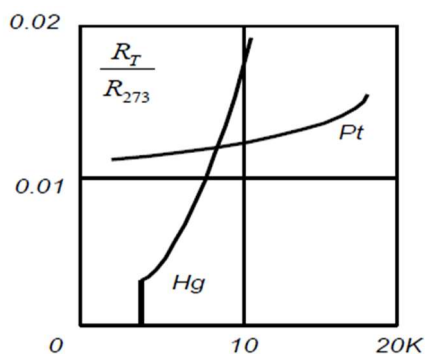


Рисунок 14.1 – Зміна опору зразків ртуті і платини при глибокому охолодженні

Явище надпровідності пов'язане з тим, що одного разу наведений у надпровідному контурі електричний струм буде тривалий час (упродовж років) циркулювати по цьому контуру без будь-якого підведення енергії ззовні. Такий надпровідний контур створює в просторі магнітне поле, подібне до постійного магніту, що не вимагає живлення від джерела струму.

Однак на практиці з'ясувалося, що надпровідність порушується не тільки в разі підвищення температури до значень, що перевищують $T_{кр}$, а й під час виникнення на поверхні надпровідника магнітного поля з магнітною індукцією, що перевищує індукцію переходу $B_{кр}$. Найбільша можлива температура переходу (критична температура) певного надпровідникового матеріалу відповідає критичній магнітній індукції і навпаки.

Розрізняють такі надпровідники: **I роду** – перехід у стан надпровідності під час охолодження відбувається стрибкоподібно; **II роду** – перехід у стан надпровідності під час охолодження відбувається поступово; також у них існує проміжний стан між нижнім і верхнім значеннями критичної магнітної індукції переходу, що відповідає значенням температур $T < T_{кр}$ (рис. 14.2).

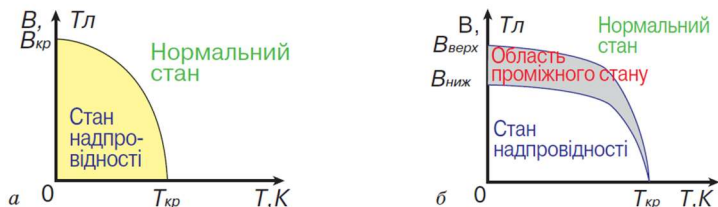


Рисунок 14.2 – Залежність величини магнітної індукції від температури: а) для надпровідників I роду; б) для надпровідників II роду

Порівняно з надпровідниками I роду надпровідники II роду мають вищі значення як критичної температури переходу $T_{кр}$, так і критичної магнітної індукції $B_{кр}$. Останній фактор є визначальним для широкого застосування надпровідників у сучасних електричних апаратах (табл. 14.1).



Основні роботи Вальтера Фріца Майснера (нім. Fritz Walther Meißner) присвячені фізиці низьких температур. Він відкрив надпровідність багатьох сплавів та з'єднань. **Ефект Майснера** – це явище швидкого затухання магнітного поля в надпровіднику. Ефект Майснера руйнується в сильних магнітних полях. В залежності від типу надпровідника надпровідний стан при цьому або зникає повністю (так звані надпровідники першого роду), або ж надпровідник розбивається на нормальні й надпровідні області (надпровідники другого роду). Ефектом Майснера пояснюється левітація надпровідника над сильним магнітом (або магніту над надпровідником).

Таблиця 14.1 – Параметри надпровідникових матеріалів

Надпровідники	Найбільше значення температури переходу $T_{кр}$, К	Найбільше значення магнітної індукції переходу $B_{кр}$, Тл
Елементарні I роду		
Алюміній Al	1,2	0,010
Олово Sn	3,7	0,031
Ртуть Hg	4,2	0,041
Тантал Ta	4,5	0,083
Свинець Pb	7,2	0,080
Елементарні II роду		
Ніобій Nb	9,4	0,195
Ванадій V	5,3	0,13
Складні сплави II роду		
44% Nb + 56% Ni	8,7	12
50% Nb + 40% Zr	9,5	11
Складні сполуки II роду		
Ванадій галід V_3Ga	14	50
Ніобій станид Nb_3Sn	18	22

У 1933 р. німецькі фізики В. Майснер і Р. Оксенфельд зробили нове фундаментальне відкриття: надпровідники під час переходу з нормального стану в надпровідний стають ідеальними діамagnetиками, тобто їх відносна магнітна проникність μ стрибком зменшується від 1 до 0. Тому зовнішнє магнітне поле не може проникнути в надпровідниковий матеріал, надпровідники здатні відштовхувати його (рис. 14.3).

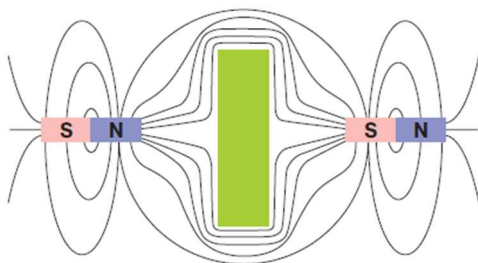


Рисунок 14.3 – Огинання надпровідника силовими лініями магнітного поля

За принципом механічного виштовхування надпровідників із магнітного поля побудовано надшвидкісний залізничний транспорт на «магнітній подушці».

У 1986 році вчені **Йоханнес Георг Беднорц** (нім. Johannes Georg Bednorz) і **Карл Олександр Мюллер** (нім. Karl Alexander Müller) виявили матеріали з критичною температурою поблизу точки кипіння рідкого азоту (-196 градусів за Цельсієм), і були удостоєні Нобелівської премії з фізики в 1987 році «За важливий прорив у фізиці, що виразився у відкритті надпровідності в керамічних матеріалах» (*For their important break-through in the discovery of superconductivity in ceramic materials*)

В даний час проводяться дослідження в області надпровідності з метою підвищення температури $T_{\text{кр}}$ (**високотемпературна надпровідність**). Історично граничною

величиною є температура в 30 К, проте низка авторів під високотемпературною надпровідністю має на увазі надпровідники з критичною температурою вище точки кипіння азоту (77 К або -196°C).



Маглев – поїзд на магнітній подушці. Він піднімається в повітря за рахунок дії потужного магнітного поля. Так як тертя при русі відсутнє, це дозволяє поїздам рухатися максимально швидко. Китайська компанія CRRC створила маглев нового типу (поліпшили рекорд на 10 км/год). Вдосконалені технології дозволили транспорту майбутнього розвинути швидкість 600 км/год, однак перших пасажирів він зможе перевозити лише в 2027 році – раніше не вдасться побудувати лінію для руху транспорту майбутнього. На разі в Китаї повноцінно працюють маглеви на швидкісній лінії, яка з'єднує центр Шанхаю з аеропортом (пасажирські потяги на магнітній подушці розганяються до 430 км/год).



В 2024 році Китай продемонстрував нову розробку у сфері високошвидкісного транспорту: поїзд на магнітній подушці, що здатний розвивати швидкість до 1000 км/год. Випробування пройшли у вакуумній трубі, що дозволило зменшити тертя і збільшити ефективність системи.

Так звані високотемпературні надпровідники можуть бути охолоджені рідким азотом, тому існує великий спектр застосувань надпровідності, наприклад, в обмежувачах струму, електродвигунах і генераторах.

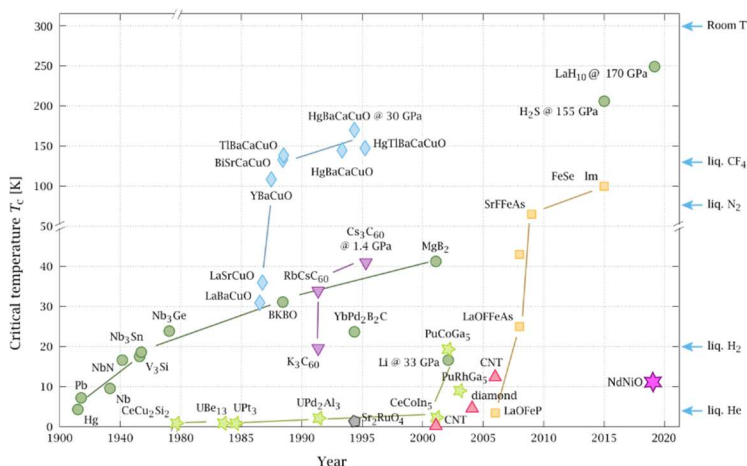


Рисунок 14.4 – Речовини та їхня критична температура, відкриті з часом (1900-2020 роки). Високотемпературні надпровідники починаються близько 77 К

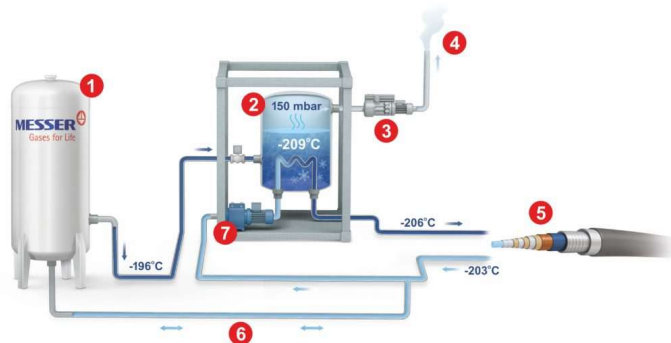


Рисунок 14.5 – Система для охолодження надпровідних електричних кабелів: 1 – ємність для рідкого азоту, 2 – субкулер, 3 – вакуумний насос, 4 – азот, 5 – надпровідник, 6 – лінія компенсації, 7 – насос рідкого азоту

Установка для охолодження надпровідних електричних кабелів складається в основному з субкулера, ланцюга охолодження та ємності для рідкого азоту. Зовнішня частина субкулера обладнана клапаном розширення рідкого азоту із контейнера для зберігання. Тут азот випаровується, створюючи цим холод у субкулері. Якщо азот надходить безпосередньо в атмосферу із зовнішнього боку субкулера, він випаровується в точці кипіння (-196 градусів за Цельсієм). Такої температури охолодження недостатньо, тому вакуумний насос підключається до субкулера, так що азот випаровується у вакуумі (при 150 мбар). Таким чином, температура випаровування може бути знижена до -209 градусів за Цельсієм. Подальше зниження температури неможливе, оскільки азот замерзає при температурі -210 градусів за Цельсієм.

Усередині субохолоджувача знаходиться теплообмінник. Завдяки цьому рідкий азот прокачується (діючи як холодоагент), який тим самим охолоджується до температури -206 градусів за Цельсієм. Таким чином, охолодження та трансмісія холоду здійснюються одним і тим самим обладнанням.

Переохолоджений рідкий азот в теплообміннику протікає через кабель надпровідника, щоб розсіювати тепло, що надійшло. Азот трохи нагрівається, але завжди залишається рідким і не випаровується. Потім він повертається до насоса, а потім до субкулера, де відбувається переохолодження до температури охолодження -206 градусів за Цельсієм. Це створює замкнутий контур охолодження, який з'єднаний через лінію компенсації з резервуаром рідкого азоту, щоб компенсувати коливання об'єму та тиску.

Іншими областями застосування є живлення електролізерів у хімічній промисловості або при виробництві алюмінію.

Новою технологією для цих матеріалів є передача електричної енергії через силові кабелі без втрат. Це велика перевага, особливо в великих містах і промислових районах, оскільки прокладка звичайного мідного кабелю часто призводить до труднощів. Крім того, кабелі з високотемпературних надпровідників не генерують магнітні поля, що також більше спрощує інсталяцію. Завдяки високій пропускну здатності, також з'являється можливість для транспортування великої кількості енергії при більш низькій напрузі. Це дозволяє зберегти підстанції та уникнути електричних втрат в трансформаторах. Хоча використання високотемпературних надпровідників у кабелях ЛЕП дозволяє передавати струм без втрат, досі ця технологія залишається експериментальною. Іншими областями застосування є живлення електролізерів у хімічній промисловості або при виробництві алюмінію.

Технологія, яка зароджується та обіцяє вирішувати певні завдання, що не досяжні для класичних комп'ютерів, – квантові комп'ютери. Один із провідних підходів до побудови квантових комп'ютерів полягає у зберіганні інформації в петлях з надпровідного матеріалу. Вони охолоджуються майже до абсолютного нуля ($-273,15^{\circ}\text{C}$) всередині дорогих пристроїв, які називаються рефрижераторами розчинення (рис. 14.5).

В даний час робляться величезні кроки для фізичного визначення і реалізації надпровідників при ще більш високих температурах. Багато елементів і сполук, таких як купрати, графен, металевий водень, гідрати і гідриди, випробовуються на високотемпературну надпровідність.

Хоча низькотемпературні вимоги до сучасних надпровідників суттєво обмежують їхнє використання в повсякденному житті, ці матеріали стали повсюдно вивчати в

лабораторіях, де дослідники можуть застосовувати різні методи зниження їхньої температури. Це здійснено, але часто збільшує вартість і складність експерименту.



Нові лінії електропередач обіцяють підвищити обсяг енергії, що передається в 5-10 разів при тій же опорній поверхні і рівні напруги. Їх розробляє американський стартап VEIR, використовуючи надпровідні кабелі та запатентовану систему охолодження, яка забезпечує потужність, що передається, 400 МВт.

На відміну від традиційних кабелів, лінії електропередач VEIR виготовляються з високотемпературних надпровідних стрічок, але головна інновація компанії – система охолодження: у нинішньому вигляді це охолодження азотом, який проходить вакуумно-ізольованими трубками, всередині яких знаходиться надпровідний провід та теплообмінники. Стартап планує запустити першу дослідну лінію у 2026 році. Перший прототип VEIR – високовольтна лінія змінного струму може передавати до 400 МВт енергії при напрузі до 69 кВ. Компанія планує наростити напругу до гігават, а також побудувати лінії постійного струму.

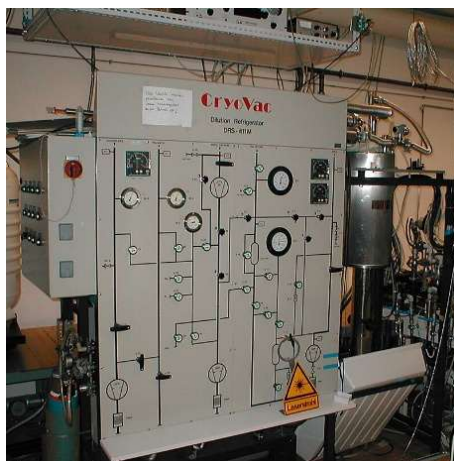


Рисунок 14.6 – Рефрижератор розчинення

Екстремальним прикладом є Великий адронний колайдер, прискорювач у Європейському центрі ядерних досліджень ЦЕРН (від фр. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN), європейській лабораторії фізики елементарних частинок поблизу Женеви в Швейцарії. Щоби протони рухалися по 27-кілометровому колу, адронний колайдер генерує сильні магнітні поля за допомогою надпровідних котушок, які утримуються при температурі лише 1,9 кельвіна ($-271,25^{\circ}\text{C}$). Для цього потрібна кріогенна система, яка містить 96 тонн рідкого гелію, – найбільша з усіх, які існують у світі.



Фізики з Вашингтонського університету та Аргонської національної лабораторії Міністерства енергетики США (DOE) зробили відкриття. Дослідники використовували Advanced Photon Source, щоб перевірити рідкісні

характеристики цього матеріалу, що прокладає шлях до більш ефективних великомасштабних обчислень. Матеріал має потенційне застосування в надпровідних схемах для наступного покоління промислової електроніки.

Дослідники знайшли надпровідний матеріал, який унікально чутливий до зовнішніх подразників, що дозволяє посилювати або пригнічувати властивості надпровідності за бажанням. Це відкриває нові можливості для енергоефективних перемикачів надпровідних схем.

Застосування надпровідникового обладнання та технологій в електроенергетиці забезпечує багато переваг:

- скорочення вдвічі-втричі втрат електроенергії;
- зниження маси й габаритних показників обладнання у 2-4 рази;

- підвищення надійності та подовження терміну експлуатації електрообладнання за рахунок зниження старіння ізоляції;
- підвищення надійності та стійкості роботи енергосистем;
- підвищення рівня пожежної та екологічної безпеки електроенергетики.

Передбачається, що в електроенергетиці відбуватиметься поступова заміна традиційного резисторного обладнання на більш дешеве й компактне надпровідникове, яке істотно надійніше й ефективніше.

14.2 Кріопровідники

Крім явища надпровідності у сучасній електротехніці усе ширше використовується явище **кріопровідності**, тобто досягнення деякими металами досить малої питомої провідності при кріогенних температурах, більш високих, ніж температура надпровідного переходу. Матеріали, що мають особливо сприятливі властивості для застосування їх як провідників в умовах кріогенних температур, називаються **кріопровідниками** або **гіперпровідниками**.

Питомий опір кріопровідника за робочої температури може бути меншим за питомий опір цього ж провідника за нормальної температури в сотні, а в деяких випадках і в тисячі разів. Найчастіше як кріопровідники використовують алюміній, срібло, золото, берилій. Як охолоджувальні агенти застосовують рідкий водень (з урахуванням його здатності утворювати вибухонебезпечну суміш із повітрям) і рідкий азот.

З фізичного погляду явище кріопровідності не подібне до явища надпровідності. Кріопровідники, у яких у разі зміни температури в широких межах значення ρ змінюється плавно (без стрибків), не можна використовувати в ряді пристроїв,

заснованих на тригерному ефекті появи та порушенні надпровідності. Однак застосування кріопровідників у металевих резонаторах НВЧ та інших мікрохвильових приладах істотно підвищує їхні робочі параметри. Якщо не зважати на надпровідність, то за гелієвої температури найменший опір має мідь. Значний інтерес для використання як кріопровідності, крім звичайних провідникових матеріалів, становить берилій. Берилій і його сполуки токсичні; але берилій, охолоджений рідким азотом (77 К), має найменше можливе значення ρ , причому робота з рідким азотом значно простіша, ніж робота з рідким воднем або гелієм.

Робоча температура кріопровідників досягається застосуванням більш висококиплячих і дешевих холодоагентів: рідкого водню або навіть рідкого азоту, це значно спрощує й здешевлює виконання та експлуатацію пристрою. Крім того, у надпровідниковому пристрої, наприклад електромагніті, по обмотці якого проходить сильний струм, накопичується велика енергія. Якщо через випадкове підвищення температури або магнітної індукції хоча б на малій ділянці надпровідникового контуру, надпровідність буде зруйнована, і раптово звільниться велика кількість енергії, що може викликати серйозну аварію. У випадку ж кріопровідникового кола підвищення температури викличе лише поступове зростання опору без ефекту вибуху.

Використання кріопровідників замість надпровідників веде до спрощення та зменшення вартості виконання теплової ізоляції пристроїв, зниження витрат потужності на їхнє охолодження. Для отримання високоякісних кріопровідників потрібні винятково висока чистота металу (відсутність домішок) і відсутність наклепу (відпалений стан). Кріопровідники можуть з успіхом використовуватися для обмоток електричних машин і

трансформаторів, для струмопровідних жил кабелів тощо. У ряді випадків застосування кріопровідників досить перспективно.

Питання для самоперевірки:

1. Поясніть явище надпровідності, хто його відкрив?
2. Які фактори впливають на критичну температуру надпровідників?
3. У чому полягає ефект Майснера?
4. Які основні властивості надпровідників другого роду?
5. Які матеріали належать до високотемпературних надпровідників?
6. Для чого застосовуються надпровідні магніти?
7. Які технічні обмеження використання кріопровідників?
8. Які переваги використання надпровідників у енергетиці?
9. У яких галузях науки і техніки застосовуються кріопровідники?

РОЗДІЛ 15. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

15.1 Основні поняття

Магнітними називають матеріали, які здатні накопичувати, зберігати й трансформувати магнітну енергію; їх застосовують в електротехніці з урахуванням їхніх магнітних властивостей. Такі властивості мають метали: залізо, нікель, кобальт, а також їхні сплави.

Кожна речовина, розміщена в магнітному полі, тією чи іншою мірою набуває магнітного моменту. У магнітній речовині магнітні моменти окремих атомів упорядковані; спонтанний магнітний момент відмінний від нуля. Намагнічування речовини описують такі характеристики: магнітна індукція B , напруженість магнітного поля H , магнітна проникність μ тощо.

Вектор магнітної індукції B характеризує інтенсивність і напрямок магнітного поля; кількісно дорівнює силі, з якою магнітне поле взаємодіє з одиничним елементом струму, розташованим перпендикулярно до вектора індукції; вимірюється в теслах (Тл); залежить від властивостей середовища.

При дослідженні магнітних полів і розрахунку магнітних пристроїв користуються розрахунковою величиною – **напруженістю магнітного поля H** , що кількісно дорівнює індукції магнітного поля у вакуумі; вимірюється в амперах на метр (А/м); не залежить від магнітних властивостей середовища.

Відношення магнітної індукції до напруженості магнітного поля ($B/H = \mu_{\text{абс}}$) називають **абсолютною магнітною проникністю середовища**. Через магнітну постійну проникність здійснюється зв'язок між відносною та абсолютною магнітною проникністю. Відносна магнітна проникність дорівнює:

$$\mu = \frac{\mu_{абс}}{\mu_0}, \quad (15.1)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Криву, що виражає залежність між H і B , називають **початковою кривою намагнічування**. Вона є важливою характеристикою магнітних матеріалів (рис. 15.1).

В області дуже слабких магнітних полів (початок кривих) магнітна індукція зростає лінійно зі зростанням напруженості поля, магнітна проникність залишається постійною; це так звана **початкова магнітна проникність μ_n** , яка характеризує можливість використання матеріалу в слабких магнітних полях у техніці слабких струмів.

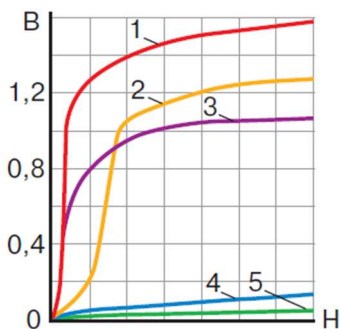


Рисунок 15.1 – Залежність магнітної індукції від напруженості зовнішнього магнітного поля: 1 – залізо особливо чисте; 2 – залізо чисте (99,98 % Fe); 3 – пермалой (78 % Ni); 4 – нікель, 5 – сплав залізо-нікель (26 % Ni)

В області середніх полів магнітна проникність різко зростає і проходить максимум. **Максимальна магнітна проникність μ_{max}** визначає верхню межу використання матеріалу.

В області сильних полів зростання магнітної індукції відбувається дуже сповільнено по пологій прямій – настає насичення.

Розгляньмо хід залежності намагнічування від напруженості зовнішнього магнітного поля. Припустимо, що у вихідному стані зразок матеріалу повністю розмагнічений, тоді його робоча точка знаходиться на початку координат площини H – B . За зростання напруженості магнітного поля H спостерігається зростання індукції B . Після певного моменту індукція зростає слабко, оскільки можливості намагнічування матеріалу вичерпані. При певному значенні напруженості магнітного поля намагніченість зразка досягає максимального значення – магнітного насичення $B_{\text{нас}}$ (червона крива на графіку) (рис. 15.2).

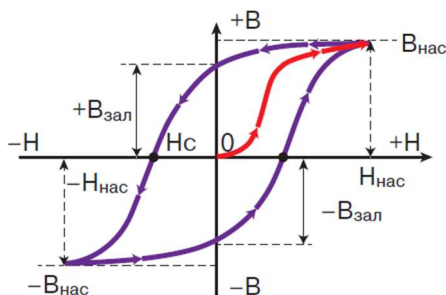


Рисунок 15.2 – Графік намагнічування й розмагнічування речовини

Лінію, по якій переміщується робоча точка намагніченого матеріалу після зняття зовнішнього поля, називають **кривою повернення** (ліва синя крива на графіку). Траєкторії кривих намагнічування (червона) і розмагнічування (синя) не збігаються. Це явище називають **гістерезисом** (запізненням, відставанням зміни магнітної індукції B від зміни напруженості

поля H). У місцях перетину синьої кривої з осями координат визначають характерну точку зі значенням індукції $B_{\text{зал}}$ – **залишкова індукція**. Це намагніченість (індукція), яку має зразок після зняття зовнішнього магнітного поля. Щоб зняти цей залишковий магнітний момент, необхідно докласти поле з протилежним знаком ($-H$). Величину напруженості магнітного поля, яка необхідна для повного розмагнічування матеріалу, тобто для зміни магнітної індукції від залишкової до нуля, називають **коерцитивною силою** H_c .

Під час подальшого збільшення магнітного поля відбудеться перемагнічування зразка в протилежному напрямку. При певному значенні напруженості поля настає насичення матеріалу, але вже протилежного знаку.

Під час зміни напруженості магнітного поля від $-H_{\text{нас}}$ до $+H_{\text{нас}}$ залежність індукції B від напруженості поля H зображено ще однією синьою кривою (праворуч). Сині криві утворюють **петлю гістерезису** – це замкнена крива зміни магнітного моменту зразка під дією періодичної зміни напруженості магнітного поля.

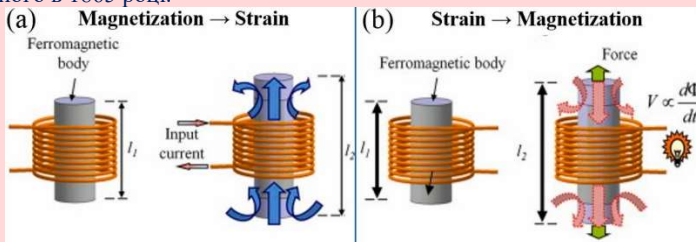
Під час розмагнічування частина магнітної енергії виводиться з матеріалу. Різниця цих енергій визначає незворотні втрати енергії на перемагнічування (на гістерезис). За площею петлі гістерезису можна визначати магнітні втрати, тобто втрати енергії зовнішнього магнітного поля, які виявляються в нагріванні магнітного матеріалу в процесі перемагнічування. Що більша площа петлі гістерезису, то більші магнітні втрати.

Причинами виникнення і складовими втрат є:

- втрати на гістерезис $P_{\text{Г}}$;
- втрати на вихрові струми $P_{\text{В}}$;
- додаткові втрати $P_{\text{Д}}$.

Найістотнішими видами втрат є втрати на гістерезис і вихрові струми. Під час перемагнічування відбувається зсув між доменів та обертання магнітних моментів, для чого потрібні витрати енергії зовнішнього поля. Це і є втрати на гістерезис, величина яких пропорційна до частоти зовнішнього магнітного поля. Втрати на вихрові струми, що виникають у провідникових матеріалах, поміщених у змінне магнітне поле, пов'язані з нагріванням матеріалу відповідно до закону Джоуля-Ленца. Величина втрат на вихрові струми пропорційна до квадрата частоти зовнішнього магнітного поля.

Магнітострикція – ефект відкритий Джеймсом Прескоттом Джоулем (англ. James Prescott Joule) в 1842 році і викликаний зміною взаємозв'язків між атомами в кристалічній решітці, і тому властивий всім речовинам. Зміна форми тіла може виявлятися, наприклад, у розтягуванні, стисканні, зміні об'єму, що залежить як від магнітного поля, що діє, так і від кристалічної структури тіла. Найбільші зміни розмірів зазвичай відбуваються у сильномагнітних матеріалів. Їх відносне подовження зазвичай варіюється в межах $10^{-5}..10^{-2}$. Магнітострикційний ефект оборотний – при зміні лінійних розмірів тіла під дією зовнішніх сил його магнітні властивості, відповідно, змінюються. Це називається **магнітоупругим ефектом – ефектом Віллари**, названим ім'ям італійського фізика Е.Віллари, що відкрив його в 1865 році.



Схематичний опис (а) ефекту Джоуля та (б) ефекту Віллари

Повні втрати визначають сумою всіх втрат у магнітному матеріалі, тобто:

$$P_{\Sigma} = P_r + P_v + P_d. \quad (15.2)$$

Ще одна властивість, притаманна магнітним матеріалам, – **магнітострикція** (від латин. *strictio* – стиск, натягування) – явище, яке полягає в тому, що при зміні стану намагніченості тіла його об'єм і лінійні розміри змінюються.

За магнітними властивостями електротехнічні матеріали поділяють на дві групи:

- слабомагнітні – діамагнетики й парамагнетики;
- сильномагнітні – феромагнетики та феримагнетики.

Діамагнетики – речовини, що намагнічуються в зовнішньому магнітному полі в напрямку, *протилежному* напрямку вектору магнітної індукції поля, послаблюючи його. За відсутності зовнішнього магнітного поля діамагнетики немагнітні. До діамагнетиків належать інертні гази, молекулярні водень та азот, бісмут, цинк, мідь, золото, срібло, германій, вода в рідкому стані, ацетон, гліцерин, полум'я свічки, нафтален і багато інших речовин із магнітною проникністю $\mu < 1$, значення якої не залежить як від напруженості зовнішнього магнітного поля, так і від температури.

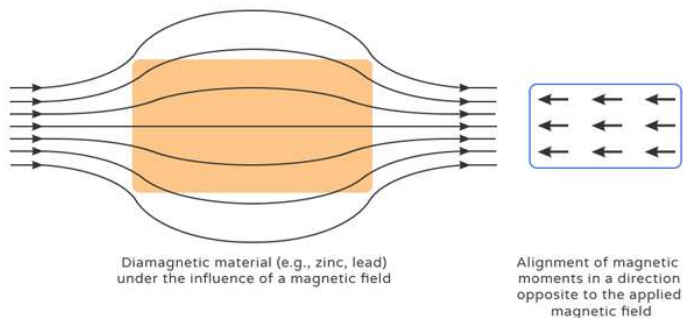


Рисунок 15.3 – Діамагнетики

Діамагнітна левітація – це явище, під час якого сильні магнітні поля відштовхують діамагнітні матеріали, які, здається, кидають виклик гравітації. У поїздах на магнітній підвісці потужні надпровідні магніти використовуються для створення сильного магнітного поля, а сам поїзд оснащений діамагнітними матеріалами, як правило, у формі магнітів або покриттів. Ці матеріали активно відштовхують магнітне поле, створюване рейками, змушуючи потяг парити над ними.

Інше важливе застосування діамагнетиків – визначення характеристик матеріалів і контроль якості. Вимірювання діамагнітної сприйнятливості можна використовувати для оцінки чистоти та складу речовин. Вчені та інженери можуть отримати уявлення про молекулярну структуру та цілісність матеріалу, піддавши зразок впливу відомого магнітного поля та вимірявши його діамагнітну реакцію. Цей метод знаходить застосування в різних галузях промисловості, від фармацевтики та хімії до розвідки корисних копалин і гемології.

Парамагнетики – також слабомагнітні речовини, що намагнічуються в зовнішньому магнітному полі в напрямку вектору магнітної індукції поля, відповідно частково підсилюючи його. До парамагнетиків належать багато лужних металів, солі заліза, кобальту, нікелю, оксиди азоту, мангану, хлорид заліза тощо, а також розчини різних солей. Це речовини з магнітною проникністю $\mu > 1$, яка також не залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля.

Завдяки своїм унікальним магнітним властивостям парамагнетизм знаходить різноманітне застосування в різних галузях науки та промисловості. Його здатність реагувати на зовнішні магнітні поля та давати цінну інформацію про

електронну структуру матеріалів робить його цінним інструментом у різних сферах:

- **магнітно-резонансна томографія (МРТ):** медична візуалізація є одним із найвідоміших застосувань. Парамагнітні агенти використовуються в скануванні МРТ для підвищення контрастності зображень, створюючи детальні зображення з високою роздільною здатністю м'яких тканин, органів і кровоносних судин;

- **вимірювання магнітної сприйнятливості:** парамагнітні матеріали часто використовуються в лабораторних умовах для вимірювання магнітної сприйнятливості речовин. Ця властивість використовується для вивчення електронної структури та зв'язку матеріалів, включаючи мінерали, надпровідники та магнітні матеріали.

- **магнітно-резонансна спектроскопія:** окрім медичної візуалізації, парамагнетизм має вирішальне значення в методах магнітно-резонансної спектроскопії, таких як спектроскопія електронного парамагнітного резонансу (ЕПР) і ядерно-магнітного резонансу (ЯМР). Ці методи використовуються в хімії, фізиці та біохімії для вивчення електронних і структурних властивостей молекул, дослідження хімічних реакцій і аналізу біомолекулярних структур.

Феромагнетики – особлива група речовин, що намагнічуються. До них належать залізо, нікель, кобальт та їхні сплави, сплави хрому й марганцю тощо. Під дією магнітного поля вони намагнічуються так, що підсилюють зовнішнє магнітне поле й надають йому потрібної конфігурації. Ці речовини мають магнітну проникність $\mu \gg 1$, яка залежить від напруженості магнітного поля. Вони намагнічуються дуже сильно й зберігають власне магнітне поле після припинення дії зовнішнього поля. Це

явище називають залишковим намагнічуванням, що взято за основу утворення штучних магнітів (наприклад, магнітних стрілок компасів). Магнітна проникність феромагнітних матеріалів змінюється з температурою, набуваючи максимальних значень за температур, близьких до температури (точки) Кюрі. Для чистого заліза температура Кюрі становить $+768\text{ }^{\circ}\text{C}$, для нікелю – $+358\text{ }^{\circ}\text{C}$, кобальту – $+1131\text{ }^{\circ}\text{C}$.

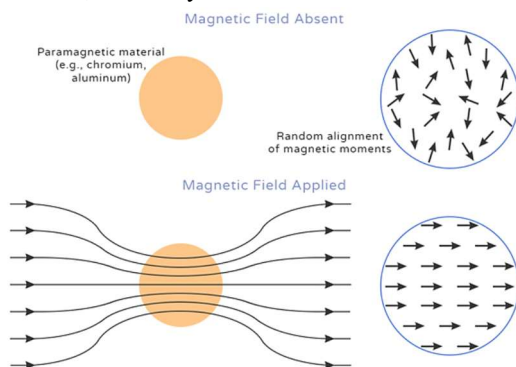


Рисунок 15.4 – Парамагнетики

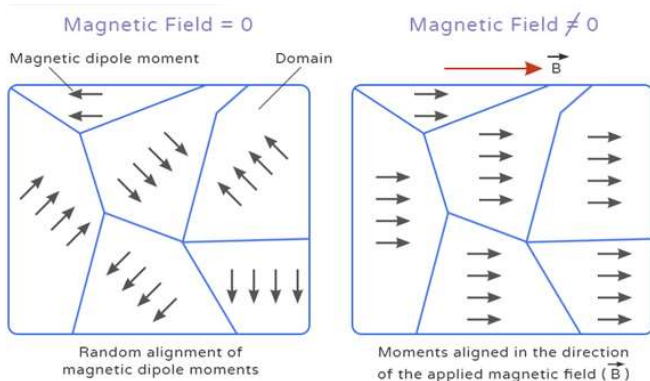


Рисунок 15.5 – Феромагнетики

Якщо феромагнетики перемагнічувати змінним магнітним полем, спостерігаються втрати енергії на тепло. Петля гістерезису розширюється (збільшує свою площу) порівняно зі статичною за рахунок втрат не лише на гістерезис, а й на вихрові струми й додаткові втрати. Таку петлю називають *динамічною*, а відповідні втрати – *сумарними*.

Для **феримагнетиків** характерна наявність кількох магнітних підґраток, магнітні моменти яких відрізняються й не компенсують один одного, тому результируючий момент не дорівнює нулю. Властивості феримагнетиків тісно пов'язані з їхньою кристалічною структурою.

У не дуже сильних магнітних полях вони поведуться подібно до феромагнетиків. За відсутності зовнішнього поля феримагнетики розбиваються на домени, мають характерну криву намагнічення з насиченням і гістерезисом. Для них характерна значно менша, порівняно з феромагнетиками, величина намагніченості насичення, а також температурна залежність.

Незвична поведінка феримагнетиків у сильних магнітних полях – найпростіша колінеарна магнітна структура в деякому інтервалі магнітних полів і температур може стати неколінеарною внаслідок конкуренції негативної обмінної взаємодії між магнітними підґратками та взаємодії магнітних моментів із зовнішнім полем напруженістю H ; магнітні моменти підґраток становитимуть різні кути з напрямком зовнішнього магнітного поля.

Більшість феримагнетиків належить до діелектриків і напівпровідників і характеризується високим питомим опором. Із цим пов'язані можливості їхнього широкого застосування у ВЧ і НВЧ-пристроях, оскільки в них дуже малі втрати на вихрові

струми в змінних електромагнітних полях навіть дуже високих частот. Властивості феримагнетиків мають деякі впорядковані металеві сплави, але переважно – різні оксидні сполуки, серед яких найбільший практичний інтерес становлять ферити.

У різних приладах та апаратах, застосовуваних в електротехніці, потрібні матеріали, які не мають магнітних властивостей. Для таких цілей придатні пластмаса й кольорові метали (алюміній, латунь, бронза). Однак ці матеріали мають малу механічну міцність, а деякі з них дефіцитні. У зв'язку із цим їх замінюють немагнітною сталлю і немагнітним чавуном.

Магнітні матеріали, які застосовують в електротехніці, поділяють на:

- магнітом'які матеріали;
- магнітотверді матеріали;
- матеріали спеціалізованого призначення.

15.2 Магнітом'які матеріали

Ці матеріали характеризуються здатністю легко намагнічуватися до насичення та розмагнічуватися у відносно слабких магнітних полях напруженістю H у межах 0,80–800 А/м. Вони мають високу магнітну проникність, невелику коерцитивну силу та малі втрати на гістерезис.

Призначені передусім для роботи в змінному магнітному полі або в динамічних режимах. Частотний діапазон застосування різних груп магнітом'яких матеріалів значною мірою визначають величиною їхнього питомого електричного опору: матеріали з більшим опором можна використовувати на високих частотах. У разі малих значень опору з підвищенням частоти можуть значно зрости вихрові струми та, відповідно, втрати на перемагнічування. У постійних і низькочастотних

полях (до сотень герц та одиниць кілогерц) використовують металеві магнітом'які матеріали. На підвищених і високих частотах застосовують матеріали з питомим опором, що відповідає напівпровідникам і діелектрикам. Бажано, щоб матеріали були технологічними, недорогими й недефіцитними, а їхні властивості не дуже залежали від механічних напружень. В окремих випадках важливі температурна та часова стабільність властивостей, лінійність кривої намагнічення (на певній ділянці) тощо.

Найважливіші матеріали цієї групи буде розглянуто нижче.

Технічно чисте залізо містить невелику кількість домішок вуглецю, сірки, мангану, кремнію тощо (до 0,1 %), які погіршують його магнітні властивості. Через порівняно низький електричний опір **Ошибка! Закладка не определена.** використовують переважно для магнітопроводів постійного магнітного потоку.

Магнітні властивості заліза значною мірою залежать як від його чистоти (кількості домішок), так і від структури (розміру зернин, на межі яких виникає викривлення кристалічної ґратки) та способу оброблення. Технічно чисте залізо застосовують для отримання майже всіх феромагнітних сплавів.

Електролітичне залізо отримують шляхом електролізу розчину хлориду або сульфату заліза. Воно відрізняється високим ступенем чистоти й високою магнітною індукцією. Осаджене на катоді залізо після ретельного промивання подрібнюють на порошок у кульових млинах, після чого його піддають вакуумному відпалу або переплавляють у вакуумі. Магнітні властивості такого заліза низькі через велике насичення воднем. Електролітичне залізо може становити інтерес лише у

двох випадках: під час отримання дуже чистого заліза й отримання залізного порошку для магнітодіелектриків.



Рисунок 15.6 – Залізо електролітичне та 1 см³

Карбонільне залізо – це високочисте залізо, яке отримують термічним розкладанням пентакарбоніла заліза згідно з $\text{Fe}(\text{CO})_5$. Карбонільне залізо має вигляд тонкого сірого порошку, що дає змогу виготовляти осердя шляхом пресування. У карбонільному залізі відсутні кремній, фосфор і сірка, але є вуглець, кисень та азот. У результаті термічного оброблення у водні залізо набуває високих магнітних властивостей.



Рисунок 15.7 – Карбонільне залізо

В електроніці карбонільне залізо застосовують для виготовлення магнітопроводів для високочастотних котушок і виробництва деяких феритів. Також карбонільне залізо використовують як феромагнітну фазу в магнітодіелектриках. Порошкові магнітопроводи з карбонільного заліза мають високу стабільність параметрів у широкому діапазоні температур і рівнів магнітного потоку з відмінною добротністю в діапазоні від 50 кГц до 200 МГц.

Низьковуглецева електротехнічна сталь – різновид технічно чистого заліза з вмістом вуглецю не більше 0,04 % та інших домішок – не більше 0,6 %. Випускають тонколистову та сортову, застосовують для виготовлення магнітопроводів усіх типів, деталей реле, осердь і полюсних наконечників електромагнітів, елементів вимірювальних приладів, магнітопроводів двигунів постійного та змінного струму малої та середньої потужності тощо.

Електротехнічна сталь із вмістом вуглецю менше 0,05 % і кремнію 0,8–4,8 % – основний магнітом'який матеріал найширшого застосування. Домішки кремнію істотно збільшують питомий електричний опір сталі, початкову й максимальну магнітні проникності, зменшують коерцитивну силу та втрати на гістерезис, однак знижують індукцію насичення. Кремній несприятливо впливає на механічні властивості заліза, збільшуючи його крихкість та ускладнюючи прокатування в листи.

Якщо вміст кремнію становить понад 5 %, сталь стає дуже крихкою. Сталь із вмістом кремнію до 1,8 % використовують для виготовлення деталей електричних машин, які працюють у постійному полі; сталь із вмістом кремнію 1,8–2,8 % застосовують в електричних машинах змінного струму; сталь із

вмістом кремнію 2,8–4,8 % використовують переважно для виготовлення магнітопроводів трансформаторів.



Рисунок 15.8 – Осердя трансформатора

Пермалої – група сплавів заліза з нікелем (іноді ще з кобальтом), легованих додатково іншими елементами. Містять 35–80 % нікелю. Класичний пермалой має у своєму складі 78,5 % Ni та 21,5 % Fe. Для надання пермалоюм необхідних властивостей до їхнього складу вводять такі домішки: Mo, Cr, Si, Mn, Cu. Молібден і хром підвищують початкову магнітну проникність, але знижують індукцію насичення; домішка молібдену сприяє також зменшенню чутливості пермалоїв до деформування; хром робить постійною магнітну проникність у слабких полях, підвищує температурну стабільність і питомий опір; кремній і манган збільшують питомий опір і спрощують механізм оброблення пермалоїв; мідь надає термостабільності.

Найкращі магнітні властивості в пермалою марки 79НМ (79 % Ni, 15 % Fe, 5 % Mo, 0,5 % Mn). Вартість пермалоїв визначають вмістом у їхньому складі нікелю. У марках пермалоїв літера Н означає нікель, К – кобальт, М – манган, Х – хром, С – кремній (силіцій), Д – мідь; додаткова літера П – з прямокутною петлею гістерезису. Цифра в марці вказує відсотковий вміст нікелю.

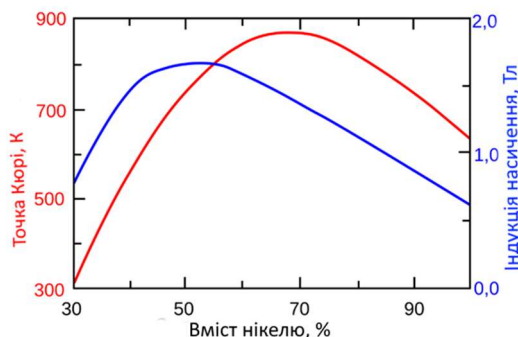


Рисунок 15.9 – Залежність точки Кюрі та намагніченості насичення від частки нікелю в пермалойі

Пермалойі характеризуються високими значеннями магнітної проникності в слабких полях і малим значенням коерцитивної сили. За вмістом нікелю розрізняють сплави низьконікелеві (40–50 %) і високонікелеві (70–80 %). Низьконікелеві пермалойі характеризуються вищою в півтора рази індукцією насичення, приблизно вдвічі вищим питомим електричним опором, простішою термообробкою, нижчою вартістю, слабшим впливом механічних напружень, чистоти та складу на магнітні властивості порівняно з високонікелевими пермалоями. Магнітна проникність високонікелевих пермалойів у кілька разів більша, а коерцитивна сила менша, ніж у низьконікелевих.

Низьконікелеві пермалойі марок 45Н і 50Н застосовують для малогабаритних трансформаторів, дроселів, реле й деталей магнітопроводів, які працюють із підвищеними індукціями й на підвищених частотах, де потрібна висока концентрація магнітного потоку. Високонікелеві пермалойі марок 79НМ, 80НХС, 76НХД застосовують для потужних і малогабаритних трансформаторів, реле, для виготовлення магнітних екранів;

особливо тонкі стрічки (товщина 0,02 мм) використовують в імпульсних трансформаторах, магнітних підсилювачах, безконтактних реле. Недоліки цих сплавів – нижчі значення індукції насичення та вища вартість порівняно з електротехнічними сталями, чутливість до механічних напружень і потреба в складній термообробці.



Рисунок 15.10 – Пермалой

Пермалої з прямокутною петлею гістерезису можуть використовувати для виготовлення осердя магнітних підсилювачів, перемикальних пристроїв, випрямних установок і для елементів комп'ютерів.

Аморфні магнітні матеріали (АМ) відрізняються поєднанням високих магнітних і механічних властивостей, наявністю лише ближнього структурного порядку. Аморфний стан формується під час надшвидкого переходу з рідкого стану до твердого охолодженням розплаву.

Швидкої тепловіддачі досягають лише для виготовлення дуже тонкого сортаменту (наприклад, стрічка завтовшки 0,05 мм). АМ на 75–85 % складаються з одного або кількох

перехідних металів (Fe, Co, Ni) і 15–25 % металоїду (склоутворювача) – бору, вуглецю, кремнію, фосфору. Додавання металоїду зменшує намагніченість насичення, знижує точку Кюрі, але при цьому збільшує питомий опір, підвищує твердість і міцність сплавів, їхню корозійну стійкість. Виробництво АМ дешевше, ніж традиційних кристалічних матеріалів. Для додаткового поліпшення АМ застосовують термічне або термомагнітне оброблення.

Високочастотні магнітом'які матеріали – це магнітні речовини, які мають виконувати функції магнетиків при частотах понад 10^2 – 10^3 Гц. Згідно із частотними властивостями їх поділяють на матеріали для звукових, ультразвукових частот, низьких радіочастот, високих і надвисоких радіочастот. У таких матеріалів має бути насамперед великий питомий опір, що зменшує втрати на вихрові струми. Їх поділяють на магнітом'які ферити та магнітодіелектрики.

Магнітом'які ферити – це магнітна кераміка, яку отримують спіканням оксиду заліза (Fe_2O_3 – ферум(III) оксид) та оксидів інших металів. Матеріали поєднують властивості феромагнетиків і напівпровідників або діелектриків. Зокрема, їхній питомий опір досягає значень 10^{16} Ом·м, що дає змогу використовувати їх на найвищих частотах (табл. 15.1).

Ферити виготовляють за технологією виробництва радіокераміки з недефіцитних матеріалів. Як початкову сировину використовують оксиди відповідних металів. Їх подрібнюють і перемішують, після чого брикетують і відпалюють на повітрі. Брикети знову подрібнюють на порошок, який пластифікують водним розчином полівінілового спирту й формують вироби способом пресування чи гарячого лиття. Відформовані вироби запікають.

Таблиця 15.1 – Властивості деяких магнітом'яких матеріалів

Назва	Магнітна проникність		Коерцитивна сила, А/м	Індукція насичення, Тл	Гіпотимний опір, мкОм·м
	початкова	максимальна			
Технічно чисте залізо	250-400	3500-4500	50-100	2,18	0,1
Електролітичне залізо	600	15000	30	2,18	0,1
Карбонільне залізо	2000-3000	20000-21500	6,4	2,18	0,1
Електротехнічна сталь	200-600	3000-8000	10-65	1,95-2,02	0,25-0,6
Низьконікелевий пермалой	15000-40000	1500-60000	5-32	1,0-1,6	0,45-0,9
Високонікелевий пермалой	7000-100000	50000-300000	0,65-5,0	0,65-1,05	0,16-0,85



Рисунок 15.11 – Магнітом'які ферити

Перевага феритів у тому, що це матеріали відносно дешеві, до того ж, змінюючи їхні склад і структуру, можна отримувати матеріали з потрібними характеристиками. До недоліків магнітом'яких феритів належать низька магнітна індукція насичення – 0,15–0,5 Тл (унаслідок часткової компенсації магнітних моментів речовини), більша коерцитивна сила, низька

температура точки Кюрі (у більшості феритів вона не перевищує +200–300 °С) порівняно з феромагнетиками. Феритам властиві також усі недоліки кераміки (твердість, крихкість, складне оброблення тощо).

Найбільш поширені дві групи магнітом'яких феритів – *манганово-цинкові* та *нікелево-цинкові*, що являють собою трикомпонентні системи $\text{Mn-Zn-Fe}_2\text{O}_3$ та $\text{Ni-Zn-Fe}_2\text{O}_3$. Перші використовують на частотах до кількох сотень кілогерц і в імпульсних режимах; другі – на частотах до 100 МГц. Індукція насичення розглянутих феритів сягає 0,1–0,4 Тл, що значно нижче, ніж у магнітом'яких сплавів. Магнітна проникність становить: $\mu_{\text{п}} = 20\text{--}20\,000$ і $\mu_{\text{мах}} = 45\text{--}35\,000$.

Суттєві переваги манганово-цинкових феритів перед нікелево-цинковими: у кілька разів менші втрати на гістерезис, вища індукція, значно більша температура точки Кюрі та менше значення температурного коефіцієнта магнітної проникності ТК μ . За жорстких вимог до величини нелінійних спотворень манганово-цинкові ферити кращі за нікелево-цинкові, але останні мають переваги під час роботи в пристроях із підмагнічуванням. Магнітом'які ферити застосовують під час виготовлення магнітопроводів імпульсних і високочастотних трансформаторів і котушок індуктивності, магнітних антен, магнітних запам'ятовуючих пристроїв. На основі магнітом'яких феритів реалізовано перспективний тип елементів – багатофункційні магнітні радіокомпоненти, які здійснюють водночас трансформацію, стабілізацію, модуляцію та інші види перетворення електричного сигналу.

Магнітодіелектрики – пресований матеріал, що складається з порошку магнітного матеріалу (феро- або феримагнетика) з малою величиною коерцитивної сили, причому

частки магнітного матеріалу електрично ізолювані одна від одної діелектриком. За основу використовують карбонільне залізо, пермалой тощо. Ізолювальним зв'язувальним є фенолформальдегідні смоли, полістирол, скло тощо. Основа повинна мати високі магнітні властивості, зв'язувальна речовина – здатність утворювати між зернами суцільну ізолювальну плівку. Шляхом подрібнення магнітного матеріалу на дрібні частинки, які не стикаються поміж собою, досягають малих втрат на гістерезис і вихрові струми.

Оскільки в цьому матеріалі дрібні магнітні частинки ізолювані одна від одної прошарками діелектрика, йому притаманний також механізм електропровідності діелектрика. Питомий опір таких магнітних матеріалів сягає 10^{14} Ом·м. Магнітні властивості магнітодіелектриків значною мірою залежать від методів і технологічних режимів їхнього отримання.

Магнітодіелектрики – це також і високочастотні магнітні матеріали, характерною ознакою яких є вища стабільність магнітних властивостей, зокрема стабільність магнітної проникності під час зміни зовнішнього магнітного поля. Але за деякими важливими електромагнітними параметрами магнітодіелектрики поступаються феритам, через що сфера застосування магнітодіелектриків поступово скорочується.

Альсіфер – це потрійний сплав алюмінію (аль-), кремнію (-сі-) і заліза (-фер). Оптимальний склад альсіферу: 9,5 % Si, 5,5 % Al, решта – 85 % – Fe. Такий сплав вирізняється твердістю та крихкістю, тому його виготовляють у вигляді фасонних виливків. Вимоги до точності підтримання складу сплаву невисокі, тому що властивості магнітодіелектрика мало залежать від властивостей вихідного магнітного матеріалу. Вони визначаються здебільшого розмірами, формою і взаємним

розташуванням частинок цього матеріалу. Вироби з альсіферу – магнітні екрани, корпуси приладів тощо – виготовляють методами лиття з товщиною стінок не менше 2–3 мм через крихкість сплаву. Така особливість обмежує застосування цього матеріалу, хоча альсіфер дешевий і недефіцитний. Змінюючи вміст кремнію та алюмінію, можна регулювати величину температурного коефіцієнта магнітної проникності TK_μ і домогтися практично нульових його значень.



Рисунок 15.12 – Тороїдальне осердя з альсіферу

Значення магнітної проникності магнітодіелектриків на основі альсіферу невелике ($\mu_n = 20\text{--}90$), діапазон робочих частот 0,01–0,1 МГц.



Альсіфер був винайдений Хакару Масумото в Імперському університеті Тохоку в Сендаї, Японія, приблизно в 1936 році як альтернатива пермалою в індуктивних застосуваннях для телефонних мереж. Назва «альсіфер» з'явилася в 1941 році, і спочатку означало пресовану масу з даного сплаву, а потім воно закріпилося за самим сплавом. У західних країнах матеріал отримав назву «сендаст» (sendust). В 1946 році Масумото був лауреатом Імперської премії Японської академії.

Магнітодіелектрики на основі залізонікелевих сплавів (пермалойв) вигідно відрізняються від альсиферів високими значеннями початкової магнітної проникності: $\mu_n = 200\text{--}250$ і зниженням значення температурного коефіцієнта магнітної проникності ТК μ . Вихідною сировиною в цьому разі є молібденовий пермалой 79НМ. Присадку сірки додають для надання пермалою крихкості, після чого його змелюють до частинок, розміром у кілька мікрометрів, що дає змогу зменшити втрати на гістерезис. Магнітодіелектрикам на основі пермалою властиве певне зниження магнітної проникності за підвищеної вологості, тому магнітопроводи із цього матеріалу потрібно застосовувати в герметизованій апаратурі.

Магнітодіелектрики на основі карбонільного заліза. Порошкоподібне карбонільне залізо можна отримувати з розміром частинок до 1–5 мкм і величиною початкової магнітної проникності $\mu_n \approx 3000$ за робочої частоти до 60 МГц. Промисловість випускає два класи карбонільних порошків: для радіоапаратури – класу «Р» і для провідного зв'язку – класу «П». Потрібно пам'ятати, що за підвищеної вологості в умовах експлуатації цей матеріал поглинає вологу, тому магнітопроводи мають бути герметизовані.

Немагнітний чавун застосовують у тих випадках, коли конструкційний матеріал не потребує наявності магнітних властивостей. Немагнітні чавуни добре обробляють механічно. За температури до +400 °С вони зберігають свої парамагнітні властивості. Великий електричний опір немагнітного чавуну знижує втрати на вихрові струми порівняно з кольоровими сплавами. Магнітна проникність немагнітного чавуну: $\mu = 1,03$, питомий опір: $\rho = 1,4$ мкОм·м, межа міцності: 250–350 МПа.

Зразковий склад немагнітного чавуну: 2,6–3,0 % вуглецю, 2,5 % кремнію, 5,6 % мангану, 9–12 % нікелю, решта – залізо.



Рисунок 15.13 – Немагнітний чавун

Немагнітний чавун використовують для виготовлення кришок, кожухів, втулок масляних вимикачів, обойм силових трансформаторів, кожухів зварювальних трансформаторів тощо.

Немагнітні сталі виготовляють шляхом додавання нікелю та мангану, що сприяє зниженню температури переходу γ -заліза в α -залізо до температури $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ і нижче. Зразковий склад немагнітної сталі: 0,25–0,35% вуглецю, 22–25% нікелю, 2–3% хрому, решта – залізо. Межа міцності такої сталі 700–800 МПа, магнітна проникність: $\mu = 1,05\text{--}1,2$.

Немагнітну сталь застосовують для стягування і кріплення трансформаторів, дроселів, котушок індуктивності тощо.

15.3 Магнітотверді матеріали

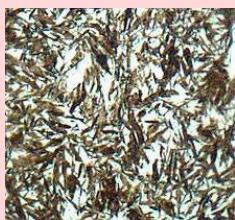
Магнітотверді матеріали намагнічуються до насичення й перемагнічуються в порівняно сильних магнітних полях напруженістю в тисячі й десятки тисяч А/м (довго зберігають свої магнітні властивості). Ці матеріали характеризуються високими значеннями коерцитивної сили $H_c > 4000\text{ А/м}$, залишкової індукції $B_{\text{зал}}$, магнітної енергії $(B \cdot H)_{\text{max}}$.

Магнітна проникність таких матеріалів нижча, ніж у магнітом'яких матеріалів, причому що вища коерцитивна сила, то менша магнітна проникність. Для магнітотвердих матеріалів характерна велика кількість різних дефектів, що утруднюють переміщення доменних границь.

З магнітотвердих речовин виготовляють переважно постійні магніти.

За складом і способом отримання магнітотвердих матеріалів розрізняють леговану мартенситну сталь, литі магнітотверді сплави, магніти з порошків, магнітотверді ферити, магнітні стрічки.

Мартенситна сталь належить до найпростіших і найдоступніших матеріалів. Використовують лише леговану хромом (до 10 %), вольфрамом (до 6 %), кобальтом (до 16 %) сталь. Набуває потрібних магнітних властивостей після гартування з утворенням *мартенситу* – специфічної структурної складової. Через невисокі магнітні характеристики застосовують обмежено.



Мартенсит отримав назву на честь німецького металознавця Карла Адольфа Готфріда Мартенса (нім. Karl Adolf Gottfried Martens). Це мікроструктура голчастого (пластинчастого), а також рейкового (пакетного) виду, що спостерігається в загартованих металевих сплавах і деяких чистих металах, яким властивий поліморфізм. Мартенсит – основна структурна складова загартованої сталі; є упорядкованим пересиченим твердим розчином вуглецю в α -залізі такої ж концентрації, як у вихідного аустеніту. З перетворенням мартенситу при нагріванні та охолодженні пов'язаний ефект пам'яті металів та сплавів. За аналогією термін також може належати до будь-якої кристалічної структури, яка утворена бездифузійним перетворенням.

Найбільшу кількість постійних магнітів виготовляють із **литих сплавів** складу Fe-Al-Ni та Fe-Al-Ni-Co.

Сплави системи Fe-Al-Ni містять 20–30 % Ni, 11–13 % Al, легуються міддю, інколи титаном. Мають порівняно невисокі магнітні властивості.

Сплави систем Fe-Al-Ni-Co містять 12–26 % Ni, 2–40 % Co і 6–13 % Al з додаванням 2–8 % міді, до 9 % титану та до 3 % ніобію для поліпшення властивостей. Мають відносно велику магнітну енергію. При додаванні кобальту магнітні властивості сплавів підвищуються. Недоліком сплавів є труднощі виготовлення з них виробів точних розмірів через крихкість і твердість сплавів, що допускають оброблення тільки шляхом шліфування. Коерцитивна сила досягає 14 кА/м.

Порошкові магнітні матеріали виготовляють способом пресування з наступним термообробленням. Їхнє застосування особливо важливе, коли є потреба у виготовленні дрібних виробів із суворим дотриманням розмірів.

15.4 Інші магнітотверді матеріали

Матеріали для звукозапису. Для запису й відтворення інформації використовують суцільні **металеві стрічки з магнітотвердих сталей і сплавів** (переважно в спеціальній апаратурі) та стрічки на пластмасовій основі з покриттям із порошкоподібних феритів. Для виготовлення останніх застосовують дешеві доступні оксиди заліза – магнетит Fe_3O_4 (чорного кольору) й червоний залізняк Fe_2O_3 (червоно-коричневого кольору). Технічні характеристики стрічки залежать не лише від властивостей вихідних матеріалів, а й від ступеня подрібнення частинок, об'ємної щільності магнітного матеріалу

в робочому шарі, орієнтації частинок; вони визначають якість запису – відтворення на малих швидкостях руху носія.

Матеріали з високою питомою енергією. До цієї групи належать сплави металів групи заліза (Fe, Co, Ni) із рідкісноземельними металами, що характеризуються рекордними значеннями всіх основних магнітних характеристик при задовільних характеристиках температурної та часової стабільності. Спочатку перевагу віддавали сплавам Sm-Co, які виявилися найбільш технологічними. У 1987 р. промисловість освоїла виробництво постійних магнітів на основі сплавів системи Nd-Fe-B, які загалом мають кращі характеристики (крім діапазону робочих температур). Їхнє світове виробництво швидко зростає.



Рисунок 15.14 – Неодимові магніти

Інтенсивно ведуться дослідження з метою отримання нових матеріалів із кращими властивостями, зниження їхньої вартості, розроблення нових технологічних прийомів виготовлення магнітів.



Неодимові магніти (також відомі як магніти «NdFeB», «Neo» або «NIB») належать до сімейства рідкісноземельних магнітів і мають найвищі магнітні властивості серед усіх постійних магнітів, сильніші за самарій-кобальт (SmCo), альніко та ферит. Крім високої

магнітної міцності, вони відносно недорогі, що робить їх ідеальним вибором для широкого спектру споживчих, комерційних, промислових і технічних застосувань. Неодимові магніти (NdFeB) забезпечують максимальну продуктивність навіть при найменшому об'ємі магніту. Вони завжди мають бути покриті для захисту від ризику корозії.

Неодимові магніти використовуються у виробництві жорстких дисків для комп'ютерів. Зазвичай такі магніти мають форму дуги і застосовуються у виготовленні динаміків навушників, радіо, мобільних телефонів, смартфонів, планшетів, колонок тощо для більшої гучності динаміка. В медицині неодимові магніти використовуються в апаратах для магнітно-резонансної томографії.

Неодимові магніти втрачають не більше 1-2 % своєї намагніченості за 10 років, проте їх можна легко розмагнітити, нагрівши до температури +70 °C і більш.

15.5 Матеріали спеціального призначення

Серед матеріалів спеціального призначення в радіoeлектроніці застосовують матеріали з прямокутною петлею гістерезису (ППГ), ферити для пристроїв надвисокочастотного діапазону й магнітострикційні матеріали.

Ферити й металеві сплави з прямокутною петлею гістерезису (ППГ) (табл. 15.2) широко застосовують у пристроях автоматики, обчислювальної техніки, в апаратурі телеграфного зв'язку. До матеріалів і виробів цього типу існують специфічні вимоги, а для їхньої характеристики залучають деякі додаткові

параметри. Основним із таких параметрів є **коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису** $K_{\text{пк}}$:

$$K_{\text{пк}} = \frac{B_{\text{зал}}}{B_{\text{max}}}, \quad (15.3)$$

де $B_{\text{зал}}$ – залишкова магнітна індукція, яка відповідає максимальному значенню магнітної індукції B_{max} .

Для ідеальної ППГ: $K_{\text{пк}} = 1$; для матеріалів, які застосовують на практиці: $K_{\text{пк}} = 0,85\text{--}0,98$. Матеріали з ППГ мають забезпечувати малий час перемагнічування, більшу температурну стабільність магнітних характеристик, а отже, мати високу температуру точки Кюрі й деякі інші властивості.

Таблиця 15.2 – Властивості осердь і матеріалів із прямокутною петлею гістерезису

Матеріали або осердя	H_c , А/м	$B_{\text{зал}}$, Тл	$K_{\text{пк}}$	T_K , °С	Примітка
Ферити різних марок	10-1200	0,15-0,25	0,9	100-630	Є понад 25 різних марок
Мікронні осерді з пермалоїв (товщина стрічки 2-10 мкм)	8-50	0,6-1,5	0,85-0,9	300-630	Сплави: 500НП, 65НП, 78НМ, 34НКПМ

Магнітопроводи з матеріалу, у якого ідеальна ППГ, мають два стійких магнітних стани, які відповідають додатному ($+B_{\text{зал}}$) і від'ємному ($-B_{\text{зал}}$) значенням залишкової магнітної індукції, тому є магнітними елементами для збереження та оброблення двійкової інформації. Запис і зчитування інформації здійснюють перемиканням магнітопроводу з одного магнітного стану в інший за допомогою імпульсів струму, які створюють необхідну напруженість магнітного поля. Двійкові елементи на магнітних

осердях із ППГ характеризуються високою надійністю, малими габаритами, низькою вартістю, відносною стабільністю характеристик. Вони мають майже необмежений термін використання, зберігають записану інформацію при відключених джерелах живлення.

Ферити з ППГ. Специфічна форма петлі гістерезису реалізується при виборі певного хімічного складу й умов спікання фериту, а не є результатом будь-якого спеціального оброблення матеріалу, що приводить до утворення текстури. Коли піднімається температура від -20 до $+60$ °C у феритів різних марок коерцитивна сила зменшується в 1,5-2 рази, залишкова індукція – на 15–30 %, коефіцієнт прямокутності – на 5-35 %. Технологія виготовлення осердь із феритів із ППГ проста й економічна. З феритів із ППГ найширше застосовують **магній-манганові** та **літійові**.

Залежно від особливостей пристроїв, у яких застосовують ферити з ППГ, вимоги до них можуть істотно різнитися. Так, ферити, призначені для комутаційних і логічних елементів схем автоматичного управління, повинні мати малу коерцитивну силу (10-20 А/м). І навпаки, матеріали, що використовують у пристроях зберігання дискретної інформації, – підвищене значення коерцитивної сили (100-300 А/м). У пристроях запам'ятовування ЕОМ застосовують або кільцеві феритові осердя малого розміру (із зовнішнім діаметром 0,3–0,4 мм), або багатоотвірні феритові плати, у яких область навколо кожного отвору виконує функцію окремого осердя.

Стрічкові мікронні осердя з пермалоїв мають, порівняно з феритами, кращі магнітні властивості (табл. 5.2) та вищу температурну стабільність. У тому ж інтервалі температур (від -20 до $+60$ °C) їхні властивості майже не змінюються. У

мікромініатюрних електронних приладах використовують магнітні плівки, нанесені на основи методом розпилення у вакуумі.

Ферити для пристроїв надвисоких частот (НВЧ).

Діапазон НВЧ відповідає довжинам хвиль від 1 мм до 1 м. Електромагнітні хвилі можуть поширюватися в просторі, заповненому діелектриком, а від металів вони майже повністю відбиваються. Тому металеві поверхні використовують для спрямування хвиль, їхньої концентрації або розсіювання. Електромагнітна енергія НВЧ найчастіше передається по хвилеводах, що є порожніми або частково заповненими твердими металевими трубами. Як тверді матеріали для керування потоком енергії у хвилеводах використовують НВЧ-ферити, магнітними характеристиками яких можна управляти за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Ферити використовують у НВЧ-пристроях – антенних перемикачах і циркуляторах, що слугують для розподілу енергії між окремими хвилеводами, у фазообертачах, фільтрах, модуляторях, обмежувачах потужності тощо. НВЧ-ферити мають відповідати специфічним вимогам: досягненню вузької лінії резонансу; високій чутливості матеріалу до керуючого поля (можливості керування відносно слабким зовнішнім полем); високому питомому об'ємному опору (10^6 – 10^8 Ом·м) і, можливо, меншому тангенсу кута діелектричних втрат (10^{-3} – 10^{-4}), а також, можливо, меншим значенням магнітних втрат поза областю резонансу, що забезпечує слабе загасання у фериті; температурній стабільності властивостей і, можливо, вищому значенню точки Кюрі.

Магнітострикційні матеріали – це матеріали, застосування яких засноване на явищі магнітострикції й

магнітопружному ефекті, тобто зміні розмірів тіла в магнітному полі та зміні магнітних властивостей матеріалу під дією механічних впливів. Магнітострикційними матеріалами для високих частот є ферити. Магнітострикційні коливання невеликої амплітуди в намагніченому середовищі за своїм зовнішнім проявом аналогічні п'єзоелектричним. Тому їх іноді називають *п'єзомагнітними*.

Сплав *платини із залізом Fe–Pt* має велику константу магнітострикції, однак він дуже дорогий, тому має досить обмежене застосування. Недоліком *залізокобальтових Fe–Co і залізоалюмінієвих Fe–Al сплавів* є крихкість, що ускладнює механічне оброблення, а також низька антикорозійна стійкість, що перешкоджає використанню таких перетворювачів у водному середовищі. Зазначені сплави застосовують як магнітопроводи генераторів акустичних коливань при звукових та ультразвукових частотах. Поздовжня магнітострикція цих сплавів має позитивний знак, а відносна деформація коливається в межах $(40\text{--}120) \times 10^{-6}$. Найчастіше для цього використовують чистий *нікель*, що має значну магнітострикцію. Цінними властивостями нікелю є висока стійкість до корозії та малий температурний коефіцієнт модуля пружності.

У магнітострикційних пристроях широко застосовують *феритову кераміку*. Завдяки високому питомому опору в неї дуже малі втрати на вихрові струми, вона не піддається дії хімічно агресивних середовищ.

За допомогою керамічної технології можна виготовити перетворювачі практично будь-яких форм і розмірів. За складом магнітострикційна кераміка є або чистим феритом нікелю, або твердим розчином на його основі.

Термомагнітні матеріали – сплави з різкою залежністю магнітної проникності від температури. Це сплави на основі Ni–Cu, Fe–Ni, Fe–Ni–Cr, Fe–Ni–Co. Їх застосовують для компенсації температурної похибки в установках, зумовленої зміною індукції постійних магнітів або опору проводів у магнітоелектричних приладах порівняно з тим значенням, при якому виконувалося градування. Для отримання різкої температурної залежності магнітної проникності використовують властивість феромагнетиків знижувати індукцію з підняттям температури поблизу точки Кюрі. Для зазначених феромагнетиків точка Кюрі лежить між 0 і +100 °С залежно від добавок легувальних елементів.

Сплав Ni–Cu з вмістом міді 30 % може компенсувати похибки в температурних межах від –20 до +80 °С, з вмістом міді 40 % – від –50 до +10 °С.



Пермендюр (англ. permendur: **permeability** – "проникність"; **durable** – "міцний") - сплав заліза (47-50%) з кобальтом (48-50%), з невеликою добавкою ванадію (1,5-2%). Сплав розроблений у США Густавом Ельменом для лабораторій Белла в 1929 р. Величина коерцитивної сили регулюється змістом ванадію. При вмісті ванадію більше, ніж

у пермендюрі (2-5%) сплав називають ремендюр (Remendur), при 8-12% – вікалой. Сучасні рецептури сплаву містять невеликі кількості ніобію, кремнію та марганцю для покращення властивостей холодного формування.

Сплави з особливо високою індукцією насичення – залізо-кобальтові сплави – мають індукцію насичення до 2,4 Тл.

Електричний опір таких сплавів невеликий. Сплави, що містять 50–70 % кобальту, називають **пермендюрами**. Це магнітом'які сплави заліза (47–50 %) з кобальтом (48–50 %) і невеликим доданням ванадію (1,5–2 %) (рис. 15.15).

Здешевлений варіант сплаву містить орієнтовно 24 % кобальту. За значеннями магнітної проникності в полях, напруженість яких $H > 4$ А/см, і за точкою Кюрі, що становить +950–980 °С, пермендюр значно перевищує електротехнічну сталь і залізо.

Через високу вартість пермендюри можуть застосовувати тільки в спеціальній апаратурі, зокрема в динамічних репродукторах, осцилографах, телефонних мембранах і виробках, які працюють у постійних або слабких змінних магнітних полях із сильним підмагнічуванням постійним полем.

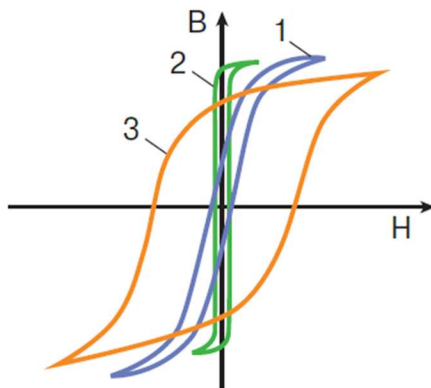


Рисунок 15.15 – Петлі гістерезису: 1 – магнітом'яких матеріалів; 2 – прямокутна петля магнітом'яких матеріалів; 3 – магнітотвердих матеріалів

З магнітострикційних матеріалів виготовляють магнітопроводи електромеханічних випромінювачів і приймачів для електроакустики й ультразвукової техніки, магнітопроводи електромеханічних і магнітострикційних фільтрів і резонаторів, ліній затримки. Їх застосовують як чутливі елементи магнітопружних перетворювачів у пристроях автоматики.

Питання для самоперевірки:

1. Які основні властивості магнітних матеріалів?
2. Розкажіть про класифікацію електротехнічних матеріалів за магнітними властивостями.
3. Що таке магнітострикція?
4. Що вам відомо про парамагнетики, де їх застосовують?
5. Розкажіть про особливості феромагнітних матеріалів.
6. Що таке магнітна проникність, як вона впливає на властивості матеріалів?
7. Чим магнітом'які матеріали відрізняються від магнітотвердих? Наведіть приклади магнітом'яких та магнітотвердих матеріалів.
8. Що таке гістерезис, чому він важливий для магнітних матеріалів?
9. Що називається коерцитивною силою?
10. Які матеріали спеціального призначення використовуються для екранування магнітних полів?

РОЗДІЛ 16. НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

16.1 Напівпровідникові матеріали

До провідників належать матеріали з питомим електричним опором: $\rho = 10^{-8} - 10^{-6}$ Ом·м, до діелектриків – матеріали з $\rho = 10^8 - 10^{18}$ Ом·м. Напівпровідникові матеріали займають проміжне місце між провідниками та діелектриками й мають величину питомого опору, яка знаходиться в межах $10^{-6} - 10^8$ Ом·м (за кімнатної температури), що й спричинило появу терміну «напівпровідники».

Напівпровідники – це речовини, які за своєю електропровідністю займають проміжне місце між провідниками та діелектриками, питомий опір яких змінюється під дією певних зовнішніх впливів. Напівпровідникові властивості має велика кількість матеріалів, серед яких 12 хімічних елементів (рис. 16.1).



Рисунок 16.1 – Класифікація напівпровідникових матеріалів

16.1.1 Кремній

Кремній (силіцій) (Si) за поширеністю в земній корі (29,5 %) посідає друге місце після кисню. Численні сполуки кремнію

входять до складу більшості гірських порід і мінералів. Пісок і глина, що утворюють мінеральну частину ґрунту, також є його сполуками. Найбільш поширеною сполукою цього елемента є силіцій(IV) оксид (SiO_2). Ця сполука трапляється переважно як мінерал кварц. У деяких родовищах чистота кварцового піску досягає 99,9 %. У вільному стані в природі простої речовини кремній немає. Вихідною сировиною для отримання кремнію є природний двооксид (кремнезем).

Кристалічний чистий кремній – тверда речовина сірого кольору з металічним блиском, тепло- й електропровідний. Напівпровідникові властивості кремнію обумовлені будовою кристала, яка аналогічна алмазу. Проте зв'язки в кристалі значно слабші, ніж в алмазі, і за нормальних умов частина з них розірвана, а тому в кристалі є вільні електрони, наявність яких і зумовлює незначну тепло- й електропровідність. При нагріванні розривається більше зв'язків, тому тепло- й електропровідність зростає.



Рисунок 16.2 – Кристалічний чистий кремній

Електрична провідність кремнію дуже залежить від присутності домішок, які поділяють на два види: донори й акцептори. При переважанні донорів основними носіями заряду в кремнії є електрони провідності, при переважанні акцепторів –

дірки. Такий кремній є напівпровідником n -типу й p -типу, відповідно.

Кремній має порівняно високу температуру плавлення й у розплавленому стані вирізняється високою хімічною активністю. Кремній – матеріал, найбільш придатний для виготовлення фотоелементів, призначених для безпосереднього перетворення сонячної енергії на електричну. ККД фотоелементів досягає 15–20 %.

Кремній є базовим матеріалом для виготовлення низькочастотних і високочастотних, потужних і малопотужних біполярних транзисторів, польових транзисторів та інтегральних мікросхем для приймально-підсилювальної апаратури й обчислювальної техніки.



Рисунок 16.3 – Сонячна панель із полікристалічного кремнію

У техніці широко застосовують кремнієві фоточутливі прилади, особливо фотодіоди, що вирізняються високою швидкодією. Спектр фоточутливості кремнієвих фотодетекторів добре узгоджується зі спектром випромінювання багатьох напівпровідникових джерел світла. Кремнієві фотоелементи, які використовують для перетворення сонячної енергії на електричну, отримали назву сонячні батареї. Їх використовують

у системах енергопостачання космічних апаратів. Їхній ККД в більшості випадків становить 10–12 %. Зі здешевленням виробництва кремнію сонячні батареї стали перспективними для наземного використання. Також кремній використовують для виготовлення детекторів ядерного випромінювання.

16.1.2 Германій

Чистий германій (рис. 16.4) має яскраво-сріблястий колір і металічний блиск, характеризується відносно високою твердістю, але дуже крихкий. Подібно до кремнію він кристалізується у вигляді кубічних ґраток алмазного типу, елементарна комірка яких містить вісім атомів.



Вперше германій був передбачений Менделєєвим ще у 1871 році під назвою ека-силіцій. У 1885 році, гірники шахти «Хімельсфюрст» знайшли невідомий раніше мінерал, що отримав назву аргіродит. Наступного року, німецький хімік **Клеменс Вінклер** (нім. Clemens Alexander Winkler), професор неорганічної хімії гірничої академії Фрейберга, досліджуючи аргіродит, виявив, що на 7 % той складається з невідомого елемента. 6 лютого 1886 року Вінклер виділив сульфід нового елемента, і зміг визначити його властивості, які збігалися з гіпотетично передбаченими властивостями ека-силіцію.

Кристалічний германій хімічно стійкий на повітрі за кімнатної температури: він не розчиняється у воді, хлоридній і розведєній сульфатній кислотах. Активними розчинниками германію в нормальних умовах є суміш нітратної і плавикової кислот, розчин перекису водню. Під час нагрівання на повітрі до температури понад +650 °C він окиснюється, утворюючи германій(IV) оксид (GeO_2). Під час нагрівання германій також

інтенсивно взаємодіє з галогенами, сіркою та сірчистими сполуками.

Германій має відносно невисоку температуру плавлення і надзвичайно малий тиск насиченої пари за цієї температури. Навіть у розплавленому стані германій майже не взаємодіє з графітом і кварцовим склом, що дає змогу використовувати ці матеріали як тиглі й човники під час оброблення та здійснення металургійних процесів. Рідкий германій має здатність інтенсивно поглинати водень.



Рисунок 16.4 – Чистий германій

Германій використовують у радіоелектроніці й електротехніці як напівпровідник для виготовлення випрямлячів змінного струму різної потужності, транзисторів різних типів. З нього виготовляють перетворювачі Холла й інші прилади, які застосовують для вимірювання напруженості магнітного поля, струмів і потужності. Робочий діапазон температури германієвих приладів від -60 до $+70$ °С.

Оптичні властивості германію дають змогу використовувати його для виготовлення фототранзисторів і фоторезисторів, оптичних лінз із великою світлосилою (для інфрачервоних променів), оптичних фільтрів, модуляторів світла й коротких радіохвиль. Германій використовують також для

виготовлення лічильників ядерних частинок. Германієві прилади мають бути захищені від дії вологості повітря.



Рисунок 16.5 – Германієві інфрачервоні (ІЧ) асферичні лінзи, які можуть використовуватися для тепловізійних систем і точних аналітичних приладів

16.1.3 Селен

Селен (Se) – рідкісний елемент, його вміст у земній корі дорівнює 0,00006 %. Власних руд мінерали селену не утворюють. Він міститься в невеликих кількостях (разом із телуrom) у саморідній сірці та сульфідних рудах. На повітрі селен стійкий, дуже чутливий до світла. Взаємодіє з фтором і хлором, а під час нагрівання – з металами, киснем повітря та воднем.

Селен був відкритий у 1817 році **Єнсом Якобом Берцеліусом** (швед. Jöns Jakob Berzelius) у відходах при виготовленні сірчаної кислоти. Назва походить від грец. σελήνη («Місяць»), оскільки Берцеліус виявив, що відкритий ним новий елемент дуже нагадує телур (від лат. tellus – «Земля») і у природі супроводжує його.

Сірий (металевий) селен (рис. 16.6) – речовина сірого кольору зі слабким блиском, не розчиняється в сірковуглеці

(CS₂). Електричний опір цієї модифікації різко (у 1000 разів) знижується на світлі (порівняно з електричним опором у темряві). Сірий селен переходить у червоний при розчинення в гарячій концентрованій сульфатній кислоті.

Червоний селен – неметалічна речовина червоного кольору, розчинна в сірковуглеці (CS₂) з утворенням жовтого розчину. Термодинамічно нестійка модифікація, на повітрі згоряє блакитним полум'ям, поширюючи характерний запах гнилих овочів.

Щороку у світі отримують приблизно 1000 т селену. Оскільки селен краще проводить електричний струм під час освітлення, його широко використовують для виготовлення фотоелементів, приладів інфрачервоного діапазону, у вимірювальній апаратурі, для сигналізації.



Рисунок 16.6 – Сірий та червоний селен

У сучасних напівпровідникових технологіях використовують селеніди багатьох елементів: олова, свинцю, бісмуту, стибію, селеніди лантанодів.

Таблиця 16.1 – Основні властивості простих напівпровідників

Властивості	Кремній	Германій	Селен	Телур
Щільність за 20 °С, г/см ³	2,33	5,32	4,82	6,25
Температура плавлення, °С	1414	936	220	450
Температура кипіння, °С	2477	2700	685	500
Діелектрична проникність ϵ	12,5	16	5,3	-
Власний питомий опір за температури +20 °С, Ом·м	$2 \cdot 10^3$	0,68	10^{10}	$2,9 \cdot 10^{-3}$
Рухливість електронів при 300 К, м ² /(В·с)	0,14	0,39	-	18
Рухливість дірок при 300 К, м ² /(В·с)	0,05	0,19	$0,2 \cdot 10^{-4}$	0,12
Ширина забороненої зони за кімнатної температури, еВ	1,12	0,7	1,9	0,35

16.1.4 Телур

Телур (Te) – сріблясто-біла речовина з металевим блиском. Незважаючи на зовнішню подібність телуру з металами, він крихкий і легко розтирається на порошок. Електрична провідність телуру мала, але під час освітлення збільшується, що характерно для напівпровідників. За хімічними властивостями близький до селену. Сполуки телуру з металами – телуриди.

Напівпровідник телурид кадмію використовується для виготовлення сонячних батарей. Кадмієво-телуриєві батареї є другою за популярністю технологією у сфері сонячної енергетики, і займають близько 5 % ринку. ККД таких батарей перевищує 20 %.

Іншим важливим застосуванням телуру є виготовлення термоелектрогенераторів – близько 30 % телуру йде на ці

потреби. Такими генераторами, що перетворюють теплову енергію на електричну, оснащені штучні супутники, радіометеорологічні станції та інші автономні установки.



Риунок 16.7 – Кристал телуру

16.2 Властивості напівпровідників

Електропровідність напівпровідників дуже чутлива до зміни температури, а також до інших зовнішніх енергетичних факторів – освітлення, опромінення ядерними частинками, тиску, деформації, зовнішніх електричних і магнітних полів тощо. За низьких температур електропровідність напівпровідників мала (опір великий), а за температури, наближеної до абсолютного нуля, напівпровідники мають властивості ізоляторів. Але під впливом тепла електропровідність напівпровідників зростає, опір зменшується (на відміну від провідників) (рис. 16.8).

Зменшення опору напівпровідників під час нагрівання свідчить про те, що підвищення температури приводить до збільшення кількості вільних зарядів у напівпровіднику. У металах таке не відбувається, а отже, напівпровідники мають інший механізм електропровідності, ніж метали. Причина цього – різна природа хімічного зв'язку між атомами металів і напівпровідників. Металічний зв'язок забезпечується газом вільних електронів, який утримує позитивні йони у вузлах кристалічної ґратки. Атоми напівпровідників скріплює

ковалентний зв'язок. Електрони, що знаходяться на зовнішньому електронному рівні (*валентні*), слабше пов'язані з атомом, ніж інші електрони, які розташовані ближче до ядра. У процесі утворення ковалентного зв'язку два атоми вносять «у спільну справу» по одному своєму валентному електрону. Ці два електрони тепер належать обом атомам, тому їх називають спільною електронною парою, яка утримує атоми напівпровідника один біля одного за допомогою сил електричного тяжіння.

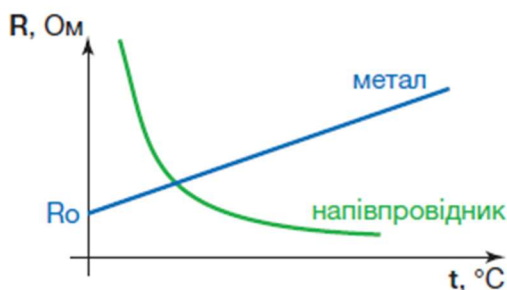


Рисунок 16.8 – Залежність опору напівпровідників і металів від температури

Електропровідність напівпровідників може дуже сильно змінюватися при додаванні навіть мізерної кількості домішок. Наприклад, якщо в хімічно чистий германій додати 0,001 % арсену, його питома електропровідність зростає в 10 000 разів.

Найпоширеніший у природі напівпровідник – кремній. Кульки – атоми кремнію, а трубки, що їх з'єднують, – канали ковалентного зв'язку між атомами. Кожний атом кремнію скріплений із чотирма сусідніми атомами. Оскільки кремній чотиривалентний, на зовнішній електронній оболонці атома

кремнію розташовані чотири валентні електрони. Кожний із цих чотирьох електронів готовий утворити спільну електронну пару з валентним електроном іншого атома. У результаті атом кремнію оточують чотири атоми, які «пристикувалися» до нього й кожний з яких вносить по одному валентному електрону. Відповідно, навколо кожного атома кремнію розташовується по вісім електронів (чотири своїх і чотири чужих).

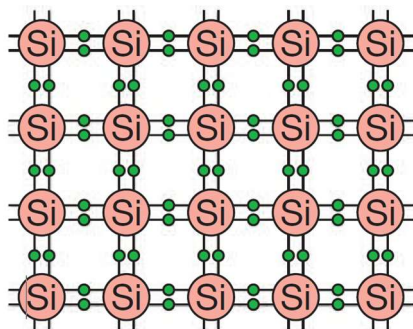


Рисунок 16.9 – Кристалічна ґратка кремнію

Ковалентні зв'язки зображено парами ліній, що з'єднують атоми; на цих лініях знаходяться спільні електронні пари. Кожний валентний електрон, розташований на такій лінії, більшість часу проводить у просторі між двома сусідніми атомами. Однак валентні електрони аж ніяк не «прив'язані намертво» до відповідних пар атомів. Відбувається перекриття електронних оболонок усіх сусідніх атомів, так що будь-який валентний електрон є спільним надбанням усіх атомів-сусідів. Від деякого атома такий електрон може перейти до сусіднього з ним атома, потім – до наступного й так далі. Валентні електрони

можуть переміщатися по всьому простору кристала – вони належать усьому кристалу, а не якійсь одній атомній парі.

Проте валентні електрони кремнію не є вільними (як у металах). У напівпровіднику зв'язок валентних електронів з атомами набагато міцніший, ніж у металі. Енергії електронів виявляється недостатньо для того, щоб під дією зовнішнього електричного поля почати впорядкований рух від меншого потенціалу до більшого. Тому за досить низьких температур напівпровідники близькі до діелектриків – вони не проводять електричний струм.

16.3 Утворення енергетичних зон

За умови, що атоми в матеріалі розміщені на великих відстанях один від одного, взаємодією між ними можна знехтувати. Потенціальна енергія взаємодії електрона з ядром $E(r)$ має вигляд енергетичної ями. Електрон у такій ямі має від'ємну енергію і може знаходитися на одному з рівнів: E_1 , E_2 , E_3 , ..., E_n . Рівні, які розміщені вище від рівня E_n , – вільні. При цьому потенційні бар'єри перешкоджають вільному переходу електронів від одного атома до другого.

При наближенні атомів потенціальні криві, які відділяють сусідні атоми, частково перекриваються й утворюють потенціальну криву, яка проходить нижче від нульового рівня 0–0 (рис. 16.10). Це означає, що зближення атомів приводить до зменшення не тільки ширини, а й висоти бар'єра.

Оскільки ця висота нижча від початкового положення енергетичного рівня валентних електронів E_n , то останні отримують змогу практично без перешкод переходити від одного атома до другого.

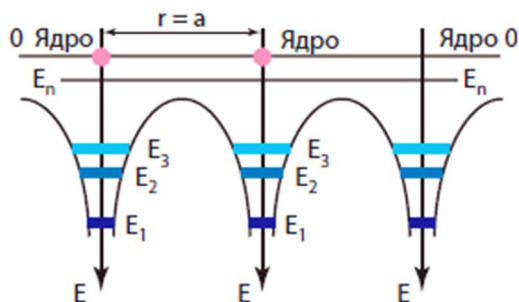


Рисунок 16.10 – Енергетичні схеми атомів, наближених на відстань $r=a$

При наближенні атомів один до одного дискретні енергетичні рівні, властиві окремому атому, розщеплюються на окремі підрівні, у результаті чого тверде тіло характеризується певною зонною діаграмою, у якій дозволені енергетичні зони чергуються із забороненими. Кожна зона складається з множини дискретних енергетичних підрівнів, відстань між якими така мала, що зони можна вважати практично безперервними.

Енергетичні зонні діаграми матеріалів зображено на рисунку 16.11. Верхню дозовану зону називають **вільною**, або **зоною провідності**, а розміщену під нею дозовану зону – **валентною зоною**. У напівпровідниках і діелектриках між валентною зоною і зоною провідності існує проміжна зона – **заборонена**. Особливість цієї зони – повна відсутність дозованих рівнів.

Ширина забороненої зони дорівнює величині енергії, яку необхідно надати електрону, щоб перевести його зі зв'язаного стану у валентній зоні в зону провідності. Ширина забороненої зони в напівпровідниках становить до 3 еВ (електрон-вольт), у діелектриках – перевищує 3 еВ, у провідниках забороненої зони немає.

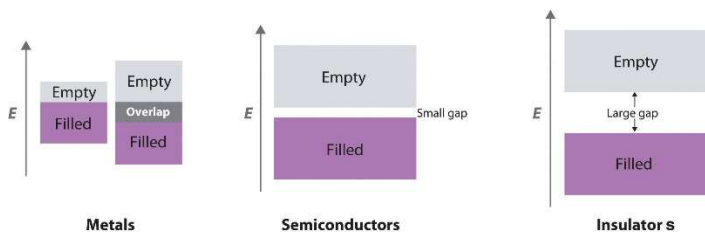


Рисунок 16.11 – Енергетичні зонні діаграми провідників, напівпровідників та діелектриків

За температури, близької до абсолютного нуля, валентна зона в напівпровідниках завжди повністю заповнена електронами, а зона провідності може бути порожньою. Щоб «звільнити» електрони й викликати електричний струм, необхідно ззовні надати їм енергію (наприклад, нагріти кристал). Завдяки цьому електрони будуть переведені на вищі енергетичні рівні й становитимуть зону провідності (зону вільних електронів).

Значення ширини забороненої зони елементарних напівпровідників наведено в таблиці 16.2.

Таблиця 16.2 – Ширина забороненої зони (ΔE) елементарних напівпровідників за температури 300 K (+26,85 °C)

Елемент	ΔE , eV	Елемент	ΔE , eV
Бор	1,1	Арсен	1,2
Вуглець (алмаз)	5,6	Сульфур	2,5
Кремній	1,12	Селен	1,8
Германій	0,665	Телур	0,36
Фосфор	1,5	Йод	1,25

16.4 Електропровідність напівпровідників та її види

Опір напівпровідника зменшується зі зростанням температури. За підвищеної температури теплові коливання атомів стають інтенсивнішими, й енергія валентних електронів зростає. У деяких електронів енергія досягає значень, достатніх для розриву ковалентних зв'язків. Такі електрони залишають свої атоми й стають *вільними* (або електронами провідності) – так само, як у металах. У зовнішньому електричному полі вільні електрони починають упорядкований рух, утворюючи електричний струм.

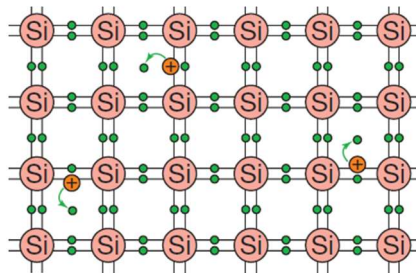


Рисунок 16.12 – Утворення вільних електронів і «дірок»

На місці розірваного ковалентного зв'язку, там, де був електрон, утворюється порожнє місце, яке отримало умовну назву «дірка», – незаповнений зв'язок із зарядом, що дорівнює заряду електрона, але з протилежним знаком. «Дірки» також не залишаються на місці – вони можуть «блукати» по кристалу. Один із сусідніх валентних електронів, «подорожуючи» між атомами, може «перескочити» на вакантне місце, що утворилося, заповнивши «дірку»; тоді «дірка» в цьому місці зникне, але з'явиться нова «дірка» в тому місці, звідки цей електрон прийшов.

За відсутності зовнішнього електричного поля переміщення «дірок» має випадковий характер, бо валентні електрони також «блукають» між атомами хаотично. Однак в електричному полі починається спрямований рух і електронів, і «дірок».

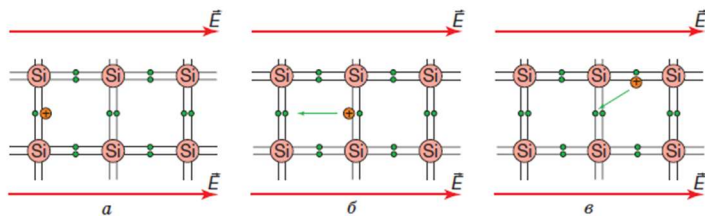


Рисунок 16.13 – Рух «дірки» в електричному полі:

а – початкове положення «дірки» (найбільш вірогідні «переходи» електрон-«дірка» в напрямку *проти* ліній поля)

б – електрон «стрибнув» вліво (зелена стрілка), заповнивши вакансію, а «дірка», відповідно, змістилася вправо.

в – наступний можливий стрибок – «дірка» зайняла нове місце, розташоване ще правіше.

«Дірка» в цілому переміщується в напрямку ліній поля – тобто туди, куди й має рухатися позитивний заряд. «Перескоки» валентних електронів від атома до атома відбуваються переважно в напрямку *проти* ліній поля.

Отже, у кристалі кремнію є два типи носіїв заряду: *вільні електрони* та «*дірки*». При накладанні зовнішнього електричного поля з'являється електричний струм, викликаний їх упорядкованим зустрічним рухом: вільні електрони переміщуються *протилежно* до вектора напруженості електричного поля E , а «дірки» – у напрямку вектора E .

Виникнення струму за рахунок руху вільних електронів називають електронною провідністю, або *провідністю n-типу*. Процес упорядкованого переміщення «дірок» називають «дірковою» провідністю, або *провідністю p-типу* (від лат.

negativus – негативний і *positivus* – позитивний). Обидві провідності в чистому напівпровіднику – електронну та «діркову» – разом називають **власною провідністю** напівпровідника.

У чистому напівпровіднику число електронів, які вивільнюються в кожний момент часу, дорівнює числу «дірок», що утворюються при цьому. Загальна ж їхня кількість за кімнатної температури відносно невелика. Тому електропровідність такого напівпровідника мала, і він здійснює досить великий опір електричному струму.

Найважливішою особливістю напівпровідників є те, що їхній питомий електричний опір може бути змінений на кілька порядків у результаті додавання домішок. У такому випадку, крім власної провідності, у напівпровіднику виникає домінуюча **домішкова провідність** того чи іншого типу.

Наприклад, якщо у розплав чотиривалентного кремнію (Si) додати трохи п'ятивалентного арсену (As), то після кристалізації розплаву виявляється, що атоми арсену займають місця в деяких вузлах кристалічної ґратки кремнію. На зовнішньому електронному рівні атома арсену п'ять електронів. Чотири з них утворюють ковалентні зв'язки з найближчими сусідами – атомами кремнію (рис. 16.14). П'ятий електрон арсену, що не брав участі у створенні ковалентних зв'язків, стає вільним. Енергія зв'язку цього «зайвого» електрона з атомом арсену, розташованим у кристалі кремнію, набагато менша від енергії зв'язку валентних електронів з атомами кремнію. Тому вже за кімнатної температури майже всі атоми арсену в результаті теплового руху залишаються без п'ятого електрона, перетворюючись на позитивні йони. Кристал кремнію, відповідно, наповнюється вільними електронами, які

відчепилися від атомів арсену. Але в такому разі поява вільного електрона, який «пішов» з атома арсену, не супроводжується появою рухомої «дірки».

Отже, проникнення атомів п'ятивалентного арсену в кристалічну ґратку кремнію створює електронну провідність, але не приводить до симетричної появи «діркової» провідності. Головна роль у створенні струму тепер належить вільним електронам, які в такому випадку називають **основними носіями заряду**.

Механізм власної провідності продовжує працювати й за наявності домішок: ковалентні зв'язки, як і раніше, рвуться за рахунок теплового руху, породжуючи вільні електрони й «дірки». Але тепер «дірок» виявляється набагато менше, ніж вільних електронів, у великій кількості наданих атомами арсену. Тому «дірки» в цьому випадку будуть **неосновними носіями заряду**.

Домішки, атоми яких віддають вільні електрони без появи однакової кількості рухливих «дірок», називаються **донорними**. Тому напівпровідники з донорними домішками називають **електронними напівпровідниками**, або **напівпровідниками n-типу**.

Можна, навпаки, створити напівпровідник з переважно «дірковою» провідністю. Так вийде, якщо в кристал чотиривалентного кремнію (Si) додати тривалентну домішку, наприклад індій (In). В такому випадку на зовнішньому електронному рівні атома індію розташовані три електрони, які формують ковалентні зв'язки з трьома атомами кремнію, які їх оточують. Для четвертого сусіднього атома кремнію в атома індію вже не вистачає електрона, і в цьому місці виникає «дірка». І «дірка» ця не проста, а особлива – з досить великою енергією

зв'язку. Коли в неї потрапить електрон із сусіднього атома кремнію, він у ній «застрягне назавжди», бо тяжіння електрона до атома індію дуже велике – більше, ніж до атомів кремнію. Атом індію перетвориться на негативний йон, а в тому місці, звідки електрон «прийшов», виникне «дірка» – але тепер уже звичайна рухлива «дірка» у вигляді розірваного ковалентного зв'язку в кристалічній ґратці кремнію. Ця «дірка» почне «блукати» по кристалу за рахунок «естафетного» передання валентних електронів від одного атома кремнію до іншого.

Отже, кожний домішковий атом індію породжує «дірку», але не приводить до симетричної появи вільного електрона. Домішки, атоми яких створюють у кристалі рухливі «дірки», називають **акцепторними**.

Тривалентний індій (In) – приклад акцепторної домішки для чотиривалентного кремнію (Si). Якщо до кристалу чистого кремнію додати акцепторну домішку, то кількість «дірок», породжених домішкою, буде набагато більшою від кількості вільних електронів, що виникли за рахунок розриву ковалентних зв'язків між атомами кремнію. Напівпровідник з акцепторною домішкою – це **«дірковий» напівпровідник, або напівпровідник *p*-типу**.

«Дірки» відіграють головну роль під час створення струму в напівпровіднику *p*-типу. У цьому випадку «дірки» – **основні носії заряду**; вільні електрони – **неосновні носії заряду**. Рух вільних електронів у напівпровіднику *p*-типу не має істотного впливу: електричний струм забезпечується насамперед «дірковою» провідністю.

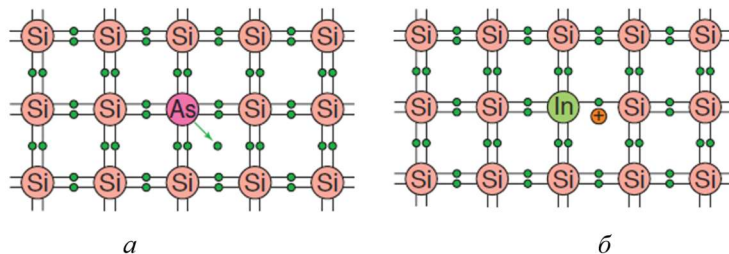


Рисунок 16.14 – Структура напівпровідника: а – n -типу; б – p -типу

16.5 Електронно-«дірковий» перехід (p - n -перехід)

Робота переважної більшості напівпровідникових приладів ґрунтується на явищах, які виникають при контакті двох монокристалічних напівпровідників із різними типами провідності. Такий контакт p - і n -напівпровідників називають **p - n -переходом**, або **електронно-«дірковим»**. Він має цінні властивості, використання яких і обумовлює широкий спектр можливостей напівпровідникових приладів.

Щоб отримати p - n -перехід, потрібно в кристалі напівпровідника утворити дві контактуючі ділянки з різними типами провідності. Найпростіше це можна зробити так званим методом сплавлення (рис. 16.15). Як основу беруть пластинку з монокристалу германію (n -Ge), який має провідність n -типу. Зверху кладуть шматочок тривалентної домішки, наприклад, індію (In), і нагрівають до $+450 - +500$ °С. Германій та індій сплавляються і після охолодження утворюється p - n -перехід: прикордонний шар германію збагачується індієм, унаслідок чого утворюється тонкий шар напівпровідника p -типу (p -Ge).

Цей шар у місці контакту з германієм n -типу й утворює електронно-«дірковий» перехід.

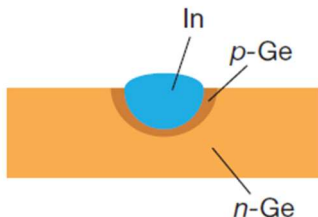


Рисунок 16.15 – Утворення p - n -переходу

Розглянемо процеси в напівпровідниковому елементі, який складається з двох частин, одна з яких має провідність p -типу, а інша – n -типу. На рисунку 16.16 зображено контакт таких ділянок; кольорові кружечки – це «дірки» та вільні електрони, які є основними (або неосновними) носіями заряду у відповідних ділянках.

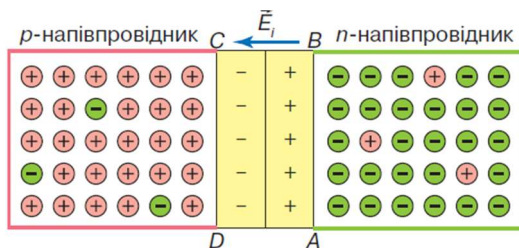


Рисунок 16.16 – Замикаючий шар p - n -переходу

У напівпровіднику p -типу, який отримують за допомогою акцепторної домішки, концентрація «дірок» набагато перевищує концентрацію електронів. У напівпровіднику n -типу, який отримують за допомогою донорної домішки, концентрація електронів набагато перевищує концентрацію «дірок». Якщо між двома такими напівпровідниками встановити контакт, то виникне **дифузний струм** – основні носії заряду (електрони й

«дірки») будуть хаотично перетікати з тієї ділянки, де їх більше, у ту ділянку, де їх менше, і рекомбінувати один з одним. Як наслідок, поблизу межі між ділянками практично не буде вільних (рухомих) основних носіїв заряду, але залишаться йони домішок із некомпенсованими зарядами. Ділянка в напівпровіднику p -типу, яка прилягає до межі, отримує при цьому негативний заряд, принесений електронами, а прикордонна ділянка в напівпровіднику n -типу отримує позитивний заряд, принесений «дірками».

У результаті в напівпровіднику n -типу біля межі контакту залишається некомпенсований заряд позитивних (+) йонів донорної домішки, а в напівпровіднику p -типу (також поблизу межі) виникає некомпенсований негативний (–) заряд йонів акцепторної домішки. Ці некомпенсовані об'ємні заряди утворюють так званий **замикальний шар**, внутрішнє електричне поле якого перешкоджає подальшій дифузії вільних електронів і «дірок» через межу контакту. У ділянці p - n -переходу виникає цікаве й дуже важливе явище – **однобічна провідність**.

Підключимо до напівпровідникового елемента джерело живлення так, щоб «плюс» джерела – до n -напівпровідника, а «мінус» – до p -напівпровідника (рис. 16.17). Зовнішнє електричне поле веде основні носії заряду далі від межі контакту. Ширина замыкального шару збільшується, його електричне поле зростає. Опір замыкального шару великий, й основні носії не в змозі подолати p - n -перехід. Електричне поле дає змогу переходити межу лише неосновним носіям, однак, з огляду на дуже малу концентрацію неосновних носіїв, струм, який вони створюють, дуже малий. Подану нижче схему називають **включенням p - n -переходу у зворотному напрямку**.

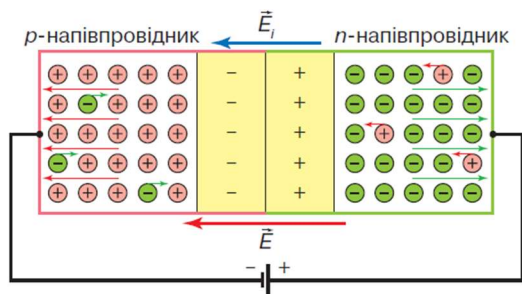


Рисунок 16.17 – Включення p - n -переходу в зворотному напрямку (струму немає)

Електричного струму основних носіїв немає; є лише мізерно малий струм неосновних носіїв. У цьому випадку p - n -перехід виявляється закритим.

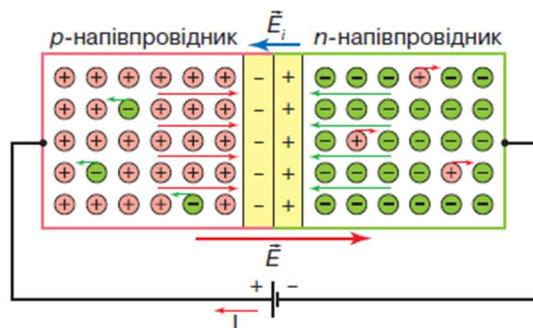


Рисунок 16.18 – Включення p - n -переходу в прямому напрямку (струм іде)

При зміні полярності підключення джерела живлення, тобто «плюс» на p -напівпровідник, а «мінус» – на n -напівпровідник (рис. 16.18) зовнішнє електричне поле буде спрямоване проти замикального поля і відкриє шлях для руху основних носіїв через p - n -перехід. Замикальний шар стає тоншим, його опір

зменшується. Відбувається масове переміщення вільних електронів із n -ділянки в p -ділянку, а «дірки» так само спрямовуються з p -ділянки до n -ділянки. У ланцюгу виникає струм, викликаний рухом основних носіїв заряду.

Цю схему називають **включенням p - n -переходу в прямому напрямку**. Тепер електричне поле перешкоджає перетіканню неосновних носіїв, але цей незначний фактор помітно не впливає на загальну провідність.

16.6 Вольт-амперна характеристика напівпровідників

Вольт-амперною характеристикою (ВАХ) матеріалу чи пристрою називають залежність сили струму в ньому від величини прикладеної напруги. ВАХ зазвичай зображують як графік, у якому напруга прикладається вздовж осі абсцис, а струм – уздовж осі ординат (рис. 16.19).

У напівпровідниках прямої залежності сили струму від напруги немає. Струм при збільшенні напруги зростає значно швидше за саму напругу. Якщо змінити напругу на зворотну, то зміна струму в напівпровіднику відбуватиметься за таким само законом. Тобто вольт-амперна характеристика чистого напівпровідника симетрична (рис. 16.19).

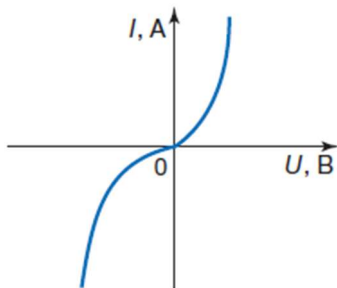


Рисунок 16.19 – Вольт-амперна характеристика чистого напівпровідника

Якщо взяти два напівпровідники з різними типами провідності й розташувати їх у тісному контакті (створити p - n -перехід), то вольт-амперна характеристика такого пристрою стане несиметричною. Звідси випливає: якщо струм йде в одному напрямку, ця система матиме малий опір, а в іншому напрямку – великий. Отже, і струм у різних напрямках (прямий і зворотний) матиме різну величину (рис. 16.20).

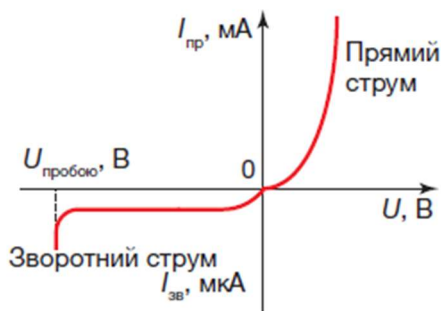


Рисунок 16.20 – Вольт-амперна характеристика p - n -переходу

Однобічна провідність p - n -переходу використовується в напівпровідниковому **діоді** – електронному приладі з одним p - n -переходом і з двома електродами (анод і катод), що пропускає електричний струм лише в одному напрямку; у протилежному напрямку струм через діод не проходить (діод «закритий») (рис. 16.21). Діоди застосовують у радіотехніці, електроніці, енергетиці переважно для випрямлення змінного електричного струму.

Напівпровідникові p - n -переходи використовують не тільки для випрямлення змінного струму, а й для підсилення електричних сигналів. Якщо в електричну схему з двох увімкнених послідовно між собою p - n -переходів ввести зворотний зв'язок, то її можна використовувати й для генерації

електричних коливань. Напівпровідникові прилади, призначені для розв'язання цих завдань, називають **напівпровідниковими тріодами**, або **транзисторами** – це напівпровідниковий прилад, який застосовують для підсилення або генерації електричних сигналів.

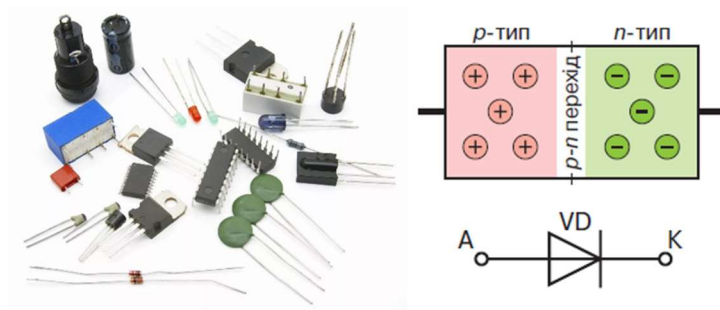


Рисунок 16.21 – Напівпровідниковий діод: зовнішній вигляд схематичне зображення і графічне позначення на схемах

Напівпровідникові тріоди, на відміну від діодів, мають два електронно-«діркових» переходи, увімкнених послідовно між собою назустріч один одному (n - p - n або p - n - p -переходи). Їхніми робочими електродами є **база Б**, **емітер Е** та **колектор К**.

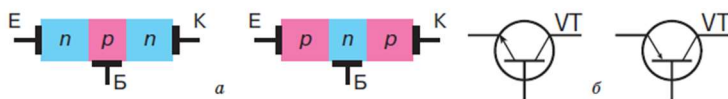
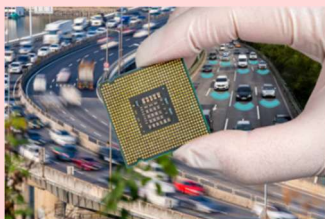


Рисунок 16.22 – Напівпровідниковий транзистор: а – схематичне зображення будови транзисторів типів n - p - n та p - n - p ; б – умовне графічне позначення транзисторів на схемах

Для виготовлення транзисторів використовують переважно германій і кремній, оскільки вони характеризуються значною механічною міцністю, хімічною стійкістю та великою рухливістю носіїв струму.

Лідером в галузі напівпровідникової продукції нині є Тайвань – там виробляють найбільш ефективні мікрочіпи. Конкуренцію тайванським виробникам становлять заводи в Південній Кореї. Власне виробництво напівпровідникової продукції налагоджено в Сполучених Штатах. Американська система дозволяє забезпечити повний цикл виробництва передових мікрочіпів – від розроблення до кінцевого продукту, але працюють такі компанії здебільшого на військово-промисловий комплекс.



Мікрочіпи часто використовуються у системах безпеки та керуванні автомобілем. Особливу роль напівпровідники відіграють у конструкції гібридних та електромобілів, де їх кількість може досягати 3500 чіпів, що відповідають за розподіл електроенергії та оптимізацію ефективності їхньої роботи. Наприклад, BOSCH розробляє мікрочіпи для систем управління двигуном та електроніки автомобілів. Apple використовує напівпровідники для виробництва своїх продуктів – від інноваційних iPhone, iPad, зручних AirPods, до потужних та енергоефективних MacBook.

Питання для самоперевірки:

1. Що таке напівпровідники, і як вони відрізняються від провідників і діелектриків?
2. Які основні типи напівпровідників?
3. Що таке енергетичні зони в напівпровідниках, і як вони утворюються?

4. Як змінюється електропровідність напівпровідників залежно від температури?
5. Що таке *p-n*-перехід, і які його основні властивості?
6. У чому полягає принцип роботи напівпровідникового діода?
7. Що таке електронно-дірковий перехід?
8. Як виглядає вольт-амперна характеристика напівпровідників?
9. Які матеріали використовуються для виготовлення напівпровідників?
10. Чому напівпровідники є основою сучасної електроніки?

Предметний
покажчик

А

АБС-пластик, 188
азот, 148
альдрей, 371
альсіфер, 450
алюміній, 365
анізотропія, 17
антипірени, 176
атом, 14

Б

бронза, 359
берилієва, 361
кадмієва, 360
кремнієва, 360
олов'яна, 360
свинцева, 361
фосфориста, 362

В

в'язкість, 110
валентність, 15
вектор магнітної
індукції, 430
відносне видовження,
109
звуження, 109
вініпласт, 195
водень, 140
водопоглинання, 131
вологопроникність,
132
волокно
оптичне, 262
вольфрам, 373
втома, 111
втрати
*дипольно-
релаксаційні*, 61
питомі, 48

резонансі, 55
вулканізація, 224

Г

газовий розряд
дуговий, 81
іскровий, 80
коронний, 82
тліючий, 80
гелій, 154
германій, 468
герметик, 247
гетинакс
фольгований, 217
гігроскопічність, 131
гістерезис, 432
границя
текучості, 108
графіт, 410
гума
тіурамова, 227

Д

деполімеризація, 175
дифеніл, 167
дифлон, 209
дифузія, 15
дифузний струм, 485
діамагнетика, 435
діелектрик, 11, 32
діелектрична
проникність, 43
діелектричні втрати,
в рідких
діелектриках, 60
в твердих
діелектриках, 62
іонізаційні, 58
в газах, 59
довговічність, 118
домен, 294
діуралюмін, 367

Е

ебоніт, 229
еластомери, 220
елегаз, 150
електрет, 327
електрична міцність,
69
електричне поле
неоднорідне, 78
однорідне, 77
електропровідність,
23, 25
газів, 28
несамостійна, 138
несамостійна, 29
рідин, 30
емаль, 238
ескапон, 227
ефект
Віллари, 434
піроелектричний,
323
електретний, 329
Зесбека, 329
Майснера, 419
Пельтьє, 389
Керра, 300
Поккельса, 300

З

Закон
Кюри-Вейсса, 291
Ареніуса, 1173
Пашена, 83
залишкова індукція,
433
залізо, 398
електролітичне,
441
карбонільне, 442
затверджувач, 214
зв'язувач, 212
золото, 392

зона

валентна, 477
заборонена, 477
провідності, 477

I

ізотропія, 17

іонний зв'язок, 19

Й

йон, 14

К

каучук

бутадієновий, 227
бутадієн-стірольний,
227
натуральний, 220
синтетичний, 222
ізопреновий, 223

кевлар, 202

кераміка

надпровідна, 271
конденсаторна, 269
спеціального
призначення, 272
стеатитова, 268

кислотність, 130

клас нагрівостійкості
ізоляції, 115

клей

неорганічний, 244
органічний, 246

ковалентний зв'язок,
16

коерцитивна сила,
295,433

коефіцієнт

теплопровідності,
120

діелектричних
втрат, 52

тепловіддачі, 123

компаунди

заливні, 240

кабельні, 240

обмазувальні, 240
просочувальні, 240
термопластичні,
241

термореактивні,
241

константан, 384

кремній, 465

крива

іонізації, 66

намагнічування, 431

критична температура
переходу, 416

крихкість, 110

кріопровідність, 427

кут діелектричних
втрат, 47, 50

Л

лавина, 85

лавсан, 208

лак

кремнійорганічний,

237

олійний, 236

олійно-бітумний,

236

олійно-смоляний, 236

просочувальний, 232

фенолоалкідний, 237

водно-емulsійний,
238

латунь, 362

М

магналії, 372

магнітні матеріали,
430

магнітодіелектрики,
449

магнітострикція, 435

майлар, 208

манганін, 383

масло

кабельне, 165

касторове, 161

конденсаторне, 166
ляне, 160

малов'язке, 165

рицинове, 161

середньов'язке, 166
трансформаторне,
161

тунгове, 160

матеріали

магнітом'які, 440

магнітотверді, 453

термомагнітні, 462

межа

міцності, 108

пружності, 109

металічний зв'язок, 20

мідь, 356

міжфазна поляризація,
41

мікалекс, 282

міканіт, 278

гнутий, 280

колекторний, 279

прокладковий, 279

термотривкий, 280

мікаполотно, 282

мікастрічка, 280

мікафолій, 281

мікашовк, 282

міцність, 107

молекула, 14

молекулярний зв'язок,
21

молібден, 375

мусковіт, 275

Н

нагрівостійкість, 116

надпровідник, 416

напівпровідник, 465

наповнювач, 212

напруга

пробивна, 69
напруженість
магнітного поля,
430
нейзильбер, 364
нейлон, 202
нелінійність
ефективна, 301
реверсивна, 302
неон, 156
нікель, 405
ніобій, 378
ніхром, 385

О

олово, 406
опір
питомий, 11, 31

П

п'єзоелектрик, 305
п'єзоефект, 308
паладій, 397
парамагнетик, 436
перехід Фредерікса,
352
пермалої, 444
пермендіор, 463
піноскло, 255
пірекс, 253
піроелектрик, 321
пластики, 212
пластифікатор, 214
пластичність, 109
платина, 395
повітря, 139
позистор, 301
поліаміди, 201
полівінілацеталі, 211
полівінілхлорид, 194
поліетилен, 182
поліетилентерефталат,
208
полізобутилен, 191
полііміді, 199

полікарбонат, 209
поліконденсація, 175
полімери
термопластичні,
177, 181
термореактивні,
181
полімеризація, 174
поліметилметакрилат,
197
поліпропілен, 189
полістирол, 186
політетрафторетилен,
192
політрифторхлорети-
лен, 196
поліуретани, 210
поляризація, 36, 38, 39,
138, 295, 334
електронна, 34
іонна, 37
релаксаційна, 43
порцеляна, 268
потенціал
іонізаційний, 74
прес-порошки, 215
пробій
газів, 72
електричний, 71
електротепловий,
71
електрохімічний,
71, 104
тепловий, 100
рідких
діелектриків, 92
твердих
діелектриків, 96
пружність, 108

Р

радіоелектрети, 338
рекомбінація, 29, 75
реній, 379
рівняння Фур'є, 120

рідини
фторорганічні, 171
рідкі кристали
нематичні, 348
холестеричні, 350
смектичні, 350

С

сажа, 413
свинець, 409
світлостійкість, 134
сегнетоелектрики, 287
сегнетокераміка, 269
селен, 470
силумін, 368
ситал, 255
скло, 250
борсилікатне, 253
електротехнічне,
258
кольорове, 259
оптичне, 258
свинцеве, 254
силікатне, 252
хіміко-
лабораторне,
257
скловолокно, 261
склогетинакс, 218
склотканина, 263
сляда, 274
сляденіти, 283
слядопласти, 284
смарт-скло, 260
совол, 168
совтол, 168
срібло, 394
стабілізатор, 214
сталь, 401
електротехнічна,
443
мартенситна, 454
старіння діелектрика,
105
старіння ізоляції, 116

стійкість
 радіаційна, 134
 тропічна, 133
 хімічна, 133
стример, 88
ступінь полімеризації,
 174

Т

тантал, 376
твердість
 за методом
 Брінелля, 111
 за методом
 Віккерса, 113
 за методом
 Роквелла, 112
текстоліт, 218
телур, 472
температура
 займання, 129
 плавлення, 128
 плинності, 128
 розм'якшення, 127

 склування, 129
 спалаху, 129
температурний
 коефіцієнт
 лінійного
 розширення, 125
температуропровідніст
 ь, 124
теплоємність, 124
теплопровідність, 119
теплостійкість, 114
термопара, 388
термоудар, 125
тефлон, 192
точка Кюрі
 сегнетоелектрична,
 290
транзистор, 490
трибоелектрети, 340
триплекс, 256

У

ультрафарфор, 270

Ф

фарфор
 електротехнічний,
 266
фенопласти, 216
феримагнетики, 439
ферити, 457
феромагнетики, 437
фехраль, 387
флогопіт, 276
фотоелектрети, 338
фреон, 152
фторфлогопіт, 277

Х

холодостійкість, 118
хром, 381
хромаль, 387

Ч

чавун, 403

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Акімов О. І. Техніка високих напруг. Ізоляція та перенапруги в пристроях електропостачання і електричної тяги залізничного транспорту: навч. посіб. / О. І. Акімов, Д. Л. Сушко. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – 217 с.
2. Атаманюк В. В. Технологія конструкційних матеріалів. – Київ: Кондор, 2006. – 528 с.
3. Афтанділянц Є.Г. Матеріалознавство: Підручник / Є.Г. Афтанділянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. – Херсон, Видавець Грінь Д.С., 2013. – 612 с.
4. Бацуровська І. В. Електротехнології : навч. посіб. / І. В. Бацуровська. Миколаїв : МНАУ, 2021. – 258 с.
5. Бовсуновський А. П. Електротехнічні матеріали : короткий довідник. / А. П. Бовсуновський – Київ : НУХТ, 2012. – 36 с.
6. Будник А.Ф. Неметалеві матеріали в сучасному суспільстві: Навчальний посібник. / А.Ф. Будник, В.Б. Юскаєв, О.А. Будник – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 222 с.
7. В. В. Шевченко. Основи електроенергетики: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В. В. Шевченко Видання 3-є, перероблене та доповнене. Харків: НТУ «ХПІ, 2024. – 438 с.
8. Василенко І. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали: навч. посіб. / І. І. Василенко В. В. Широков, Ю. І. Василенко – Львів: Магнолія, 2006. – 242 с.
9. Височанський Ю. М. Сегнетоелектрики в наноінженерії. Фосфорвмісні халькогеніди металів : монографія / Ю. М. Височанський, О.О. Молнар – Ужгород : ТОВ «РІК-У», 2021. – 284 с.
10. Віленський В.О. Полімери: синтез, модифікація, дослідження : навчальний посібник / В.О. Віленський – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2024. – 348 с.
11. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів : підруч. для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти. / Власенко А. М. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с.

12. Джурка Г.Ф. Полімерні композиційні матеріали / Г. Ф. Джурка. – Полтава, 2008 – 58 с.
13. Дорощенко Г. Д. Радіокомпоненти та мікроелектронна технологія : навч. пос. / Дорощенко Г. Д., Колесницький О. К., Тужанський С. Є. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 145 с.
14. ДСТУ 2648-94 Ізолятори електротехнічні. Терміни та визначення [Чинний від 01.07.1995].
15. ДСТУ 2725-94 Матеріали магнітні. Терміни та визначення [Чинний від 01.07.1995].
16. ДСТУ 2815-94. Електричні й магнітні кола та пристрої. Терміни і визначення [Чинний від 01.01.1996].
17. ДСТУ 2839-94. Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови [Чинний від 01.01.1996].
18. ДСТУ 2843-94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення [Чинний від 01.01.1996].
19. ДСТУ 3095-95 Вироби із феритів та магнітодіелектриків. Терміни та визначення [Чинний від 01.07.1996].
20. ДСТУ 3467-96 Папір конденсаторний. Загальні технічні умови [Чинний від 01.01.1999].
21. ДСТУ 3545-97 Матеріали електроізоляційні тверді. Методи вимірювання електричного опору та питомого електричного опору за підвищених температур [Чинний від 01.07.1999].
22. ДСТУ ІЕС 60216-1:2015. Матеріали електроізоляційні. Характеристики нагрівостійкості. Частина 1. Методики проведення випробування на старіння й оцінювання результатів (ІЕС 60216-1:2001, IDT) [Чинний від 01.09.2016].
23. ДСТУ ІЕС 60243-2:2014 Матеріали електроізоляційні. Методи випробування на електричну міцність. Частина 2. Додаткові вимоги до випробування сталою напругою (ІЕС 60243-2:2001, IDT) [Чинний від 01.07.2015].
24. ДСТУ ІЕС 60216-2:2015. Матеріали електроізоляційні. Характеристики нагрівостійкості. Частина 2. Визначення показників нагрівостійкості. Вибір критерію випробування (ІЕС 60216-2:2005, IDT) [Чинний від 01.09.2016].
25. Журавльова Л. В. Електроматеріалознавство / Л. В. Журавльова, В. М. Бондар. – К. : Грамота, 2006. – 312 с.

26. Заячук Д. Нанотехнології і наноструктури: навч. посіб. / Д. М. Заячук. – Львів: Вид-во «Львівська політехніка», 2009. – 580 с.
27. Калетнік Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість / Г. М. Калетнік, М. Г. Чаусов, В. М. Швайко. – Київ: «Хайт-Тек Прес», 2013. – 528 с.
28. Кириленко В.М. Електротехнічні матеріали: Курс лекцій. Частина 1. Діелектричні матеріали : навчальний посібник / В.М. Кириленко, К.В. Кириленко. В.М. Головка. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 224 с.
29. Ковтуненко Синтетичні полімери. Конституція / В. О. Ковтуненко, Л. П. Величко // Біологія і хімія в рідній школі. – 2020. – № 2. – С.2-6.
30. Колесов С.М. Електроматеріалознавство (Електротехнічні матеріали) / С.М. Колесов, І.С. Колесов – К.: "Дельта", 2008. – 516 с.
31. Конструкційні та функціональні матеріали / В. П. Бабак, Д. Ф. Байса, В.М. Різак, С. Ф. Філоненко. – К.: Техніка. – ч.1, 2003. – 344 с.
32. Конструкційні та функціональні матеріали / В. П. Бабак, Д. Ф. Байса, В.М. Різак, С. Ф. Філоненко. – К.: Техніка. – ч.2, 2004. – 368 с.
33. Крилик, Л. В. Матеріали електронної техніки : навчальний посібник / Л. В. Крилик, О. О. Селецька. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 120 с.
34. Курська Т. М. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій / Т. М. Курська, Г. О. Чернобай, С. Б. Єрьоменко. – Харків : УЦЗУ, 2008. – 136 с.
35. Куцова В. З. Спеціальні сплави, рідкоземельні та благородні метали: навч. посіб. / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, О. А. Носко. – Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2007. – 162 с.
36. Куцова В. З. Фазові перетворення в спеціальних легованих сталях: навч. посіб. / В. З. Куцова, М. А. Ковзель, О. А. Носко. – Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2007. – 132 с.

37. Леонтьєв В. О. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник / В. О. Леонтьєв, С. В. Бевз, В. А. Видмиш. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 122 с.
38. Масліков М.М. Кріогенна техніка і технологія: навч. посібник / М.М. Масліков. – Київ: НУХТ, 2010. – 178 с.
39. Матвійчук В. А. Діагностування електрообладнання. Навч. посіб. / В. А. Матвійчук, О. Є. Рубаненко, І.О. Гунько – Вінниця: ВНАУ, 2020. – 138 с.
40. Матеріалознавство : навч. посіб. / В.І. Бузило, В.П. Сердюк, А.В. Яворський, О.А. Гайдай – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2021. – 243 с .
41. Матеріалознавство на автомобільному транспорті / В. А. Косенко, С. В. Кадомський, О. О. Богдан, В. В. Малишев, В. А. Поступаленко. – Київ, 2019. – 254 с.
42. Мікроелектронні сенсори фізичних величин / В. Вуйцік, З. Ю. Готра, В. В. Григор'єв, В. Каліта, О. М. Мельник, Є. Потенцкі. – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
43. Мікульонок І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей : навч. посіб. / І. О. Мікульонок. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 312 с.
44. Нестерчук Д. М. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д. М. Нестерчук, С. О. Квітка, С. В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. – 206 с.
45. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії: навч. посібник / О. І. Соловей, Ю. А. Лега, В. П. Розен, О. О. Ситник, А. В. Чернявський, Г. В. Курбаса. – Черкаси: ЧДТУ, 2007. – 483 с.
46. Основи електроніки : навч. посіб. / А. С. Васюра, Г. Д. Дорощенко, В. П. Кожем'яко, Г. Л. Лисенко. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 197 с.
47. Паливно-енергетичний комплекс України у цифрах і фактах / За ред. М. П. Ковалка. – К.: УЕЗ, 2000. – 152 с.
48. Паржницький О. В. Електроматеріалознавство : навч. посібн. для здобувач. проф. (проф.-тех.) освіти / О. В. Паржницький, С. В. Аушева, Г. Ю. Шулепіна. – Київ : Грамота, 2023. – 224 с.

49. Плескач В. М. Технологія конструкційних матеріалів / В.М. Плескач, І. П. Волчок. – Запоріжжя: Дике поле, 2007. – 168 с.
50. Поплавко Ю. М. Фізика діелектриків : підруч. / за заг. ред. акад. НАН України Ю. І. Якименка. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 572 с.
51. Поплавко Ю. М. Фізика твердого тіла : підручник. В 2-х томах. / Ю. М. Поплавко. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – Том 2: Діелектрики, напівпровідники, фазові переходи. – 379 с.
52. Поплавко Ю. М. Фізичне матеріалознавство: навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, Л.П. Переверзева, С. О. Воронов, Ю. І. Якименко. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – Частина 2. Діелектрики. – 392 с.
53. Поплавко Ю. М. Фізичне матеріалознавство: навч. посіб. / Ю. М. Поплавко, С. О. Воронов, Ю. І. Якименко. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – Ч. 3. Провідники та магнетики. – 372 с.
54. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Навч. посібник для ВНЗ. / В. Попович. – Львів: Львівська політехніка, 2000. – 264 с
55. Розорінов Г. М. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. / Г. М. Розорінов, Д. О. Соловійов. – Київ: Ліра – К, 2007. – 198 с.
56. Савицький В. М. Магнітні властивості речовини : навч. посіб. / В.М. Савицький – Х. : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2010. – 328 с.
57. Скачков В. О. Високотемпературні композиційні матеріали на основі вуглецю та кераміки: монографія / В. О. Скачков, О. Р. Бережна, Ю. О. Белоконь. – Запорізька державна інженерна академія – Запоріжжя: ЗДІА, 2016. – 301 с.
58. Скло, сегнетоелектрики, графен, високотемпературні надпровідники. – Ч. 6: навч. посіб. /О.Т. Богорош, С.О. Воронов, Р.І. Петришин, В.М. Крамар, О.Г. Шайко-Шайковський (за заг. ред. О.Г. Шайко-Шайковського. – Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. 2022. – 312 с.
59. Сологуб М.А. Технологія контрукційних матеріалів, К: Вища школа, 2002. – 373с.

60. Теорія поля: підручник / Ю. Ф. Ткаченко, Д. Д. Федоришин, В. В. Федорів, С. О. Лизун. – Ів.- Франківськ: Факел, 2006. – 106 с.
61. Технологія конструкційних матеріалів / За ред. М. А. Сологуба. - 2-ге вид., перероб. і допов. – К.: Вища школа, 2002. – 374 с.
62. Трегуб М. І. Електротехнічні матеріали: навчальний посібник / М. І. Трегуб, А. М. Рубець, В. С. Хахула – Біла Церква, 2020. – 60 с.
63. Хільчевський В.В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів / В. В. Хільчевський В.В. – К.:Либідь, 2002. – 326 с.
64. Червоний І. Ф. Виробництво напівпровідникових матеріалів. Конспект лекцій. / І. Ф. Червоний, С. Г. Єгоров, Р. М. Воляр. – Запоріжжя : Вид-во Запорізької державної інженерної академії, 2006. – 100 с.
65. Швець Є.Я. Матеріали і компоненти електроніки: навчальний посібник / Є. Я. Швець, І. Ф. Червоний, Ю. В. Головка. – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 278 с.
66. Якименко Ю. Фізичне матеріалознавство. Ч. 1. Основні напрямки матеріалознавства / Ю. І. Якименко Ю.М., А. С. Воронов, Ю.М. Поплавко. – К. Політехнік, 2011. – 300 с.
67. *Experimental investigation on the propagation of streamer discharges and the stability field* Jongen. Eindhoven University of Technology, Dec. 2021
<https://research.tue.nl/en/studentTheses/experimental-investigation-on-the-propagation-of-streamer-dischar>.
68. Hygroscopic Materials and Characterization Techniques for Fiber Sensing Applications: A Review / Muhammad Arif Riza, Yun Li Go, Robert R. J. Maier, Sulaiman Wadi Harun, Siti Barirah Anas. - Sensors and Materials, Vol. 32, No. 11 (2020).
69. Indulkar C. S., Thiruvengadam S. An Introduction To Electrical Engineering Materials: S.Chand & Company Limited, 2008. – 468 p.
70. Kumagai, R. Propagation and branching process of negative streamers in water / Ryo Kumagai, Seiji Kanazawa, Kiyonobu Ohtani,

et al. // J. Appl. Phys. 124, 163301 (2018); <https://doi.org/10.1063/1.5025376>.

71. Lu, F. Modeling and analysis of micro piezoelectric power generators for micro-electromechanical-systems applications. / F Lu, Lee H.P., Lim, S.P. // Smart Materials and Structures, № 13, 2004, pp. 57-63.

72. *Nanoelectronics* and information technology. Advanced electronic materials and novel devices, 2003. – 1001 p.

73. *Nanostructured* materials and nanotechnology. Edited by Hari Singh Nalva. Academic Press, 2002. – 834 p.

74. Nitrogen Injection Fire Prevention System for Oil Filled Transformers / Sarvesh Vitthal Ghadge, Mr. S. S. Shingare. – Vol-2 Issue-5 2016

75. Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics: A review / Yongling Wua, Yulin Maa, Hongyu Zheng, Seeram Ramakrishna. – Materials & Design 211 (2021) 110164.

76. Rajput R. K. A Textbook of Electrical Engineering Materials. Firewall Media, 2004. – 449 p.

77. Rusev, R.; Tzaneva, B.; Angelov, G. *Electrophoretic Deposition of Rochelle Salt Nanocrystals on Aluminum Plate. Coatings* **2023**, *13*, 1074. <https://doi.org/10.3390/coatings13061074>

78. Technical Guide for Kevlar® Aramid Fiber <https://www.dupont.com/brands/kevlar.html>

79. *Van Vlack L. H.* Elements of Material Science and Engineering (Sixth edition), Addison Publishing Co., 1989. – 600 p.

Навчальне видання

ГОНТАР Юлія Григорівна

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Навчальний посібник для здобувачів денної та заочної форм навчання
спеціальностей G3 Електрична інженерія та G5 Електроніка,
електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка

Відповідальний за випуск доц. Кессаєв О.Г.

Роботу до видання рекомендував д.т.н., проф. Безпрозваних Г.В.

В авторській редакції

План 2025 р., поз. 5

Підп. до друку _____ Гарнітура Times New Roman

Видавничий центр НТУ «ХПІ».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Електронне видання