

О.В. БОБРОВ, В.А. КОЗЕЧКО  
Д.В. ЦИПЛЕНКОВ, А.О. ОВЧАРЕНКО

# КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ



Національний  
технічний університет  
**ДНІПРОВСЬКА  
ПОЛІТЕХНІКА**  
1899

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"



***КОНСТРУКЦІЙНІ  
ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ  
МАТЕРІАЛИ***

**Навчальний посібник**

Дніпро  
НТУ "ДП"

2023

УДК 620.1:620.3(075.8)  
К 65

*Рекомендовано вченою радою Національного технічного університету "Дніпровська політехніка" як навчальний посібник для студентів спеціальностей 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка та 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтенгровані технології та робототехніка. (протокол № 7 від 29.06.2023 р.).*

Рецензенти:

*Андрій Муха, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.*

*Олександр Остапчук, д-р. техн. наук, доцент, доцент кафедри відновлюваних джерел енергії Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського".*

**Конструкційні та електротехнічні матеріали:** навч. посіб. / К 65 О.В. Бобров, В.А. Козечко, Д.В. Ципленков, А.О. Овчаренко; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ "ДП", 2023. – 360 с.

ISBN 978-966-981-825-6

*Розглянуто особливості застосування конструкційних та електротехнічних матеріалів, процесів та явищ, які відбуваються в діелектричних, провідникових, напівпровідникових і магнітних матеріалах які застосовуються в електротехніці.*

*Основною особливістю посібника є детальна структуризація навчального матеріалу, що зорієнтовано значною мірою на дистанційну форму навчання з демонстрацією конкретних прикладів тісного взаємозв'язку властивостей різноманітних електротехнічних матеріалів з основами електротехніки..*

*Розраховано для студентів спеціальностей 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», та 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтенгровані технології та робототехніка, а також може бути корисна інженерам інших спеціальностей.*

ISBN 978-966-981-825-6

УДК 620.1:620.3(075.8)

© О.В. Бобров, В.А. Козечко, Д.В. Ципленков, А.О. Овчаренко 2023.

© НТУ "Дніпровська політехніка", 2023

# **З М І С Т**

<b>Передмова</b>	8
<b>Вступ</b>	9
<b>ЧАСТИНА І. КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ</b>	10
<b>Розділ 1. Будова та властивості металів і сплавів, їх механічні, фізичні та хімічні властивості</b>	13
1.1 Будова металів та сплавів	13
1.2 Дефекти кристалічної ґратки	16
1.3 Властивості металів та сплавів	19
1.4 Залізовуглецеві сплави	22
Контрольні запитання	26
<b>Розділ 2. Загальні відомості про конструкційні матеріали чорні метали – залізо та його сплави. Особливості застосування</b>	29
2.1 Характеристика видів та маркування чавунів	30
2.2 Класифікація та маркування сталей	36
Контрольні запитання	41
<b>Розділ 3. Кольорові метали та сплави алюмінію, міді, магнію, цинку. Особливості застосування</b>	43
3.1 Алюмінієві сплави	43
3.2 Мідь та основні сплави на її основі	48
3.3 Сплави на основі магнію	50
3.4 Сплави на основі цинку	52
Контрольні запитання	53
<b>Розділ 4. Неметалеві конструкційні матеріали, пластмаси. Особливості застосування</b>	55
4.1 Силікатні матеріали	56
4.2 Пластмаси	57
4.3 Основні види виробів з пластмас	59
Контрольні запитання	60



<b>Розділ 5. Загальні відомості про ливарне виробництво</b>	61
5.1 Ливарні властивості сплавів	62
5.2 Технологічність литих деталей	69
5.3 Способи отримання виливків	69
5.4 Лиття в піщано-глинисті форми	70
5.5 Технологія формовки	74
5.6 Складання і заливка форм. Вибивання та очищення виливків	77
5.7 Дефекти виливків і способи їх усунення	79
Контрольні запитання	80
<b>Розділ 6. Загальні відомості про обробку металів тиском і різанням</b>	81
6.1 Загальні відомості про обробку металів тиском	81
6.2 Загальні відомості про обробку металів різанням	96
Контрольні запитання	100
<b>Розділ 7. Загальні відомості про зварювальне виробництво</b>	101
7.1 Дугове зварювання	101
7.2 Плазмове зварювання	106
7.3 Електрошлакове зварювання	107
7.4 Газове зварювання	108
7.5 Контактне зварювання	109
7.6 Зварювання тертям	111
7.7 Зварювання вибухом	112
7.8 Ультразвукове зварювання	113
Контрольні запитання	114
<b>Розділ 8. Термічна і хіміко-термічна обробка конструкційних матеріалів</b>	116
8.1 Види термічної обробки металів	116
8.2 Хіміко-термічна обробка конструкційних сталей	128
Контрольні запитання	134
<b>ЧАСТИНА II. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ</b>	136
<b>Розділ 9. Основні явища в електротехніці та їх закономірності</b>	137
9.1 Електричне поле	137

9.2 Електричний струм	142
9.3 Магнітне поле	145
9.4 Приклади розрахунку	152
Контрольні запитання	155
<b>Розділ 10. Діелектричні матеріали</b>	<b>157</b>
10.1 Поляризація діелектриків	157
10.2 Електропровідність діелектриків	168
10.3 Електричний пробій діелектриків	174
10.4 Теплові властивості діелектриків	179
10.5 Діелектричні матеріали різних агрегатних станів	181
10.6 Активні діелектрики	196
10.7 Приклади розрахунку завдань з визначення параметрів діелектричних матеріалів	205
Контрольні запитання	210
<b>Розділ 11. Провідникові матеріали</b>	<b>213</b>
11.1 Фізичні процеси і явища в провідникових матеріалах	213
11.2 Метали високої електропровідності	229
11.3 Надпровідники	232
11.4 Метали високого електричного опору	237
11.5 Метали різного призначення	239
11.6 Неметалеві провідникові матеріали та вироби	244
11.7 Напівпровідники	246
11.8 Приклади розрахунку завдань з визначення параметрів провідникових матеріалів	266
Контрольні запитання	270
<b>Розділ 12. Магнітні матеріали</b>	<b>272</b>
12.1 Фізичні процеси та явища в магнітних матеріалах	272
12.2 Вимірювання основних параметрів магнітних матеріалів	283
12.3 Деякі магнітні матеріали	290
12.4 Приклади розрахунку завдань з визначення параметрів магнітних матеріалів	299
Контрольні питання	303
<b>Список джерел інформації</b>	<b>307</b>

<b>ДОДАТКИ</b>	309
<b>Додаток 1. Таблиця переводів твердості</b>	309
<b>Додаток 2. Властивості діелектриків</b>	311
Визначення основних характеристик діелектриків	311
Смоли	315
Синтетичні полімери	316
Шаруваті пластики	318
Електроізоляційні лаки	319
Компаунди	321
Волокнисті діелектрики	322
<b>Додаток 3. Властивості провідникових матеріалів</b>	325
Визначення основних характеристик провідників	325
Властивості надпровідникових матеріалів	331
Властивості сплавів високого опору	331
Визначення основних характеристик біметалів	333
Сплави для термопар	334
Властивості припоїв	335
Властивості електротехнічного вугілля	338
Визначення основних характеристик напівпровідників	340
Властивості простих напівпровідників	341
Властивості напівпровідникових сполук	342
<b>Додаток 4. Властивості магнітних матеріалів</b>	344
Визначення характеристик магнітних матеріалів	344
Властивості магнітом'яких матеріалів	345
Властивості магнітотвердих матеріалів	346
Криві намагнічування сталей	348
<b>Додаток 5. Періодична система елементів Д.І. Менделєєва</b>	352
<b>Додаток 6. Одиниці Міжнародної системи (ГОСТ 8.417 – 81)</b>	354

<b>Додаток 7. Літерні позначення найбільш вживаних в електротехніці величин (ДСТУ ІЕС 60027-1:2017, ДСТУ ІЕС 60027-2:2017)</b>	<b>357</b>
<b>Додаток 8. Грецька абетка та її українська вимова</b>	<b>359</b>
<b>Додаток 9. Латинська абетка та її українська вимова</b>	<b>359</b>
<b>Додаток 10. Множники і префікси для утворення десяткових кратних і часткових одиниць</b>	<b>359</b>

## **ПЕРЕДМОВА**

Якісна підготовка майбутніх фахівців в галузях електричної інженерії та електроніки, автоматизації та електронних комунікацій потребує знань щодо матеріалів, які застосовуються в технічних системах. Це як конструкційні матеріали, доля яких останнім часом суттєво збільшується, так і електротехнічні матеріали.

Перша частина навчального посібника підготовлена **Вікторією Козечко**, канд. техн. наук, доценткою, доценткою кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства НТУ «Дніпровська політехніка».

Друга частина навчального посібника підготовлена **Дмитром Циценковим**, канд. техн. наук, доцентом, завідувачем кафедри електротехніки НТУ «Дніпровська політехніка» та **Олексієм Бобровим**, канд. техн. наук, доцентом, доцентом кафедри електротехніки НТУ «Дніпровська політехніка».

Загальна редакція на відповідність сучасним вимогам з точки зору хімічних наук виконана **Аліною Овчаренко**, канд. хім. наук, доценткою кафедри хімії НТУ «Дніпровська політехніка».

## **ВСТУП**

Науково-технічний прогрес пов'язаний, перш за все, з розробкою та використанням нових, більш сучасних матеріалів. Це справедливо як для машинобудування, однієї з найбільш масштабних галузей техніки так і для електричної інженерії, яка лежить у основі сучасних виробничих технологій. Надійність, довговічність, зносостійкість, стійкість до ударних та циклічних навантажень, ремонтпридатність, економічність та інші найважливіші параметри машинобудівельних та електроенергетичних виробів, зрештою, визначаються використаними в них матеріалами.

За призначенням матеріали, що використовуються у різних галузях машинобудування та електроенергетики умовно поділяють на конструкційні, інструментальні, електротехнічні, технологічні та деякі інші.

**Конструкційні матеріали** застосовують для виготовлення деталей приладів, інженерних конструкцій, що працюють в умовах дії механічних навантажень. Вони характеризуються зносостійкістю, конструкційною міцністю, надійністю, довговічністю. До них відносяться сплави на основі заліза (сталь, чавун); сплави на основі міді (бронза, латунь) та інші. Ці сплави є універсальними і використовуються в різних деталях та конструкціях. Наряду з універсальними матеріалами застосовують конструкційні матеріали певного функціонального призначення, наприклад, корозійностійкі, зносостійкі, жароміцні, інструментальні.

**Електротехнічні матеріали** характеризуються особливими електричними та магнітними властивостями, призначені для виготовлення виробів, які застосовуються при виробництві, передачі, розподілу та споживанні електроенергії. Область застосування цих матеріалів в електричній інженерії обумовлена їх унікальними електричними, магнітними та механічними властивостями або їх сукупністю. До електротехнічних матеріалів відносяться провідники, напівпровідники, діелектрики у твердій, рідкій та газоподібній фазах, магнітні матеріали.

# ЧАСТИНА 1

## КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

*Матеріали* – це вихідні і допоміжні речовини, які необхідні для виготовлення виробів, виконання їх механічної обробки для виготовлення готової продукції (наприклад, метали та їх сплави, цегла, деревина, шкіра, полімери, папір, натуральні і хімічні волокна і ін.). Матеріали є природною базою продукції. Частка вартості матеріалів становить 40...70 % всіх витрат на виготовлення готової продукції, а для автоматизованого виробництва досягає 80 %.

Розрізняють такі різновиди матеріалів:

- сировина, або сирі матеріали, які підлягають подальшій переробці (залізна руда на металургійному заводі, нафту на нафтопереробному комбінаті);
- напівфабрикат – перероблений матеріал, який повинен пройти одну або декілька стадій обробки, щоб стати виробом, придатним до споживання.

Готова продукція одного виробництва може бути напівфабрикатом для іншого.

Для успішного вирішення багатьох практичних завдань необхідно знати про сучасні способи отримання і обробки матеріалів, їх властивості та раціональне застосування. Питання будови і властивостей металів, сплавів, неметалевих матеріалів, паливно-мастильних матеріалів та експлуатаційних рідин, що застосовуються в конструкціях автомобілів і необхідних для їх експлуатації та ремонту, розглядає матеріалознавство.

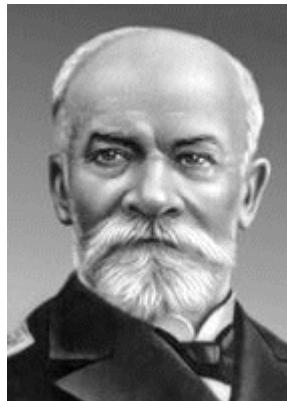
*Матеріалознавство* – це наука про зв'язки між складом, будовою і властивостями матеріалів, закономірності їх змін внаслідок фізико-механічних та інших видів впливів, а також шляхи отримання (виробництва) матеріалів, покращення їх властивостей і ефективності використання.

Вперше існування зв'язку між будовою сталі та її властивостями виявив П.П. Аносов (1799 – 1839).



**П.П. Аносов (1799 – 1839)**

Основи наукового металознавства належать видатному металургу Д.К. Чернову (1839 – 1921), якого називали «батьком металографії».



**Д.К. Чернов (1839 – 1921)**

На початку ХХ століття велику роль для розвитку металознавства відіграли роботи Н.С. Курнакова, який використав для дослідження металів методи фізико-хімічного аналізу. Він встановив залежність між кристалічною будовою, структурою і властивостями сплавів, був не тільки теоретиком, але й організатором металургійних (алюміній, магній) виробництв. Фізико-хімічна теорія дослідження металів і сплавів, розроблена Н. С. Курнаковим, нині широко застосовується в металографічних лабораторіях.

Значний вклад у розвиток матеріалознавства зробили Р. О. Аустен і Г. К. Сорбі (Англія), А. Мартенс (Німеччина), Л. Ж. Труст (Франція), Ю. А. Бринелля (Швеція), С. П. Роквелл (США) та ін. Завдяки їхнім



дослідженням були систематизовані відомості про хімічний склад матеріалів, що застосовуються у всіх галузях промислового виробництва і будівництва.

При механічній обробці кваліфікований робітник повинен знати марку і механічні властивості застосовуваного матеріалу, вміти вибрати матеріал різального інструменту, визначати режими різання. При науковому підході до вибору режимів різання з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу при високій продуктивності можна отримати високоякісну деталь, а незнання цих даних призведе до низької якості, передчасної поломки або виходу з ладу різального інструменту. Тому токарі, слюсарі, фрезерувальники повинні знати всі конструкційні матеріали, що застосовуються не тільки в токарно-гвинторізних верстатах, але і в іншому металообробному обладнанні.

Усі метали і сплави прийнято поділяти на дві групи. Залізо та сплави на його основі (сталь та чавун) називають чорними металами, а всі інші метали (*Be, Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Ag, Sn, W, Au, Hg, Pb* та ін.) та їх сплави – кольоровими.

Найбільшого використання набули чорні метали. На основі заліза виготовляється не менше 90 % всіх конструкційних та інструментальних матеріалів.

# РОЗДІЛ 1

## БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ, ЇХ МЕХАНІЧНІ, ФІЗИЧНІ ТА ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

### 1.1 Будова металів та сплавів

Метали та металеві сплави – це кристалічні тіла. Атоми (іони) в них розташовані закономірно на відміну від аморфних тіл, в яких атоми розташовуються хаотично.

Технічне значення матеріалів залежить від їхньої будови, що відображаються в їх властивостях. Будову матеріалів – характеризує їх структура.

**Структура** це сукупність стійких зв'язків матеріалу, що забезпечують його цілісність і збереження основних властивостей при зовнішніх і внутрішніх змінах.

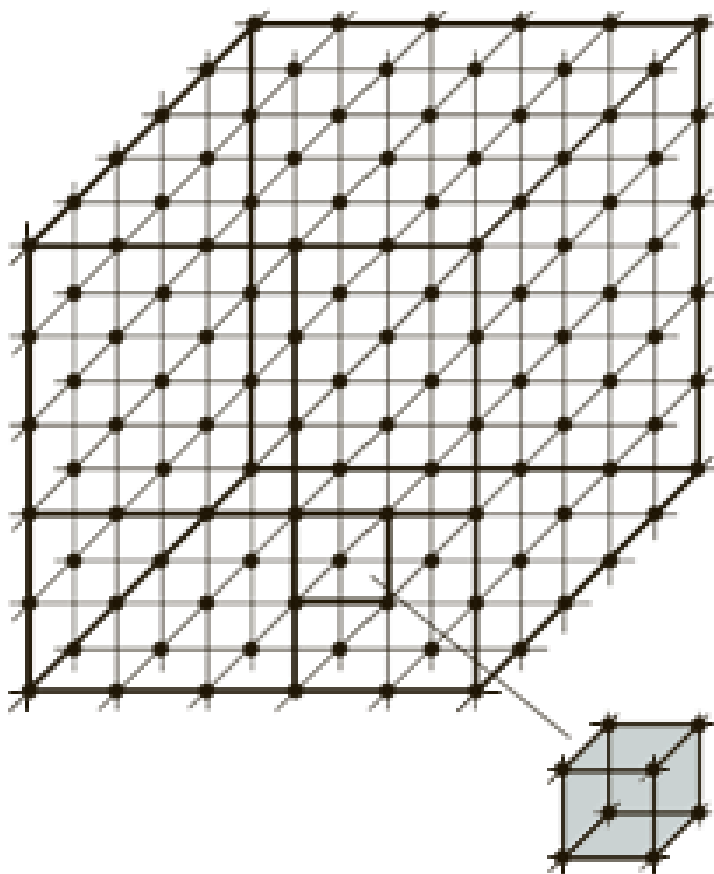
Структура матеріалів визначається безліччю факторів: будовою атомів, іонів, молекул, розподілом у них електронів, типом зв'язків між частинками та інше. У матеріалознавстві прийнято розглядати *три рівня будови матеріалів: атом – молекула – фаза.*

За своєю будовою тверді тіла поділяються на кристалічні (метали і сплави металів у твердому стані) та аморфні (скло, смоли та ін.). Атоми кристалічних тіл на відміну від аморфних, що мають їх хаотичне розташування, перебувають у певних місцях, утворюючи систему, періодично повторювану в просторі. Сукупність таких місць називають кристалічною решіткою.

**Атомно-кристалічна структура металів.** Як відомо, всі речовини складаються з атомів, у тому числі і метали. Кожен метал (хімічний елемент) може перебувати в газоподібному, рідкому або твердому агрегатних станах. Кожен агрегатний стан матиме свої особливості, відмінні один від одного. У газоподібному металі відстань між атомами велика, сили взаємодії малі і атоми хаотично переміщуються в просторі; газ прагне до розширення в бік більшого об'єму. При зниженні температури і тиску речовина переходить у рідкий стан. Властивості рідкої речовини відрізняються від властивостей газоподібної. Атоми у рідкому металі зберігають лише так званий ближній порядок, тобто знаходяться на

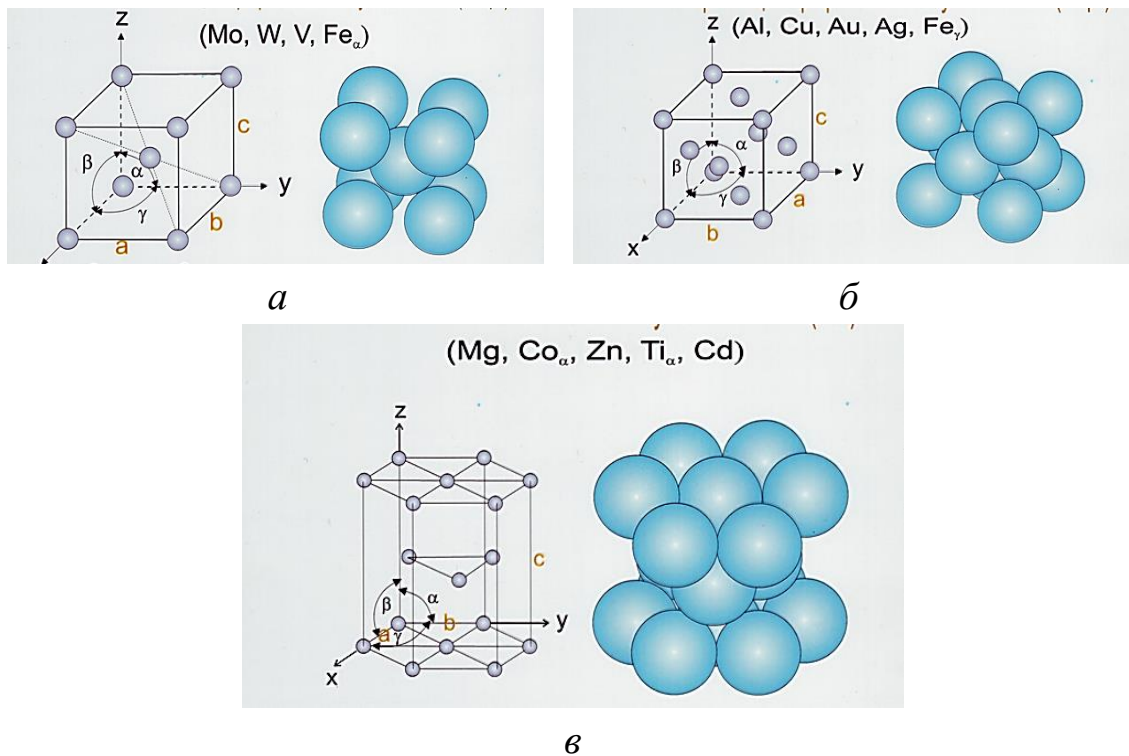
невеликій відстані один від одного. При зниженні температури рідкий метал переходить у твердий стан, який вже має строгу закономірність розташування атомів.

Якщо умовно провести вертикальні і горизонтальні лінії зв'язку через центри атомів то можна побачити, що у металів у твердому стані атоми розташовані в строго визначеному порядку і створюють безліч разів повторювані елементарні геометричні фігури – паралелепіпеди (рис. 1.1). Найменшу геометричну фігуру називають елементарною ґраткою. Елементарні осередки, розташовані на горизонтальних і вертикальних кристалографічних площинах, утворюють просторову кристалічну ґратку.



**Рисунок 1.1 – Схема розташування елементарних геометричних комірок в атомних ґратках металів та сплавів**

Більшість металів утворюють одну з наступних кристалічних ґраток зі щільним розташуванням атомів: кубічну об'ємноцентровану, кубічну гранецентровану чи гексогональну (рис. 1.2).



**Рисунок 1.2 – Кристалічні ґратки металів:**

***a*** – об’ємноцентрована кристалічна ґратка (ОЦК);

***б*** – гранецентрована кристалічна ґратка (ГЦК);

***в*** – гексагональна щільно упакована кристалічна ґратка (ГЩУ)

**Об’ємноцентрована кубічна ґратка** (рис. 1.2, *a*) складається з восьми атомів, які розташовані по одному атому в кожній вершині куба, і одного, що знаходиться в центрі куба на рівних відстанях від його граней. Цю форму атомної кристалічної комірки мають залізо модифікації *Fe- $\alpha$* , ванадій, вольфрам, молібден, тантал і хром, тобто в основному чорні метали.

**Гранецентрована кубічна ґратка** (рис. 1.2, *б*) має 14 атомів – по одному атому в кожній вершині куба (вісім атомів) і по одному атому в центрі кожної грані (шість атомів). Гранецентровану кубічну решітку мають алюміній, залізо модифікації *Fe- $\gamma$* , золото, кобальт, мідь, нікель, платина і срібло, в основному це кольорові метали і частина чорних металів.

**Гексагональна щільноупакована ґратка** (рис. 1.2, *в*) складається з 17 атомів. Форма геометричного тіла, яку утворюють ці атоми, є шестигранною призмою. При цьому по шість атомів розташовані в кожній вершині верхнього і нижнього підстав, по одному атому в центрі цих підстав і три атома в центрі однієї з трьох граней (через грань).

Гексагональну щільноупаковану решітку мають берилій, кадмій, магній, ванадій, тантал.

Між атомами в кристалічній решітці і між ґратками існує так званий металевий зв'язок. Від якого залежать міцність і твердість металів. Чим вище цей зв'язок, тим більшу міцність і твердість мають метали. Механізм зв'язку між атомами в решітці і між ґратами має складну фізико-хімічну природу.

На практиці ідеальне розташування кристалічних решіток зазвичай не спостерігається. Кристали, що утворюються кристалічними ґратками, мають викривлену геометричну форму і різну величину.

**Анізотропія металів.** *Анізотропія* (від гр. Anisos – нерівний і tropos – напрямок) – неоднаковість фізичних властивостей середовища (тіла) у різних напрямках. Анізотропія передбачає залежність властивостей металів від рівня їх розміщення по площині атомно-кристалічних решіток. Чим більше в площині атомів, тим вищий рівень властивостей металів. У горизонтальній площині у будь-якій формі атомно-кристалічних решіток більше, ніж у вертикальній площині. Отже, міцність металів, випробувана в горизонтальному напрямку, вище, ніж у вертикальному. Анізотропія проявляється в процесі обробки конструкційних матеріалів тиском (прокату, волочіння, штампування та інших технологічних способів отримання заготовок і виробів).

Технічні метали є полікристалами, тобто вони складаються з більшого числа анізотропних кристалітів. У більшості випадків кристаліти є різноорієнтованими, тому в усіх напрямках властивості більш менш однакові, тобто полікристалічне тіло є ізотропним.

## **1.2 Дефекти кристалічної ґратки**

Дефекти кристалічної будови бувають найрізноманітніші. Це і видимі спотворення структури, наприклад, тріщини макроскопічного розміру, внутрішні плоскі спотворення. А є дефекти структури, помітні лише за допомогою мікроскопів, що надають значні збільшення досліджуваних кристалів. Тому необхідно класифікувати всі дефекти, що зустрічаються в кристалічній структурі за якоюсь ознакою. Фізики не

відразу зуміли знайти найбільш універсальний принцип класифікації дефектів в кристалах. Пропонувалися різні системи, наприклад за способом утворення дефектів:

- хімічні – домішкові атоми, введені в кристал при його вирощуванні, дифузії з поверхні або при іонній імплантації, а також за рахунок трансмутації при захопленні атомами повільних нейтронів;
- термічні – дефекти, що виникають в результаті нагрівання кристала з подальшим його загартуванням;
- деформаційні – дефекти, що виникають під дією пластичної деформації кристалів;
- радіаційні – утворюються в кристалах при їх опроміненні швидкими електронами, нейтронами,  $\gamma$ -променями (рентгенівське випромінювання), прискореними іонами.

Однак, найбільш вдалою і універсальною системою є класифікація дефектів кристалічної будови за геометричним принципом – числом вимірювань, в яких дефект має макроскопічні розміри, тобто що перевищують параметр ґратки  $a$ . Оскільки спотворення кристалічної структури починається зі зміни положення окремих атомів, що займають нерегулярні позиції, то, параметр ґратки (найкоротша міжатомна відстань, або атомний розмір) може бути тією одиницею виміру, порівнюючи з якою розміри дефекту вздовж одного з трьох напрямків ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), можна віднести їх до одного з таких типів:

1) **нульмірні або точкові** – це дефекти, розміри яких по всіх трьох напрямках можна порівняти з міжатомним параметром  $a$ ;

2) **одномірні або лінійні** – це дефекти, у яких один з розмірів істотно більше  $a$ , а два інших можна порівняти з параметром ґратки;

3) **двовимірні або плоскі** – це дефекти де спостерігається недосконалість кристалічної будови, коли два розміри суттєво перевищують параметр ґратки;

4) **тривимірні або об'ємні** – це дефекти, тобто недосконалість, у яких всі три розміри істотно більше міжатомного параметра  $a$ .

**До точкових дефектів** відносяться спотворення структури, що мають всі три розміри, які можна порівняти з міжатомним параметром ґратки. Точкові дефекти бувають власними, тобто дефектами кристала, і домішковими.

До власних дефектів відносяться вакансії, міжвузлові атоми і дрібні кластери точкових дефектів з атомів матриці.

**Вакансії** – це відсутність атома у вузлі кристалічної ґратки (рис. 1.3, а).

**Міжвузлові атоми** – це такі утворення в кристалі, коли близько біля заповненого вузла кристалічної ґратки розташовується зайвий атом (рис. 1.3, б). Цей зайвий атом може утворювати з вузловим атомом різні конфігурації.

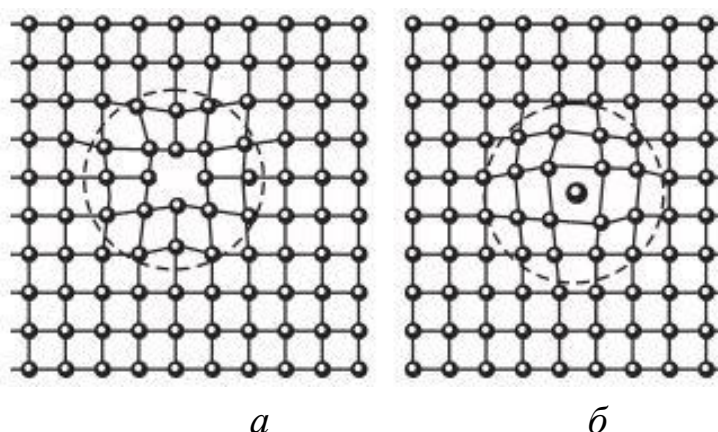


Рисунок 1.3 – Конфігурації атомів у простій кубічній решітці: біля вакансії (а) та міжвузлового атома (б)

Для лінійних дефектів характерно, що один з трьох розмірів істотно більше міжатомного параметра ґратки, тобто є макроскопічними. Такі спотворення структури можуть відбуватися, наприклад, при зростанні кристалів у нерівноважних умовах.

Припустимо, що одна з атомних площин кристала виявилася недобудованою. Вона обривається десь у середині кристала. Цей обрив або край неповної атомної площини (іноді її називають екстраплощиною або напівплощиною) являє собою лінію, уздовж якої і відбувається порушення в регулярному розташуванні атомів кристалу. Така лінія називається крайовою дислокацією (рис. 1.4).

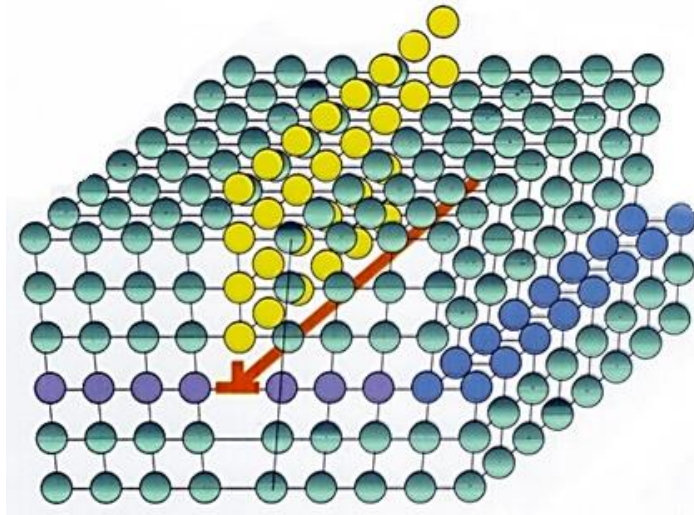


Рисунок 1.4 – Крайова дислокація атомів кристалу

### 1.3 Властивості металів та сплавів

#### *Механічні властивості*

До основних механічних властивостей відносять:

- міцність;
- пластичність;
- твердість.

*Міцність* – здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією навантажень.

*Пластичність* – здатність матеріалу змінювати свою форму і розміри під дією зовнішніх сил.

*Твердість* – здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього іншого тіла.

#### *Фізичні властивості*

До фізичних властивості належать:

- колір;
- щільність;
- температуру плавлення;
- теплопровідність;
- електропровідність;
- магнітні властивості.



*Колір* – здатність металів відбивати електромагнітне випромінювання (світло) з певною довжиною хвилі. Наприклад, мідь має рожево-червоний колір, алюміній – сріблясто-білий.

*Щільність* – металу визначається відношенням маси до одиниці об'єму. За щільністю метали поділяють на легкі (менше 4500 кг/м<sup>3</sup>) і важкі.

*Температура плавлення* – це така, при якій метал переходить зі твердого стану в рідкий. За температурою плавлення метали поділяють на тугоплавкі (вольфрам – 3416° С, тантал – 2950° С та ін.) й легкоплавкі (олово – 232° С, свинець – 327° С). У системі СІ температуру плавлення виражають у градусах Кельвіна (К).

*Теплопровідність* – здатність металів передавати тепло від більш нагрітих ділянок тіла до менш нагрітих. Найбільшу теплопровідність мають срібло, мідь, алюміній. У системі СІ теплопровідність виміряється у Вт/(м·К).

Здатність металів проводити електричний струм оцінюють двома протилежними характеристиками – ***електричною провідністю та електричним опором***.

Електропровідність вимірюється в системі СІ сіменсами (См), а електроопір – в омах (Ом). Висока електропровідність необхідна, наприклад, для струмопровідних проводів (їх виготовляють з міді, алюмінію). При виготовленні електронагрівальних приладів і печей необхідні сплави з високим електроопором (із ніхрому, константану, манганіну). З підвищенням температури електропровідність металу зменшується, а зі зниженням – збільшується.

*Магнітні властивості* виражаються в здатності металів намагнічуватися. Високими магнітними властивостями володіють залізо, нікель, кобальт та їхні сплави, які називають феромагнітними. Матеріали з магнітними властивостями застосовують в електротехнічній апаратурі та для виготовлення магнітів.

### ***Хімічні властивості***

Хімічні властивості характеризують здатність металів і сплавів чинити опір окисленню або вступати в з'єднання з різними речовинами: киснем з повітря, розчинами кислот, розчинами лугів та інше.

До хімічних властивостей відносять:

- корозійну стійкість;

- жаростійкість.

*Корозійна стійкість* – здатність металів чинити опір хімічному руйнуванню під дією на їх поверхню зовнішнього хімічно-агресивного середовища (корозія відбувається при вступі в хімічну взаємодію з іншими елементами).

*Жаростійкість* – здатність металів чинити опір окисленню при високих температурах.

Хімічні властивості враховують в першу чергу для виробів або деталей, що працюють у хімічно агресивних середовищах:

- ємності для перевезення хімічних реактивів;
- трубопроводи хімічних речовин;
- прилади та інструменти в хімічній промисловості.

*Технологічні властивості* матеріалів характеризують сприйнятливість матеріалів технологічним впливам при їх переробці у виробі. Знання цих властивостей дозволяє раціонально здійснювати процеси виготовлення виробів.

Основними характеристиками матеріалів є:

- різання;
- оброблення тиском;
- ливарні характеристики;
- зварювання;
- схильність до викривлення при термічній обробці та інші.

*Різання* характеризують такими показниками:

- якістю обробки матеріалів – шорсткістю обробленої поверхні і точністю розмірів;
- стійкістю ріжучого інструменту;
- опором різанню – швидкістю і силою різання;
- виглядом стружкоутворення.

*Оброблення тиском* визначають у процесі технологічних випробувань (проб) матеріалів на пластичну деформацію. Методи оцінки оброблюваності тиском залежать від виду матеріалів і технології їх переробки.

Обробка тиском порошкових матеріалів характеризується основними характеристиками: плинність, ущільненість та формуємість. Методи визначення характеристик порошкових матеріалів встановлені державними стандартами.

*Ливарні властивості матеріалів* – сукупність технологічних показників, що характеризують формування вилівки шляхом заливання розплавленого матеріалу в ливарну форму.

*Плинність* – властивість розплавленого матеріалу заповнювати ливарну форму.

*Ливарна усадка* – зменшення обсягу розплаву при переході з рідкого стану в твердий. Коефіцієнт усадки індивідуальний для кожного виду матеріалу.

*Зварюваність* – властивість матеріалу утворювати зварне з'єднання, працездатність якого відповідає якості основного матеріалу, підданого зварюванню. Про зварюваність судять за результатами випробування зварних зразків і характеристикам основного матеріалу в зоні зварного шву.

## **1.4 Залізовуглецеві сплави**

Залізовуглецевими сплавами (сталі і чавуни) є сплави заліза з вуглецем і іншими елементами. Вуглець значно впливає на формування структури сплаву. Залізо з вуглецем здатне утворити тверді розчини, а також хімічну сполуку – цементит  $Fe_3C$ . Для розуміння формування структури і властивості сталей і чавунів необхідно вивчити також вивчити мікроструктуру залізовуглецевих сплавів, їх хімічний склад. Треба з'ясувати вплив вуглецю і постійних домішок на властивості сталей і чавунів, а також принцип їх класифікації, позначення марок за стандартами; навчитися визначати за маркою зразка хімічний склад сталі або чавуну.

Діаграма стану залізо–вуглець у графічній формі зображує фазовий склад сплаву залежно від температури і концентрації вуглецю і складається з трьох простих подвійних діаграм:

- подвійної з обмеженою розчинністю компонентів і перитектичним перетворенням при температурі  $1499^{\circ}C$ ;
- подвійної з обмеженою розчинністю компонентів і евтектичним перетворенням при температурі  $1147^{\circ}C$ ;
- подвійної з обмеженою розчинністю компонентів і евтектоїдним перетворенням при температурі  $727^{\circ}C$ .

**Ферум** – атомний номер елемента 26, утворює просту сполуку *залізо*, яке є металом сріблястого кольору та має температуру плавлення 1539° С. Чисте залізо містить 99,999 % *Fe*, технічне – залізо 99,8...99,9 % *Fe*. Залізо існує у двох кристалічних формах – ОЦК (об'ємна-центрована кубічна) і ГЦК (гранецентрована кубічна). При температурі, нижчій від 911° С, існує  $\alpha$ -залізо. При температурі, вищій за 1392° С, залізо позначають як  $\delta$ -залізо. Кристалічна гратка  $\alpha$  і  $\delta$ -заліза ОЦК. Період гратки  $\alpha$ -заліза до температури 911° С становить 2,86 А<sup>0</sup>, вище температури 1392° С – 2,93 А<sup>0</sup>. Густина  $\alpha$ -заліза 7680 кг/м<sup>3</sup>. До температури 768° С (точка Кюрі)  $\alpha$ -залізо магнітне, вище цієї температури – немагнітне ( $\beta$ -залізо).

Перетворення однієї модифікації на іншу відбувається при постійній температурі і супроводжується тепловим ефектом. Видозміни елемента позначаються буквами грецького алфавіту у вигляді індексу основного позначення металу.

Прикладом видозміни від температури є залізо (рис. 1.5). Використовуючи явище поліморфізму, можна зміцнювати стан сплавів за допомогою термічної обробки.

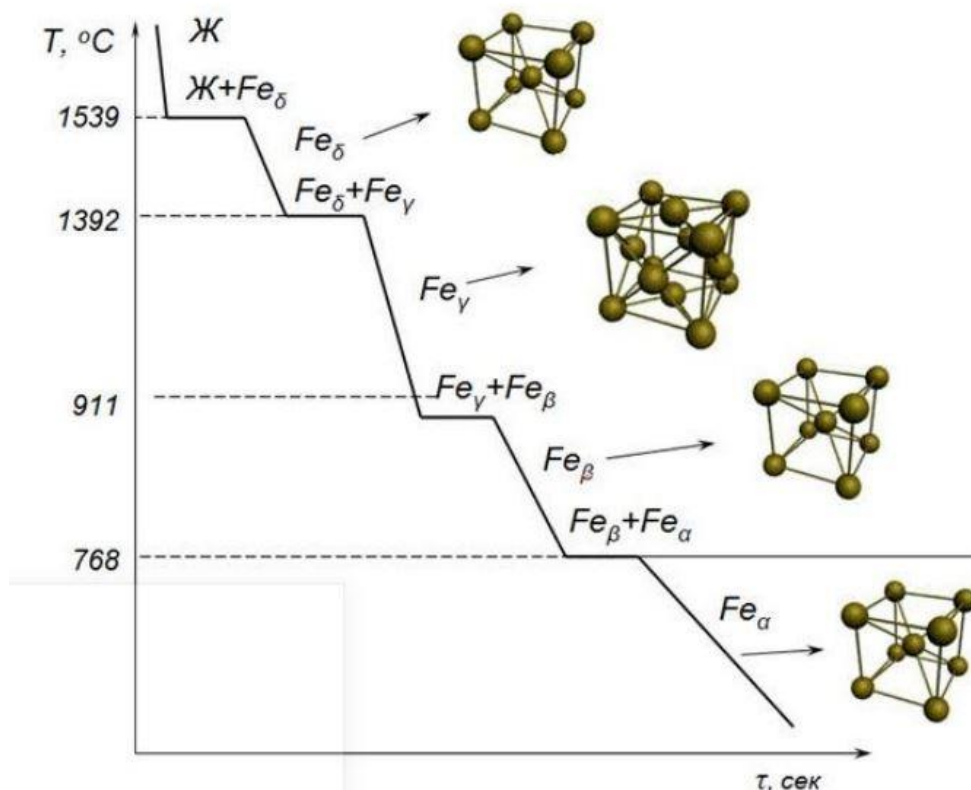


Рисунок 1.5 – Крива охолодження чистого заліза

**Карбон** – неметалевий елемент, атомний номер 6, проста сполука має назву **вуглець**, густина  $2500 \text{ кг/м}^3$ , температура плавлення  $3500^\circ \text{C}$ . Вуглець є поліморфною речовиною. У звичайних умовах він є модифікацією графіту, але може існувати і як метастабільна модифікація алмазу. Вуглець розчиняється в залізі, як у рідкому та твердому станах, а також може знаходитись у вигляді хімічної сполуки (цементиту), а у високовуглецевих сплавах у формі графіту.

Діаграма стану залізо-вуглець наведено на рис. 1.6.

Компонентами системи  $Fe - Fe_3C$  є залізо і цементит. Фази: рідкий сплав, ферит, аустеніт і цементит.

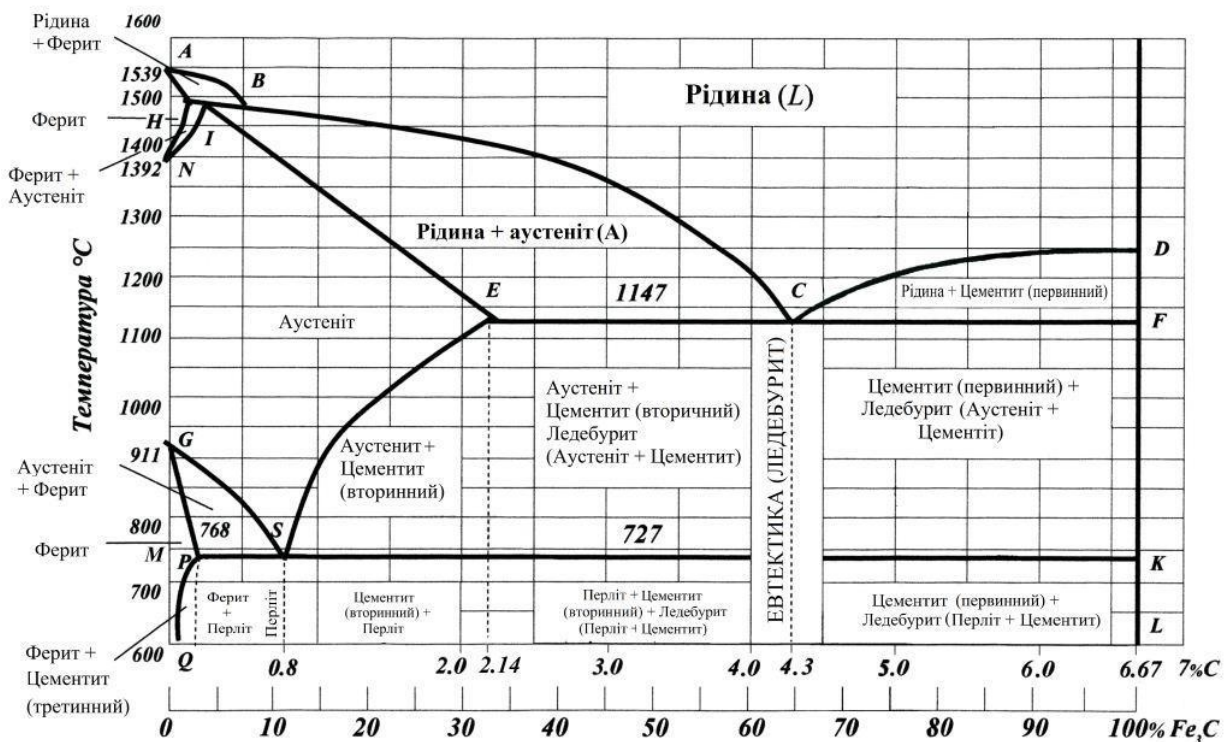


Рисунок 1.6 – Діаграма стану залізо-вуглець

**Рідкий сплав (розчин)** – однорідна рідина, що складається із заліза та вуглецю. Рідкий сплав існує як окрема фаза вище лінії ліквідусу (ABCD), а між лініями ліквідус і солідус (AECF) він перебуває у рівновазі з кристалічною фазою (феритом, аустенітом або цементитом). Залізо добре розчиняє вуглець і утворює однорідну рідку фазу, в твердому стані (нижче лінії солідус) – ферит, аустеніт, цементит.

**Ферит** – твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі. Розрізняють низькотемпературний  $\alpha$ -ферит з розчинністю 0,02 % і високотемпературний  $\delta$ -ферит з межевою розчинністю 0,1 %. Ферит м'який HB 80-100,

пластичний, має чітко виражені магнітні властивості, добре проводить тепло та електрику, має кубічну ґратку.

**Аустеніт** – твердий розчин вуглецю в  $\gamma$ -залізі, має кубічну гранецентровану решітку (фаза отримала назву на честь англійського вченого Р. Аустена). Межова розчинність вуглецю в  $\gamma$ -залізі 2,14 %. Аустеніт м'який (НВ 200), магнітних властивостей не має.

**Цементит** – хімічна сполука феруму з карбоном – ферум карбід (карбід заліза)  $Fe_3C$  із вмістом карбону 6,67 % (рис. 1.7). Цементит дуже твердий і крихкий НВ 800, магнітні властивості виражені слабо, погано проводить електричний струм і теплоту, кристалічна ґратка складна. Температура плавлення цементиту точно не встановлена у зв'язку з можливістю його розпаду. Структурні складові сплавів заліза (сталей і чавунів) – перліт і ледебурит.

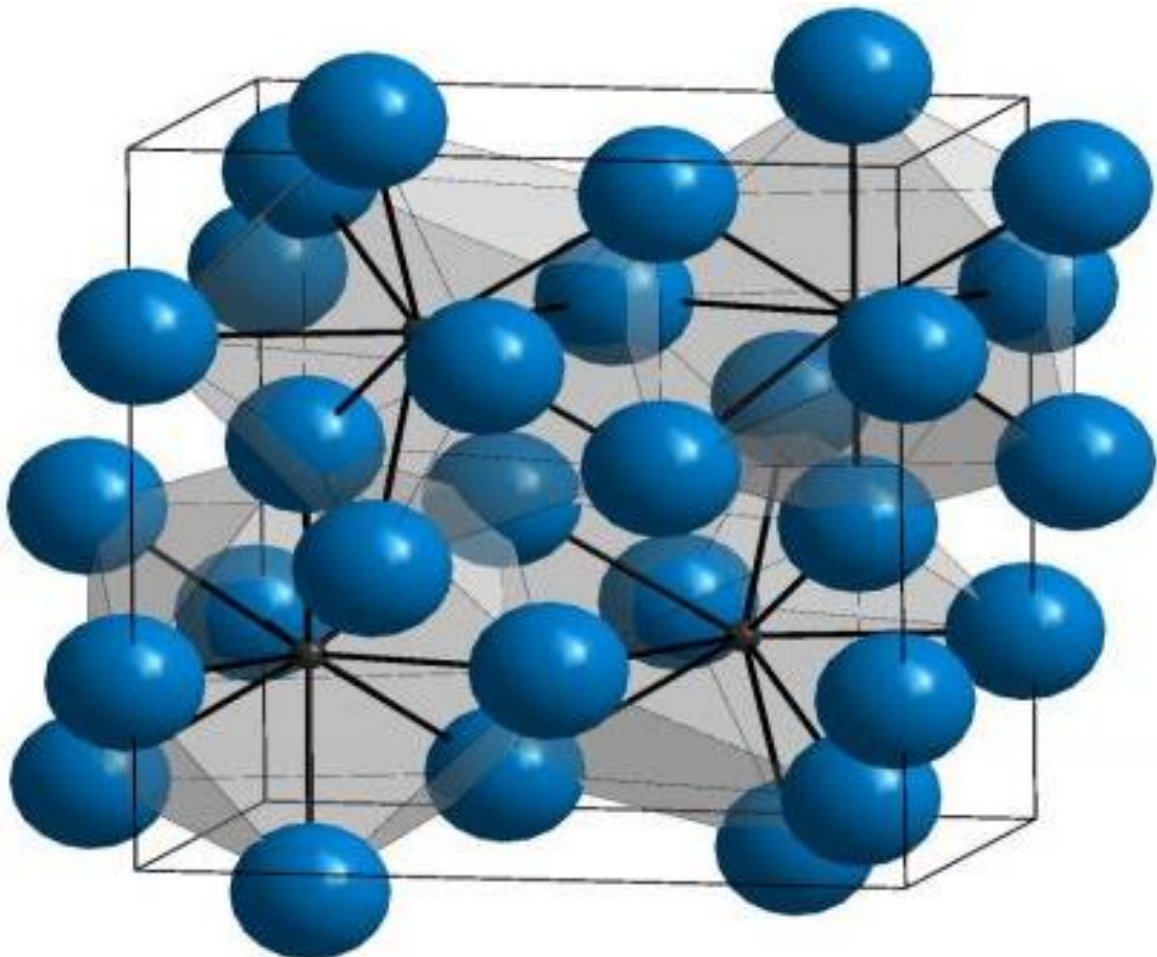


Рисунок 1.7– Кристалічна ґратка цементиту

**Перліт** – це евтектоїдна суміш фериту та цементиту у вигляді дуже тонких пластинок або зерен. Евтектоїдна суміш утворюється внаслідок

розпаду аустеніту при температурі  $727^{\circ}\text{C}$ . Вміст карбону у перліті складає 0,8 %. Перліт буває пластинчастий або зернистий, що залежить від умов його утворення.

**Ледебурит** – евтектична суміш аустеніту та цементиту, що містить 4,3 % карбону (фаза отримала назву на честь німецького вченого-металурга Ледебурга). Ледебурит утворюється при затвердінні залізовуглецевих сплавів при температурі  $1147^{\circ}\text{C}$ . В інтервалі температур від  $1147^{\circ}\text{C}$  до  $727^{\circ}\text{C}$  він являє собою механічну суміш зерен аустеніту та пластин первинного цементиту, що випав із розплаву; нижче  $727^{\circ}\text{C}$  ледебурит складається із перліту, що утворився при розпаді аустеніту і первинного цементиту. Ледебурит характеризується високою твердістю HB 700 і крихкістю.

Характерні лінії діаграми: ABCD – ліквідус; AECF – солідус. Вище лінії ABCD сплави системи перебувають у рідкому стані. По лінії AC з рідкого розчину починають випадати кристали твердого розчину вуглецю в  $\gamma$ -залізі, який називається аустенітом, отже, в області ACE буде суміш двох фаз – рідкого розчину і аустеніту; по лінії CD з рідкого розчину починають випадати кристали цементиту; в області DCF міститься суміш двох фаз – рідкого розчину і цементиту. Перетворення у твердому стані (вторинна кристалізація) відбувається по лініях GSE, PSK і GPQ. Внаслідок переходу заліза з однієї модифікації в іншу, а також у зв'язку зі зміною розчинності вуглецю в залізі.

В області діаграми AGSE існує аустеніт. При охолодженні сплавів аустеніт розпадається з виділенням по лінії GS фериту (твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі), а по лінії SE – вторинного цементиту (хімічна сполука  $\text{Fe}_3\text{C}$ ). В області діаграми GSP міститься суміш двох фаз – фериту і аустеніту, а в області SEE1 – суміш вторинного цементиту і аустеніту. По лінії PSK відбувається розпад аустеніту з утворенням перліту; тому ця лінія називається лінією остаточного перетворення аустеніту в перліт або перлітною.

В табл. 1.1 наведені критичні точки діаграми стану залізо-вуглець.

### **Контрольні запитання**

1. Що називається металами?
2. Якими характерними властивостями володіють метали?



**Таблиця 1.1 – Критичні точки діаграми залізо-вуглець**

Позначення точки	Температура $t, ^\circ\text{C}$	Вміст вуглецю $C, \%$	Значення точки
A	1539	0	Плавлення (кристалізація) чистого заліза
N	1392	0	Поліморфне перетворення $\delta \leftrightarrow \gamma$ в чистому залізі
G	911	0	Поліморфне перетворення $\alpha \leftrightarrow \gamma$ в чистому залізі
H	1499	0,1	$\delta$ – твердий розчин, максимально насичений вуглецем. Бере участь у перитектичному перетворенні
J(I)	1499	0,16	Аустеніт, що утворюється в результаті перитектичного перетворення
B	1499	0,51	Рідка фаза, що бере участь у перитектичному перетворенні
D	1260	6,67	Допустима температура плавлення $Fe_3C$
E	1147	2,14	Аустеніт, максимально насичений вуглецем
C	1147	4,3	Рідка фаза, що піддається евтектичному перетворенню
P	727	0,02	Ферит, максимально насичений вуглецем
S	727	0,8	Аустеніт, що піддається евтектоїдному перетворенню
Q	20	0,006	Ферит, максимально насичений вуглецем

3. На які дві основні групи поділяють метали? Назвіть їх відмінні риси.
4. На які групи поділяють чорні метали? Дайте їх характеристику.
5. Яка природа кристалічної будови металів?
6. Перелічіть і охарактеризуйте види кристалічних решіток металів.
7. Дайте визначення анізотропії металу.
8. Що таке алотропія металів?



9. Які характеристики матеріалу відносяться до хімічних властивостей?

10. Назвіть основні технологічні властивості металів та сплавів.

11. Механічні властивості металів та сплавів – надайте їх характеристику.

12. Накресліть діаграму стану сплавів заліза з вуглецем. Покажіть на цій діаграмі лінії ліквідусу і солідусу.

13. Охарактеризуйте основні структури залізовуглецевих сплавів.

14. Охарактеризуйте структурні перетворення, що відбуваються при повільному охолодженні сплаву заліза з вуглецем, де 0,4 % С (доевтектоїдна сталь), 4,3 % С (евтектичний чавун) і 5 % С (заевтектичний чавун).

15. Перелічіть складові діаграми залізо-вуглець.

## РОЗДІЛ 2

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ЧОРНІ МЕТАЛИ – ЗАЛІЗО ТА ЙОГО СПЛАВИ. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

**Конструкційні** – це такі матеріали на основі яких виготовляють деталі для машин, інженерних споруд і конструкцій. Вони в ході роботи неодноразово будуть піддаватися механічним навантаженням. Такі деталі характеризуються великою різноманітністю не тільки форми, але й експлуатаційних навантажень. Їх застосовують в різних галузях промисловості, за їх допомогою будують промислові печі, виготовляють деталі для автомобілів, використовують в авіаційній сфері. Завдання виробника – виготовляти конструкційну деталь, готову працювати при різних температурах, в різних середовищах і з досить інтенсивними навантаженнями. Головною відмінністю продукції від інших доповнень конструкцій є їх готовність протягом довго часу приймати на себе максимальні навантаження.

З огляду на те, що метали є практично найнадійнішими і довговічними складовими, конструкційні матеріали виготовляються переважно з них. Тому, конструкційні матеріали класифікуються і розпізнаються характеристиками матеріалів з яких були виготовлені. Найчастіше з металів вибирають сталь через її міцності, надійності та легкості в обробці.

**Металеві конструкційні матеріали.** За основу матеріалів беруть сплави зі сталі, чавуну і заліза. Вони мають хорошу міцність, тому деталі та елементи, виготовлені із них, використовуються частіше за інших. Також використовують сплави з магнітними і немагнітними властивостями, кольорові і некольорові сполуки металів. Найчастіше – це алюміній, але в деяких деталях можливе використання сплавів (дюралюміній) на його основі. Сплави використовують тоді, коли деталь потрібно деформувати і перетворювати декілька разів. До кольорових металів також належать мідь (бронза), титан.

**Неметалеві конструкційні матеріали.** Неметалеві матеріали почали використовуватися набагато пізніше попередньої групи. Розвиток технологій сприяв створенню більш дешевих неметалевих матеріалів, які також міцні і надійні. Виготовляють їх з деревини, кераміки, скла, різних видів гуми та пластичних мас.

**Композиційні матеріали.** Композиційні матеріали складаються з елементів, що сильно відрізняються один від одного за властивостями. Вони дозволяють створювати конструкції із заздалегідь визначеними характеристиками, їх застосовують для підвищення ефективності виробу. Назва складу задається матеріалом матриці. Такі матеріали мають основу. Композити, що мають металеву матрицю – металеві, керамічну – керамічні та інші. Вони створені штучним шляхом. Матеріал, який отримують на виході, має новий склад властивостей. Композиційні матеріали можуть включати в себе як металеві, так і неметалеві складові.

Існує ще одна класифікація, що дозволяє розпізнати який саме необхідний матеріал для виконання обраного завдання – це розклад на види за технічними критеріями.

#### **Матеріали з підвищеною міцністю:**

- матеріали, що мають відмінні технологічні можливості;
- довговічні матеріали (елементи, на експлуатацію яких не впливають механічні показники);
- пружні конструкційні матеріали;
- нещільні матеріали;
- матеріали стійкі до природних впливів;
- матеріали, що мають високу міцність.

## **2.1 Характеристика видів та маркування чавунів**

Чавун – це сплав заліза з вуглецем (вміст карбону становить понад 2 % за масою) та іншими елементами.

До складу чавуну входить також інші елементи, такі як силіцій (*Si*) – від 0,5 % до 3,6 % і манган (*Mn*) – від 0,5 % до 1,5 %; фосфор (*P*) – 0,2 % і сульфур (*S*) – 0,1 %...0,2 %. Силіцій сприяє графітизації (виділенню графіту), манган перешкоджає графітизації, але знешкоджує сульфур, який робить чавун крихким і є шкідливою домішкою. Фосфор поліпшує рідкоплинність і величиною 1 % не знижує механічних властивостей. Вуглець може перебувати у вигляді хімічної сполуки із Fe-Fe<sub>3</sub>C, може бути у вільному стані у вигляді чотирьох алотропних модифікацій

– алмаз, графіт, карбід, фулерен (букібол), і може бути частково у вільному, частково у сполученому стані.

На властивості чавуну значною мірою впливає кількісне співвідношення вмісту зв'язаного і вільного вуглецю, а також форма графітових включень.

Чавун, в якому весь карбон перебуває у зв'язаному із ферумом стані у вигляді  $Fe_3C$  (ферум карбід), називається білим чавуном (за білим кольором зламу). Він не містить видимих під мікроскопом включень графіту. Білий чавун дуже твердий (НВ 450...550) і крихкий, погано піддається технологічній обробці і тому має обмежене використання. Він, в основному, переробляється в сталь. Для поліпшення експлуатаційних характеристик (підвищення зносостійкості, жаростійкості, корозійної стійкості) до складу чавуну додаються леговані елементи: нікель, хром, вольфрам, алюміній і т. ін. Білі леговані чавуни дуже міцні, зносостійкі, жаростійкі, тому з них виготовляють гальмівні колодки, ножі екскаваторних ківшів, деталі дробарок, котлів та інше.

**Графітізовані чавуни** – це такі, які мають видимі під мікроскопом включення графіту в структурі після ствердіння та в результаті накладення зовнішніх дій (термічних, силових та ін.) у твердому стані.

До числа графітізованих чавунів належать: чавун з пластинчастим графітом, чавун з вермикулярним графітом, чавун з кулястим графітом, ковкий чавун, половинчастий чавун (з двох складових: «білої» (ледебуритно-карбідно-перлітної) та «сірої» (перлітно-феритно-графітної)).

У доменному виробництві виплавляють три види чавунів – *переробний, ливарний і спеціальний* (феросплави).

*Переробний чавун* відповідно до ДСТУ 3133-95 призначений для сталеплавильного виробництва, виготовляють марок П1 і П2; для ливарного виробництва марок – ПЛ1, ПЛ2, ПЛ3; фосфористий – марок ПФ1, ПФ2, ПФ3; високоякісний – марок ПВК1, ПВК2, ПВК3.

*Ливарний чавун* використовується для створення машинобудівних ливарних чавунів на чавуноливарних виробництвах.

Для самостійного використання з нього одержують ливарні деталі для різноманітних механізмів і машин ливарними методами.

Переваги чавуну полягають у високих ливарних властивостях і невеликій ціні (у порівнянні зі сталлю). Температура розплавлення чавуну

на 300...400° С нижча, ніж у сталі, що скорочує процес ливарного виробництва.

Чавуни, за рахунок вмісту графіту, добре обробляються різанням, з утворенням більш чистої поверхні готових виробів, ніж при обробці сталі.

Чавун має високу твердість і низьку пластичність, він крихкий, тому його неможливо піддавати пластичній деформації. Через низьку пластичність і високий вміст карбону чавун погано зварюється. Хімічні властивості його низькі, він піддається всім видам іржавіння.

Ливарний чавун менш крихкий, добре обробляється різанням через високий вміст силіцію, який сприяє графітизації, має добрі антифрикційні властивості, великий опір стисненню, достатньо високу міцність при розтягненні, згинанні, різанні. Використовується в машинобудуванні як найбільш дешевий спосіб виготовлення деталей. Маркується літерою Л і числами, які показують вміст силіцію. Випускають сім марок ливарного чавуну: Л1; Л2; Л3; Л4; Л5; Л6; Л7. Чим вище число, тим менший вміст силіцію (Л1 – 3,6 % Si ... Л7 – 0,8 % Si).

Залежно від вмісту мангану, фосфору, сульфуру ливарний чавун поділяються на чотири групи (I, II, III, IV), п'ять класів (А, Б, В, Г, Д) і чотири категорії (I, II, III, IV).

**Машинобудівні чавуни.** За формою графітових включень машинобудівні ливарні чавуни поділяються на:

- сірі чавуни – форма графітових включень у вигляді пластин;
- високоміцні – включення графіту кулеподібної форми;
- ковкі чавуни – включення графіту вермикулярної форми.

Держстандарт установлює вісім марок сірого чавуну: СЧ-10; СЧ-15; СЧ-20; СЧ-25; СЧ-30; СЧ-35; СЧ-40; СЧ-45 (рис. 2.1). Принципи маркування сірого чавуну: СЧ – сірий чавун (його назва за сірим кольором зламу). Число вказує середню величину тимчасового опору розриву:  $\sigma_b = 100$  МПа або 10 кгс/мм<sup>2</sup>. Твердість цих чавунів НВ = 143...255;  $\delta = 0,2...0,5$  %. Хімічний склад: C = 3,2...3,5 %; Si = 1,9...2,5 %; Mn = 0,5...0,8 %; P = 0,1...0,3 %; S ≤ 0,125 %.

Шляхом регулювання сумарного вмісту карбону і силіцію в розплавленому чавуні, а також швидкості охолодження у формі можна одержати виливки з різноманітною структурою.



**Рисунок 2.1 – Мікроструктура сірого чавуну  
(збільшення у 800 разів)**

*Сірі чавуни* – ідеальні ливарні сплави з невисокою температурою плавлення  $1100^{\circ}\text{C}$ , що при твердінні не дає усадки. Вони дешевші, ніж сталь, а виливки з них менше коробляться утворюючи тріщини, мають більш чисту поверхню, тому що менше взаємодіють з піщаною формою. Виливки більш тонкостінні, ніж виливки зі сталі, що призводить до менших витрат металу.

Марки СЧ10...СЧ20 використовуються для одержання виливок, які менше навантажуються, це кришки, фланці, маховики.

Чим вища марка, тим надійніші виливки щодо несучої здатності.

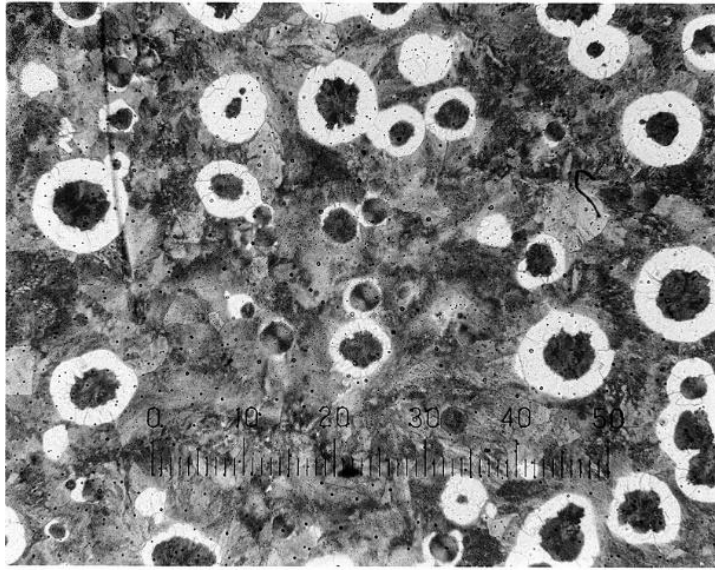
Основними складовими структури, які визначають їх властивості, крім графіту, є ферит, цементит, перліт.

*Високоміцний чавун*, що має кулясту форму графіту, одержують обробкою розплавленого чавуну різноманітними модифікаторами (магній, церій, марганець), рис. 2.2.

Хімічний склад:  $C = 2,7...3,6\%$ ;  $Si = 1,9...2,8\%$ ;  $Mn = 0,2...0,9\%$ ;  $P = 0,1\%$ ;  $S = 0,1\%$ ;  $Cr = 0,15\%$ .

Високоміцний чавун у три рази міцніший, ніж сірий, відзначається пластичністю, добре обробляється різальним інструментом, має добрі ливарні властивості.

Марка чавуну визначається його тимчасовим опором розриву під час розтягання, умовною границею плинності та відносним видовженням.



**Рисунок 2.2 – Мікроструктура високоміцного чавуну  
(збільшення у 800 разів)**

Умовне позначення марки чавуну з кулястим графітом містить букви ВЧ: В – високоміцний, Ч – чавун, цифрове позначення мінімального значення тимчасового опору під час розтягання, в МПа, та через дефіс (–) мінімального значення відносного видовження, у відсотках.

Приклад умовного позначення марки чавуну з кулястим графітом з мінімальним значенням тимчасового опору під час розриву 500 МПа та мінімальним відносним подовженням 2 %: ВЧ 500-2 ДСТУ 3925-99. Виготовляється всього 12 марок такого чавуну (табл. 2.1).

З *ковких чавунів* виготовляють корпуси повітряного інструменту, кронштейни, гальмівні колодки, картери і редуктори (використовуються в автотракторобудуванні), фітинги. Виливки із ковкого чавуну мають властивості, близькі до сталевих (рис. 2.3).

Ковкий чавун одержують внаслідок спеціального тривалого високотемпературного відпалу вихідної литої заготовки із білого чавуну.

Ковкий чавун позначають буквами КЧ і двома числами, з яких перше вказує мінімальну границю міцності на розтяг, друге – мінімальне відносне видовження  $\delta$  (%). Відомі такі марки ковкого чавуну: на феритній основі (3-10 % перліту) КЧ30-6, КЧ33-8, КЧ35-10, КЧ37-12, на перлітній основі (0-20 % фериту) КЧ45-7, КЧ50-5, КЧ55-4, КЧ60-3, КЧ65-3 (табл. 2.2).

**Таблиця 2.1 – Механічні властивості високоміцного чавуну  
(згідно з ДСТУ 3925-99)**

Марка чавуну	Тимчасовий опір розриву під час розтягнення $\sigma_B$ , МПа	Умовна границя пружності $\sigma_{0,02}$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Твердість за Брінелем, НВ
	Не менше			
ВЧ 350-22	350	230	22	140...170
ВЧ 400-15	400	260	15	140...202
ВЧ 420-12	420	270	12	140...217
ВЧ 450-10	450	320	10	140...225
ВЧ 450-5	450	310	5	160...220
ВЧ 500-7	500	340	7	153...245
ВЧ 500-2	500	390	2	180...260
ВЧ 600-3	600	390	3	192...277
ВЧ 700-2	700	420	2	228...302
ВЧ 800-2	800	490	2	249...351
ВЧ 900-2	900	600	2	280...360
ВЧ 1000-2	1000	700	2	270...360

Ковкий чавун має такі переваги: поєднання відмінних механічних властивостей з високою оброблюваністю різанням; однорідність структури на всьому перетині виливка; відсутність внутрішньої напруги в литві; здатність сприймати високі знакозмінні навантаження; хороша корозійностійкість.



**Рисунок 2.3 – Мікроструктура ковкого чавуну  
(збільшення у 800 разів)**



**Таблиця 2.2 –Механічні властивості ковкого чавуну за ГОСТ 1215-79**

Марка	Тимчасовий опір розриву під час розтягнення $\sigma_b$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Твердість за Брінелем, НВ
КЧ 30-6	294	6	100...163
КЧ 33-8	323	8	100...163
КЧ 35-10	333	10	100...163
КЧ 37-12	362	12	110...163
КЧ 45-7	441	7	150...207
КЧ 50-5	490	5	170...230
КЧ 55-4	539	4	192...241
КЧ 60-3	588	3	200...269
КЧ 65-3	637	3	212...269
КЧ 70-2	686	2	241...285

Ковкий чавун використовується у виробництві для виготовлення дрібних тонкостінних виливків (3...50 мм) відповідального призначення, які працюють в умовах динамічних знакозмінних навантажень в автомобільній промисловості, тракторобудування і сільськогосподарської техніки. З ковкого чавуну виготовляють коробки передач, деталі приводних механізмів, шасі, важелі, колінчаті і розподільні вали, деталі зчеплення, поршні дизельних двигунів, коромисла клапанів, фітинги та інші вироби.

## 2.2 Класифікація та маркування сталей

Сталі є основною продукцією сталеплавильного металургійного виробництва і основним конструкційним матеріалом у машинобудуванні та інших галузях промисловості.

Для поділу і раціонального застосування всіх видів сталей, що виробляє металургійна промисловість, використовують їх класифікацію та маркування.

Сталі класифікують за такими ознаками:

✓ за способом виробництва, за хімічним складом, за якістю, за призначенням, за характером ведення процесу розкислення тощо;

- ✓ за способом виробництва сталі поділяються на киснево-конвертерні (виплавлені у кисневих конвертерах), мартенівські (у мартенівських печах) та електросталі (в електричних печах);
- ✓ за хімічним складом та за якістю сталі поділяються на вуглецеві і леговані.

Вуглецеві сталі є найпоширенішими, вони дешевші за леговані, мають задовільні механічні властивості, добре обробляються тиском і різанням і використовуються у маловідповідальних та мало навантажених конструкціях. Їх поділяють за вмістом вуглецю:

- маловуглецеві (0,25 % карбону (C));
- середньовуглецеві (0,25...0,65 %);
- багатовуглецеві (більше 0,65 %).

За якістю:

- звичайної якості;
- якісні;
- високоякісні.

Легування (уведення в сталь елементів, що покращують їхні властивості) здійснюється в процесі плавки шляхом додаванням легуючих елементів хрому, молібдену, нікелю, вольфраму, титану, ванадію, кобальту та інших.

За призначенням вуглецеві сталі поділяються на:

- конструкційні;
- інструментальні.

У тому числі леговані сталі поділяються на:

- конструкційні;
- інструментальні;
- спеціальні.

Конструкційні сталі – це:

- низьковуглецеві;
- середньовуглецеві;
- інструментальні;
- високовуглецеві.

Щодо характеру ведення процесу і розкислення сталі бувають:

- спокійні;
- напівспокійні;

- киплячі.

Спокійна – це повністю розкислена (розчинений кисень вилучений) та якісна сталь. Кипляча – це малорозкислена сталь, в якій вміст кисню підвищений. Напівспокійна сталь займає проміжний стан.

Вуглецеві конструкційні сталі маркують залежно від якості:

- ✓ *звичайної якості* – містять підвищену кількість сульфуру Ст0, Ст1... Ст6 (Ст. – означає сталь, цифри – умовний порядковий номер);
- ✓ *якісні* – 08, 10, 15, 25, 30, 35 ... 85 (числа вказують середній вміст карбону в сотих частинах відсотка), 60Г, 65Г, 70Г (буква Г вказує на підвищений вміст мангану).

Для позначення ступеня розкислення після позначення марки сталі додають букви:

- сп – спокійна;
- кп – кипляча;
- пс – напівспокійна.

Конструкційні сталі використовують для виготовлення різноманітних, деталей, вузлів у машинобудуванні та будівництві.

Вуглецеві інструментальні сталі містять 0,65 %...1,35 % карбону. Залежно від якості їх маркують так:

- ✓ *якісні* У7, У8...У13 (У – вуглецева інструментальна сталь, число вказує вміст карбону в десятих долях відсотка);
- ✓ *високоякісні* – У8А, У10А...У13А (А – означає, що сталь високої якості).

*Леговані сталі маркують великими буквами і цифрами. Легуючі елементи позначають такими буквами:*

- С – силіцій;
- Х – хром;
- М – молібден;
- Г – манган;
- Н – нікель;
- В – вольфрам;
- К – кобальт;
- Ф – ванадій;
- Т – титан;
- Ю – алюміній;
- Д – купрум.

Цифри перед літерами означають процентний вміст карбону (дві цифри – в сотих частках, одна цифра – в десятих). При вмісті карбону більше 1 % цифра не ставиться. Цифри після букв – середній вміст легуючих елементів (у відсотках). Якщо цифра після літери не проставлена, вміст легуючого елемента 1 %...1,5 %.

Найбільш поширені леговані сталі:

- конструкційні – 15X, 20X, 40X, 45X;
- інструментальні – ХВГ, 9ХС, ХВ5;
- швидкорізальні – Р12, Р9, Р18, Х23Р20С2;
- жаростійкі – Х8СМ;
- нержавіючі – 2Х13.

Наприклад:

сталь **18ХГТ** містить: 0,17...0,23 % *C*; 1,0...1,3 % *Cr*; 0,1...1,1 % *Mn*; близько 0,1 % *Ti*;

сталь **38ХНЗМФА** – 0,3...0,4% *C*; 1,2...1,5% *Cr*; 3,0...3,5 % *Ni*; 0,35...0,45 % *Mo*; 0,1...0,18 % *V*;

сталь **30ХГСА** – 0,32...0,39 % *C*; 1,0...1,4 % *Cr*; 0,8...1,1 % *Mn*; 1,1...1,4 % *Si*.

Використання легованих сталей дає можливість зменшити металоємність машин і конструкцій, збільшити їх довговічність, а також виготовляти вироби покращеної якості щодо високих температур, навантажень та корозійності. Проте леговані сталі дорожчі від конструкційних, їх створення технологічно складніше. Найефективніші технологічно мотивоване використання низьколегованих сталей, що спроможне забезпечити економію 18...20 % металу.

*Інструментальні сталі* застосовують для виготовлення різного інструменту. Вони повинні мати високу твердість та зносостійкість.

Для виготовлення різального інструменту використовують такі сталі:

- низької теплостійкості (до 250 °С): ХГ, 9ХС, ХВГ, ХВСГ;
- підвищеної до 600 °С теплостійкості: Р9, Р6М5, Р9К5, Р14Ф4.

Сталі для вимірювального інструменту повинні мати високу твердість, зносостійкість і зберігати постійність розмірів. Для виготовлення плиток, калібрів, шаблонів застосовують високовуглецеві хромисті сталі, наприклад, ХВГ, ХВ5. Найчастіше такі сталі після гартування

обробляють холодом (для повного перетворення залишкового аустеніту в мартенсит).

*Сталі для штамів:*

- холодного деформування середніх розмірів: 9ХС, Х6ВФ;
- холодного деформування різних розмірів, особливо високоточних: Х12М, Х12Ф;
- гарячого деформування середніх розмірів: 5ХНТ, 5ХНВ;
- гарячого деформування великих розмірів важко-навантажених: 4Х2В5МФ, 5Х3В3МФС.

Для деяких високоякісних сталей є відхилення в позначеннях. Так, швидкорізальні сталі позначають буквою Р, цифра вказує на вміст у ній вольфраму, шарикопідшипникові сталі позначають буквами і цифрами (наприклад ШХ), де Ш – шарикопідшипникова з вмістом хрому в процентах.

Машинобудівні сталі спеціального призначення характеризуються їх механічними властивостями при низьких і високих температурах; фізичними, хімічними властивостями та використанням при експлуатації в особливих умовах (при температурах нижче 0 °С, високих, динамічних навантаженнях та ін.).

Сталі з особливими фізичними властивостями отримують за допомогою спеціального легування і термічної обробки, їх застосовують в основному в приладобудуванні, електронній, авіа- та космічній промисловості.

Сталі з особливими хімічними властивостями (корозієстійкі) містять не менш як 12,5...13 % силіцію. Сталі з високим вмістом хрому і нікелю – стійкі в агресивних середовищах. Застосовують їх переважно в харчовій та хімічній промисловості.

*Спеціальні сталі* (сталі з особливими властивостями) застосовують для роботи в агресивних середовищах, при високих температурах, ударних навантаженнях тощо.

Корозійностійкі сталі мають високу корозійну стійкість у хімічно активних газових і рідких середовищах. Це досягається за рахунок великого вмісту хрому (понад 13%). Титан додається в сталь для запобігання корозії. Корозійностійкі сталі поділяються на:

- хромисті 10Х13, 40Х13, 10Х25 (феритна);
- хромонікелеві (аустенітні): 12Х18Н9, 10Х18Н10Т.

Жаростійкі і жароміцні сталі мають здатність чинити опір газовій корозії при підвищених температурах та зберігати достатню міцність при високих температурах. Жаростійкість забезпечується легуванням сталей хромом, силіцієм та алюмінієм, які утворюють захисні плівки  $(Fe, Cr)_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ . До жаростійких відносяться леговані сталі 25X6C10, 40X9C2, 15X25T, 12X18H10T.

Жароміцність досягається легуванням тугоплавкими хімічними елементами (хром, нікель, молібден). До жароміцних сталей належать сталі марок: 15X2MФС, 15X11MФ, 40X10C2M, 10X18H10T, 40X15H7Г7Ф2МС.

Зносостійка (аустенітна) сталь 110Г13Л використовується для виготовлення деталей, які працюють в умовах абразивного тертя та високого тиску і ударів (наприклад, траки гусеничних машин, деталі подрібнювачів, хрестовини залізничних і трамвайних колій, черпаки землерийних машин). Характерна особливість марганцевого аустеніту – здатність сильно наклепуватись і перетворюватися в мартенсит, що сприяє підвищенню твердості й опору до зношення.

### Контрольні запитання

1. Що таке чавуни?
2. Що таке сталь?
3. За допомогою чого здійснюється маркування чавунів?
4. Розшифруйте марку чавуну СЧ15.
5. Яка марка чавуну маркується буквами «ВЧ» і цифрою, що характеризує межу міцності при випробовуваннях на розтяг?
6. Які вироби виготовляють з високоміцних чавунів?
7. Як маркують ковкі чавуни?
8. Які вироби виготовляють із ковких чавунів?
9. Суть зміцнення сталі при легуванні.
10. Які легуючі елементи здатні утворювати з карбоном карбіди, а які – ні?
11. Класифікація легованих сталей за призначенням; назвіть галузі застосування цих сталей.

12. Охарактеризуйте класифікацію легованих сталей за вмістом легуючих компонентів. Наведіть приклади марок легованих сталей.

13. Наведіть приклади конструкційних легованих сталей. Галузі їх застосування.

14. Які із сталей відносяться до інструментальних? Наведіть приклади інструментальних сталей для ріжучого і вимірювального інструментів.

15. Назвіть існуючі галузі застосування швидкорізальної сталі.

## РОЗДІЛ 3

### КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ ТА СПЛАВИ АЛЮМІНІЮ, МІДІ, МАГНІЮ, ЦИНКУ. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

#### 3.1 Алюмінієві сплави

*Алюміній* – метал сріблясто-білого кольору з малою щільністю 2,7 г/см<sup>3</sup> і невисокою температурою плавлення 660 °С. Він кристалізується в гранецентровану кубічну гратку, не має поліморфних перетворень, але має високу теплопровідність, електропровідність і пластичність.

За чистотою первинний алюміній ділиться на три класи: особливої чистоти А999 (99,999 % *Al*, а сума всіх домішок не більше 0,001 %); високої чистоти А995, А99, А97, А95 (99,995...99,95 % *Al*) і технічної чистоти А85, А8, А7, А6, А5, АТ (99,85...99,0 % *Al*).

Алюміній – хімічно активний метал, проте він має достатню корозійну стійкість внаслідок утворення на поверхні щільної оксидної плівки *Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*. Вона дуже добре зчіплюється з металом і малопроникна для всіх газів. Алюміній стійкий до концентрованої азотної кислоти і деяких органічних кислот. Соляна, плавикова та інші кислоти, а також луги руйнують алюміній. Чим чистіше алюміній, тим вище його корозійна стійкість. Механічні властивості чистого алюмінію невисокі:  $\sigma_B = 60 \dots 130$  МПа,  $\delta = 5 \dots 28\%$ .

#### 3.1.1 Класифікація і маркування алюмінієвих сплавів

Як основні легуючі елементи в алюмінієвих сплавах застосовують *Cu, Mg, Si, Mn, Zn*; менше *Ni, Li, Ti, Be*, тощо. Більшість легуючих елементів утворюють з алюмінієм тверді розчини обмеженої розчинності і проміжні фази з алюмінієм і між собою (*CuAl<sub>2</sub>, Mg<sub>2</sub>Si*). Всі сплави алюмінію можна поділити на три групи:

- 1) деформовані сплави незміцнені та зміцнені термічною обробкою;
- 2) ливарні сплави;
- 3) сплави, одержувані методом порошкової металургії (САП – спечені алюмінієві порошки, САС – спечені алюмінієві сплави).

Нині прийняте змішане літерне і буквено-цифрове маркування алюмінієвих сплавів. Наприклад, сплави, що деформуються, позначаються



буквами Д, АД, АК, АМ, АВ; ливарні – АЛ. Буквою Д позначають сплави дюралюмінія – Д1, Д16 тощо. Букви АВ означають сплав Авіаль. Букви АМг і АМц позначають сплав алюмінію з магнієм (Mg) і марганцем (Mn), причому цифри, що стоять за буквами АМг1; АМг6 відповідають зразковому вмісту магнію в цих сплавах.

Букви АТ відповідають деформованому алюмінію, цифра вказує чистоту алюмінію. Деякі кувальні сплави позначені буквами АК (алюміній кувальний) – сплави АК4-1, АК6, АК8 тощо. Таке маркування алюмінієвих сплавів не відрізняється системністю та одноманітністю. Тому в даний час вводиться єдине чотирицифрове маркування алюмінієвих сплавів. Перша цифра позначає основу всіх сплавів. Алюмінію присвоєна цифра один. Друга цифра характеризує головний легуючий елемент або групу головних легуючих елементів. Третя цифра або третя з другою відповідають старому маркуванню. Четверта цифра – непарна (включаючи 0) вказує, що сплав деформується. Так, сплав Д16 маркують 1160, Д19 – 1190. Експериментальні сплави позначають цифрою 0, яка ставиться попереду одиниці, тобто для експериментальних сплавів як виняток застосовується п'ятизначне маркування. Наприклад, сплав марки 01420. Ця цифра виключається з маркування, коли сплав виготовляється серійно. Ливарні сплави мають останню парну цифру. Металокерамічний спосіб виробництва характеризується останньою цифрою 9, дрові сплави позначають цифрою 7.

### **3.1.2 Деформовні алюмінієві сплави**

*Деформовні сплави* – це такі сплави, що не зміцнюються під час термічної обробки. До цієї групи належать сплави алюмінію з манганом (сплави АМц) і магнієм (сплави АМг). Сплави можуть зміцнюватись тільки холодною пластичною деформацією. Їх застосовують для виготовлення ємностей, бензо- і маслопроводів, а також для заклепок ( $\sigma_b =$  від 130 до 430 МПа,  $\sigma_{0,2} =$  до 300 МПа,  $\delta$  порядку 10...20 %).

*Деформовані алюмінієві сплави*, зміцнені термічною обробкою Основними в цій групі є сплави систем алюмінію з купрумом, магнієм, манганом, силіцієм, літієм і берилієм:

*Al–Cu–Mg* (Д16, Д19 та ін.);

*Al–Zn–Mg–Cu* (В93, В95, В96 та ін.);

*Al–Cu–Mg–Mn–Si* (AK6, AK8);

*Al–Be* і *Al–Be–Mg*.

*Сплави системи Al–Cu–Mg.* Сплави на основі цієї системи з домішками мангану, названі дюралюмін, мають широкий інтервал міцності властивостей від середніх до високих. Дюралюміни марок Д16 і Д19 застосовують в авіації. Манган уведений у дані сплави для підвищення їх корозійної стійкості, а титан (до 0,1 %) додають в сплав Д19 – для подрібнення зерна. Сплав Д16 при кімнатній температурі має більш високу міцність, ніж інші дюралюміни.

У порівнянні з чистим алюмінієм усі дюралюміни відрізняються зниженою корозійною стійкістю і потребують спеціальних засобів захисту від корозії. Застосовують в основному два способи захисту: покриття дюралюміна технічним алюмінієм (марок А7 і А8) і електрохімічне оксидування (анодування). При анодуванні (наприклад, у сульфатній кислоті) поверхню виробів покривають більш щільною і товстою, ніж в природних умовах, захисною оксидною плівкою  $Al_2O_3$ . Дюралюміни на основі системи *Al–Cu–Mg* характеризуються низькою технологічністю при литті та обробці тиском (необхідне застосування малих швидкостей деформації) і вимагають використання вузького інтервалу температур нагріву під час загартування. Сплави відносяться до категорії незварюваних плавлень через високу схильність до утворення кристалізаційних тріщин.

*Сплави системи Al–Zn–Mg–Cu.* Сплави цієї системи є найміцнішими серед алюмінієвих. Міцність цих сплавів досягає 500...700 МПа, але при меншій пластичності ( $\delta = 8...10\%$ ), ніж у дюралюміна.

На відміну від дюралюміна у високоміцних сплавах (В93, В95, В96) після гартування виходить більш стабільний твердий розчин. Тому такі сплави застосовують тільки після штучного старіння. Загартовування проводять з температури 460...470 °С у холодній або підігрій (до 80° С...100 °С) воді. Нагріта вода необхідна при загартуванні великогабаритних профілів і штамповок, щоб уникнути їх розтріскування. Сплав В95 є найбільш універсальним конструкційним матеріалом. Він застосовується для виготовлення всіх видів деформованих напівфабрикатів: листів, плит, профілів, труб, поковок і штамповок. Пресовані профілі зі сплаву В95 значно міцніші, ніж листи. За міцністю при нормальній температурі сплав В95 значно кращий за дюралюміни.

### **3.1.3 Жароміцні, ливарні та спечені алюмінієві сплави**

Жароміцні сплави алюмінію мають більш складний хімічний склад, ніж інші алюмінієві сплави. Підвищення жароміцності сплавів типу дуралюмін – Д16, ВД17, ВАД2 було досягнуто шляхом збільшення вмісту в них магнію, а сплавів Д20 і Д21 – купруму. Крім того, застосовують спеціальні домішки титану, цирконію, феруму, нікелю та інших елементів, що позитивно впливають на жароміцність сплавів. Механічні властивості жароміцних алюмінієвих сплавів:  $\sigma_b = 420 \dots 440$  МПа,  $\sigma_{0,2} = 280 \dots 350$  МПа,  $\delta = 11 \dots 18$  %. Робоча температура  $200 \dots 300$  °С.

Ливарні алюмінієві сплави повинні мати плинність, малу усадку, низьку схильність до утворення гарячих тріщин і пористості, а також високі механічні і корозійні властивості. Крайні ливарні властивості мають сплави, що містять у своїй структурі евтектики. Як ливарні частіше застосовують сплави на основі систем *Al-Si*, *Al-Cu* і *Al-Mg*.

Найкращими ливарними властивостями і малою питомою вагою володіють сплави системи *Al-Si*, звані силумінами (АЛ2, АЛ4, ВАЛ5).

САП (спечений алюмінієвий порошок або спечена алюмінієва пудра) – алюміній, зміцнений частинками алюміній оксиду. Отримують САП шляхом холодного, а потім гарячого брикетування при температурі  $500 \dots 600$  °С тонкого окисленого алюмінієвого порошку (пудри) і подальшої деформації (прокатці, куванні, пресуванні) гарячепресованих брикетів. Пудра має форму лусочок товщиною менше 1 мкм.

Зі збільшенням вмісту алюміній оксиду межа міцності підвищується від  $300 \dots 320$  для САП1 і до  $440 \dots 460$  МПа для САП4. Відносне подовження відповідно знижується від  $5 \dots 8$  % до  $1,5 \dots 2$  %. Найважливішою властивістю САП є підвищена жароміцність у порівнянні з усіма деформованими алюмінієвими сплавами. Причому його властивості майже не змінюються залежно від тривалості експлуатації. Наприклад, 100-годинна тривала міцність САП при  $500$  °С дорівнює  $450 \dots 550$  МПа, тоді як жароміцні деформовані і ливарні алюмінієві сплави при температурах вище  $350$  °С взагалі довго не працюють.

САС (спечені алюмінієві сплави) отримують гарячим брикетуванням із подальшим пресуванням при температурі  $\sim 500$  °С з порошоків окислених алюмінієвих сплавів.

Сплави САС-1 (25 %...30 % Si, 5 %...7 % Ni) і САС-2 (25%...30 % Si, 5 %...7 % Fe) володіють низьким коефіцієнтом лінійного розширення і використовуються для виготовлення окремих деталей, приладів замість більш важких сталей. САС-1 характеризується задовільною межею міцності (220...240 МПа), межею плинності (210...230 МПа) і низьким відносним подовженням (0,5 %). Із САП і САС виготовляють диски і лопатки компресорів і деталі, що працюють тривалий час при температурі 300...500 °С і короткочасно при 700...900 °С.

### **3.1.4 Надлегкі алюміній-літєві сплави**

Сплави системи *Al-Li* мають значну питому міцність з високим питомим модулем пружності, тому вони можуть різко знизити вагу і вартість приладів, особливо авіаційних.

Крім надзвичайно токсичного берилію, літій є єдиним легуючим елементом, вміст якого в сплаві зменшує щільність сплаву і збільшує модуль пружності. Кожен відсоток вмісту літію в алюміній-літєвому сплаві знижує його щільність на 2 % і підвищує модуль пружності на 6 %. Щільність таких сплавів становить 2540...2560 кг/м<sup>3</sup>, щільність літію 530 кг/м<sup>3</sup>.

Типовий алюміній-літєвий сплав на 10 % легше і на 10 % жорсткіше традиційного алюмінієвого сплаву. Вартість *Al-Li* сплавів у 2,5 рази перевищує номінальну вартість традиційних алюмінієвих сплавів.

Алюміній-літєві сплави з часом замінять більшість сплавів, використовуваних зараз у будівництві літаків, і відсоток використання таких сплавів може перевищити відсоток використання композиційних матеріалів.

Насьогодні *Al-Li* сплави отримують методом лиття, коли легуючі елементи розчиняють у розплаві алюмінію, та з отриманого сплаву виливають злитки. Такий процес обмежує вміст літію трьома відсотками. Більш високий вміст літію і, отже, більш низька щільність можна досягти шляхом порошкової металургії. Порошкова металургія алюміній-літєвих сплавів дозволяє підвищувати вміст літію до 5 %, знизити щільність сплаву на 14 %, забезпечивши при цьому високої міцності, корозійної стійкості та здатності сплаву працювати при температурах до 250 °С.

## 3.2 Мідь та основні сплави на її основі

### 3.2.1 Латуні

Мідь належить до металів неперехідних груп, має кристалічну ґратку ГЦК. Мідь має найвищу електро- і теплопровідність із усіх металів, поступаючись тільки сріблу. Чим вище чистота міді, особливо за змістом елементів, з якими вона утворює тверді розчини, тим вище її електропровідність. Чиста мідь характеризується невисокою міцністю ( $\sigma_{\text{в}} = 220$  МПа) при дуже високій пластичності ( $\delta = 45 \dots 50 \%$ ). Пластичність при нормальних температурах залежить від вмісту домішок – сульфуру і оксигену, які утворюють у міді частки включень сульфідів ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) і оксидів ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) відповідно. При температурі гарячої деформації евтектики міді зі плюмбумом або з бісмутом розплавляються, і тоді виникає явище червоноламкості. Присутність бісмуту надає міді крихкість при знижених температурах, оскільки сам бісмут має крихкість. У міді, що містить оксиген у вигляді оксидів або у твердому розчині, при нагріванні виникають тріщини на поверхні, так звана «воднева хвороба». Це явище пов'язане із виходом з міді водяної пари, що утворилася під час реакції водню з киснем. Для зниження вмісту оксигену використовують метод вакуумної плавки.

Міцність міді може бути збільшена у результаті холодної пластичної деформації (більше  $60 \dots 70 \%$ ), що призводить до зміцнення до рівня  $\sigma_{\text{в}} = 450$  МПа, але при цьому, природно, сильно знижується пластичність ( $\delta = 5\%$ ). Відпал рекристалізації міді зазвичай здійснюють при температурі  $300 \dots 350$  °С.

Сплави міді з цинком називають латунями; за винятком сплавів з нікелем, всі інші її сплави називають бронзами. Латуні позначають літерою Л і цифрою, що вказує масовий вміст купруму у сплаві у відсотках (наприклад, Л96, Л59). Якщо латунь легована разом із цинком іншими елементами, то після букви Л ставлять умовне позначення цих елементів: С – плюмбум, О – станум, Ж – ферум, А – алюміній, К – силіцій, Мц – манган, Н – нікель. Числа після букв показують масовий вміст легуючого елемента, крім цинку (наприклад, ЛМцЖ55-3-1 містить  $\sim 55 \%$  *Cu*,  $3 \%$  *Mn*,  $1 \%$  *Fe*, *Zn* – залишок).

Як уже зазначалося, основний легуючий елемент в латуні – цинк. При його вмісті до 39 % сплави є однофазними і складаються з твердого розчину цинку в міді.

У складних (спеціальних) латунях загальний вміст додаткових легуючих компонентів не перевищує 7...9 %; всі вони (крім плюмбуму) збільшують міцність, але зменшують пластичність сплавів. Домішка плюмбуму покращує антифрикційні властивості і різання. Латуні поділяють на деформовані і ливарні.

### **3.2.2 Бронзи**

Бронзи маркують буквами Бр, потім вказують основні легуючі елементи та їх вміст у сплаві. Так, БрОЦС6–6–3 містить 6 % *Sn*, 6 % *Zn* і 2 % *Pb*, *Cu* – залишок. Позначення елементів у бронзах такі, що і при маркуванні латуней. Крім того, фосфор позначають буквою Ф, цинк – Ц, хром – Х, берилій – Б, цирконій – Цр. Олов'яні бронзи за структурою бувають однофазними ( $\alpha$ – твердий розчин олова в міді) і двофазними, що складаються з  $\alpha$  – і  $\delta$  – ( $Cu_{31}Sn_8$ ) фаз. Так,  $\delta$  – фаза виділяється при вмісті станума 7...9 %. Вона підвищує твердість і крихкість бронз.

**Олов'яні бронзи** характеризуються високими антифрикційними властивостями, корозійною стійкістю, низькою ливарною усадкою. Через зростаючу крихкість при збільшенні станума в промисловості застосовують бронзи, що містять до 10...12 % *Sn*.

Олов'яні бронзи застосовують для лиття художніх виробів. При додатковому легуванні фосфором їх використовують для виготовлення деталей, що працюють на тертя в корозійному середовищі: підшипники, втулки що ущільнюють, пояски поршневих кілець, клапани.

**Алюмінієві бронзи** можуть бути як подвійними (наприклад, БрА5), так і додатково легуваними нікелем, манганом, ферумом та ін. Бронзи, що містять до 4...5% *Al*, характеризуються високою пластичністю. Двофазні сплави мають більш високу міцність, але знижену пластичність у порівнянні з однофазними.

Алюмінієві бронзи добре обробляються тиском, корозійностійкі, мають високі механічні властивості, хороші ливарні властивості, однак при литті утворюються усадкові раковини. Із високоміцних алюмінієвих

бронз виготовляють шестерні, втулки, підшипники, пружини, деталі електроустаткування.

**Берилієві бронзи** мають високі механічні (зокрема, пружні) властивості, стійкість проти корозії і задовільну електро- і теплопровідність, добре зварюються. Широко відомі бронзи, що містять 1,6...2,6 % *Be*, 0,2...0,5 % *Ni*, 0,1...0,25 % *Ti* (БрБ2; БрБ2,5; БНТ-1,9; БНТ-1) цифри вказують вміст берилію % (за масою).

Є ще класи кременистих бронз, хромових, цирконієвих бронз, які отримали менше поширення.

### 3.3 Сплави на основі магнію

**Магній** – метал сріблясто-білого кольору. Температура плавлення магнію 650 °С. Кристалічна ґратка гексагональна. Відрізняється низькою щільністю (1,74 г/см<sup>3</sup>), хорошою оброблюваністю різанням, здатністю сприймати ударні і гасити вібраційні навантаження.

Залежно від вмісту домішок встановлені такі марки магнію: Мг96 (99,96% *Mg*), Мг95 (99,95% *Mg*), Мг90 (99,90% *Mg*), Мг99 магній високої чистоти (99,9999% *Mg*).

Магній є хімічно активним металом, який легко окислюється на повітрі. Чистий магній через низькі механічні властивості (тимчасовий опір 100...190 МПа, відносне подовження 6...17%, твердість 30...40 НВ) як конструкційний матеріал практично не застосовують. Його використовують у піротехніці, у хімічній промисловості для синтезу органічних сполук, у металургії різних металів і сплавів як розкислювач, відновник і легуючий елемент.

Перевагою магнієвих сплавів є висока питома міцність. Межа міцності магнієвих сплавів досягає 250...400 МПа при щільності менше 2 г/см<sup>3</sup> на кубічний сантиметр. Сплави в гарячому стані добре куються, прокочуються і пресуються. Магнієві сплави добре обробляються різанням (краще, чим сталі, алюмінієві та мідні сплави), добре шліфуються і поліруються. Задовільно зварюються контактною і дуговою зваркою в середовищі захисних газів.

До недоліків магнієвих сплавів поряд з низькою корозійною стійкістю і малим модулем пружності слід віднести погані ливарні властивості, схильність до газонасичення, окислювання і займання при їх виготовленні.

За механічними властивостями вони поділяють на сплави невисокої і середньої міцності, високоміцні і жароміцні, за схильністю до зміцнення за допомогою термічної обробки.

**Деформуємі магнієві сплави.** У сплавах МА1 і МА8 основним легируючим елементом є манган. Термічною обробкою ці сплави не зміцнюються, мають добру корозійну стійкість і здатність до зварювання. Сплави МА2-1 і МА5 відносяться до системи *Mg-Al-Zn-Mn*. Алюміній і цинк підвищують міцність сплавів, надають хорошу технологічну пластичність, що дозволяє виготовляти з них ковані і штамповані деталі складної форми (крильчатки та інші деталі літака). Сплави системи *Mg-Zn*, додатково леговані цирконієм (МА14), кадмієм, рідкісноземельними металами (МА15, МА19 та ін) відносять до високоміцних магнієвих сплавів. Їх застосовують для незварних сильно навантажених деталей (обшивки літаків, деталей вантажопідйомних машин, автомобілів, ткацьких верстатів і т.д.)

**Ливарні магнієві сплави.** Найбільше застосування знайшли сплави системи *Mg-Al-Zn* (МЛ5, МЛ6). Вони широко застосовуються в літакобудуванні (корпуси приладів, насосів, коробок передач, ліхтарі і двері кабін і т.д.), ракетній техніці (корпуси ракет, паливні й кисневі баки, стабілізатори), конструкціях автомобілів, особливо гоночних (корпусу, колеса, помпи та ін), в приладобудуванні (корпуси і деталі приладів). Внаслідок малої здатності до поглинання теплових нейтронів магнієві сплави використовують в атомній техніці, а завдяки високій демпфуючій здібності при виробництві кожухів для електронної апаратури.

Більш високими технологічними і механічними властивостями володіють сплави магнію з цинком і цирконієм (МЛ12), а також сплави, додатково леговані кадмієм (МЛ8), рідкісноземельними металами (МЛ9, МЛ10). Дані сплави застосовують для виготовлення навантажених деталей літаків і авіадвигунів (корпусів компресорів, картерів, ферм шасі, колонок керування та ін.)

Магнієві сплави піддаються таким видам термічної обробки:



- T1 – старіння;
- T2 – відпал;
- T4 – гомогенізація і гарт на повітрі;
- T6 – гомогенізація, гарт на повітрі і старіння;
- T61 – гомогенізація, загартування у воді і старіння.

### 3.4 Сплави на основі цинку

**Цинк** – метал з низькою температурою плавлення (419 °C) і дуже низькою – кипіння (906 °C), високою питомою вагою (7,14 г/м<sup>3</sup>). Міцність цинку низька ( $\sigma_b=150$  МПа) при високій пластичності ( $\delta=50$  %).

Кристалічна ґратка гексагональна. Алотропічних перетворень цей метал не має.

Цинк застосовується для гарячого і гальванічного оцинковування сталевих листів, у поліграфічній промисловості, для виготовлення гальванічних елементів тощо. Цинк використовується як домішка в різні сплави, у першу чергу в сплави міді (латунь, тощо), і як основа цинкових сплавів (наприклад – легкоплавкі припої на основі цинку), а також як друккарський метал.

Залежно від чистоти цинк поділяється на марки (ГОСТ 3640-47):

- ЦВ (99,99% Zn);
- Ц0 (99,96);
- Ц1 (99,94);
- Ц2 (99,9);
- Ц3 (98,7);
- Ц4 (97,5).

Домішки в технічному цинку *Pb* (основне забруднення), *Fe*, *Cd* і деякі інші. Звичайний легуючий компонент у цинкових сплавах алюміній (до 5...10%). В системі *Al-Zn* можливе утворення двох твердих розчинів: *b*-твердий розчин (майже чистий цинк) і *a*-твердий розчин на основі алюмінію, що розчиняє до 83 % *Zn* (такий твердий розчин на основі алюмінію може містити 83 % *Zn* і лише 17 % *Al*). У певному інтервалі температур і концентрації – твердий розчин розпадається на два твердих розчинів тієї ж кристалічної структури, багаті (*a2*) і бідні (*a1*) цинком.

Сплави цинку з міддю не схильні до старіння, але за механічними властивостями вони гірші за сплави з алюмінієм. Найміцнішими цинковими сплавами є потрійні сплави *Zn-Al-Cu*. Структура цих сплавів дуже різноманітна (залежить, головним чином, від співвідношення і кількостей *Al* і *Cu*) і складається з первинних виділень *b* (чистий *Zn*), *a* (розчин на базі *Al*, багатий *Zn*) або *e* (хімічні з'єднання  $CuZn_3$ ), подвійної і потрійної евтектики.

Цинкові сплави поділяються на ливарні, антифрикційні та деформовані. Властивості цинкових сплавів для виробництва відливок регламентується ГОСТ 25140-93 «Сплави цинкові ливарні». Хімічний склад сплавів наведено в таблиці 3.1.

**Таблиця 3.1 – Марки та хімічний склад цинкових ливарних сплавів**

Марка сплаву	Масова частка елементів, %			
	Основні компоненти			
	<i>Al</i>	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Zn</i>
<i>ZnAl4Cu1A</i>	3,5...4,5	0,7...1,3	0,02...0,06	інші
ЦА4о	3,5...4,5		0,02...0,06	
ЦА4	3,5...4,5		0,02...0,06	
<i>ZnAl4Cu1A</i>	3,5...4,5		0,02...0,06	

Сплави маркуються буквою Ц та додатковими буквами і цифрами, що відображає назву легованих елементів та їх вміст у сплаві, відповідно.

Наприклад: ЦА4М1 – цинковий ливарний сплав, з хімічним складом: 3,5...4,5% *Al* та 0,7...1,3% *Cu*, *Zn* – інш.

### ***Контрольні запитання***

1. Охарактеризуйте властивості міді і вплив на них домішок.
2. Опишіть види латуней і бронзи, властивості цих сплавів і галузі їх застосування.
3. Приведіть характеристику властивостей алюмінію та охарактеризуйте вплив на них домішок.
4. Який сплав називають силуміном? Поясніть вплив модифікування на структуру і механічні властивості силуміну. Наведіть галузі застосування силумінів.

5. Які алюмінієві сплави відносяться до деформованих? Суть процесу старіння дюралюмінію.

6. Назвіть види алюмінієвих сплавів, що деформуються, їх марки, властивості і галузі застосування.

7. Назвіть види сплавів на магнієвій основі, їх марки, основні властивості і галузі застосування.

8. Приведіть характеристику властивостей алюмінію і вкажіть вплив на них домішок.

9. Назвіть види алюмінієвих сплавів, що деформуються, їх марки, властивості і галузі застосування.

10. Назвіть види сплавів на магнієвій основі, їх марки, основні властивості і галузі застосування.

## РОЗДІЛ 4

### НЕМЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, ПЛАСТМАСИ. ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ

*Неметалевими* називають матеріали на основі полімерів. Полімери – це загальна назва речовин, структура яких складається з молекул великих розмірів – макромолекул. Кожна макромолекула являється ланцюжком з багатьох елементарних частин (ланок), які називаються мономерами. Розрізняють природні полімери (натуральний каучук, целюлоза, азбест) і синтетичні, отримані штучним шляхом (поліетилен, полістирол, синтетичні каучуки і смоли, полікарбонати та ін.). Початковою сировиною для отримання синтетичних полімерів є продукти хімічної переробки нафти, природного газу і кам'яного вугілля.

Залежно від хімічного складу розрізняють *органічні* і *неорганічні полімери*. Основу органічних полімерів складають атоми карбону і гідрогену, що утворюють макромолекули або самотійно, або разом з іншими елементами (оксигеном, сульфуром, нітрогеном). Органічними полімерами є смола і каучуки.

*Основу неорганічних полімерів* складають оксиди силіцію, алюмінію, магнію, кальцію та інших елементів. У структурі цих полімерів карбонівих макромолекул немає. *До неорганічних полімерів відносять* силікатне скло, кераміку, слюду.

За структурою макромолекул полімери поділяються на лінійні, розгалужені, стрічкові і просторові (сітчасті). Лінійна або розгалужена структура макромолекул надає полімерам високу еластичність, забезпечує їх здатність неодноразово розм'якшуватися при нагріванні, а при охолодженні знову укріплятися. Такі полімери називають *термопластичними*, а матеріали на їх основі називають термопластами. До них належать поліетилени, капрон, поліпропілен, оргскло.

Полімери зі сітчастою структурою макромолекул називають *терморективними*, а матеріали на їх основі – *реактопластами*. До реактопласти відносять матеріали на основі терморективних синтетичних смол (епоксидних, поліефірних та ін.).

Неметалічні матеріали застосовують замість металевих сплавів з метою зниження маси машин або для підвищення їх корозійної стійкості

в умовах дії агресивного хімічного середовища при експлуатації. У ряді випадків ці матеріали незамінні (скла, клеї), крім того, застосування неметалевих матеріалів спрощує технологію і знижує трудоемність виготовлення деталей, а також зменшує витрати на технологічне оснащення. Найбільш популярними з неметалевих матеріалів у машинобудуванні є пластмаси.

#### 4.1 Силікатні матеріали

Розрізняють штучні і природні силікатні матеріали.

Азбест, граніти, андезити відносяться до кислотостійких природних сполук. Азбест, крім високої стійкості до кислот, є ще й відмінним вогнетривким матеріалом. Це магній гідросилікат ( $3MgO \times 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ).

Граніти термостійкі до температури  $250^\circ C$ . До складу гранітів входить близько 70...75%  $SiO_2$ , 13...15%  $Al_2O_3$ , оксиди кальцію, магнію і натрію займають близько 8...10 %.

Гірські породи досить затребуваний матеріал, але складність їх видобутку трохи пригальмовує їх широке поширення у промисловості. Однак в деяких випадках гірські породи є незамінними. Азбест, в більшості випадків, використовується як допоміжний матеріал, у вигляді наповнювача, та застосовується в ізоляції корпусів різних апаратів.

З неметалевих конструкційних матеріалів можуть бути виготовлені пристрої та агрегати, а також окремі деталі до них. Крім того, неметалеві конструкційні матеріали використовуються як захисний основний матеріал виробу (наприклад, футеровка ванни травлення виконана з металу, а основа – металева).

Властивості неметалевих конструкційних матеріалів різноманітні: висока стійкість у різних агресивних середовищах, невелика щільність, різна теплопровідність, хороша адгезія до поверхні металу та ін. Більшість з них все ж не витримують високих температур (особливо це відноситься до неметалевих конструкційних матеріалів органічного походження, які руйнуються вже при  $150...200^\circ C$ ), погано реагують на перепади температури, важко обробляються.

У середовищах з підвищеною хімічною агресивністю дуже важливу роль відіграє здатність захисного покриття ізолювати основну конструкцію. Між підкладкою і зовнішнім середовищем не повинно бути прямого контакту. Для забезпечення повної ізоляції використовуються потовщені шари одного матеріалу або ж багатошарові покриття, які включають в себе кілька відносно тонких шарів з різних матеріалів. Досить часто, коли один матеріал наносять занадто товстим шаром, в ньому виникає внутрішня напруга, і захисне покриття досить швидко руйнується.

У нафтопереробній та хімічній промисловості широкого поширення набули саме багатошарові захисні покриття, сформовані з неметалевих конструкційних матеріалів.

Умовно в покритті можна виділити три основні зони, які несуть у собі різні функції:

- нижній шар, який прилягає безпосередньо до основного матеріалу і забезпечує стабільність зв'язку між підкладкою і покриттям;
- середня частина (основне покриття) визначає механічні та ізоляційні властивості;
- зовнішній шар, поверхневий, який вступає в безпосередній контакт з агресивним середовищем (іноді йому надають спеціальні властивості).

Серед неметалевих конструкційних матеріалів для протикорозійного захисту набули широкого застосування гуми, пластичні маси (пластмаси), різні силікатні матеріали та багато інших.

## **4.2 Пластмаси**

Пластмасами (пластиками) називають синтетичні матеріали, одержувані на основі органічних полімерів, що здатні набувати задану форму при нагріванні під тиском, і зберігають її після охолодження. Розрізняють в залежності від складу ненаповнені і наповнені пластмаси. За типом матричного полімеру і технологічними властивостями розрізняють термопластичні і терморективні пластмаси (термопласти і реактопласти).

Окрему групу становлять газонаповнені пластмаси, в яких наповнювачем є повітря або нейтральні гази.

Ненаповнені пластмаси являють собою матричні полімерні матеріали (поліетилен, поліамід та ін.) без будь-яких домішок. Наповнені (армовані) пластмаси є фактично композиційними матеріалами з полімерної матрицею і наповнювачем у вигляді порошку, волокон, тканин або інших шаруватих матеріалів. Відповідно до цього розрізняють порошкові, волокнисті і шаруваті наповнені пластмаси. Кількість наповнювача може змінюватися від 15...20 до 70...75%. Крім наповнювача, до складу цих пластмас входять затверджувачі, пластифікатори, барвники, стабілізатори та інші добавки.

Жорсткість і міцність наповнених (армованих) пластмас істотно вище в порівнянні з ненаповненими. Це пояснюється значно більшою жорсткістю і міцністю елементів наповнювача в порівнянні з матричним полімером.

У сучасному машинобудуванні більш затребувані армовані пластмаси, як термопластичні, так і термореактивні. Їх використовують для виготовлення мало- та помірно навантажених деталей (шестерні, втулки, шківни, кузовні деталі). Ненаповнені пластмаси, в першу чергу, поліетилен, застосовують виключно для малонавантажених деталей (паливні баки, корпусні деталі та ін.).

Відмінними показниками пластмас є мала щільність, стійкість до агресивних середовищ, вібростійкість, шумопоглинальні і звукоізолюючі та хороші технологічні властивості. Разом з тим для виробів з ненаповнених пластмас характерні невисокі жорсткість і міцність, що обумовлено низькими значеннями модуля пружності ( $E$  не більше 3 ГПа) і тимчасового опору руйнуванню (не більше 100 МПа) цих матеріалів. Для багатьох пластмас також характерні порівняно невисока (до 200...300° С) теплостійкість і низька теплопровідність, схильність до старіння і повзучості.

Основними способами виготовлення виробів з термопластів є лиття під тиском, екструзія, вакуумне формування і деякі інші технології. Застосування лиття під тиском виправдано при масовому виробництві деталей складної конфігурації, виготовлення яких з металу пов'язане з трудноємністю механічною обробкою. Основними операціями при цьому є нагрів полімеру до в'язкопластичного стану, уприскування полімеру в герметичну форму, охолодження виробу у формі з подальшим витягуванням готового виробу з форми. Екструзія полягає в нагріванні полімеру до

пластичного стану з наступним його видавлюванням через спеціальний отвір (фільтр) у вигляді профілю того чи іншого перетину і охолодженням у воді або на повітрі. Метод вакуумного формування застосовують для виготовлення великогабаритних виробів з листових термопластів товщиною 0,5...10 мм.

Для масового виготовлення деталей з реактопластів застосовують пресування на гідравлічних і механічних пресах. Використовуються прес матеріали (прес-порошки або прес волокніти), які при нагріванні в процесі пресування стають пластичними. В результаті прес матеріал набуває задану конфігурацію, а термореактивна матриця при подальшому затвердінні переходить у неплавкий і нерозчинний стан.

### **4.3 Основні види виробів з пластмас**

Пластмаси набули широкого використання в різних сферах виробництва (машинобудування, будівельні конструкції, електротехніка та інше).

**Органічне скло** – є термопластичним матеріалом, що володіє високою прозорістю – для видимих (до 96 %) та ультрафіолетових променів (до 76 %), добре перероблюється, має досить високі характеристики міцності, достатню стійкість до атмосферного старіння, хорошу маслостійкість, бензиностійкість і водостійкість.

**Полікарбонати.** Як конструкційний матеріал полікарбонати використовуються для деталей машино- і приладобудування, електро- та радіотехніки, а в якості плівки – для кіно- і електропромисловості. Полікарбонати – це продукт переробки термопластів усіма відомими методами.

**Теплостійкі пластмаси та склопластики.** Крім перелічених вище декоративно-конструкційних пластмас в окрему групу виділено теплостійкі пластмаси та склопластики, що застосовуються в відповідальних конструкціях і деталях машино- та приладобудування, будівництві.

**Пресувальні волокністі матеріали** являють собою прес-композицію на основі термореактивного сполучного.

**Текстоліт** – електроізоляційний конструкційний матеріал, що використовується для виробництва підшипників ковзання, шестерень і інших деталей, а також в електро- та радіотехніці.



**Трубки тефлонові термостійкі.** Призначені для використання в електричних машинах постійного і змінного струму, а також в електрота радіотехнічних виробках, що працюють в агресивних середовищах і в діапазоні температур від  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+200\dots+250^{\circ}\text{C}$ .

### **Контрольні запитання**

1. Які матеріали називаються пластмасами?
2. Як поділяють пластмаси?
3. Які пластмаси є термопластичними?
4. Чим пояснюється оборотність властивостей термопластів та їх невисоку міцність .
5. Опишіть фізичні властивості пластмас.
6. Назвіть переваги пластмас як конструкційних матеріалів.
7. Назвіть недоліки пластмас.
8. Які пластмаси є термореактивними?
9. Назвіть основні компоненти пластмас.
10. Наявність яких додаткових компонентів спостерігається в пластмасах.
11. З якою метою вводять наповнювачі у пластмаси. Класифікація наповнювачів.

## РОЗДІЛ 5

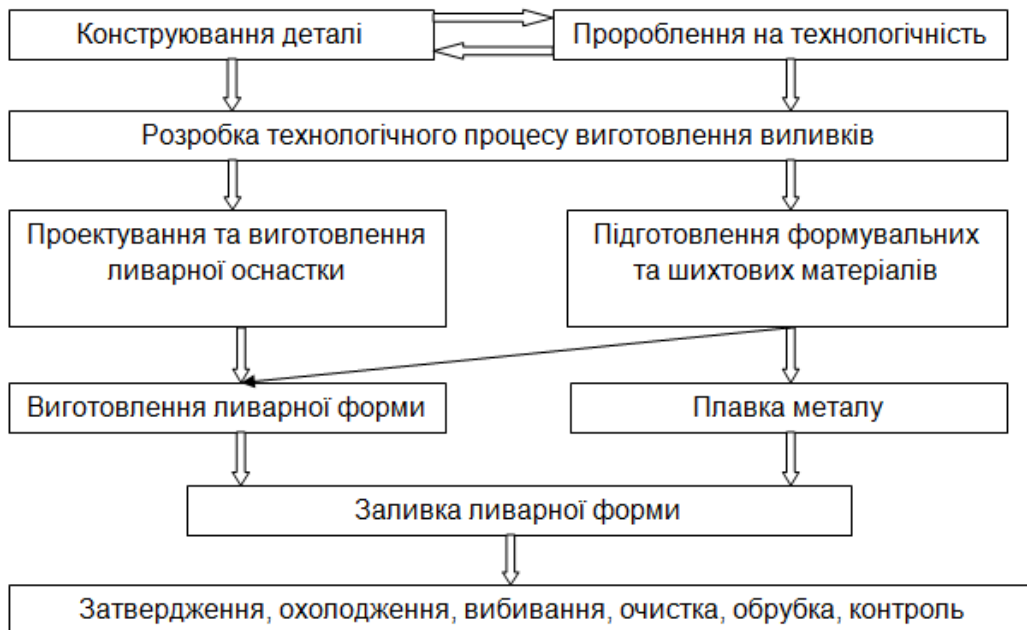
### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛИВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО

*Процеси лиття* – це отримання металевих виробів (виливків) шляхом заливання розплавленого металу в ливарну форму. Ливарна форма являє собою систему елементів, що утворюють робочу порожнину, при заливці якої рідким металом формується вилівок. Після кристалізації металу вилівок (заготівку) видаляють з ливарної форми і відправляють на подальшу обробку.

Характерною особливістю ливарного виробництва є універсальність, тобто можливість отримання найрізноманітніших за масою, конфігурацією, механічними та експлуатаційними властивостями фасонних заготовок (виливків) із чавуну, сталі та сплавів кольорових металів.

Продукцією ливарного виробництва є великі сталеві вилівки: станини прокатних станів, станини металорізальних верстатів, корпуси гідротурбін та інші вилівки масою в десятки і сотні тон, також маленькі деталі масою до кілька грамів для радіоелектронної промисловості, часової промисловості та інших галузей.

Загальна схема виготовлення вилівоків наведена на рис. 5.1.



**Рисунок 5.1 – Загальна технологічна схема виготовлення вилівоків**

## 5.1 Ливарні властивості сплавів

У даний час для виготовлення виливків застосовують різні матеріали: чавун, сталь, мідні, алюмінієві, магнієві, цинкові, свинцеві, олов'яні та нікелеві сплави. Вибір ливарного сплаву визначається механічними, фізичними, хімічними і ливарними властивостями, а також вартістю матеріалу.

*Чавун* – залізовуглецевий нековкий ливарний матеріал, що містить понад 2 % (до 3...3,5 %) карбону, до 4,5 % силіцію, до 1,5 % мангану, до 1,8 % фосфору, до 0,08 % сульфуру.

Експлуатаційні властивості чавуну залежать від його міцності, твердості, пластичності, а також від форми, розмірів і розташування карбонних включень у його структурі. Графітізовані чавуни – це сірі чавуни з пластинчастим графітом (СЧ10–СЧ35;  $\sigma_B = 100...350$  МПа, НВ 120...190). Вони малочутливі до надрізів та інших концентраторів напруження. Добре розсіюють вібрації, тому станини верстатів виготовляють не зі сталі, а із чавуну. У разі ударних навантажень чавун застосовувати не можна, оскільки він крихкий. Проте, сірий чавун є найбільш дешевим ливарним сплавом.

*Ковкий чавун* (КЧ 30-6. КЧ 80-1,5;  $\sigma_B = 294...784$  МПа, 100...320 НВ) отримують шляхом відпалу білого чавуну. Він має включення з пластинчастим графітом, низькі ливарні властивості – знижену рідкоплинність, велику усадку, підвищену схильність до появ тріщин. Застосовують для відливок, що працюють зі знакозмінними навантаженнями: коробки передач, шасі в автотранспорті, важелі тощо).

*Високоміцний чавун* з кулеподібним графітом (ВЧ35...ВЧ100;  $\sigma_B = 350...1000$  МПа, НВ140...360). Чавун застосовують для відповідальних відливок, що працюють в умовах змін теплового режиму, наприклад гільзи ДВС та ін. Цей чавун за ливарними властивостями близький до сталей. Має знижену рідкоплинність, знижену усадку, схильність до дефектів ливарного походження.

Чавуни всіх марок добре обробляються, але погано зварюються. Їх властивості визначають призначення чавунів від помірно навантажених (СЧ) до вібронавантажених. Легований чавун (ЧХ1 – ГОСТ 7769-82 та ін.) застосовують для роботи деталей при температурах до 500...700° С.

*Сталь* – сплав заліза з вуглецем та іншими елементами, що містить до 2,14 % карбону. Найбільша величина межі міцності та межі витривалості досягається при вмісті карбону близько 0,9 %.

Залежно від призначення та якісних показників виливки з вуглецевих і легованих сталей їх поділяють на три групи:

- відливки загального призначення, що контролюють за зовнішнім виглядом, розмірами та хімічним складом;
- відливки відповідального призначення, що контролюють за міцністю та відносним подовженням;
- відливки особливо відповідального призначення, що контролюють за ударною в'язкістю.

Сталеві виливки піддають термообробці: нормалізації при температурі 850...920° С із подальшим відпуском або загартуванню при температурі 800...870° С із відпуском.

До легкоплавких металів належать сплави (свинець, олово та ін.), температура плавлення яких менше 232° С.

До тугоплавких металів відносять сплави на основі титану, вольфраму, молібдену, ніобію, ванадію. Температура плавлення таких матеріалів становить 1700...3500° С.

До кольорових металів відносять: алюміній, магній, цинк, мідь і сплави на їх основі.

Алюміній і його сплави мають високу міцність, малу густину. Вони є незамінними матеріалами в авіапромисловості. Сплави алюмінієві ливарні згідно з ГОСТ 1583-93: АЛ2–АЛ11, мають межу міцності  $\sigma_B = 150...220$  МПа, щільність 2,65...2,94 г/см<sup>3</sup>. Сплави групи – АМг10 (АЛ 27) мають високу корозійну стійкість,  $\sigma_B = 320$  МПа. Магній у цьому сплаві має мінімальну густину. У чистому вигляді він не застосовується, проте його додають до сплаву для збільшення міцності.

Сплави цинку досить міцні, мають високу корозійну стійкість і можуть застосовуватися як антифрикційні матеріали та для захисту залізовмісних сплавів.

Мідь має високі значення електропровідності та теплопровідності, пластична та є достатньо міцною.

*Латунь* (мідно-цинкові сплави) має високу міцність і корозійну стійкість.

*Бронзи* (сплави на мідній основі з додаванням металів олова, алюмінію, кремнію, берилію) володіють хорошими антифрикційними та корозійними властивостями.

*Титан* має густину  $4,6 \text{ г/см}^3$ ,  $\sigma_{\text{в}} = 930 \text{ МПа}$ , твердість 45 НВ. Жаростійкий і витримує окиснення до  $400 \dots 500^\circ \text{ С}$ . Деталі з нього добре витримують температуру рідкого азоту.

*Ніобій* володіє високою жароміцністю, застосовується для виготовлення деталей турбін, що працюють при температурі  $1100 \dots 1400^\circ \text{ С}$ . Жаростійкість і жароміцність дозволяють використовувати його для роботи у важких умовах. Відливки з ніобію та його сплавів виготовляють спеціальними способами. Трудомісткість виготовлення виробів з ніобія велика.

Найбільш важливими показниками ливарних властивостей є рідкотекучість, ліквация, усадка (лінійна та об'ємна), схильність до утворення тріщин, схильність до поглинання газів і утворення газових раковин та пористості у виливках тощо.

*Рідкотекучість* – це здатність сплавів текти в розплавленому стані по каналах ливарної форми, заповнювати її порожнини і чітко відтворювати контури виливків.

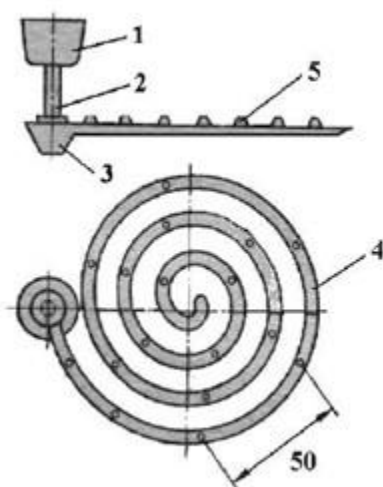
Рідкотекучість ливарних сплавів залежить від різних факторів: хімічного складу, температурного інтервалу кристалізації, в'язкості і поверхневого натягу розплаву, температури заливання, а також властивостей ливарної форми та інших. Чисті метали та сплави, які твердіють при постійній температурі (*евтектичні сплави*), володіють кращою рідкотекучістю, ніж сплави, що утворюють тверді розчини і твердіють в інтервалі температур. Чим вище в'язкість і поверхневий натяг розплаву, тим менше рідкотекучість.

Фосфор, силіцій і карбон покращують її, а сульфур погіршує. З підвищенням температури заливання розплавленого металу і температури форми рідкотекучість поліпшується. Збільшення теплопровідності матеріалу ливарної форми знижує рідкотекучість. При гарній рідкотекучості метал заповнює всю порожнину форми, а при недостатній – утворює недоливи в тонких перерізах виливки.

Рідкотекучість ливарних сплавів визначають за допомогою різних методів і технологічних проб. Технологічні проби на рідкотекучість – це

ливарні форми з порожниною у вигляді каналів, заповнення яких рідким металом характеризує його рідкотекучість. З різноманітного складу конструкції технологічних проб найбільше поширена спіральна форма проби (рис. 5.2) – спіраль Керрі.

Рідкотекучість визначають за допомогою пройденого рідким металом до затвердіння, тобто за довжиною прутка. Невеликі виступи, нанесені через 50 мм полегшують вимір довжини спіралі (прутка). Спіральний канал дозволяє отримати довгі прутки в порівняно невеликих формах.



**Рисунок 5.2 – Вид технологічної спіральної проби (спіраль Керрі):**  
1 – чаша; 2 – стояк; 3 – металопримач; 4 – спіральний канал; 5 – виступи

*Ліквация* – неоднорідність хімічного складу, що виникає під час кристалізації сплавів. Ліквация обумовлена тим, що сплави кристалізуються в інтервалі температур. При цьому склад кристалів, що утворюється на початку затвердіння, може істотно відрізнитися від складу останніх крапель кристалізованого розчину. Чим ширше температурний інтервал кристалізації, тим сильніше розвивається ліквация, причому найбільшу схильність до неї проявляють ті компоненти сплаву, які найбільш сильно впливають на величину інтервалу кристалізації (для сталі –  $S$ ,  $O_2$ ,  $P$ ,  $C$ ). Розрізняють дендритну і зональну ліквацию.

*Дендритна ліквация* проявляється в мікрооб'ємах сплаву, близьких до розміру зерна, і причиною її є виборний процес кристалізації. Первинні осі дендрита мають підвищену концентрацію тугоплавких компонентів, а в міжосьових просторах кристалізуються легкоплавкі

компоненти, що призводить до неоднаковості механічних властивостей. Дендритна ізоляція усувається шляхом високотемпературного відпалу.

*Зональна ліквіація* спостерігається у всьому об'ємі виливків внаслідок відмінності температури кристалізації окремих компонентів або їх щільності. Наприклад, у свинцевій бронзі БрС30 свинець, що має більш високу щільність (11,34 г/см<sup>3</sup>) у порівнянні з міддю (8,93 г/см<sup>3</sup>), при повільному охолодженні осідає в нижній частині виливків. Зональну ліквіацію в сталях викликає температурний фактор. В осьовому перетині виливків спостерігається підвищена концентрація *C*, *S* і *P*. Зональну ліквіацію можна тільки попередити. Для зменшення зональної ліквіації необхідно:

- забезпечити вирівнювання швидкостей охолодження окремих частин виливків за рахунок здійснення розосередженого підведення металу;
- створювати умови спрямованої кристалізації і збільшувати швидкість охолодження виливків, застосовуючи, за необхідністю охолоджувачі.

*Усадка* – властивість ливарних сплавів зменшувати об'єм при затвердінні і охолодженні. Розрізняють лінійну і об'ємну усадку.

*Лінійна усадка* – зменшення лінійних розмірів виливків при їх охолодженні від температури, при якій утворюється міцна кірка, здатна протистояти тиску розплавленого металу, до температури навколишнього середовища. Лінійну усадку визначають співвідношенням, %:

$$\varepsilon_{\text{лин}} = \frac{(l_{\text{ф}} - l_{\text{от}})100\%}{l_{\text{от}}},$$

де  $l_{\text{ф}}$  і  $l_{\text{от}}$  – розміри порожнини форми і виливків при температурі 20° С.

На лінійну усадку впливають хімічний склад сплаву, температура його заливки, швидкість охолодження сплаву у формі, конструкція виливки і ливарні форми. Так, усадка сірого чавуну зменшується із збільшенням вмісту карбону та силіцію, аналогічно впливає силіцій на усадку алюмінієвих сплавів. Зниження температури заливання зменшує усадку виливків. Збільшення швидкості відводу теплоти від залитого у форму сплаву сприяє зростанню усадки виливків.

Лінійна усадка становить %, для:

- сірого чавуну 0,9...1,5;
- вуглецевих сталей 2...2,4;

- алюмінієвих сплавів 0,9...1,5;
- мідних 1,4...2,3.

*Об'ємна усадка* – зменшення об'єму сплаву при його охолодженні в ливарній формі при формуванні виливки. Об'ємну усадку визначають за таким співвідношенням:

$$\varepsilon_{об} = \frac{(V_{\phi} - V_{от})100\%}{V_{от}},$$

де  $V_{\phi}$  і  $V_{от}$  – об'єм порожнини форми і об'єм виливки при температурі 20°C.

Об'ємна усадка приблизно дорівнює потроєній лінійній усадці.

Усадка в виливках проявляється у вигляді усадкових раковин, пористості, тріщин і викривлення.

*Усадкові раковини* – порівняно великі порожнини, розташовані в місцях виливки, що твердіють в останню чергу. Зосереджені великі усадкові раковини утворюються при виготовленні виливків з чистих металів, сплавів евтектичного складу (силуміну) і сплавів з малим інтервалом кристалізації (низьковуглецеві сталі).

*Усадкова пористість* – скупчення порожнин, що утворилися в виливці у великій зоні в результаті усадки в тих місцях виливки, які затверділи останніми без доступу до них розплавленого металу. Усадкова пористість розташовується на межах зерен металу. Отримати виливки без усадкових раковин і пористості можливо за рахунок безперервного підведення розплавленого металу в процесі кристалізації аж до повного затвердіння. З цією метою на виливки встановлюють прибуток – резервуари з розплавленим металом, які забезпечують доступ розплавленого металу до ділянок виливки, які твердіють останніми.

Схильність до утворення тріщин. У результаті нерівномірного затвердіння у виливках, тонких та товстих частин і гальмуванні усадки форми при охолодженні, виникають внутрішні напруження. Ці напруження тим вище, чим менше піддатливість форми і стрижнів. Якщо величина внутрішніх напружень перевищить межу міцності сплаву в даній ділянці виливки, то в її тілі утворюються гарячі або холодні тріщини.

*Гарячі тріщини* – звичайно добре видимі розриви поверхні виливків, що поширюються по межах кристалів і мають нерівну окислену поверхню, на якій при збільшенні видно і дендрити, які утворюються



внаслідок усадки при охолодженні розплаву у формах. Характерними ознаками гарячих тріщин є їх нерівні (рвані) краї і значна ширина.

*Холодні тріщини* – дуже тонкі розриви поверхні виливків, що мають зазвичай чисту, світлу з кольорами мінливості зернисту поверхню. Утворюються через внутрішні напруження або внаслідок механічного впливу при температурі нижче температури кристалізації виливків. На відміну від гарячих тріщин холодні поширюються по зернах, а не по їх межах, розташовуються вони переважно у гострих кутах та інших місцях концентрації напружень.

Холодні тріщини найчастіше утворюються в тонкостінних виливках складної конфігурації і тим більше, чим вище пружні властивості сплаву, чим значніше його усадка при знижених температурах і чим нижче його теплопровідність. Небезпека утворення холодних тріщин у виливках посилюється наявністю в сплаві шкідливих домішок (наприклад фосфору в сталях).

Під впливом внутрішніх напружень, що виникають при охолодженні, відбувається зміна форми і розмірів виливків. Викривлення збільшується при ускладненні конфігурації виливків з підвищенням швидкості їх охолодження, яка викликає через нерівномірне охолодження окремих частин виливків і різну усадку. Викривлення виливків може бути також викликано опором форми усадки окремих частин виливків. Для попередження викривлення у виливках необхідно збільшувати піддатливість форми: створювати раціональну конструкцію виливків тощо.

*Схильність до газопоглинання.* У розплавленому стані метали і сплави здатні активно поглинати значну кількість газів з навколишнього середовища та при заливці металу у форму. При надлишковому вмісті газу виділяються з розплаву у вигляді газових бульбашок, які можуть спливати на поверхню, утворюючи газові раковини, пористість або неметалеві включення, що знижує механічні властивості і герметичність виливків.

Для зменшення газових раковин і пористості у виливках плавку ведуть під шаром флюсу, в середовищі захисних газів з використанням добре просушених шихтових матеріалів. Перед заливанням розплавлений метал необхідно піддавати дегазації вакуумуванням, продуванням

інертними газами, збільшувати газопроникність ливарних форм і стрижнів, знижувати вологість формувальної суміші, підсушувати форми тощо.

## **5.2 Технологічність литих деталей**

Під технологічністю литої деталі розуміють її конструктивні особливості, при яких максимально забезпечуються вимоги ливарної технології та технології механічної обробки з мінімальними витратами. Конструкція виливків має відповідати таким вимогам:

- забезпечити мінімальне число поверхонь роз'єму моделі та форми;
- виключати окремі частини і скоротити число стрижнів;
- стінки виливків повинні бути без різких переходів від тонких перерізів до товстих.

Можливість використання однієї площини роз'єму визначають за правилом світлових тіней: тіньові ділянки при уявному освітленні деталі паралельними променями в напрямку, перпендикулярному до площини рознімання форми, мають бути відсутні.

Наявність великої кількості стрижнів призводить до збільшення трудомісткості виготовлення виливків, появи браку внаслідок перекосу і викривлення розмірів внутрішніх порожнин у результаті неточностей при установці стрижня.

## **5.3 Способи отримання виливків**

При виборі оптимального способу отримання литих деталей проводять порівняльний аналіз технологічних процесів лиття. За критеріями порівняльного аналізу способів лиття приймають технологічні можливості способів (маса і габаритні розміри виливків, складність і вимоги, що пред'являються до них, масштаб виробництва та ін.), ливарні властивості сплавів, можливості способів лиття при забезпеченні рівномірної дрібнозернистої структури, більш високі механічні властивості.

*Найбільш поширеними способами лиття* – це в піщано-глинисті разові форми та спеціальні способи лиття (по виплавлених моделях, в

оболонкові форми, в металеві форми, під тиском і відцентрове лиття). Області застосування цих способів визначаються типом виробництва (одиначне, серійне, масове), масою виливків (дрібні – до 100, середні – до 1000, крупні – більше 1000 кг), точністю і чистотою поверхні, ливарними властивостями сплавів і економічною доцільністю.

При виборі способу лиття необхідно враховувати ливарні властивості сплавів. Якщо сплав має знижену рідкотекучість, то небажано застосовувати лиття в металевому кокілі. *Кокіль* – це металева багаторазова ливарна форма, що складається з двох або більше частин залежно від конфігурації відливки. У цьому разі доцільно використовувати лиття під тиском, лиття по моделях що виплавляються та інші способи, які підвищують рідкотекучість сплавів. Якщо для виготовлення виливків використовуються сплави з високою усадкою, то небажано застосовувати лиття в кокілі і під тиском, оскільки через низьку піддатливість форм можливе утворення тріщин у виливках. Складні по конфігурації виливки одержують литтям під тиском, по моделях, що виплавляються або в піщаних формах. Литтям у кокілі отримують виливки з простою зовнішньою конфігурацією, а відцентровим литтям виготовляють, як правило, виливки типу тіл обертання. Найбільш тонкостінні виливки одержують литтям по виплавлюваних моделях і литтям під тиском, при литті в кокілі стінки виливки повинні бути значно товщі, ніж при литті в піщані форми.

#### **5.4 Лиття в піщано-глинисті форми**

*Лиття в піщано-глинисті разові форми* – це найдавніший спосіб лиття. Цей спосіб лиття економічно доцільний при будь-якому характері виробництва, для деталей будь-якої маси, конфігурації, габаритів, для одержання виливків практично з усіх ливарних сплавів. У разових піщано-глинистих формах виготовляють приблизно 80 % усього числа виливків.

Суть цього способу лиття полягає в тому, що по моделі виготовляють з формувальної суміші ливарну форму, в подальшому заповнену металом. Ливарна форма при діставанні виливки кожен раз руйнується.

Для виготовлення піщано-глинистих форм використовують формувальні і стрижневі суміші, що містять пісок і елементи, що зв'язують (іноді із спеціальними домішками). Основа кожної суміші – пісок. Найбільш поширені кварцові піски, що складаються із зерен кристалічного силіцій(IV) оксиду (кремнезему)  $\text{SiO}_2$ , володіють досить високою вогнетривалістю. Кварцовий пісок відіграє роль наповнювача, в якості з'єднувального матеріалу застосовують глину, яка покращує вогнетривалість, міцність і пластичність суміші, але погіршує її газопроникність і піддатливість. Тому в об'ємі суміші не має бути більше 8 – 12 % глини.

Грубозернистий кварцовий пісок забезпечує високу газопроникність, але дає шорстку поверхню виливків і підвищує пригар, оскільки рідкий метал заходить у пори між зернами і охоплює їх. Дрібний пісок забезпечує гладку поверхню виливків, але різко знижує газопроникність суміші. Тому при виготовленні великих виливків, де потрібне відведення великої кількості газів, що виділяються, застосовують крупнозернистий пісок, а при отриманні дрібних виливків, для яких чистота поверхні є головною вимогою – дрібнозернистий пісок.

Формувальні суміші поділяються на єдині, облицювальні і наповнювальні. Єдині суміші застосовують при виготовленні дрібних виливків у масовому виробництві, а в одиничному і дрібносерійному виробництві для виготовлення великих форм – облицювальні і наповнювальні. З перших оформляють робочий (облицювальний) шар форм товщиною 15 – 30 мм, другими заповнюють інший об'єм опоки. *Опока* – це металевий або дерев'яний ящик без дна й верху, що утримує формувальну суміш під час виготовлення ливарних форм. Наповнювальні суміші, що складаються в основному з обігових, значно дешевше облицювальних, що складаються з свіжих матеріалів.

Для досягнення певних технологічних властивостей у формувальні і стрижневі суміші додають спеціальні домішки. Так, наприклад, для підвищення протипригарних властивостей в суміші для чавунного лиття додають домішки кам'яновугільного пилу, подрібненого коксу та вугілля, мазуту.

Вимоги, що пред'являються до формувальних і стрижневих сумішей, визначаються умовами їх роботи. Суміші повинні володіти

вогнетривкістю, пластичністю, міцністю, газопроникністю, піддатливістю і непригоранням.

*Вогнетривкість* – здатність суміші, не розм'якшуючись, витримувати високі температури залитого у форму рідкого металу. Від вогнетривкості залежить чистота поверхні виливків, відсутність пригару.

*Пластичність* – здатність суміші давати чіткий відбиток моделі (при виготовленні форми) або стрижневого ящика (при виготовленні стрижня).

*Міцність* – здатність ущільненої суміші не руйнуватися при транспортуванні і заливці готової форми металом.

*Газопроникність* – здатність формувальної і особливо стрижневою суміші пропускати гази, що виділяються із суміші і охолоджуючого металу. При недостатній газопроникності можливе утворення у виливках газових раковин.

*Піддатливість* – здатність суміші не перешкоджати лінійній усадці закристалічного металу виливків.

*Непригоранність* – забезпечується додаванням у суміш протипригарних домішок, таких як кам'яновугільний пил, тальк, графіт, які налипають на поверхню форм для чавунних виливків. З маршаліту, магнетиту, циркону виготовляють протипригарні фарби, якими покривають стрижні і порожнини форм для сталевих виливків.

Стрижні працюють у більш важких умовах, ніж форми, оскільки вони оточені рідким металом з усіх боків (за винятком знакових частин). Тому стрижнева суміш повинна мати більш високу міцність, газопроникність і піддатливість. Для тонких і складних стрижнів як з'єднувальної домішки до стрижневої суміші використовують оліфу, рідке скло, смоли, декстрин, патоку та ін. Для підвищення газопроникності і піддатливості в стрижневу суміш додають тирсу або торф (2 – 3 %), які в процесі сушіння стрижня вигорають.

Приготування формувальних і стрижневих сумішей здійснюється, як правило, в змішувальних барабанах, де зерна піску піддаються значному механічному тиску. Тому формувальні піски мають володіти достатньою твердістю. Твердість мінералів оцінюється за шкалою Мооса, по якій найменшою твердістю, яка дорівнює 1, володіють тальк і графіт, найбільшою – алмаз 10 (десять одиниць). Для використання в якості

формувальних придатні піски, твердість яких за шкалою Мооса становить більше 5 одиниць.

*Виготовлення форм.* Ливарні форми виготовляють вручну (ручна формовка) і на машинах (машинна формовка) за допомогою модельних комплектів, які забезпечують отримання виливків потрібних конфігурацій і розмірів, а також дотримання технологічного процесу. У модельний комплект входять модель виливки, стрижневий ящик – один або декілька (якщо відливання має порожнини або отвори), моделі ливникової системи, підмодельна дошка (при ручному формуванні) або модельна плита (при машинному формуванні).

Модельний комплект повинен відповідати формі і розмірам виливків з урахуванням лінійної усадки металу і припусків на механічну обробку. Модельний комплект для ручного формування виготовляють з дерева, для машинного формування – з металів.

Моделі складних виливків роблять роз'ємними (наприклад, з двох напівформ), що дозволяє видаляти їх з форми без її руйнування. Модель відрізняється від виливків збільшеними на величину усадки сплаву розмірами, наявністю формувальних ухилів, що полегшують вилучення моделі з форми, наявністю площини роз'єму і знакових частин, призначених для встановлення стрижня, що утворює внутрішню порожнину (отвір) у виливці.

Стрижень виготовляють у стрижневих ящиках із суміші, наприклад кварцового піску, окремі зерна якого скріплюються при сушінні або хімічному затвердінні спеціальними засобами. Стрижні при заливанні у форми з усіх боків оточені рідким металом, тому вони повинні володіти високою газопроникністю, а також міцністю, піддатливістю, вибиваємістю, що забезпечується вибором складу відповідної стрижневої суміші та конструкцією стрижня. Для забезпечення стійкого положення у формі і точної конфігурації виливків стрижні повинні мати достатнє число знаків (виступів). В умовах одиничного і дрібносерійного виробництва виливків стрижні виготовляють ручним способом по стрижневим ящикам і шаблонам. У масовому і великосерійному виробництві стрижні виготовляють на різних машинах: струшуючих, пресових, пісcomedних, піскодувних та тощо.

## 5.5 Технологія формовки

Після розробки модельного комплекту вибирають технологію формування і виготовлення стрижнів. Розрізняють два види формовки: по-сирому і по-сухому.

При формуванні *по-сирому* ущільнену форму не піддають додатковому сушінню і затвердінню;

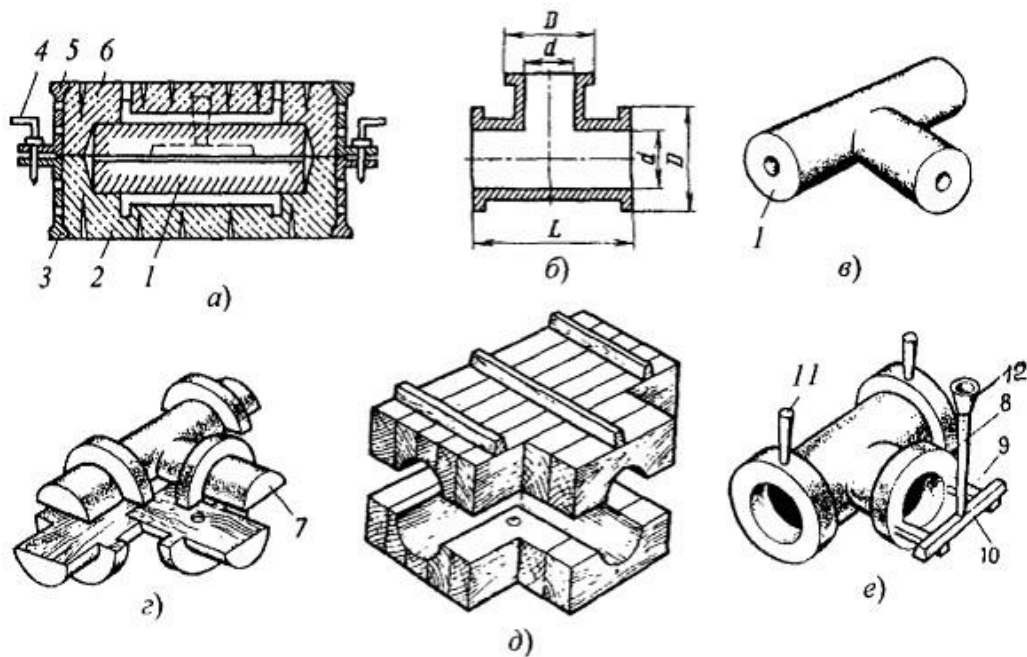
При формуванні *по-сухому* форма висушується або хімічно твердіють.

Формовку по-сирому застосовують у виробництві дрібних чавунних і сталевих виливків масою до 100 кг і різних виливків з кольорових сплавів. Для виготовлення форм використовують єдині суміші. Для більш великих сталевих і чавунних виливків, а також для виливків відповідального призначення (наприклад, арматурне лиття) незалежно від маси використовують формовку по-сухому. У разі випадку застосовуються форми з облицювальної і наповнювальної суміші. Затвердіння форми здійснюють шляхом проведення теплового сушіння в спеціальних камерних сушарках, газовими та інфрачервоними нагрівачами, різними пристроями для продувки форми газами (в основному, вуглекислим газом, іноді сумішшю  $CO_2$  і повітря, іноді теплим повітрям), а також за допомогою спеціальних сумішей, що додаються в суміш при її приготуванні.

Сушіння ливарних форм і стрижнів проводять з метою збільшення газопроникності, міцності і зменшення газотвірної здібності. Тривалість сушіння залежить від температури, товщини стрижнів і форм, умов передачі тепла в сушильній камері та коливається від декількох хвилин до декількох годин.

Ручна формовка може виконуватися в опоках, без опоки, у ґрунті або в кесонах, а також у сумішах, що швидко твердіють.

Найбільшого поширення набула формовка в двох опоках за роз'ємними моделями (рис. 5.3). При цьому способі формовки виливки виходять більш точними, ніж при інших способах, оскільки змішуванню опок перешкоджають центруючі втулки зі штирями. Формування в опоках з ручним ущільненням, частіше всього використовується при виготовленні одиничних виробів та здійснюється за допомогою пневматичних трамбувань.



**Рисунок 5.3 – Вигляд ливарної форми та її елементів: а – ливарна форма; б – трійник; в – ливарний стрижень; г – ливарна модель; д – стрижневий ящик. е – виливок з литниковою системою: 1 – ливарний стрижень; 2, 6 – нижня і верхня напівформа; 3, 5 – ливарні опоки; 4 – металеві штирі; 7 – ливарна модель; 8 – стояк; 9 – живильники; 10 – шлакоуловлювач; 11 – випори; 12 – ливникова чаша**

*Без опокове формування застосовують у серійному і масовому виробництві для виливків масою до 5...7 кг. Ручне ущільнення при такому способі практично не застосовується. Форми ущільнюються або на машинах з наступним ручним складанням на плацу чи конвеєрі, або на формувальних автоматах.*

Процес формування в ґрунті із застосуванням газовідвідних формувальних сумішей здійснюють в ямах, підготовлених в земляній підлозі цеху або в кесонах – глибоких ямах у підлозі цеху, викладених цеглою. Залежно від маси і висоти виливків розрізняють м'які та тверді пастелі. М'які (земляні) пастелі застосовують для формовки плоских виливків невеликої висоти, тверді (кокові) пастелі – для отримання великих виливків. Формовку в ґрунті або спеціальних прямокутних формах кесонах застосовують, переважно, при виробництві великих виливків. При такому способі формовки переважає ручне ущільнення, хоча можливо і застосування піскомету.



До недоліків формовки в ґрунті слід віднести велику трудомісткість риття ям і приготування газовідвідної суміші, значний обсяг ручних формувальних робіт, необхідність в робочих – формувальник високої кваліфікації, незначне зняття виливків з 1 м<sup>2</sup> формувальної площі. Однак цей спосіб простий і не вимагає спеціального оснащення, а тому незамінний при виробництві великих виливків.

Різновидом цього способу формовки є складання форми в спеціальних жакетах із заздалегідь виготовлених стрижнів, що оформляють після складання зовнішньої поверхні форми. Для цієї мети можуть бути використані також кесони. Однак найчастіше застосовують спеціалізовані розсувні, встановлювані для конкретної деталі на координаційних плитах металеві стінки, зібрані у вигляді прямокутного жакета. Дуже перспективний цей спосіб формовки при виготовленні стрижнів із сумішей, що не вимагають ущільнення, наприклад, з рідких (наливних) самозміцнюючих сумішей. Як правило, формування методом збірки в жакетах застосовується для виливків масою 5 – 15 т при дрібносерійному виробництві.

Металеві ливарні форми, облицьовані формувальною сумішшю (нанесення і ущільнення суміші здійснюється переважно вручну), використовують зазвичай при виготовленні виливків простої конфігурації, наприклад, лопаток гідротурбін. У зв'язку з високою вартістю ці форми застосовують тільки у разі виготовлення великих партій виливків.

Формовку в твердіючих сумішах на рідкому склі застосовують для отримання різноманітних виливків масою до 40 т з чавуну, сталі і кольорових сплавів. Час хімічного твердіння великих форм 0,5 – 1,3 год залежно від їх розміру та конфігурації. Технологічний процес формовки складається з таких операцій: установки моделі, протирання поверхні моделі і плити гасом і графітом, нанесення на модель облицьовальної швидкозміцнюючої суміші рівним шаром завтовшки 60 – 70 мм, засипки в опоку наповнюючої суміші та її ущільнення, виймання моделі з форми і обробки форми, продувки форми вуглекислим газом десь 8 – 10 хв. установки стрижнів і складання форми.

Машинну формовку застосовують головним чином при серійному і масовому виробництві лиття. Вона полегшує працю формувальника і не вимагає його високої кваліфікації: підвищує продуктивність праці і точність виливків, що економить 10 – 15 % металу в результаті зменшення

припусків на обробку, зменшує вірогідність появи браку, забезпечує одержання взаємозамінних деталей. При машинному формуванні механізують наповнення опок формувальною сумішшю та її ущільнення, видалення моделей з форми, складання і транспортування форм до місця заливки. Для наповнення опок формувальна суміш подається транспортером у бункер, розташований над формувальною машиною, а дозатор видає порцію суміші в опоку, де вона за допомогою машини ущільнюється.

## **5.6 Складання і заливка форм.**

### **Вибивання та очищення виливків**

Складання форм є відповідальним процесом, що вимагає особливої уваги і охайності. Включає підготовку напівформ і стрижнів, установку стрижнів (зазвичай в нижню напівформу) і контроль їх положення, накриття верхньої напівформи, установку випорних і ливникових чаш, скріплення напівформ або їх навантаження. Перед складанням порожнину форми продувають стисненим повітрям, для того, щоб видалити з неї частинки суміші або чужорідні тіла. Положення кожного стрижня відносно форми та інших стрижнів ретельно перевіряють.

В окремих випадках для більшої стійкості при заливці форми металом стрижні встановлюють на жеребейки – жорсткі металеві опори. Висота жеребейок відповідає товщині тіла виливки. Для лиття чавуну або сталі жеребейки виготовляють з низьковуглецевої сталі або чавуну. Під час заливання форми вони розплавляються, не порушуючи однорідності металу.

Температуру заливання форми призначають для кожного даного сплаву в залежності від товщини стінок виливків і матеріалу ливарної форми. Вона залежить також від конкретних умов кожного цеху – розміру ковша, кількості форм, що заливаються з одного ковша. Для заливки форм застосовують розливні ковши (ручні й кранові), з яких у форму надходять нижні шари металу, вільні від шлаку, і неметалевих включень. Метал у форму повинен надходити плавно з мінімальним натиском.

При заливанні форми металом її стінки і особливо стрижні швидко нагріваються і виділяють велику кількість газів. Для відводу газів з

внутрішніх порожнин форми на поверхню служать газовідвідні вентиляційні канали.

При визначенні тривалості охолодження виливків в ливарних формах вибирають температуру охолодження, яка характерна для кожного даного сплаву і нижче якої виливки можна охолоджувати на повітрі без побоювання отримати холодні тріщини, викривлення або інших дефектів, викликані зміною умов охолодження (для виливків з вуглецевої сталі – близько  $600^{\circ}\text{C}$ ). При цій температурі зазвичай починають вибивання виливків з форм. Однак суттєві корективи можуть бути внесені в залежності від конкретних особливостей деталі.

Тривалість охолодження великих і складних за формою виливків може досягати декількох діб, а температура вибивки  $500^{\circ}\text{C}$ . Процес вибивки полягає в тому, що форму руйнують на вібраційних ґратах і витягують з неї виливок. Суміш провалюється крізь ґрати і потрапляє на транспортер, що іде в формовиробниче відділення. Виливки надходять на обрубку й очищення, а опоки – на формувальну ділянку.

Видалення стрижнів є трудомісткою операцією і тому здійснюється на вібраційних або гідравлічних установках (струменем води під високим тиском), а також електрогідравлічним методом.

Ливники обрізають тепловим різанням, а у малопластичних металів відбивають. Виливки очищають від пригару і окалини в очисних барабанах та камерах.

Незважаючи на універсальність і відносну дешевизну, спосіб лиття в піщані форми пов'язаний з великим вантажопотоком допоміжних матеріалів і підвищеною трудомісткістю. При литті в піщано-глинясті форми 15...25 % маси виливків перетворюється в стружку при механічній обробці, перехід до спеціальних способів лиття дає можливість знизити припуски на механічну обробку і кількість стружки до 5...7 %.

Спеціальні способи лиття дозволяють також отримувати виливки підвищеної точності із малою шорсткістю поверхні, тому перевага спеціальних видів лиття складається і в зменшенні маси ливникової системи і різкому зниженні витрати формувальних матеріалів. Технологічний процес виготовлення виливків цими способами легко піддається механізації і автоматизації, що підвищує продуктивність праці, покращує якість виливків, знижує їх собівартість.

## 5.7 Дефекти виливків і способи їх усунення

Брак виливків становить від 5 до 20 % маси продукції, що випускається. Найбільш часто зустрічаються зовнішні дефекти виливків, які виявляються при поверхневому огляді (невідповідність розмірів, спаї, недоливи, затоки, пригару тощо); об'ємні дефекти, розташовані всередині виливків (тріщини, раковини тощо); невідповідність вимогам хімічного складу і структури металу; незадовільні механічні та інші властивості.

Невідповідність розмірів виливків кресленню є наслідком дефекту моделі, неточності складання форми або здуття слабо набитої форми при заливці.

Спаї і недоливи утворюються при зниженні рідкотекучості металу і його затвердінні до заповнення форми, що відбувається при низькій температурі металу або малому перерізі живильників тонкостінних виливків.

Затоки (задири) і перекуси утворюються по роз'єму форм унаслідок недбалого спаровування напівформ, зносу опок та моделей, контрольних штирів і втулок.

Пригар є наслідком недостатньої вогнетривалості формувальних матеріалів і фарб.

Гарячі тріщини виникають у виливках при високій температурі металу, що заливається, слабкої піддатливості форм і стрижнів, при неправильній конструкції ливників.

Холодні тріщини є наслідком нерівномірної усадки виливків у тонких і товстих її частинах.

Газові раковини спостерігаються при надмірній вологості формувальної суміші, недостатньої вентиляції форм і стрижнів, сирому стрижні, газонасиченості металу, низькій температурі лиття. Земляні раковини виникають при низькій міцності форм і стрижнів, які змиваються струменем металу, що заливається.

Шлакові включення утворюються при неправильній конструкції ливникової системи і заливці неочищеним від шлаку металом.

Усадочні раковини з'являються при неправильній установці ливників і прибутків, при високій температурі заливання металу.

Основні способи виправлення дефектів виливків – електричне та газове зварювання, заливка епоксидною смолою, металізація, механічна

обробка. Дефектні місця обробляють зубилами, висвердлюють і заварюють сталевими, мідними і мідно-нікелевими електродами. Для зняття напружень після заварювання застосовують відпал виливків при температурі 450...500° С.

### **Контрольні запитання**

1. Наведіть розгорнуту класифікацію ливарних сплавів.
2. опишіть кольорові сплави, їх переваги та раціональна сфера застосування.
2. Охарактеризуйте технологічні властивості матеріалів литих заготовок.
3. Поясніть властивості матеріалу газопоглинання та ліквідації.
4. Наведіть властивості та характеристики способів лиття, раціональна область застосування.
5. опишіть класифікацію виливків за призначенням.
6. Охарактеризуйте властивості та характеристики матеріалів для лиття.
7. Зробіть порівняльний аналіз способів лиття.
8. Охарактеризуйте види дефектів лиття та методи їх усунення.

## РОЗДІЛ 6

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ОБРОБКУ МЕТАЛІВ ТИСКОМ І РІЗАННЯМ

#### 6.1 Загальні відомості про обробку металів тиском

*Обробка металів тиском* (ОМТ) – це один з прогресивних способів формоутворення деталей, який базується на пластичній деформації металів.

Процеси ОМТ відрізняються від ливарного виробництва і особливо обробки різанням високою продуктивністю, економною витратою матеріалу та покращенням механічних властивостей металу.

Тиском виготовляють профільні вироби (рейки, кутники, двутаври, швелери тощо) та листовий метал.

В основі обробки металів тиском лежить три закони:

1. Об'єм заготовки до обробки тиском дорівнює об'єму виготовленого виробу (закон рівності об'ємів).
2. При пластичній деформації кожна точка в металі переміщується в сторону найменшого опору (закон найменшого опору).
3. Пластична деформація настає тоді, коли прикладена напруга дорівнює або більше напруження межі плинності металу.

Кожний з перерахованих законів на перший погляд є очевидним, проте має суттєве значення при розрахунках на практиці. Закон рівності об'ємів дозволяє брати необхідну кількість матеріалу для виготовлення того чи іншого виробу. Хоча на практиці треба враховувати незначну втрату металу на окалину (1...2%). Знання закону найменшого опору дозволяє орієнтуватись, куди буде переважно деформуватись метал при прикладенні зовнішнього тиску. Наприклад, якщо взяти з металу заготовку кубічної форми і наносити по ній удари молотом, то, користуючись цим законом, не важко відповісти, як буде змінюватись форма заготовки і чому в кінцевому результаті буде точний круг.

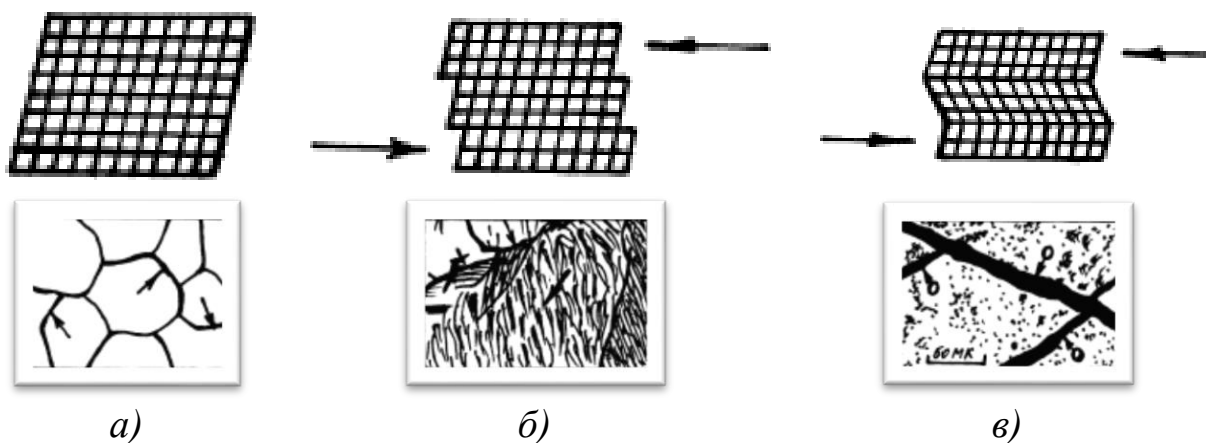
Третій закон ОМТ пов'язаний з силовою характеристикою деформації. Найкращі умови зміни форми заготовки у форму виробу виникають, коли метал тече, тобто тоді, коли прикладене зусилля не тільки

більше за необхідне для пружної деформації, а й здатне викликати явище текучості металу.

Пластична деформація металу може відбуватись ковзанням і двійникуванням (рис. 6.1).

Ковзання являє собою зсув однієї частини металу відносно іншої вздовж певної кристалографічної площини і напрямків. Зсув відбувається, як правило, по найбільш щільноупакованим атомним площинам і напрямкам.

При двійникуванні деформація зосереджується в невеликому об'ємі металу, причому частина, яка зміщується, є ніби дзеркальним відображенням частини, яка не деформувалась.



**Рисунок 6.1 – Схеми перебігу процесу деформування:  
а – недеформована структура; б – ковзання; в – двійникування**

Якщо металам з ґратками ГЦК і ОЦК більш властива деформація ковзанням, то з ГЦУ решіткою – двійникування. Деформація двійникуванням у металах з ґратками ГЦК і ОЦК може проявитись лише при низьких температурах і високих швидкостях деформації.

Металографічне вивчення механізму деформації показало, що по мірі деформації зерна повертаються і витягуються в напрямку діючого навантаження і поступово набувають однакою або близьку кристалічну орієнтацію (текстуру), структура стає волокнистою, а квазіізотропний метал – анізотропним. Це явище називається *наклепом*.

При цьому метал має найбільшу міцність. Коли ж перейти межу наклепу, то виникають тріщини, розшарування металу. Тому подальша

деформація можлива лише при відновленні (рекристалізації) структури спеціальним відпалом.

Деформування металу в значній мірі залежить від температури. Нагрів металу сприяє зменшенню опору деформації та підвищенню його пластичності.

Розрізняють холодну та гарячу деформації, які здійснюються відповідно при температурах нижче і вище температури рекристалізації. При гарячій обробці метал практично не наклепується, а при холодній зміцнення росте в залежності від степені деформації. Тому при холодній обробці для отримання великої зміни форми застосовують проміжний рекристалізаційний відпал.

Гарячій обробці підлягає більшість металів та сплавів, тому що це сприяє зменшенню енергетичних витрат. Проте при гарячій обробці на поверхні металу утворюється окалина, яка при деформації вдавлюється в середину металу і приводить до надривів, тріщин.

Вибір холодної і гарячої ОМТ залежить від багатьох факторів, та здійснюється в кожному конкретному випадку окремо.

Зміна механічних властивостей металу залежить від швидкості деформації. Збільшення швидкості деформації частіше приводить до росту зміцнення і зсуву гарячої обробки в бік більш високих температур. Пластичність змінюється не однозначно – можливе як її підвищення, так і зниження.

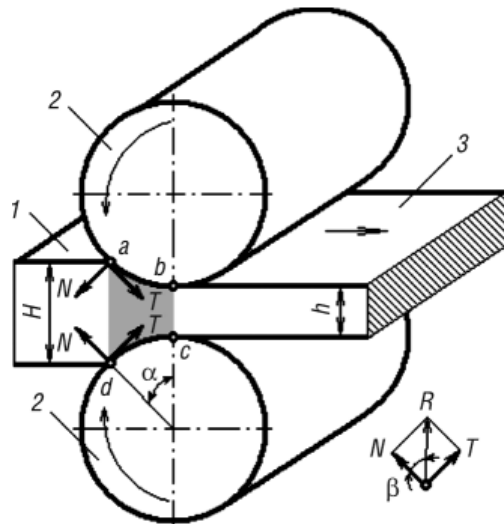
Наприклад, сама по собі пластична мідь при малих швидкостях деформації в області температур 300... 600°C стає дуже крихкою, а підвищення швидкості деформування приводить до усунення провалу пластичності. Аналогічно відбувається і в латуней, нікелю, алюмінію та ін.

Будь-який процес ОМТ характеризується осередком деформації та коефіцієнтом деформації.

Розглянемо для прикладу осередок деформації і його параметри при повздовжній прокатці між двома валками (рис. 6.2).

Осередок деформації (на рисунку заштрихована ділянка) характеризується дугою захвату  $AB$  і кутом захвату  $\alpha$ . Зміну висоти  $H_2 - H_1$ , ширини  $B_1 - B_0$  і довжини  $L - L_0$  після деформації називають відповідно абсолютним стисненням, розширенням та витяжкою. Значно зручніше висотну, поперечну та поздовжню деформацію заготовки характеризувати





**Рисунок 6.2 – Схема повздовжньої прокатки:**

**1 – заготовка до прокатки; 2 – прокатні валки; 3 – заготовка після прокатки**

відповідними коефіцієнтами:

$$\text{стиснення } \alpha = \frac{H_2}{H_1}, \text{ розширення } \beta = \frac{B_1}{B_0} \text{ і витяжки } \mu = \frac{L}{L_0}.$$

Ці коефіцієнти зв'язані між собою, оскільки об'єм заготовки до деформації дорівнює об'єму після деформації.

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{H_2 B_0 L_0}{H_1 B_1 L_1}, \quad \frac{H_2}{H_1} = \frac{B_1 L_1}{B_0 L_0}, \quad \alpha = \beta \mu.$$

Виходячи з характеру обробки виділяють такі види ОМТ: прокатку, пресування, ковку, штамповку та волочіння.

### **6.1.1 Прокатка металу**

**Прокаткою** називають процес ОМТ валками прокатного стану, які обертаються. Розрізняють поздовжню, поперечну та косу прокатку. При повздовжній прокатці (рис. 6.3, а) метал стискується між валками, які обертаються назустріч один одному і переміщається перпендикулярно до їх осі. Це самий поширений вид прокатки.

Поперечна прокатка металу (рис. 6.3, б) здійснюється між валками, які обертаються в одному напрямку. Заготовка отримує обертальний рух у напрямі протилежному обертанню валків. Таким способом виготовляють періодичний прокат, який має послідовно повторювані ділянки

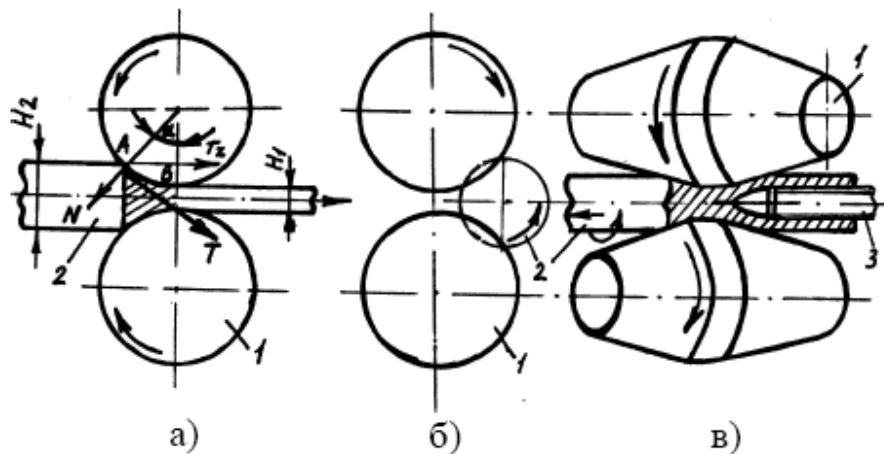


Рисунок 6.3 – Схеми прокатки:

а) – поздовжня прокатка, б) – поперечна прокатка, в) – коса прокатка;  
1 – прокатні валки; 2 – заготовка; 3 - прошва

різного поперечного перерізу (круглого, овального, квадратного, прямокутного, двотаврового, швелера та інш.), сполучених між собою перехідними ділянками, що отримується методом поздовжньої прокатки.

При косій прокатці (рис. 6.3, в) бочкоподібні валки, які розташовані під кутом один до іншого і обертаються в одному напрямі, надають заготовці обертальний і поступальний рух. Цей спосіб застосовують для прошивки заготовок з метою отримання гільз для виготовлення труб.

Процес прокатки відбувається на прокатних станах, які складаються з однієї чи декількох робочих клітей. У клітках розміщують гладкі або калібровані валки. У валках з гладкою поверхнею прокатують листовий метал. Для прокату сортового металу (рейок, кутників, швелерів, двутаврів, дроту) на робочій поверхні валків нарізають струмки. Пара валків з струмками утворює калібр.

Валки виготовляють з чавуну та сталі, інколи їх поверхню покривають твердими сплавами. Валки встановлюють у підшипниках на опорах станини. Приводять у рух за допомогою електродвигуна через редуктор.

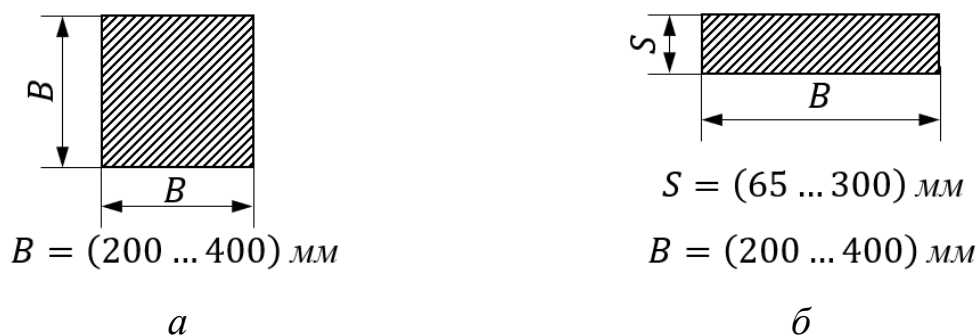
За кількістю та розташуванням валків у робочій клітці стани поділяють на: двовалкові (дуо), тривалкові (тріо), чотиривалкові (квадро), багатовалкові та універсальні.

Дуостани можуть бути реверсивні та нереверсивні. На реверсивних станах прокатують блюми та сляби, а нереверсивних – заготовки, сортовий прокат, листи, стрічки. Тріостани дозволяють здійснювати прокатку

в одну сторону між нижніми і середніми валками, а в зворотню сторону – між середнім і верхнім валками. На них прокатують рейки, балки, тонкий лист тощо. Квадростани мають два робочих (малого діаметру) і два опорних (великого діаметру) валки. Ці стани застосовуються для холодної та гарячої прокатки листового металу. Багато-валкові стани мають два робочих валки, які опираються на провідні та опорні валки. Це забезпечує велику жорсткість конструкції та запобігає прогинанню робочих валків. Застосовують їх для виготовлення тонкого листового металу.

За кількістю клітей прокатні стани поділяють на одно- і багатоклітьові. Розташування клітей може бути лінійним (в одну, дві та більше ліній), послідовним, шахматним, неперервним (прокатка проходить одночасно в декількох клітях), напівнеперервним.

За призначенням стани можна поділити на ті, які призначені для виготовлення заготовки для переробки їх у готовий прокат і ті, які виготовляють готові вироби. Вихідним продуктом прокатного виробництва є злитки різної форми, розмірів і маси. Їх отримують при розливці сталі у виливниці або неперервним способом. Із злитків отримують напівпродукт у вигляді блюмів і слябів (рис. 6.4). З блюмів отримують сортовий прокат, а з слябів виготовляють листовий метал. Для прокатки блюмів застосовують стани блюмінги, слябів – слябінги.



**Рисунок 6.4 – Види прокату – напівфабрикату:  
а) блюм; б) сляб**

Прокатні стани мають велику кількість допоміжних машин, які можна розділити на дві основні системи.

*Перша система допоміжних машин* служить для виконання всіх допоміжних операцій, які пов'язані з прокаткою, розрізанням і

транспортуванням прокатної продукції, а друга система – для кінцевої обробки металопродукції. До основних машин першої системи відносять: рольганги для передачі продукції від нагрітих печей до першої клітки стану, для транспортування металу після прокатки до печей для розрізання, до холодильників; маніпулятори та кантувателі, які обслуговують першу клітку стана; підйомно-качаючі столи та кантувателі у другій лінії стана, машини для нанесення клейма; гибочні машини; холодильники. Всі ці машини забезпечують один ритм виконання технологічних операцій.

*Друга система допоміжних машин* служить для кінцевої обробки продукції прокату. Наприклад, при прокатці рейок їх торці треба фрезерувати, загартувати, просвердлити отвори тощо. Ці машини розташовані по принципу послідовності виконання технологічних операцій.

Особливу групу прокатних станів складають трубопрокатні стани. Вони розділяються на три групи: прошивні, розкаточні та кінцевої обробки.

При прошивці заготовки на стані поперечно-гвинтової прокатки в осьовій зоні металу виникають внутрішні розтягуючі напруги, які досягають значних величин та викликають самовільне утворення порожнин, що приводить до браку. Для отримання внутрішнього отвору необхідного діаметру та з рівною поверхнею застосовують оправку. Вона представляє собою стержень з пробкою на кінці. Оправка вставляється між валками на шляху руху заготовки, а її задній кінець закріплений у спеціальному упорі. При русі вперед заготовка нашттовується на оправку. При цьому відбувається розширення і вирівнювання отвору в заготовці.

На розкатних станах отримують безшовні труби, труби точного діаметру. Після прокатки на розкатних станах труби поступають на стани кінцевої обробки. Вони бувають обкаточні, калібровочні та редуційні.

Обкатний стан призначений для розкатки стінки труби та поліровки зовнішньої та внутрішньої поверхонь для отримання рівномірної товщини стінки та однакового діаметра труби по довжині. Калібровочні стани встановлюються за обкатними. Вони призначені для усунення овальності та отримання труб заданого діаметру. Редуційні стани дають можливість отримувати труби без оправки з метою зменшення їх діаметра.

Зварні труби виготовляють на трубозварювальних станах. Процес отримання труб полягає в тому, що спочатку виготовляється металічна полоса, а потім з неї гнеться труба і зварюється. Зварюють труби ковальським зварюванням, хоча можна зварювати і електродуговим

зварюванням. *Ковальське зварювання* – це з'єднання двох або більше металевих деталей в одне ціле при високій температурі й тиску. Воно відбувається в умовах температури, близької до точки солідуса, при прокованні зварюваних деталей, накладених одну на одну.

Останнім часом набувають поширення гнуті профілі. Їх застосовують замість зварних конструкції в будівництві, що дозволяє економити до 30 % металу. Гнуті профілі виготовляють неперервним способом на багатоклітьових ролико-згинальних станках зі сталевого листа, кутників, швелерів та іншого прокату.

У даний час ведуться роботи по удосконаленню прокатного виробництва. Так, розробляються конструкції прокатних станів з підведенням ультразвуку до валків, що дозволяє підвищити ресурси пластичності металу та зменшує енергетичні витрати. Поширення знаходить ідея поєднання лиття з деформацією полоси у валках. У даний час освоєна беззлиткова прокатка алюмінію, міді та їх сплавів. Наприклад, заготовки можна отримувати, заливаючи рідкий алюміній в обод шківу, який має канавки (струмки). Рідкий метал і шків поливається водою. Метал кристалізується, а отримана заготовка надходить на прокатний стан.

Беззлиткова прокатка має ряд переваг перед іншими способами: мала втрата металу, висока продуктивність, спрощений процес отримання прокату.

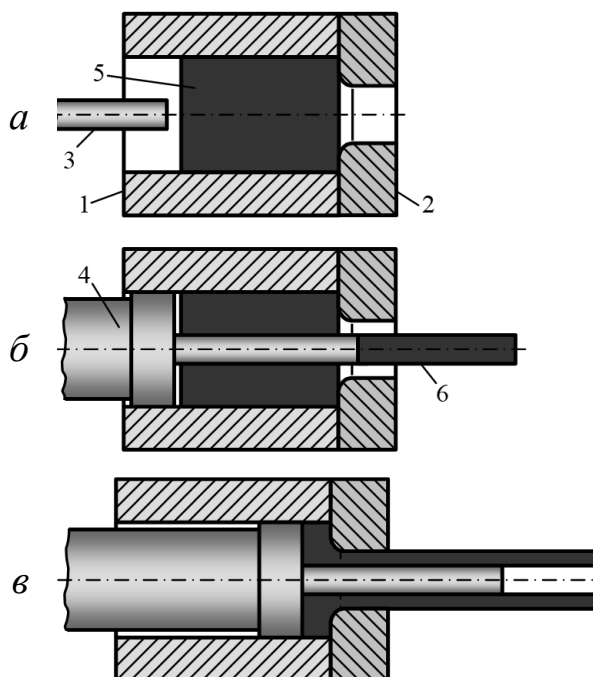
### **6.1.2 Пресування**

*Пресування* – це вид ОМТ, при якому технологічний процес полягає у видавлюванні металу пуансоном із закритого контейнера через отвір у матриці. Профіль виробу визначається отвором у матриці. *Пуансон* – робоча частина (зазвичай металевий стрижень) штампів, застосовуваних при обробці металів тиском. У процесі штампування пуансон входить у заглиблення (отвір) другої частини штампа – матриці. При пресуванні передає тиск на заготовку, що її видавлюють через матрицю. Виготовляють пуансони з високоміцної сталі.

Пресуванням виготовляють прутки діаметром 5...300 мм, труби з внутрішнім діаметром 15...700 мм і товщиною стінки 1,25...50 мм. Цим способом можна отримати вироби складної форми, які не можна виготовити іншими способами ОМТ. Виготовлена пресуванням продукція

відрізняється точністю розмірів. М'яка схема напруженого стану дозволяє деформувати на 85...90 % навіть малопластичні і труднодеформуємі метали та сплави.

Розрізняють пряму, зворотну та з боковим витіканням схеми пресування (рис. 6.5).



**Рисунок 6.5 – Схеми пресування: а – пряма; б – зворотня; в – з боковим витіканням.**

**1 – форма; 2 – прес-шайба; 3 – голка; 4 – пуансон;  
5 – заготовка; 6 – готовий виріб**

При прямому методі (б) напрям руху металу та руху пуансона співпадає. При зворотньому (а) метал рухається в протилежному напрямку до руху пуансона. У третій схемі пресування метал рухається під кутом до руху пуансона (в). Зворотний метод пресування більш економічний за прямий – зменшуються відходи непродформованого металу, зменшуються зусилля пресування, практично відсутнє ковзання заготовки по стінкам контейнера.

Серед високопродуктивних методів пресування слід відмітити гідропресування (гідроекструзію) рідиною під високим тиском та пресування з використанням енергії вибуху.

### **6.1.3 Ковка металу**

*Ковка металу* – це вид ОМТ, при якому задану форму та розміри виробу отримують багатократною дією зусилля на нагріту заготовку.

Вихідним матеріалом для ковки виробів служать злитки та різний прокат.

Розрізняють ковку в штампах і без штампів, вільну ковку. При вільній ковкі переміщення деформованого металу не зустрічає опору з боку штампу. Цим способом можна кувати злитки масою до 250 т і більше.

Крім того, ковку розділяють на ручну та механічну. Ручну ковку здійснюють молотом по наковальні. Застосовують її для індивідуального виготовлення дрібних виробів або при ремонтних роботах. Механічну ковку проводять за допомогою спеціальних молотків та пневматичних і гідравлічних пресів. Молотки використовують для виготовлення виробів середніх розмірів, а преси – для виготовлення великих виробів. Всі типи молотів і пресів мають рухомі (баба і верхній бойок) і нерухомі (шабот і нижній бойок) частини.

Кувати можна відливки та катаний метал. При ковкі литого металу процеси перетворення дендритної будови металу в зернисту та поява волокнистої структури в цілому не відрізняється від аналогічних процесів при прокатці металу.

У процесі ковкі можна отримати вироби складної і несиметричної форми, зігнутої, з відростками тощо. Ковкою отримують деталі не тільки необхідної форми, точних розмірів і з чистою поверхнею, але й із заданими властивостями в необхідному напрямку.

### **6.1.4 Штамповка металу**

Це такий вид обробки металів тиском, при якому формоутворення виробу відбувається в спеціальних пристроях – штампах. Штамповкою виготовляють різноманітні вироби і кузовні деталі автомашин, картери двигунів внутрішнього згорання, частини парових котлів, поковки, посуд тощо.

Штамповку розділяють на *листову* та *об'ємну*.

*Листовою штамповкою* виготовляють плоскі або просторові тонкостінні вироби зі сталі, кольорових металів та сплавів.

Суть листової штамповки полягає в наступному. Лист металу кладуть на матрицю, яка має порожнину, форма і розміри якої відповідають формі та розмірам зовнішньої поверхні виробу. По краях цей лист металу спеціальним пристроєм закріплюється. Потім пуансоном метал вдавлюється у матрицю. Пуансон має форму та розміри внутрішньої частини виробу. При цьому метал, внаслідок пластичної деформації, «вкладається» у матрицю.

Метал, з якого виготовляють виріб, може бути холодний і нагрітий. Відповідно розрізняють холодну та гарячу, штамповку. При холодній штамповці використовують листові заготовки товщиною від сотих долей до 4 мм, при гарячій – товщиною більше 4 мм.

Вироби, виготовлені листовою штамповкою, відрізняються високою точністю і не потребують подальшої обробки на металоріжучих верстатах. Операції листової штамповки поділяються на розділяючі (відрізання, вирубка, пробивка тощо) і формозмінюючі (гибка, витяжка, формовка, відбортовка тощо).

Складність листової штамповки полягає в забезпеченні рівномірної витяжки металу по всій площі. Особливо це стосується виробів з вертикальними стінками. Тому ведуться пошуки заміни пуансона середовищем, яке б створювало рівномірний тиск по всій площі листка металу. Можна, наприклад, здійснити електрогідравлічну штамповку. Короткочасний електричний розряд у рідкому середовищі створює ударну хвилю, тиск якої досягає декількох тисяч кілопаскалей. При такому тиску можна здійснити штамповку навіть малопластичних металів.

При виготовленні великогабаритних виробів з товстого листового металу можна застосовувати штамповку вибухом. Під час вибуху ударна хвиля створює величезний тиск на лист металу, що спричинює зміну його форми у відповідності з порожниною у штампі. Штамповкою вибухом можна виготовити вироби навіть з високоміцних та нержавіючих сталей.

*Об'ємною штамповкою* виготовляють об'ємні вироби, поковки. При цьому використовують штампи з порожнинами, форма і розміри яких відповідають формі та розмірам виробу. Якщо виріб симетричний, то штампи однакові. Наприклад, при виготовленні слюсарного молотка у нижній штамп кладуть нагріту заготовку, а таким же верхнім штампом за допомогою пресу давлять на заготовку. Вона деформується і заповнює простір у штампах.



### **6.1.5 Волочіння**

*Волочіння металу* – це протягання виробу круглого або фасонного профілю через отвір волочильного очка (волоку), площа вихідного перерізу якого менше площі перерізу вихідного виробу. Волочіння виконується тяговим зусиллям, прикладеним до переднього кінця оброблюваної заготівлі. Даним способом одержують дріт всіх видів, прутки з високою точністю поперечних розмірів і труби різноманітних перетинів.

Обробка металу волочінням набула широкого застосування в металургійній, кабельній і машинобудівній промисловості. Волочінням одержують дріт з мінімальним діаметром 0,002 мм, прутки діаметром до 100 мм, причому не тільки круглого перерізу, труби головним чином невеликого діаметра й з тонкою стінкою. Волочінням обробляють сталі різноманітного хімічного складу, прецизійні сплави, а також практично всі кольорові метали (золото, срібло, мідь, алюміній і ін.) і їхні сплави. Виробу, отримані волочінням, мають високу якість поверхні й високою точністю розмірів поперечного перерізу. Якщо виробу потрібно додати в основному ці характеристики, то такий вид обробки називають калібруванням.

Волочіння найчастіше виконують при кімнатній температурі, коли пластичну деформацію більшості металів супроводжує наклеп. Цю властивість у сукупності з термічною обробкою використовують для підвищення деяких механічних характеристик металу. Так, наприклад, арматурний дріт діаметром 3...12 мм із вуглецевої конструкційної сталі (0,70...0,90 %) при виготовленні її волочінням має межу міцності 1400...1900 МПа й границю текучості 1200...1500 МПа.

Волочіння вигідно відрізняється від механічної обробки металу різанням (струганням), фрезеруванням, обточуванням й ін., тому що при цьому відсутні відходи металу у вигляді стружки, а сам процес помітно продуктивніше й менш трудомісткий.

Волочінням можна виготовляти порожні й суцільні вироби часто складного поперечного перетину, виробництво яких іншими способами не завжди представляється можливим (наприклад, тонкі вироби, прутки значної довжини).

При волочінні ряду профілів (квадратний, трикутний, шестикутний й ін.) використовують складені волокни, які відрізняються високою універсальністю, тому що в одній і тій же волоку, міняючи профіль отвору

відповідною перестановкою окремих пластин, можна одержувати різні розміри профілю. Крім складових волок при виробництві прутків і головним чином труб застосовують кулькові й роликові волокни. При одержанні профілів складної форми застосовують дискові волокни, в яких робочі поверхні волоочильного каналу утворюються поверхнями вільно обертових дисків (неприводних валків-роликів).

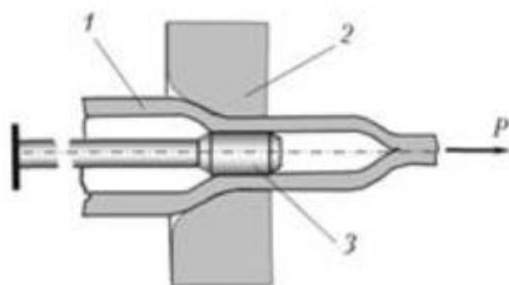
В якості вихідного матеріалу для волочіння застосовують катану й пресовану заготовку. При виробництві алюмінієвого, мідного й іншого дроту як вхідну заготовку використовують катанку, одержувану безпосередньо із плавильної печі через кристалізатор і безперервний прокатний стан. Незалежно від способу одержання вхідна заготовка перед волочінням проходить ретельну попередню підготовку, що полягає в проведенні того або іншого виду термічної обробки, видаленні окалини й підготовці поверхні для закріплення й утримання на ній змащення в процесі волочіння. Ці попередні операції забезпечують нормальне виконання пластичної деформації у волоочильному отворі, сприяють одержанню високої якості поверхні виробу, зменшують зусилля й енергію на волочіння й знижують зношування волоочильного інструмента.

Термічна обробка металу перед волочінням знімає наклеп, надає металу необхідні пластичні властивості, забезпечує одержання найбільш оптимальної структури. Тому термічну обробку вибирають такою, щоб разом із пластичною деформацією вона забезпечувала максимальні механічні й інші характеристики оброблювального виробу. Залежно від хімічного складу металу і призначення продукту волочіння застосовують відпалювання, нормалізацію, загартування.

У процесі одержання готового виробу волочінням термічну обробку для зняття наклепу і покращення структури металу можна виконувати кілька разів залежно від розмірів вихідного і кінцевого продуктів обробки й остаточних його якісних показників. Готовий продукт теж можна піддавати остаточній термічній обробці з метою додання металу необхідних механічних властивостей і структури.

При виробництві дроту і труб волочінням велику увагу надають підготовці поверхні продукту обробки перед волочінням. Для видалення окалини в калібрувальних і волочильних цехах застосовують механічний,

хімічний й електрохімічний способи, а також комбінації цих способів. Схема волочіння труби наведена на рис. 6.6.



**Рисунок 6.6 – Схема процесу волочіння труби:**  
**1 – заготовка; 2 - волока; 3 - оправлення**

При механічному очищенні поверхні від окалини дрід або трубу піддають періодичним перегинам у різних площинах між роликками, після чого метал надходить на завершальне очищення сталевими щітками. Такий спосіб економічно доцільний, придатний для очищення поверхні головним чином з вуглецевої сталі, окалина якої при перегибах порівняно легко руйнується й обпадає. З механічних способів, що забезпечують досить вдале очищення поверхні металу, знаходить застосування дробеструйна обробка. Під дією ударів дробу з вибіленого чавуну, сталевого лиття або високоміцного дрібнонарізаного сталевого дроту, окалина на поверхні оброблювального виробу розпушується і видаляється. Цей спосіб очищення поверхні металу від окалини в багатьох випадках не вимагає додаткового травлення й найбільше часто застосовується в калібрувальних цехах.

Хімічні способи видалення окалини набули найбільшого поширення завдяки своїй надійності, хоча вони менш економічні в порівнянні з механічними способами. Травлення вуглецевих і ряду легованих сталей роблять у сульфатній або хлоридній кислотах. Високолеговані сталі (кислототривкі, нержавіючі й ін.) травлять у сумішах кислот (сульфатна й хлоридна, сульфатна й нітратна й ін.). Мідь та її сплави травлять у 5...10%-вій сульфатній кислоті при температурі 30...60°C. Травлення металу в кислотах для очищення від окалини звичайно роблять із додаванням у ванну присадок (інгібіторів травлення), які значно зменшують швидкість розчинення основного металу, але не впливають на швидкість

розчинення окалини, що запобігає перетравлюванню. Крім того, присадки знижують дифузію водню ( $H_2$ ) у метал, зменшують загазованість травильних відділень, поліпшують умови праці.

Безпосередньо після травлення метал ретельно промивають для видалення залишків розчину кислоти, солей феруму, шламу, травильної присадки, бруду. Промивання роблять негайно після травлення, тому що затримка веде до висихання травильної рідини й виділенню поганорозчинних солей феруму. Звичайно промивання здійснюють спочатку в гарячій воді, що забезпечує інтенсивне розчинення солей, а потім для кращого видалення шламу – у струмені холодної води зі шлангу під тиском близько 0,7 МПа.

Після видалення окалини наносять змащуваний шар, що повинен добре втримувати змащення при волочінні й сприяти запобіганню налипанню металу на робочу поверхню волоки.

Після травлення, промивання, нанесення змащувального шару метал сушать у спеціальних камерах при циркуляції повітря температурою 300...350°C. Сушіння видаляє вологу, а також усуває можливу травильну (водневу) крихкість, що може виникнути від того, що частина водню, що утворився при травленні, дифундує в метал і викликають погіршення його пластичних властивостей.

Всі операції по підготовці поверхні металу до волочіння виконують у спеціальному ізольованому приміщенні. Для травлення й обробки поверхні дроту й прутків існують травильні машини періодичної й безперервної дії. Обробка в машинах безперервної дії забезпечує швидке й рівномірне травлення виробів будь-яких перетинів. Цей спосіб є найбільш прогресивним, тому що в безперервному процесі можна сполучати термічну обробку, видалення окалини й нанесення змащувального шару. Така потокова обробка забезпечує повну автоматизацію процесу, підвищує якість металу, знижує трудомісткість операцій.

Після процесу волочіння прутки крім термічної обробки в багатьох випадках правлять, шліфують, полірують і залежно від призначення наносять на них захисні покриття, наприклад, цинкуванням, лудінням, хромуванням, кадміруванням, алітуванням і ін. виправлення звичайно виконують на роликотравильних машинах, які встановлюють або в потоці виробництва, або окремо. Шліфування поверхні каліброваних прутків на

глибину до 0,15...0,30 мм використовується для видалення поверхневих дефектів, зняття знеуглецьованого шару, додання точних розмірів поперечному перерізу прутка та ін.

Для регламентації технологічних операцій складаються технологічні карти, в яких розписаний увесь технологічний процес щодо підготовки металу до волочіння, маршрут волочіння, способи початкових, проміжних й остаточної термічних обробок, операцій обробки й ін. Оскільки маршрут волочіння являє собою послідовність зміни розмірів поперечного перерізу вихідного матеріалу на волочильному стані, а на одній установці звичайно одержують вироби з різними розмірами поперечного перерізу, то для кожного з них має бути свій маршрут волочіння.

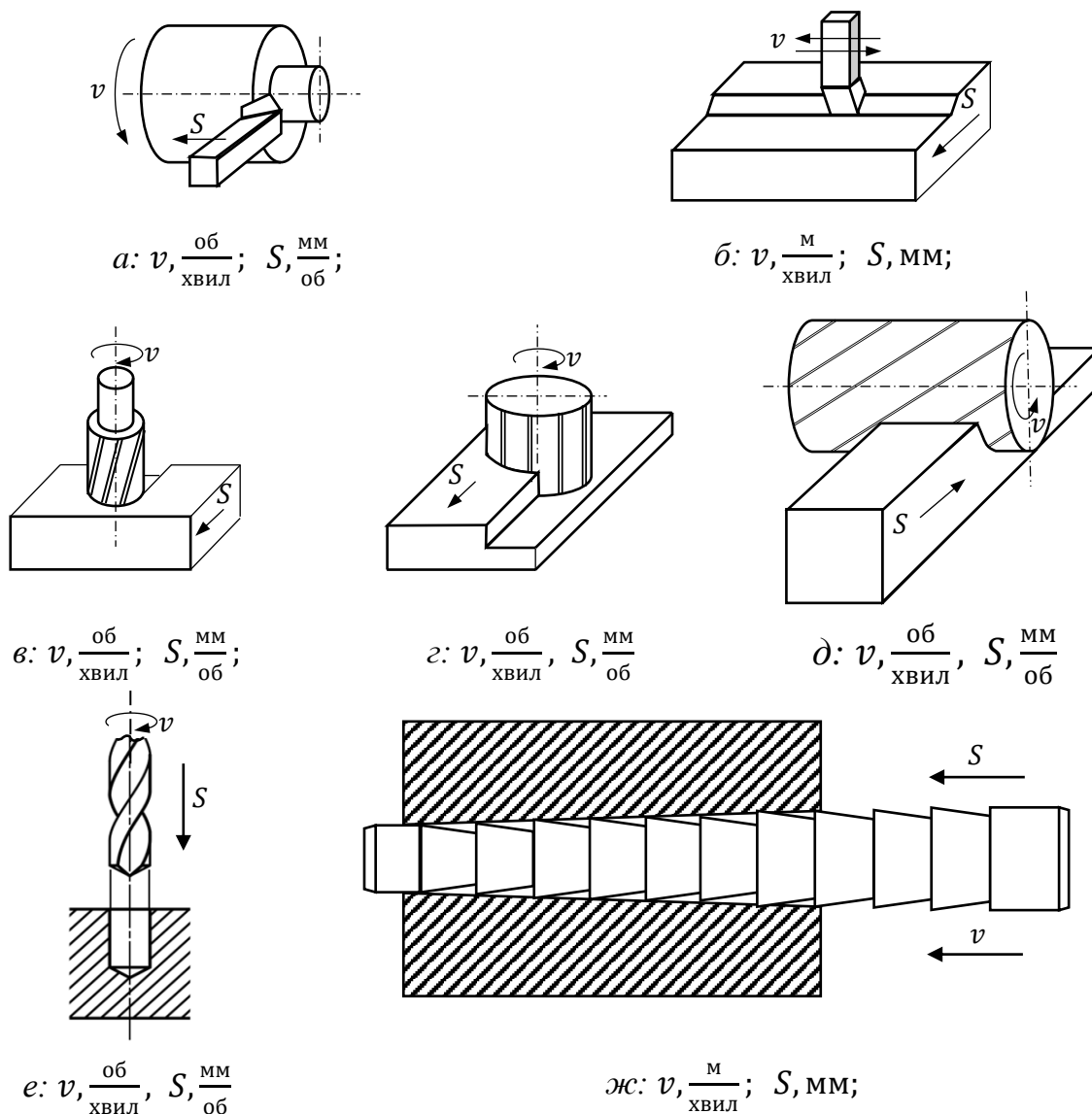
Визначаючи маршрут обробки металу на станах багаторазового волочіння, необхідно враховувати кінематику стану, тобто витяжки повинні збігатися із частотою обертання й розмірами діаметра кожного барабана. Маршрут, прийнятий без обліку кінематики стану, особливо для станів, що працюють із ковзанням не тільки утрудняє процес волочіння, але й робить його нездійсненним. Лише на станах з автоматичним регулюванням швидкостей можна допускати деяка невідповідність прийнятих витяжок і заданих швидкостей.

## **6.2 Загальні відомості про обробку металів різанням**

Процес *різання металів* полягає в зрізанні із заготовки шару металу – припуску, спеціально залишеного на обробку, з метою одержання деталі із заданими кресленням формою, розмірами й шорсткістю поверхонь.

Основними видами обробки різанням є *точіння, стругання, свердління, фрезерування й шліфування*. Обробка металів різанням здійснюється на металорізальних верстатах – токарних, стругальних, свердлильних, фрезерних і шліфувальних з використанням різних різальних інструментів – різців, сверدل, фрез, шліфувальних кругів.

Видалений у процесі різання метал – припуск – перетворюється в стружку, при цьому наявність стружки є характерною ознакою всіх різновидів процесу різання металів (рис. 6.7).



**Рисунок 6.7 – Види механічної обробки: точіння (а); стругання (б); фрезерування (в, г, д); свердління (е); протягування (ж).  $v$  – швидкість обертання;  $S$  - подача**

Для здійснення процесу різання необхідно дотримуватись руху різання і руху подачі (рис. 6.7, а). Головний рух різання має найбільшу швидкість і називається швидкістю різання. Рух подачі має швидкість меншу, ніж швидкість головного руху різання, і призначений для зрізання припуску з усієї поверхні, що підлягає обробці. Цей рух називається подачею. Головний рух і рух подачі залежно від виду обробки можуть бути обертальними або прямолінійно поступальними і здійснюються як заготовкою, так і різальним інструментом.

При точінні головний рух – обертовий рух заготовки, рух подачі – прямолінійний поступальний рух різального інструменту – різця (рис. 6.7, а). Переміщенням різця відносно заготовки зрізується її вихідна поверхня, що називається оброблюваною поверхнею, і утвориться нова поверхня, що називається обробленою поверхнею.

При струганні головний рух надається різцю, а рух подачі – заготовці (рис. 6.7, б) або як головний рух, так і рух подачі надаються тільки різцю.

При свердлінні (зенкеруванні й розгортанні) як головний рух, так і рух подачі звичайно надається різальному інструменту – свердлу (зенкеру, розгортці) (рис. 6.7, в), однак є схеми свердління, у яких головний рух надається заготовці.

При фрезеруванні головний рух надається різальному інструменту – фрезі, а рух подачі – заготовці (рис. 6.7, в, г, д), однак є схеми фрезерування, згідно з якими як головний рух, так і рух подачі надається фрезі.

При протягуванні рух надається інструменту – протяжка (рис. 6.7, ж).

### **6.2.1 Точіння**

Точіння є основним способом обробки поверхонь тіл обертання. Процес різання здійснюється на токарських верстатах при обертанні оброблюваної заготовки (головний рух) і переміщенні різця (рух подачі).

Рух подачі здійснюється:

- паралельно осі обертання заготовки (поздовжня);
- перпендикулярно осі обертання заготовки (поперечна);
- під кутом до осі обертання заготовки (похила).

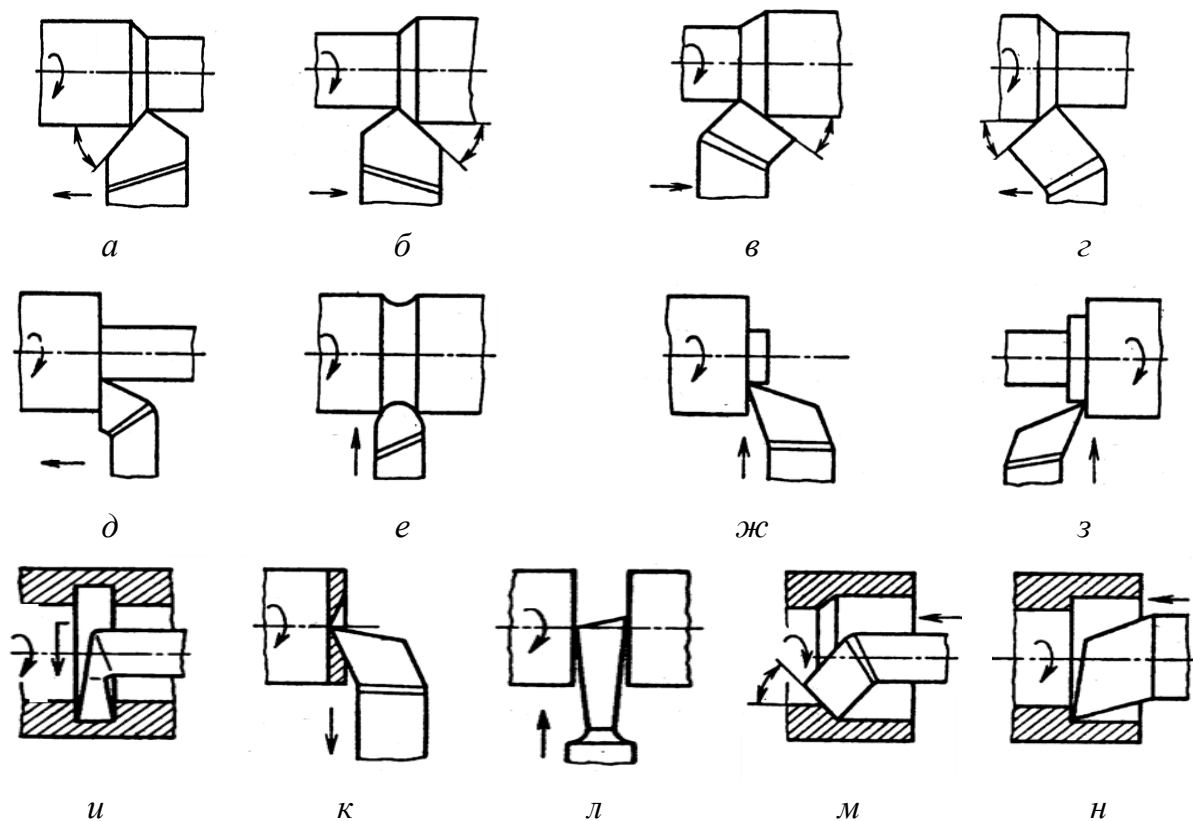
Схеми обробки поверхонь заготовки точінням представлені на рисунку 6.8.

За технологічними можливостями точіння умовне поділяють на: чорнове, напівчистове, чистове, тонке.

У якості різального інструменту при точінні використовують різці. Головним принципом класифікації різців є їхнє технологічне призначення.

Розрізняють різці:

- прохідні – для обточування зовнішніх циліндричних і конічних поверхонь;



**Рисунок 6.8 – Види токарних робіт:**

**Точіння:** а) – прохідним правим різцем; б) – прохідним лівим різцем; в) – відігнутим прохідним правим різцем; г) – відігнутим прохідним лівим різцем; д) – прохідним упорним різцем; е) – канавочним різцем; ж) – підрізним правим різцем; з) – підрізним лівим різцем; и) – внутрішнім канавковим різцем; к) – відрізним різцем; л) – підрізним різцем із врізанням;  
**Розточування:** м) – наскрізних отворів; н) – глухих отворів

- розточувальні – прохідні й упорні – для розточування глухих і наскрізних отворів;
- відрізні – для відрізання заготовок;
- різьбові – для нарізування зовнішніх і внутрішніх різьблень;
- фасонні – для обробки фасонних поверхонь;
- прорізні – для проточування кільцевих канавок;
- галтельные – для обточування перехідних поверхонь між щаблями валів по радіусу.

За характером обробки – чорнові, напівчистові, чистові.

За напрямком руху подачі – праві та ліві (праворуч на ліво й ліворуч на право).



За конструкцією – цілі, із привареною або припаяною пластиною, зі змінними пластинами.

Установка до закріплення заготовки залежить від типу верстата, виду оброблюваної поверхні, характеристики заготовки ( $L/d$ ), точності обробки й інших факторів.

### **Контрольні запитання**

1. Що таке пластичність і в чому її суть?
2. В чому полягає суть обробки металів тиском?
3. У чому різниця між холодною і гарячою обробкою металів тиском?
4. Що таке наклеп і в чому його сутність?
5. Яку має структуру метал оброблений тиском?
6. Які існують способи обробки металів тиском?
7. Опишіть призначення основних вузлів і механізмів токарно-гвинторізного верстата. Рухи при токарній обробці.
8. Охарактеризуйте режими різання при точінні.
9. Наведіть види токарних різців.

## РОЗДІЛ 7

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЗВАРЮВАЛЬНЕ ВИРОБНИЦТВО

**Зварювання** – технологічний процес отримання нероз'ємних з'єднань у результаті виникнення атомно-молекулярних зв'язків між деталями, що сполучаються при їх нагріванні і пластичній деформації.

Зварні з'єднання можна отримувати двома принципово різними методами: зварюванням плавленням і зварюванням тиском. При зварюванні плавленням атомно-молекулярні зв'язки між деталями створюються, оплавляючи кромки, що примикають, так, щоб вийшла їх загальна ванна. Ця ванна твердне при охолодженні і з'єднує деталі в одне ціле. Як правило, в рідку ванну вводять додатковий метал, щоб повністю заповнити проміжок між деталями, але можливе зварювання і без нього.

При зварюванні тиском обов'язковою є спільна пластична деформація деталей стисненням зони з'єднання. Цим забезпечується очищення поверхонь, що зварюються, від плівок забруднень, зміна їх рельєфу і утворення атомно-молекулярних зв'язків. Пластичній деформації зазвичай передують нагрів, оскільки з підвищенням температури зменшується величина деформації, необхідної для зварювання.

Нагрівання деталей, що зварюються, здійснюється різними способами: електричною дугою, газокисневим полум'ям, пропусканням струму, лазером тощо. По-різному забезпечуються захист зони зварювання від впливу повітря та її примусова деформація.

Існує безліч технологічних процесів зварювання (більше 70).

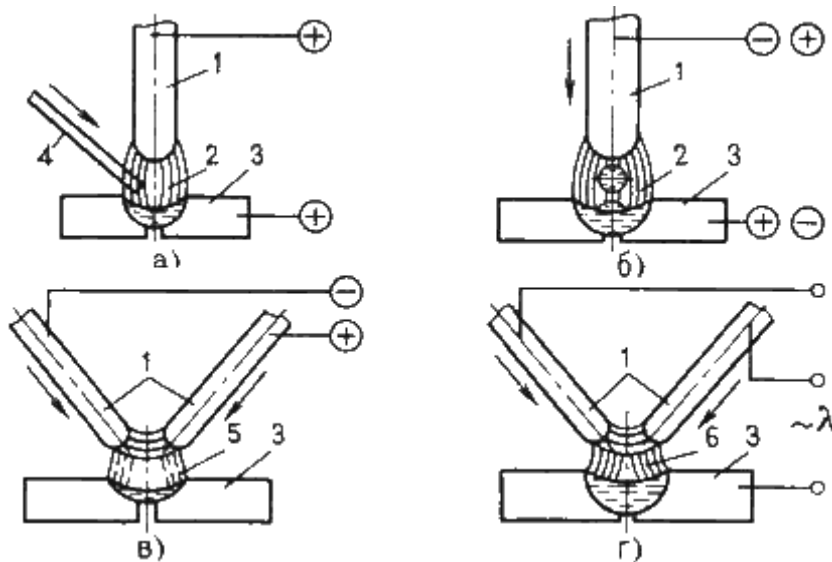
Зварювання є найбільш важливим способом отримання нероз'ємних з'єднань з різних матеріалів, зварюються метали і сплави, кераміка, скло, пластмаси, різні матеріали. Зварка застосовується у всіх галузях техніки.

#### 7.1 Дугове зварювання

Джерелом теплоти при дуговому зварюванні є електрична дуга, що виникає між електродом і заготівкою.

Зварювальною дугою називається потужний електричний розряд між електродами, що знаходяться в середовищі іонізованих газів.

Залежно від матеріалу і числа електродів, а також способу підключення електродів і заготовки в коло електричного струму, розрізняють такі різновиди дугового зварювання (рис. 7.1):



**Рисунок 7.1 – Схеми дугового зварювання:  
неплавким електродом (а); металевим електродом (б); непрямою дугою (в);  
трифазною дугою (г).**

- 1 – електрод; 2 – зварювана дуга; 3 – деталі, що зварюються;  
4 – присадний матеріал; 5 – непряма дуга;  
6 - дуга горить між кожним електродом і основним металом**

- зварювання неплавким (графітовим або вольфрамовим) електродом 1 дугою прямої дії 2 (рис. 7.1.а), коли з'єднання виконується шляхом розплавлення лише основного металу 3, або з використанням третього присадного металу 4;

- зварювання електродом, що плавиться (металевим) 1 дугою прямої дії, тобто є наслідком з одночасним розплавленням основного металу і електродами, який поповнює зварювальну ванну рідким металом (рис. 7.1.б);

- зварювання непрямою дугою 5, що горить між двома, як правило, нерозплавляючимися електродами, при цьому основний метал нагрівається і розплавляється теплотою стовпа дуги (рис. 7.1.в);

- зварювання трифазною дугою, при якій дуга горить між кожним електродом і основним металом (рис. 7.1.2).

Різновиди дугового зварювання розрізняють за способом захисту дуги і розплавленого металу та ступеня механізації процесу.

### 7.1.1 Ручна дугова зварка

Ручне дугове зварювання виконують зварювальними електродами, які подають вручну в дугу і переміщують уздовж заготовки. У процесі зварювання металевим покритим електродом (рис.7.2) дуга 8 горить між стрижнем 7 електрода і основним металом 1.

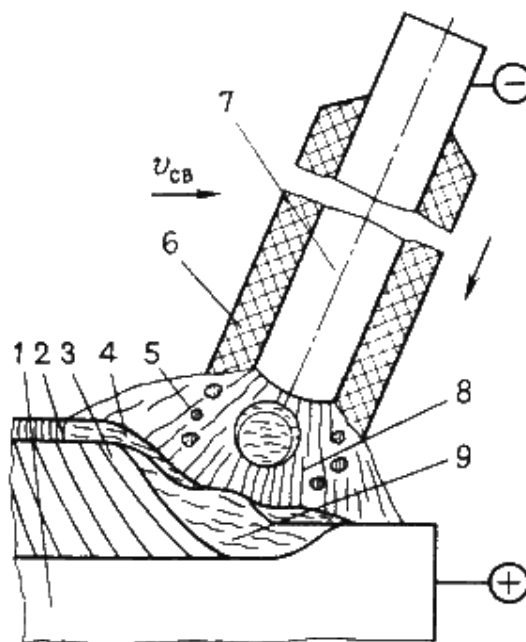


Рисунок 7.2 – Схема процесу зварювання металевим покритим електродом:

- 1 – основний метал; 2 – рідка шлакова кірка; 3 – зварний шов;
- 4 – шлакова ванна; 5 – захисна атмосфера; 6 – покриття електрода;
- 7 – стрижень; 8 – дуга; 9 – зварювальна ванна

Стрижень електрода плавиться, і розплавлений метал краплями стікає в зварювальну ванну 9. Разом зі стрижнем плавиться і покриття електрода 6, в захисній газовій атмосфері 5 навколо дуги і рідку шлакову ванну 4 на поверхні розплавленого металу. Під час руху дуги зварювальна ванна твердне і формується зварний шов 3. Рідкий шлак утворює тверду шлакову кірку.

Ручне зварювання дозволяє виконувати шви у будь-яких просторових положеннях: нижньому, горизонтальному, вертикальному,

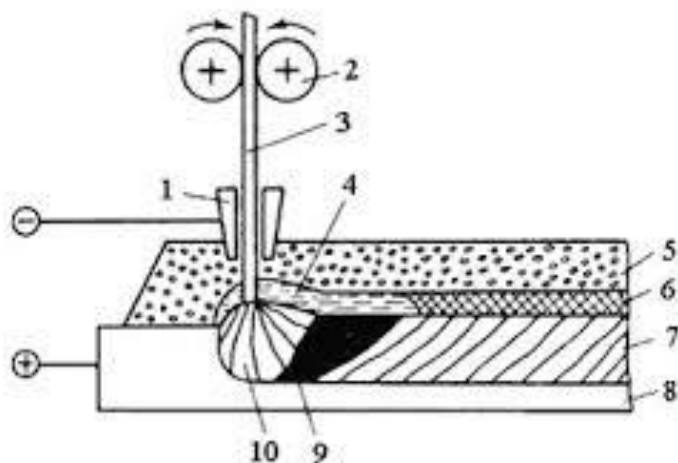
стельовому. Ручне зварювання зручне при виконанні коротких криволінійних швів у різних просторових положеннях у важкодоступних місцях, а також при виконанні монтажних робіт і складання конструкцій складної форми.

При виконанні ручного зварювання потрібно мати: джерело живлення дуги, електродотримач, гнучкі проводи, захисна маска або щиток.

### 7.1.2 Автоматичне дугове зварювання під флюсом

При автоматичному дуговому зварюванні під флюсом для зварювання використовують непокритий електродний дріт і флюс для захисту дуги та зварювальної ванни від повітря.

Схема автоматичного дугового зварювання під флюсом представлена на рис. 7.3.



**Рисунок 7.3 – Схема автоматичного дугового зварювання під флюсом:**

- 1 – струмопровід; 2 – механізм подачі дроту; 3 – дріт; 4 – рідкий шлак;  
5 – шар флюсу; 6 – поверхнева кірка; 7 – зварний шов; 8 – основний метал;  
9 – металева ванна 10 – зварювальна дуга**

Подача та переміщення електродного дроту механізовані. Процеси запалювання дуги і заварки кратера наприкінці шва. Дуга 10 горить між дротом 3 і основним металом 8. Стоп дуги і металева ванна рідкого металу 9 з усіх боків щільно закриті шаром флюсу 5 товщиною 30...50 мм. Частина флюсу плавиться і утворюється рідкий шлак 4, що захищає рідкий метал від повітря. У міру поступального руху електрода металева і шлакова ванни тверднуть з утворенням зварного шва 7, який є твердою

шлаковою кіркою 6. Дріт подають у дугу за допомогою відповідного механізму подачі 2. Струм до електроду підводять через струмопровід 1. Для зварювання під флюсом характерно глибоке проплавлення основного металу.

Переваги автоматичного зварювання під флюсом у порівнянні з ручним такі: підвищення ефективності процесу зварювання в 5...20 разів, підвищення якості зварних з'єднань і зменшення собівартості одного метра зварного шва.

*Флюси.* Застосовувані флюси розрізняють за призначенням.

Флюси для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей призначені для розкислення шва і легування його марганцем і кремнієм. Для цього використовують висококремністі марганцеві флюси, які отримують шляхом сплаву марганцевої руди, кремнезему в електричних печах.

Флюси для зварювання легованих і високолегованих сталей повинні забезпечувати мінімальне окислення легуючих елементів у шві. Для цього застосовують керамічні низькокремністі, безкремністі і фторидні флюси, які виготовляють з порошкоподібних компонентів шляхом замісу їх на рідкому склі, гранулювання і подальшого прожарювання. Основу керамічних флюсів складають мармур, плавиковий шпат і хлориди рідкоземельних металів.

### **7.1.3 Дугове зварювання в захисних газах**

При зварюванні в захисному газі електрод, зона дуги і зварювальна ванна захищені струменем захисного газу (інертного – аргон, гелій; активного – вуглекислий газ, азот, водень).

Зварювання в інертних газах можна виконувати неплавкими і плавкими електродами.

В якості неплавкого електроду застосовується пруток вольфраму, а в якості плавкого – дріт з основного металу або близького йому за хімічним складом. Область застосування аргонодугового зварювання охоплює широке коло матеріалів і виробів (вузли літальних апаратів, елементи атомних установок, корпуси та трубопроводи хімічних апаратів). Аргонодугове зварювання застосовують для легованих і високолегованих

сталей, кольорових (алюмінію, магнію, міді) і тугоплавких (титану, ніобію, ванадію, цирконію) металів та їх сплавів.

Сварка у вуглекислому газі виконується тільки плавким електродом. Захист зварювальної ванни здійснюється вуглекислим газом. Для зварювання вуглецевих і низьколегованих сталей застосовують зварювальний дріт з підвищеним вмістом металів кремнію і марганцю. Хороша якість зварного шву виходить при використанні спеціального порошкового дроту.

Зазвичай зварюються конструкції з вуглецевих і низьколегованих сталей (газо- і нафтопроводи, корпуси суден тощо).

Перевагами даного способу є низька вартість вуглекислого газу і висока продуктивність. Основний недолік – розбризкування металу (на зачистку витрачається 30...40 % часу зварювання).

## **7.2 Плазмове зварювання**

Плазмовий струмінь, що застосовується для зварювання, являє собою спрямований потік частинок або повністю іонізованого газу, що має температуру 10000...20000<sup>0</sup>С. В якості плазмоутворюючих газів застосовують азот, аргон, водень, гелій, повітря та їх суміші.

Застосовують два основних плазмових джерела нагріву: плазмовий струмінь, виділену зі стовпа непрямої дуги і плазмову дугу, в яких дуга прямої дії поєднана з плазмовим струменем.

Плазмовий струмінь є незалежним джерелом теплоти, що дозволяє в широких межах змінювати ступінь нагріву і глибину проплавлення поверхні заготовок. Теплова потужність плазмового струменя обмежена, і її застосовують для зварювання та різання тонких металевих листів і неелектропровідних матеріалів, а також для напилення тугоплавких матеріалів.

Плазмозна дуга яка має велику теплову потужність, має більш широке застосування: для зварювання високолегованої сталі, сплавів титану, нікелю, молібдену, вольфраму.

Плазмозовою дугою можна зварювати метал товщиною до 10 мм без оброблення кромки і застосування присадочного матеріалу. Оскільки

плазмова дуга володіє високою стабільністю, то забезпечується підвищена якість зварних швів. Це дозволяє виконувати мікроплазмове зварювання металу товщиною 0,025...0,8 мм.

Недолік плазмового зварювання – недовговічність пальників.

### 7.3 Електрошлакове зварювання

Сутність процесу полягає в тому, що теплову енергію, необхідну для розплавлення основного і присадочного металу, дає теплота, що виділяється в об'ємі шлакової ванни при проходженні через неї струму (рис. 7.4).

Зварювані заготовки 1 встановлюють у вертикальному положенні. У замкнутий простір між водоохолоджуваними мідними повзунами 4 і вертикально встановленими крайками виробів засипають флюс і подають електродний дріт 7 за допомогою спеціального механізму подачі 6.

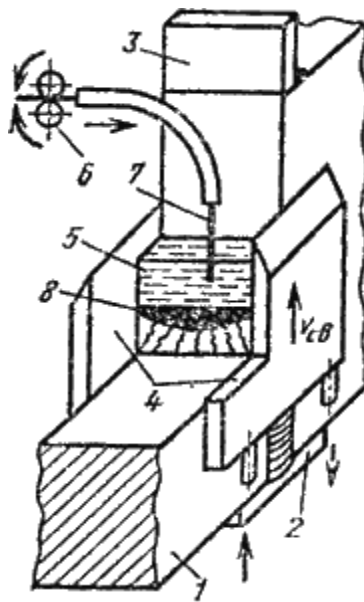


Рисунок 7.4 – Схема електрошлакового зварювання:

1 – заготовки, що зварюються; 2, 3 – спеціальні додаткові планки для монтажу; 4 – водоохолоджувальні мідні повзуни; 5 – електропровідний шлак; 6 – механізм подачі дроту; 7 – електродний дріт; 8 – зварювальна ванна

На початку процесу збуджують дугу, флюс плавиться і утворюється електропровідний шлак 5. Шлаки шунтують дугу, вона гасне, вихідне



коло джерела живлення замикається через шлак. Струм, проходячи через шлак, розігріває його, це призводить до розплавлення кромки основного металу і електрода. Розплав стікає вниз і утворює зварювальну ванну 8, вичавлюючи шлак вгору, і твердне.

У початковій і кінцевій ділянках шва утворюються дефекти: на початку шва – непровар країв, в кінці шва – усадочна раковина і неметалеві включення. Тому зварювання починають і закінчують на спеціальних планках 2 і 3, які потім видаляють газовою різкою.

Переваги: можливе зварювання металу будь-якої товщини (з 16 мм). Заготовки з товщиною до 150 мм можна зварювати одним електродом, що чинять поперечним коливанням в площині стику, при товщині більше 150 мм при використанні кількох дротів. Є досвід зварювання деталей товщиною до 2 м.

Недолік способу – утворення великого зерна в шві та в колошовній зоні внаслідок уповільненої нагрівання та охолодження. Необхідне проведення термічної обробки: нормалізації або відпалу для подрібнення зерна металу.

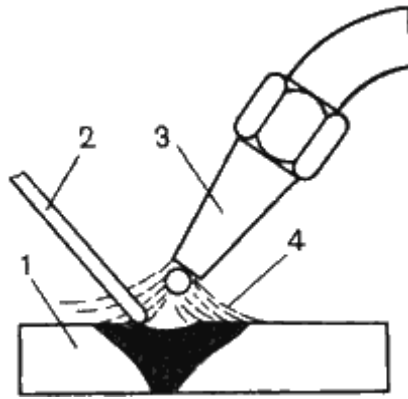
Електрошлакове зварювання широко застосовують у важкому машинобудуванні для виготовлення ковано-зварних і лито-зварних конструкцій; станини, деталі потужних пресів і верстатів, колінчаті вали суднових дизелів, ротори і вали гідротурбін, котли високого тиску і т.п.

## **7.4 Газове зварювання**

При газовому зварюванні заготовки 1 і присадний матеріал 2 у вигляді прутка чи дроту розплавляють високотемпературним полум'ям 4 газового пальника 3 (рис. 7.5).

Газове полум'я отримують при згорянні пального газу в атмосфері технічно чистого кисню. Потужність полум'я регулюють зміною наконечників пальника.

Нагрівання заготовки здійснюється більш плавно, ніж при дугового зварюванні, тому газове зварювання застосовують для зварювання металу малої товщини (0,2...3 мм), легкоплавких кольорових металів і



**Рисунок 7.5 – Схема газового зварювання:**

**1 – основний метал; 2 – електрод; 3 – пальник; 4 – газове полум'я**

сплавів; металів і сплавів, що вимагають поступового нагрівання і охолодження (інструментальні сталі, латуні); для подварки дефектів в чавунних і бронзових виливках. При збільшенні товщини металу знижується продуктивність зварювання і збільшується деформація зварюваних деталей.

## **7.5 Контактне зварювання**

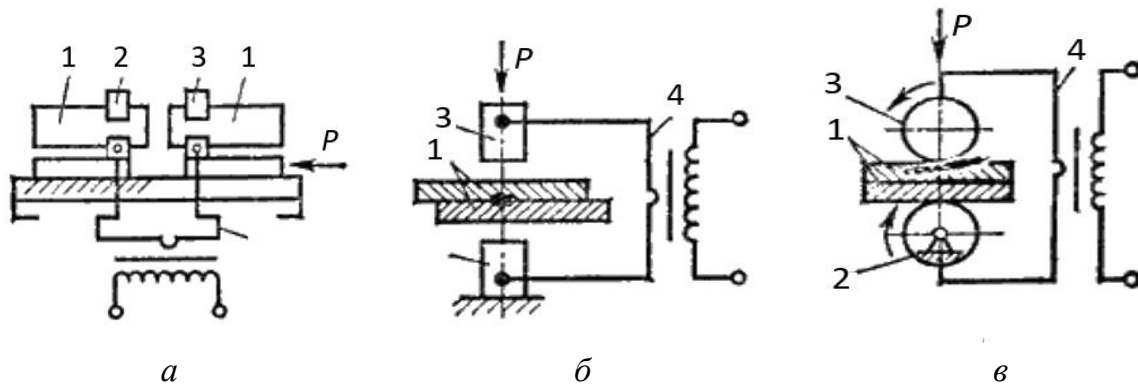
Зварні з'єднання можливо отримати в результаті нагрівання деталей, при проходженні через них струму і подальшої пластичної деформації зони з'єднання.

До деталей за допомогою електродів підводять струм невеликої напруги (3...8 В) і великої сили (до декількох десятків кА). Велика частина тепла виділяється в зоні контакту деталей.

По виду одержуваного з'єднання контактне зварювання підрозділяють на точкову, шовну, стикову. Схеми контактного зварювання представлені на рис. 7.6.

*Стикове контактне зварювання* (рис. 7.6 а) – спосіб з'єднання деталей по всій площині їх торкання.

Зварювані заготовки 1 щільно затискають в нерухомому 2 і рухомому 3 струмопроводу, підключених до вторинної обмотці зварювального трансформатору 4. Для забезпечення щільного електричного контакту поверхні, що зварюються, приводять до зіткнення і стискають. По-



**Рисунок 7.6 – Схеми контактного зварювання:**

**а – стикового; б – точкового; в – шовного:**

**1 – зварювані заготовки; 2 – нерухома частина струмопроводу;**

**3 – рухома частина струмопроводу; 4 - трансформатор**

тім вмикається струм. Поверхня контакту заготовок розігрівається до необхідної температури, струм відключається, відбувається здавлювання заготовок – осадження.

Стикове зварювання з розігрівом стику до пластичного стану і подальшої осадкою називають зварюванням опором, а при розігріві торців до оплавлення з подальшою осадкою – зварюванням оплавленням. В результаті пластичної деформації і швидкої рекристалізації в зоні утворюються рекристалізовані зерна з матеріалу обох деталей.

Зварка застосовується для з'єднання в стик деталей типу стрижнів, товстостінних труб, рейок тощо.

*Точкове зварювання* (рис. 7.6 б) – спосіб виготовлення листових або стрижневих конструкцій, що дозволяє отримати міцні з'єднання в окремих точках.

Зварювані заготовки 1, зібрані з напусткою, затискають між нерухомим 2 і рухомих 3 електродами, приєднаними до обмотці трансформатора 4.

Електроди зсередини охолоджуються водою, нагрівання локалізується на ділянках зіткнення деталей між електродами. Отримуючи зону розплаву необхідного розміру, струм вимикають, розплав твердне, утворюється зварна точка. Електроди стискають деталі, пластично деформуючи їх.

Утворене зварене з'єднання має велику міцність і його можна застосовувати для виготовлення несучих конструкцій. Цей спосіб широко застосовують в авто- і вагонобудуванні, будівництві.

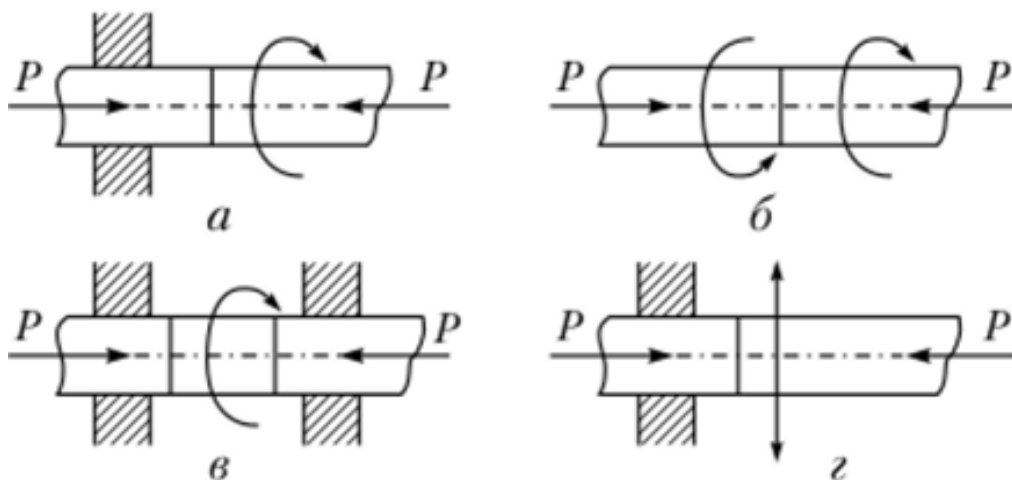
*Шовне зварювання* (рис. 7.6 в) – спосіб з'єднання деталей швом, що складається з окремих зварних точок.

Зварювані заготовки 1 поміщають між двома роликами-електродами, один з електродів 2 може мати обертальний рух, а інший 3 – обертальний рух і переміщення у вертикальному напрямку. Електроди підключаються до вторинної обмотки трансформатора 4. Електроди-ролики затискають і пересувають деталь.

Шовне зварювання забезпечує отримання міцних і герметичних з'єднань з листового матеріалу товщиною до 5 мм.

## 7.6 Зварювання тертям

Зварювання тертям – спосіб зварювання тиском при впливі теплоти, що виникає при терті поверхонь, що зварюються (рис. 7.7).



**Рисунок 7.7 – Принципова схема зварювання тертям:**

**а – обертання однієї деталі; б – обертання обох деталей;**

**в – зварювання нерухомих деталей з обертається вставкою;**

**г – зварювання при зворотно-поступальному русі однієї з деталей**

Зварювані заготовки встановлюють співвісно в затискачах машини, один з яких нерухомий, а інший може здійснювати обертальний і поступальний руху. Заготовки стискаються осьовим зусиллям, і включається механізм обертання. При досягненні температури 980...1300 °С обертання заготовок припиняють при наступному їх стисканні.

Іноді зварювання тертям виробляють через проміжний обертальний елемент або замінюють обертальний рух вібрацією.

Зварюванням тертям можна зварювати заготовки діаметром 0,75...140 мм. Переваги способу: простота, висока продуктивність, мала енергоємність, стабільність якості з'єднання, можливість зварювання заготовок з різнорідних матеріалів. Зварювання здійснюється на спеціальних машинах.

## **7.7 Зварювання вибухом**

Більшість технологічних схем зварювання вибухом засновано на використанні направленої вибуху. Поверхні заготовок, одна з яких нерухома і служить підставкою, розташовують під кутом один до одного на певній відстані. На другу заготовку укладається вибухова речовина і встановлюється детонатор. Зварювання здійснюють на жорсткій опорі. При зіткненні двох деталей під дією ударної хвилі, що рухаються з великою швидкістю, між ними утворюється кумулятивний струмінь, який руйнує і забирає оксидні поверхневі плівки та інші забруднення. Поверхні зближуються до відстані дії міжатомних сил, і відбувається захоплення по всій площі з'єднання. Тривалість зварювання кілька мікросекунд. Міцність з'єднань, виконаних зварюванням вибухом, вище міцності матеріалів, що з'єднуються.

Зварювання вибухом використовують при виготовленні заготовок для прокату біметалу, плакіровці поверхонь конструкційних сталей металами і сплавами зі спеціальними властивостями, при зварюванні заготовок з різнорідних матеріалів. Доцільно поєднання зварювання вибухом зі штампуванням і куванням (рис.7.8).

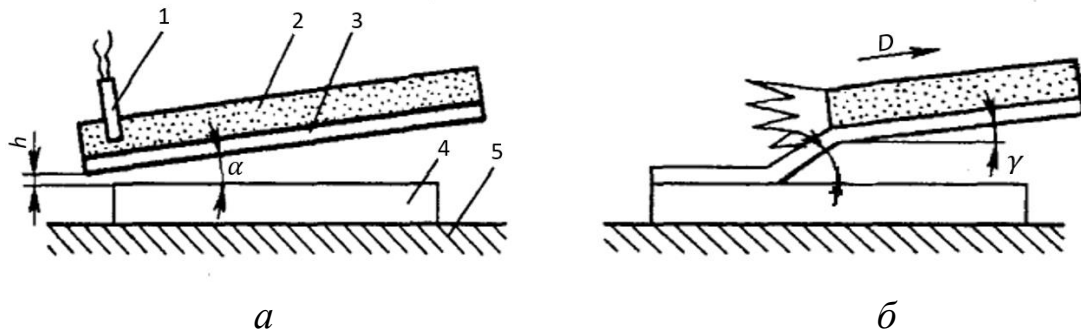


Рисунок 7.8 – Кутова схема зварювання вибухом до початку (а) і в стадії вибуху (б): 1 – детонатор; 2 – заряд речовини; 3, 4 – зварювані заготовки; 5 – жорстке підставу;  $\gamma$  – кут між пластинами;  $h$  – найменша відстань

## 7.8 Ультразвукове зварювання

З'єднання при цьому методі зварювання утворюється під впливом тиску і ультразвукових коливань.

Ультразвукові коливання в зварювальних установках одержують у такий спосіб. Струм від генератора 1 високої частоти (рис. 7.9) подається на обмотку 3 магнітострикційного перетворювача 2, який збирається з пластин товщиною 0,1...0,2 мм. Матеріал, з якого вони виготовлені, здатний змінювати свої геометричні розміри під дією змінного магнітного поля. Якщо магнітне поле направлено вздовж пакета пластин, то будь-які його зміни призведуть до вкорочення або подовження магнітостріктора, що дозволить перетворити високочастотні електричні коливання в механічні тієї ж частоти.

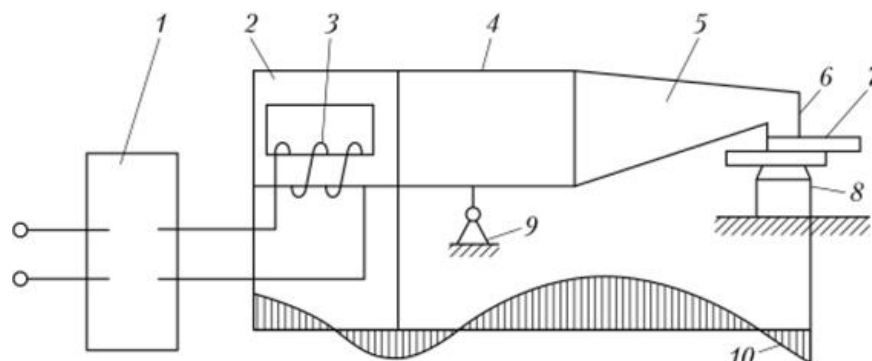


Рисунок 7.9 – Схема ультразвукового зварювання:  
 1 – генератор; 2 – магнітострикційний перетворювач; 3 – обмотка;  
 4 – хвилевід; 5 – концентратор; 6 – виступ; 7 – деталі; 8 – електрод;  
 9 – опора; 10 -крива коливань

Перетворювачі ультразвукових коливань за допомогою припою або клею з'єднуються з хвилеводом 4. Хвилевід служить для передачі коливань концентратора 5, який може посилювати амплітуду коливань. Хвилевід циліндричної форми передає коливання, не змінюючи їх амплітуди, в той час як ступінчасті, конічні концентратори підсилюють їх. Тому вибирається спеціальна форма концентратора, а його розміри розраховують з урахуванням необхідного коефіцієнта посилення.

Найбільш раціонально застосування зварювання ультразвуком в наступних областях:

- ✓ Зварювання деталей малої товщини. При цьому ультразвукове зварювання має певні переваги перед деякими іншими методами, наприклад конденсаторної. Ці переваги зумовлені тим, що при однаковій товщині деталей діаметр точки при зварюванні ультразвуком можна отримати більше, ніж при конденсаторній зварюванні, також застосовується, як відомо, для з'єднання деталей малої товщини.

- ✓ Зварювання деталей різної товщини і різнорідних металів, що не зварюються або важко зварюються іншими методами.

- ✓ Зварювання металів з неметалами (напівпровідниками, склом і деякими іншими матеріалами). У цій області досягнуті істотні успіхи, що забезпечило застосування ультразвукового зварювання в електронній та радіотехнічній промисловості. За допомогою ультразвуку зварюють деталі з пластмас. Ультразвукове зварювання поряд з лазерною застосовується для з'єднання біологічних тканин, що є одним з унікальних прикладів використання даної зварювання і одночасно характеризує її широкі можливості.

- ✓ Зварювання деталей з термооброблених матеріалів. Відсутність значного нагрівання не призводить до помітного зниження міцності металу околошовної зони.

- ✓ Сварка без попередньої зачистки поверхні деталей, захищених покриттями (плакування, анодування).

## **Контрольні запитання**

1. Чим відрізняється автоматичне дугове зварювання від ручного?

2. Як змінити швидкість зварювання та швидкість подачі електродного дроту універсального зварювального трактора?
3. Яку роль відіграє флюс та захисний газ при автоматичному зварюванні?
4. Як впливає зміна сили струму на основні параметри зварювального шва?
5. Як впливає зміна швидкості зварювання на основні параметри зварювального шва?
6. Які види зварювання Ви знаєте?
7. Опишіть особливості ручного дугового зварювання?
8. Охарактеризуйте зварювання вибухом.
9. Назвіть основні особливості ультразвукового зварювання.



## РОЗДІЛ 8 ТЕРМІЧНА І ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІ

### 8.1 Види термічної обробки металів

Властивості сплаву залежать від його структури. Основним способом, що дозволяє змінювати структуру, а, отже, і властивості є термічна обробка.

Основи термічної обробки розробив Д.К. Чернов. Далі вони розвивалися в роботах А.А. Бочвара, Г.В. Курдюмова, А.П. Гуляєва.

Термічна обробка являє собою сукупність операцій нагріву, витримки і охолодження, які виконуються в певній послідовності при певних режимах, з метою зміни внутрішньої будови сплаву і отримання потрібних властивостей (подається у вигляді графіка в осях температура-час, див. рис. 8.1).

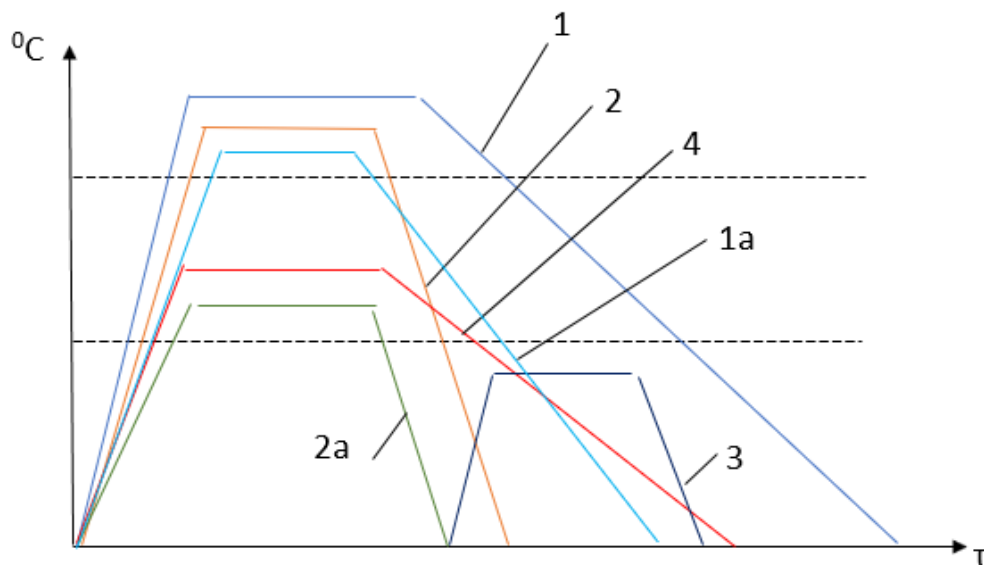


Рисунок 8. 1 – Графік різних видів термообробки:

 відпал	 гарт	 відпустка
 відпал	 гарт	 нормалізація

Розрізняють такі види термічної обробки:

1. **Відпал I роду** – можливий для будь-яких металів і сплавів. Його проведення не обумовлено фазовими перетвореннями в твердому стані.

Нагрівання, при відпалі першого роду, підвищує рухливість атомів, частково або повністю усуває хімічну неоднорідність, зменшує внутрішнє напруження. Основне значення має температура нагріву і час витримки. Характерним є повільне охолодження.

Різновидами відпалу першого роду є:

- дифузний;
- рекристалізаційний;
- для зняття напружень після кування, зварювання, лиття.

2. **Відпал II роду** – відпал металів і сплавів, що зазнають фазові перетворення в твердому стані при нагріванні і охолодженні. Виконується для сплавів, в яких є поліморфні або евтектоїдні перетворення, а також змінна розчинність компонентів в твердому стані. Виконується відпал другого роду з метою отримання більш рівноважної структури і підготовки її до подальшої обробки. У результаті відпалу подрібнюється зерно, підвищуються пластичність і в'язкість, знижуються міцність і твердість, поліпшується оброблюваність різанням. Характеризується нагріванням до температур вище критичних і дуже повільним охолодженням, як правило, разом з піччю (рис.8.1, 1, 1а).

3. **Загартування** – проводиться для сплавів, що зазнають фазові перетворення в твердому стані при нагріванні і охолодженні, з метою підвищення твердості і міцності шляхом утворення нерівноважних структур (сорбіт, троостит, мартенсит). Характеризується нагріванням до температур вище критичних і високими швидкостями охолодження (рис. 8.1, 2, 2а).

4. **Відпустка** – проводиться з метою зняття внутрішніх напружень, зниження твердості і збільшення пластичності та в'язкості загартованих сталей. Характеризується нагріванням до температури нижче критичної  $A_1$  (рис. 8.1, 3). Швидкість охолодження ролі не грає. Відбуваються перетворення, зменшують ступінь нерівноважності структури загартованої сталі.

5. **Нормалізація** – вид термічної обробки сталі, що застосовується для підвищення міцності, ударної в'язкості, однорідності структури та покращення оброблюваності низьковуглецевої сталі, а також для

виправлення структури зварного з'єднання та зменшення внутрішніх напружень.

Термічну обробку поділяють на попередню й остаточну.

Попередня – застосовується для підготовки структури і властивостей матеріалу для наступних технологічних операцій (для обробки тиском, покращення оброблюваності різанням) . Остаточна – формує властивість готового виробу.

При розробці технології необхідно встановити:

- режим нагріву деталей (температуру і час нагрівання);
- характер середовища, де здійснюється нагрів і його вплив на склад матеріалу сталі;
- умови охолодження.

Режими термічної обробки призначають відповідно до діаграми стану і діаграми ізотермічного розпаду аустеніту .

Нагрівання може здійснюватися в нагрівальних печах, плавильних або електричних, у соляних ваннах або у ваннах з розплавленим металом, пропусканням через виріб електричного струму або в результаті індукційного нагріву.

З точки зору продуктивності нагрів з максимальною швидкістю зменшує окалиноутворення, обезвуглецювання і зростання аустенітного зерна. Однак необхідно враховувати перепад температур по перерізу, що сприяє виникненню термічних напружень. Якщо напруження, що розтягують, перевищать межу міцності або межу плинності, то можливо викривлення або утворення тріщин.

Швидкість нагріву тим вище, чим менше легована сталь, однорідніше її структура, простіше конфігурація. Швидкість нагріву приймається 0,8...1 хв на 1 мм перерізу. Час витримки приймається близько 20 % від часу нагріву. Складові повітря можуть різним чином впливати на сталь:

- окислювати ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ );
- відновлювати ( $CO$ ,  $CH_4$ );
- знижувати концентрацію карбону на поверхні ( $O_2$ ,  $H_2$ );
- підвищувати концентрацію карбону на поверхні ( $CO$ ,  $CH_4$ );
- нейтрально впливати ( $N_2$ , інертні гази).

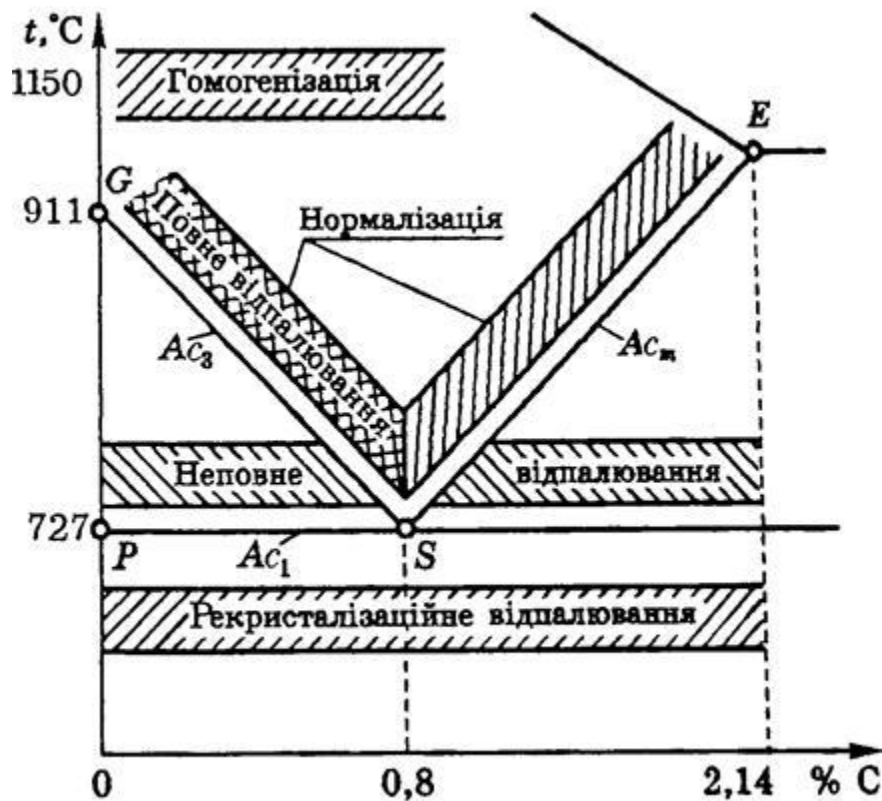


Рисунок 8.2 – Загальний вигляд лівого кута діаграми стану залізо – цементит і температурні області нагріву при термічній обробці сталей

Окислення з утворенням окалини перешкоджає отриманню високої і рівномірної твердості при загартуванні, що призводить до зміни розмірів, вимагає збільшення припусків на механічну обробку.

Зниження концентрації карбону на поверхні (вигорання карбону в поверхневому шарі металу) сприяє появі м'яких плям при загартуванні та виникненню напружень, що розтягують, в поверхневому шарі, знижують міцність від втоми. На рис. 8.2 зображені температурні області нагріву при термічній обробці сталей.

**Відпал і нормалізація. Призначення і режими.** Відпал, знижуючи твердість і підвищуючи пластичність та в'язкість за рахунок отримання рівноважної дрібнозернистої структури, дозволяє:

- покращити оброблюваність заготовок тиском і різанням;
- виправити структуру зварних швів, перегрітої при обробці тиском і лиття сталі;
- підготувати структуру до подальшої термічної обробки.

Характерно повільне охолодження зі швидкістю 30...100°C / год.

### *Відпал першого роду:*

1. Дифузійний (гомогенізований) відпал. Застосовується для усунення ліквіації, вирівнювання хімічного складу сплаву. В його основі – дифузія. У результаті нагрівання вирівнюється склад, розчиняються надлишкові карбіди. Застосовується, в основному, для легованих сталей. Температура нагріву залежить від температури плавлення,  $T_H = 0,8 T_{пл}$ . Тривалість витримки: 8...20 годин.

2. Рекристалізаційний відпал проводиться для зняття напружень після холодної пластичної деформації. Температура нагріву пов'язана з температурою плавлення:  $T_H = 0,4 T_{пл}$ . Тривалість залежить від габаритів виробу.

3. Відпал для зняття напружень після гарячої обробки (лиття, зварювання, обробки різанням, коли потрібна висока точність розмірів). Температура нагріву вибирається залежно від призначення, знаходиться в широкому діапазоні:  $T_H = 160...700^{\circ}\text{C}$ . Тривалість залежить від габаритів виробу. Деталі прецизійних верстатів (ходові гвинти, високонавантажені зубчасті колеса, черв'яки) відпалюються після основної механічної обробки при температурі  $570...600^{\circ}\text{C}$  протягом 2...3 годин, а після остаточної механічної обробки, для зняття шліфувальних напружень – при температурі  $160...180^{\circ}\text{C}$  протягом 2...2,5 годин.

*Відпал другого роду* призначений для зміни фазового складу. Температура нагріву і час витримки забезпечують потрібні структурні перетворення. Швидкість охолодження повинна бути такою, щоб встигли відбутися зворотні дифузійні фазові перетворення. Відпал знижує твердість і міцність, покращує оброблювальність різанням середньо- і високовуглецевих сталей. Подрібнюючи зерно, знижуючи внутрішні напруження, зменшуючи структурну неоднорідність все це сприяє підвищенню пластичності і в'язкості.

Залежно від температури нагрівання розрізняють відпал:

✓ Повний, з температурою нагріву на  $30...50^{\circ}\text{C}$  вище критичної температури  $A_3$

$$T_H = A_3 + (30 \dots 50)^{\circ}\text{C}.$$

Проводиться для доевтектоїдних сталей для виправлення структури. При такій температурі нагріву аустеніт виходить дрібнозернистий, і після охолодження сталь має також дрібнозернисту структуру.

✓ Неповний, з температурою нагріву на  $30...50^{\circ}\text{C}$  вище критичної температури  $A_1$ .

$$T_{\text{н}} = A_1 + (30 \dots 50)^{\circ}\text{C}.$$

Застосовується для заевтектоїдних сталей. При такому нагріванні в структурі зберігається цементит вторинний, в результаті відпалу цементит набуває сферичну форму (сфероїдизація). Отриманню зернистого цементиту сприяє гаряча пластична деформація, при якій дробиться цементитна сітка. Структура з зернистим цементитом краще обробляються і мають кращу структуру після гарту. Неповний відпал є обов'язковим для інструментальних сталей. Іноді неповний відпал застосовують для доевтектоїдних сталей, якщо не потрібно виправлення структури (сталь дрібнозерниста), а необхідно тільки знизити твердість для поліпшення оброблюваності різанням.

✓ Циклічний або маятниковий відпал застосовують, якщо після проведення неповного відпалу цементит залишається пластинчастим. У цьому разі після нагрівання вище температури  $A_1$  слід охолодження до  $680^{\circ}\text{C}$ , потім знову нагрів до температури  $750...760)^{\circ}\text{C}$  і охолодження. В результаті отримують зернистий цементит.

✓ Ізотермічний відпал – після нагрівання до необхідної температури, виріб швидко охолоджують до температури на  $50...100^{\circ}\text{C}$  нижче критичної температури  $A_1$  і витримують до повного перетворення аустеніту в перліт, потім охолоджують на спокійному повітрі. Температура ізотермічної витримки близька до температури мінімальної стійкості аустеніту. В результаті отримують більш однорідну структуру, так як перетворення відбувається при однаковому ступені переохолодження. Значно скорочується тривалість процесу. Застосовують для легованих сталей.

✓ Нормалізація – різновид відпалу. Термічна обробка, при якій виріб нагрівають до аустенітного стану, на  $30...50^{\circ}\text{C}$  вище  $A_3$  або  $A_{\text{ст}}$  з подальшим охолодженням на повітрі.

$$T_{\text{н}} = A_3 + (30 \dots 50)^{\circ}\text{C}$$

або

$$T_n = A_{ст} + (30 \dots 50)^\circ\text{C}.$$

В результаті нормалізації отримують більш тонку будову евтектоїда (тонкий перліт або сорбіт), зменшуються внутрішні напруження, усуваються вади, отримані в процесі попередньої обробки. Твердість і міцність дещо підвищуються ніж після відпалу. В заевтектоїдних сталях нормалізація усуває грубу сітку вторинного цементиту. Нормалізацію частіше застосовують як проміжну операцію для поліпшення структури. Іноді проводять як остаточну обробку, наприклад, при виготовленні сортового прокату. Для низьковуглецевих сталей нормалізацію застосовують замість відпалу. Для середньовуглецевих сталей нормалізацію або нормалізацію з високою відпусткою застосовують замість гарту з високою відпусткою. У цьому разі механічні властивості трохи нижче, але виріб піддається меншій деформації, виключаються тріщини.

**Загартування.** Конструкційні сталі піддають гарту і відпустки для підвищення міцності і твердості, отримання високої пластичності, в'язкості і високої зносостійкості, а інструментальні – для підвищення твердості і зносостійкості.

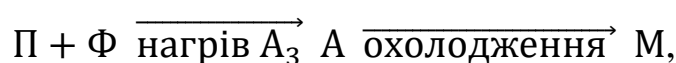
Верхня межа температур нагрівання для заевтектоїдних сталей обмежується, так як призводить до зростання зерна, що знижує міцність і опір крихкому руйнуванню. Основними параметрами є температура нагріву і швидкість охолодження. Тривалість нагрівання залежить від нагрівального пристрою, за дослідними даними на 1 мм перерізу витрачається: в електричній печі – 1,5...2 хв; в полум'яній печі – 1 хв.; в соляній ванні – 0,5 хв; в свинцевій ванні – 0,1...0,15 хв.

За температурою нагріву розрізняють види загартування:

**Повне, з температурою нагріву на 30...50° С вище критичної точки  $A_3$**

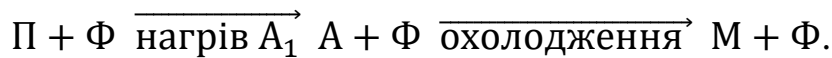
$$T_n = A_3 + (30 \dots 50)^\circ\text{C}.$$

Застосовують її для доевтектоїдних сталей. Зміни структури сталі при нагріванні і охолодженні відбуваються за схемою:



де П – перліт; Ф – ферит; А – аустеніт; М – мартенсит.

**Не повне загартування** доевтектоїдних стелей недопустиме, оскільки в структурі залишається м'який ферит. Зміна структури сталі при нагріванні та охолодженні відбувається по схемі:



**Не повне з температура нагрівання на 30...50° С** вище критичної температури  $A_1$

$$T_n = A_1 + (30 \dots 50)^\circ \text{C}.$$

Застосовується для заевтектоїдних сталей. Зміни структури стали при нагріванні і охолодженні відбуваються за схемою:



Після охолодження в структурі залишається вторинний цементит, який підвищує твердість і зносостійкість ріжучого інструменту. Після повного загартування заевтектоїдної сталі отримують дефектну структуру грубогольчатого мартенситу.

Заевтектоїдні сталі перед загартуванням обов'язково піддають відпалу – сфероїдизації, щоб цементит мав зернисту форму.

Охолодження при загартуванні.

Для отримання необхідної структури виробу охолоджують з різною швидкістю, яка у великій мірі визначається охолоджуючим середовищем, формою виробу і теплопровідністю сталі.

Режим охолодження має виключити виникнення великих гартівних напружень. При високих швидкостях охолодження при загартуванні виникають внутрішні напруження, які можуть призвести до викривлення і розтріскування.

Внутрішні напруження, що врівноважуються в межах макроскопічних частин тіла, називаються напруженнями I роду. Вони сприяють перекручуванню форми (викривленню) і утворенню тріщин при термообробці. Причинами виникнення напружень є:

- відмінність температури по перерізу виробу при охолодженні;
- різночасне протікання фазових перетворень у різних ділянках виробу.

Для попередження утворення тріщин необхідно уникати розтягувальні напруження в поверхневих шарах виробу. На характер розподілу



напружень при загартуванні, крім режиму охолодження, впливає і температура нагрівання під загартування. Перегрів сприяє утворення гартівних тріщин, збільшує деформації.

Як охолоджуюче середовище при загартуванні використовують воду при різних температурах, технічні масла, розчини солей і лугів, розплавлені метали.

Вода має істотний недолік: висока швидкість охолодження в інтервалі мартенситного перетворення призводить до утворення гартівних дефектів. З підвищенням температури води погіршується її гартівна здатність.

Найвищою і рівномірною охолоджувальною здатністю відрізняються холодні 8...12% водні розчини  $NaCl$  і  $NaOH$ . Вони миттєво руйнують парову оболонку і охолодження відбувається більш рівномірно на стадії бульбашкового кипіння.

Збільшення охолоджувальної здатності досягають при використанні струменевого або душевого охолодження, наприклад, при поверхневому загартуванню. Для легованих сталей з високою стійкістю аустеніту використовують мінеральне масло (нафтове). Що забезпечує невелику швидкість охолодження в інтервалі температур мартенситного перетворення. Недоліками мінеральних масел є підвищена займистість, низька охолоджуюча здатність в інтервалі температур перлітного перетворення, висока вартість.

При виборі охолоджуючої середовища необхідно враховувати загартовуваність і прокалюваність сталі.

*Загартовуваність* – здатність сталі набувати високу твердість при загартуванню. Загартовуваність визначається вмістом карбону. Сталі з вмістом карбону менш 0,20% НЕ ГАРТУЮТЬСЯ.

*Прокалюваність* – здатність отримувати загартований шар з мартенситною і троостит-мартенситною структурою, що володіє високою твердістю, на певну глибину виробу.

За глибину загартованої зони приймають відстань від поверхні до середини шару, де в структурі однакові обсяги мартенситу і трооститу.

Чим менше критична швидкість загартування, тим вище прокалюваність. Збільшення зерен підвищує прокалюваність. Якщо швидкість

оохолодження в серцевині виробу перевищує критичну то сталь має наскрізну прокалюваність.

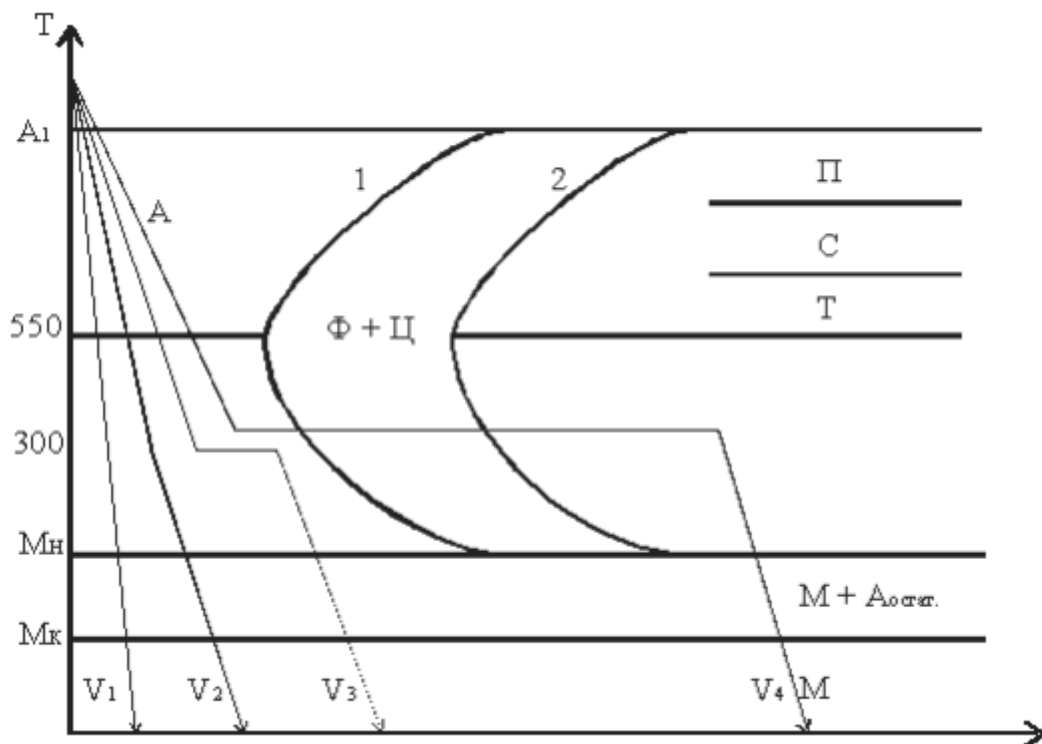
З введенням у сталь легуючих елементів загартовуваність і прокалюваність збільшуються (особливо молібден і бор, кобальт – навпаки).

### Способи загартування

Залежно від форми виробу, марки сталі і потрібного складу властивостей застосовують різні способи охолодження (рис. 8.3).

✓ *Загартування в одному охолоджувачі ( $V_1$ ).*

Нагріту до потрібної температури деталь переносять в охолоджувач і повністю охолоджують. Як охолоджуюче середовище використовують:



**Рисунок 8.3 – Режими загартування виробів:**

$V_1$  – загартування в одному охолоджувачі;  $V_2$  - загартування в двох сферах або переривчаста;  $V_3$  – ступінчасте загартування;  $V_4$  – ізотермічне загартування; А – аустеніт; Ф – ферит; П – перліт; М – мартенсит; Т – троостит; С – сорбіт;  $A_{ост}$  – остаточний аустеніт

- воду – для великих виробів з вуглецевих сталей;
- масло – для невеликих деталей простої форми з вуглецевих сталей і виробів з легованих сталей. Основний недолік – значні гартівні напруження.

✓ *Загартування в двох сферах або переривчаста ( $V_2$ ).*

Нагрітий виріб попередньо охолоджують у більш сильному охолоджувачі (вода) до температури  $\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  і потім переносять у більш м'який охолоджувач (масло).

Переривчастий гарт забезпечує максимальне наближення до оптимального режиму охолодження. Застосовується в основному для загартування інструментів. Недолік: складність визначення моменту перенесення виробу з одного середовища в інше.

✓ *Ступінчасте загартування ( $V_3$ ).*

Нагрітий до необхідної температури виріб поміщають в охолоджуюче середовище, температура якого на  $30\dots 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  вище точки  $M_H$ , і витримують протягом часу, необхідного для вирівнювання температури по всьому перерізу. Час ізотермічної витримки не перевищує періоду стійкості аустеніту при заданій температурі.

Як охолоджуюче середовище використовують розплавлені солі або метали. Після ізотермічної витримки деталь охолоджують з невисокою швидкістю. Спосіб використовується для дрібних і середніх виробів.

✓ *Ізотермічне загартування ( $V_4$ ).*

Відрізняється від ступінчатого загартування тривалістю витримки при температурі вище  $M_H$ , в області проміжного перетворення.

Ізотермічна витримка забезпечує повне перетворення переохолодженого аустеніту в бейніт. Бейніт – це голчатий троостит, структурний складник сталі. При проміжному перетворенні легованих сталей крім бейніту в структурі зберігається аустеніт залишковий. Новоутворена структура характеризується поєднанням високої міцності, пластичності і в'язкості. Разом з цим знижується деформація через наявність гартівних напружень, зменшуються і фазові напруження.

В якості охолоджуючого середовища використовують розплавлені солі і луги. Застосовується для легованих сталей.

✓ *Загартування з самовідпусткою.*

Нагріті вироби поміщають в охолоджувальне середовище і витримуються до неповного охолодження. Після вилучення виробу, його поверхневі шари повторно нагріваються за рахунок внутрішньої теплоти до необхідної температури, тобто здійснюється самовідпустка.

Застосовується для виробів, які повинні поєднувати високу твердість на поверхні і високу в'язкість в серцевині (інструменти ударної дії: молотки, зубила).

**Відпустка.** Відпустка є остаточною термічною обробкою. Мета відпустки – підвищення в'язкості і пластичності, зниження твердості і зменшення внутрішніх напружень загартованих сталей.

З підвищенням температури нагріву міцність зазвичай знижується, а пластичність і в'язкість зростають. Температуру відпустки вибирають, виходячи з необхідної міцності конкретної деталі.

Розрізняють три види відпустки:

1. Низьку відпустку з температурою нагріву  $T_n = 150 \dots 300^\circ \text{C}$ . В результаті його проведення частково знімаються гартівні напруги. Отримують структуру – мартенсит відпустки. Проводять для інструментальних сталей; після гарту струмами високої частоти; після цементації.

2. Середню відпустку з температурою нагріву  $T_n = 300 \dots 450^\circ \text{C}$ . Отримують структуру – троостит відпустки, яка поєднуватиме високу твердість 40...45HRC з хорошою пружністю і в'язкістю. Використовується для виробів типу пружин, ресор.

3. Високу відпустку з температурою нагріву  $T_n = 450 \dots 650^\circ \text{C}$ . Отримують структуру, яка поєднуватиме досить високу твердість і підвищену ударну в'язкість (оптимальне поєднання властивостей) – сорбіт відпустки. Використовується для деталей машин, що піддаються ударним навантаженням.

Комплекс термічної обробки, що включає загартування і високу відпустку, називається поліпшенням.

**Відпускна крихкість.** Зазвичай з підвищенням температури відпустки ударна в'язкість збільшується, а швидкість охолодження не впливає на властивості. Але для деяких сталей спостерігається зниження ударної в'язкості. Цей дефект називається відпускнуою крихкістю.

*Відпускна крихкість I роду* спостерігається при відпустці в діапазоні температур близько до  $300^\circ \text{C}$ . Вона не залежить від швидкості охолодження. Це явище пов'язане з нерівномірністю перетворення відпущеного мартенситу. Процес перебігає швидше поблизу границь зерен у порівнянні з обсягами всередині зерна. Біля границь спостерігається

концентрація напружень, тому границі ніжні. Відпускна крихкість I роду "незворотня", тобто при повторних нагріваннях не спостерігається.

*Відпускна крихкість II роду* спостерігається у легованих сталей при повільному охолодженні після відпустки в інтервалі температур 450...650° С. При високій відпустці по границям зерен відбувається утворення і виділення дисперсних включень, карбідів. Прикордонна зона збагачується легуючими елементами. При подальшому повільному охолодженні відбувається дифузія фосфору до границь зерна. Прикордонні зони збагачуються фосфором, знижуються міцність і ударна в'язкість. Цьому дефекту сприяють елементи хром, манган і фосфор. Зменшують схильність до відпускної крихкості II роду молібден і вольфрам, а також швидке охолодження після відпустки. Відпускна крихкість II роду "оборотна", тобто при повторних нагріваннях і повільному охолодженні тих же сталей в небезпечному інтервалі температур дефект може повторитися.

**УВАГА!** Сталі, що схильні до відпускної крихкості II роду, не можна використовувати для роботи з нагріванням до 650°С без подальшого швидкого охолодження.

## 8.2 Хіміко-термічна обробка конструкційних сталей

Хіміко-термічна обробка (ХТО) – процес зміни хімічного складу, мікроструктури і властивостей поверхневого шару деталі.

Зміна хімічного складу поверхневих шарів досягається в результаті їх взаємодії з навколишнім середовищем (твердої, рідкої, газоподібної, плазмової), в якому відбувається нагрів. В результаті зміни хімічного складу поверхневого шару змінюються його фазовий склад і мікроструктура.

Основними параметрами хіміко-термічної обробки є температура нагріву і тривалість витримки.

В основі будь-якого різновиду хіміко-термічної обробки лежать процеси дисоціації, адсорбції, дифузії.

*Дисоціація* – отримання елемента насичення в активованому атомарному стані в результаті хімічних реакцій, а також випаровування.

*Адсорбція* – захоплення поверхнею деталі атомів насичуючого елемента. Адсорбція – завжди екзотермічний процес, що приводить до зменшення вільної енергії.

*Дифузія* – переміщення адсорбованих атомів у глибину виробу. Для здійснення процесів адсорбції і дифузії необхідно, щоб насичуючий елемент взаємодіяв з основним металом, утворюючи тверді розчини або хімічні сполуки.

Хіміко-термічна обробка є основним способом поверхневого зміцнення деталей. Основними різновидами хіміко-термічної обробки є:

- цементация (насичення поверхневого шару карбоном);
- азотування (насичення поверхневого шару нітрогеном);
- нітроцементация або ціанування (насичення поверхневого шару одночасно карбоном і нітрогеном);
- дифузійна металізація (насичення поверхневого шару різними металами).

*Цементация* – хіміко-термічна обробка, яка полягає в дифузійному насиченні поверхневого шару атомами карбону при нагріванні до температури 900...950° С. Цементация піддають сталі з низьким вмістом карбону (до 0,25%). Нагрівання виробів здійснюють в середовищі, яке легко віддає вуглець (С).

Підібравши режими обробки, поверхневий шар насичують карбоном до необхідної глибини. Глибина цементация ( $h$ ) – відстань від поверхні виробу до середини зони, де в структурі є однакові обсяги фериту і перліту ( $h = 1...2$  мм).

*Ступінь цементация* – середній вміст карбону в поверхневому шарі (зазвичай, не більше 1,2 %). Більш високий вміст карбону призводить до утворення значної кількості цементиту вторинного, який надає шару підвищену крихкість.

На практиці застосовують цементацию в твердому і газовому карбюраторах. Ділянки деталей, які по повинні бути оброблені попередньо, покривають міддю (електролітичним способом) або глиняною сумішшю.

Структура шару наведена на рис. 8.4.

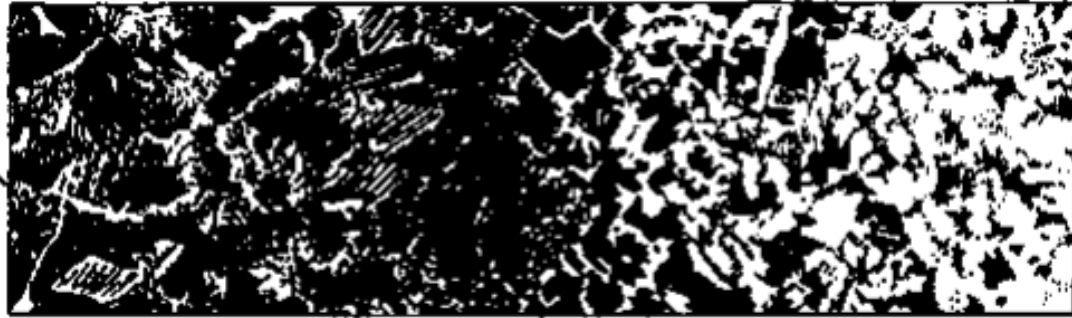


Рисунок 8.4 – Структура цементованого шару

На поверхні виробу утворюється шар заевтектоїдної сталі, що складається з перліту і цементиту. По мірі віддалення від поверхні, вміст карбону знижується і наступна зона складається тільки з перліту. Потім з'являються зерна фериту, їх кількість, по мірі віддалення від поверхні збільшується. І, нарешті, структура стає відповідати вихідному складу.

**Термічна обробка після цементації.** В результаті цементації досягається тільки вигідний розподіл карбону по перерізу. Остаточні властивості цементованої деталі подальша термообробка. Всі вироби піддають гарту з низькою відпусткою. Після гарту цементований виріб набуває високої твердості і зносостійкості, підвищується межа контактної витривалості і межа витривалості при вигині, при збереженні в'язкої серцевини.

Комплекс термічної обробки залежить від матеріалу і призначення виробу.

Якщо сталь дрібнозерниста або вироби невідповідального призначення, то проводять одноразове загартування з температури 820...850° С. При цьому забезпечується отримання високовуглецевого мартенситу в цементованому шарі, а також часткова перекристалізація і подрібнення зерна серцевини.

При газовій цементації вироби після закінчення процесу охолоджують, а потім загартовують (не потрібно повторне нагрівання під загартування).

Для забезпечення особливо високих вимог, що пред'являються до механічних властивостей цементованих деталей, застосовують подвійне загартування. Перше – гарт (або нормалізація) проводиться з температури 880...900° С для виправлення структури серцевини. Друге – гарт

проводиться з температури 760...780° С для отримання дрібногольчастого мартенситу в поверхневому шарі.

Завершальною операцією термічної обробки завжди є низька відпустка, проведена при температурі 150...180° С. В результаті відпустки в поверхневому шарі отримується структура мартенситу відпустки, частково знімаються напруження.

Цементації піддають зубчасті колеса, поршневі кільця, черв'яки, осі, ролики.

**Азотування** – хіміко-термічна обробка, при якій поверхневі шари насичуються нітрогеном.

Вперше азотування здійснив І.П. Чижевський, промислове застосування відбулося в двадцяті роки. При азотуванні збільшуються не тільки твердість і зносостійкість, але також підвищується корозійна стійкість.

При азотуванні вироби завантажують в герметичні печі, куди надходить аміак  $NH_3$  з певною швидкістю. При нагріванні аміак дисоціює за реакцією  $2NH_3 \rightarrow 2N + 3H_2$ . Атомарний нітроген поглинається поверхнею і дифундує вглиб виробу.

Фази, що виходять в азотований шар вуглецевих сталей, які не забезпечують високу твердість, утворюють крихкий шар.

Для азотування використовують сталі, що містять алюміній, молібден, хром, титан. Нітриди цих елементів мають високу твердість і термічну стійкість.

Типові сталі для азотування – 38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2НЗЮ.

Глибина і поверхнева твердість азотованого шару залежать від ряду факторів: температура азотування, тривалість азотування і хімічний склад сталі.

Залежно від умов роботи деталей розрізняють азотування:

- для підвищення поверхневої твердості і зносостійкості;
- для підвищення корозійної стійкості (антикорозійне азотування).

У першому випадку процес проводять при температурі 500...560°С протягом 24...90 годин, оскільки швидкість азотування становить 0,01 мм/год.

Вміст нітрогену в поверхневому шарі становить 10...12%, товщина шару ( $h$ ) – 0,3...0,6 мм. На поверхні твердість близько 1000 НV.

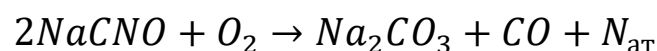


Охолодження проводять разом з піччю в потоці аміаку. Значне скорочення часу азотування досягається при іонному азотуванні, коли між катодом (деталлю) і анодом (контейнерної установкою) збуджується тліючий розряд. Відбувається іонізація нітрогеновмісного газу, іони бомбардуючи поверхню катода, нагрівають його до температури насичення. Катодне розпилення відбувається протягом 5...60 хв при напрузі 1100...1400 В та тиску 0,1...0,2 мм рт. ст., робоча напруга 400...1100 В, тривалість процесу до 24 годин.

Антикорозійне азотування виконують і для легованих, і для вуглецевих сталей. Температура проведення азотування – 650...700°C, тривалість процесу – 10 годин. На поверхні утворюється шар – фази товщиною 0,01...0,03 мм, які мають високу стійкість проти корозії. Фаза – твердий розчин на основі ферум(II) нітриду  $Fe_2N$ , має гексагональну решітку.

Азотування проводять на готових виробах, які пройшли остаточну механічну і термічну обробку (гартування з високою відпусткою). Після азотування в серцевині виробу зберігається структура сорбіту, яка забезпечує підвищену міцність і в'язкість.

**Ціанування** – хіміко-термічна обробка, при якій поверхня насичується одночасно карбоном і нітрогеном. Здійснюється у ваннах з розплавленими ціанідними солями, наприклад  $NaCN$  з домішками солей  $NaCl$ ,  $BaCl$  та ін. При окисленні натрій ціаніду утворюється атомарний нітроген і карбон(II) оксид:



Глибина шару і концентрація в ньому карбону і нітрогену залежать від температури процесу і його тривалості. Ціанований шар має високу твердість 58...62 HRC і добре чинить опір зносу. Підвищуються втомна міцність і корозійна стійкість. Тривалість процесу 0,5...2 години.

**Високотемпературне ціанування** – проводиться при температурі 800...950 °C, супроводжується переважним насиченням сталі карбоном до 0,6...1,2%, (рідинна цементация). Вміст нітрогену в ціанованому шарі 0,2...0,6%, товщина шару 0,15...2 мм. Після ціанування виробу піддаються загартуванню і низькій відпустці. Остаточна структура ціанованого шару складається з тонкого шару карбонітридов  $Fe_2(C, N)$ , а потім з

азотистого мартенситу. У порівнянні з цементацією високотемпературне ціанування відбувається з більшою швидкістю, призводить до меншої деформації деталей, забезпечує більшу твердість і опір зносу.

**Низькотемпературне ціанування** – здійснюється при температурі 540...600 °С, супроводжується переважним насиченням сталі нітрогеном. Проводиться для інструментів зі швидкорізальних, високохромистих сталей, є остаточною обробкою.

Основним недоліком ціанування є отруйність ціанідних солей.

**Нітроцементация** – газове ціанування, здійснюється в газових сумішах з цементуючого газу і дисоційованого аміаку.

Склад газу та температура процесу визначають співвідношення карбону і нітрогену в ціанованому шарі. Товщина шару залежить від температури і тривалості обробки.

Високотемпературна нітроцементация проводиться при температурі 830...950 °С, для машинобудівних деталей з вуглецевих і малолегованих сталей при підвищеному вмісті аміаку.

Завершальною термічною обробкою є гартування з низькою відпусткою. Твердість досягає 56...62 HRC.

Низькотемпературній нітроцементации піддають інструмент зі швидкорізальної сталі після термічної обробки (загартування і відпустки).

Процес проводять при температурі 530...570°С, протягом 1,5...3 годин. Утворюється поверхневий шар товщиною 0,02...0,004 мм з твердістю 900...1200 HV. Нітроцементация характеризується безпекою в роботі, низькою вартістю.

**Дифузійна металізація** – хіміко-термічна обробка, при якій поверхню сталевих виробів насичується різними елементами: алюмінієм, хромом, силіцієм, бором та ін.

При насиченні хромом процес називають хромуванням, алюмінієм – алітуванням, силіцієм – силіціювання, бором – борування.

Дифузійну металізацію можна проводити в твердих, рідких і газоподібних середовищах.

При твердій дифузійній металізації металізатором є феросплав з додаванням амоній хлориду ( $NH_4Cl$ ). В результаті реакції металізатора з  $HCl$  або  $Cl_2$  утворюється сполука хлору з металом ( $AlCl_3$ ,  $CrCl_2$ ,  $SiCl_4$ ), які при контакті з поверхнею дисоціюють з утворенням вільних атомів.

Рідка дифузійна металізація виконується шляхом зануренням деталі в розплавлений метал (наприклад, алюміній).

Газова дифузійна металізація виконується в газових середовищах, якими є хлориди різних металів. Дифузія металів протікає дуже повільно, оскільки утворюються розчини заміщення, тому при однакових температурах дифузійні шари в десятки і сотні разів тонше, ніж при цементації.

Дифузійна металізація – процес дорогий, здійснюється при високих температурах (1000...1200 °С) протягом тривалого часу.

Одною з основних властивостей металізованих поверхонь є жаростійкість, тому металізації піддають деталі, що працюють при температурі 1000...1200 °С та виготовлені з простих вуглецевих сталей.

Виключно високою твердістю (2000 HV) і високим опором зносу через утворення боридів заліза ( $FeB$ ,  $FeB_2$ ) характеризуються боровані шари, але ці шари дуже тендітні

### Контрольні запитання

1. Які лінії на діаграмі стану “залізо-вуглець” позначаються як  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $A_{cm}$  ?
2. Які є види термічної обробки для сталей?
3. Які види відпалу сталей Ви знаєте?
4. З якою метою призначають повний відпал доевтектоїдних сталей? До яких температур нагрівають ці сталі при повному відпалі?
5. Який існує зв'язок діаграми стану з можливістю проведення термічної обробки?
6. Опишіть основні види термічної обробки сталі та їх призначення.
7. Чотири основних перетворення в сталях при нагріванні та охолодженні.
8. Опишіть діаграму ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту.
9. Опишіть будову і властивості продуктів розпаду аустеніту.
10. Опишіть мартенситну діаграму. Що таке мартенсит?
11. Опишіть відпали I-го та II-го роду та їх різновиди.
12. Яка мета гартування, вибір температури нагрівання для гартування?

13. Які гартувальні середовища Ви знаєте?
14. Опишіть способи гартування сталі, їх переваги й недоліки та області застосування.
15. Опишіть види і призначення відпуску сталі.
16. Що таке хіміко-термічна обробка?
17. Опишіть основні види хіміко-термічної обробки, їх недоліки та переваги.

## ЧАСТИНА II

# ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Розробка нових матеріалів та безперервне вдосконалення вже відомих відбуваються одночасно із загальним розвитком електричної інженерії та розширенням вимог промисловості до якості матеріалів.

Першим практичним застосуванням матеріалу для створення порівняно потужного джерела електричної енергії можна вважати виготовлення великої батареї, електрорушійна сила якої створювалася за рахунок контактної різниці потенціалів між дисками з різних металів. Ця батарея була створена в 1802 академіком В.В. Петровим. У ній використовувалося 8400 мідних та цинкових дисків із прокладками з паперу, просоченого електролітом. За допомогою цієї батареї вперше у світі було отримано електричну дугу.

У 1832 р. у своїх дослідях зі створення електромагнітного телеграфу вчений П.Л. Шиллінг використовував як ізоляцію плівку, просочену воском, невулканізований каучук і шовкову пряжу.

У 1872 р. винахідник А. Н. Лодигін створив першу вугільну лампу розжарювання, а винахідник Thomas Alva Edison у 1879 р. розробив один із перших комерційно успішних варіантів електричної лампи розжарювання, що поклало початок широкому застосуванню електричного освітлення.

У цих винаходах були використані провідники, магнітні матеріали та електрична ізоляція. По мірі розвитку електротехніки все більшого значення набував правильний вибір матеріалів для успішного вирішення інженерних завдань.

Швидко зростання промисловості у всіх її численних галузях супроводжується безперервним збільшенням номенклатури застосовуваних матеріалів, вдосконаленням технології їх виготовлення та все більш широким використанням нових видів, що раніше не застосовувалися в техніці.

Електротехнічні матеріали можна досконально вивчити за умови повного розуміння факторів впливу на них різноманітних енергетичних полів (електричного, магнітного, теплового та інш.).

## РОЗДІЛ 9

### ОСНОВНІ ЯВИЩА В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ ТА ЇХ ЗАКОНОМІРНОСТІ

Для вивчення основних властивостей електротехнічних матеріалів необхідно, перш за все, усвідомити силовий характер впливу на ці матеріали електричного і магнітного полів та сформулювати основні закономірності процесів, які пов'язані з цими полями.

#### 9.1 Електричне поле

Якщо на певній відстані від заряджених тіл розміщений пробний заряд  $q$ , то на цей заряд діють сили. Простір існування цих сил називають електричним полем. Сила та енергія електричного поля зазвичай використовуються для накопичення та переміщення електричних зарядів.

#### Модель атома

Спрощена модель атома деякої речовини наведена на рисунку 9.1.

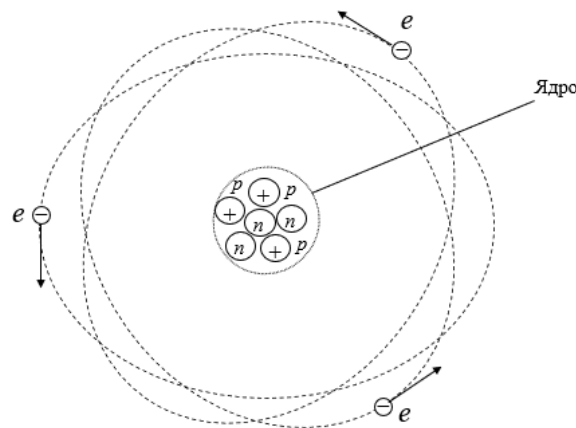


Рисунок 9.1 – Спрощена модель атома

За цією моделлю атом містить пов'язані між собою заряджені частинки – негативно заряджені електрони  $e$  масою  $9,11 \cdot 10^{-31}$  кг і позитивно заряджене ядро (рис. 9.1). Електрони притягуються силами Кулона до ядра і дуже швидко обертаються навколо нього. Ядро складається з нуклонів масою приблизно  $1,673 \cdot 10^{-27}$  кг – з позитивно заряджених

протонів  $p$  і незаряджених (нейтральних) нейтронів  $n$ . Маса електрона в 1836 разів менша маси нуклона. Тому, маса атома, а значить і його енергія згідно з формулою Ейнштейна, сконцентрована в його ядрі. Числові значення зарядів електрона і протона однакові та становлять  $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл. Діаметр атома дорівнює  $\sim 2 \cdot 10^{-10}$  м, а діаметр його ядра в сотні тисяч разів менший – близько  $10^{-15}$  м. Найбільш важливі властивості хімічного елементу визначаються кількістю протонів у складі ядра його атома. Кількість нейтронів в ядрі може змінюватись, створюючи відповідні ізотопи хімічного елемента, у тому числі нестабільні (радіоактивні) ізотопи.

### **Електричні заряди**

У нейтральному стані загальна кількість електронів в атомі (рис. 9.1) або в їх об'єднанні в молекули чи домени дорівнює загальній кількості протонів. Тому нейтральні атоми чи молекули з нульовим сумарним зарядом практично не взаємодіють з віддаленими зарядженими тілами. Деяка взаємодія може виникати, коли усереднений центр електронів не співпадає з усередненим центром протонів, тобто коли молекула має дипольну будову.

Якщо кількість електронів відрізняється від кількості протонів, то така молекула втрачає свою електричну нейтральність і стає іоном. Таке може бути внаслідок тимчасової втрати молекулою електрону під впливом зовнішніх факторів (позитивний іон) або приєднання зайвого електрону (негативний іон).

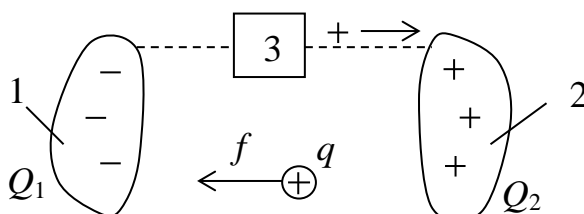
Заряд тіла  $Q$  оцінюється в кулонах (Кл). Якщо заряд  $Q$  оцінювати кількістю елементарних зарядів  $q_e = 1,602 \cdot 10^{20}$  Кл (електронів або протонів), то заряд в один кулон складається відповідно з  $6,24 \cdot 10^{20}$  елементарних зарядів.

### **Силевий характер електричного поля**

#### **Сила Кулона**

Головною властивістю електричного поля є сила взаємного притягування і відштовхування між, відповідно, різнойменно й однойменно

зарядженими тілами. Ця сила називається силою Кулона. Наявність електричного поля визначається силою  $f$ , яка діє на пробний заряд  $q$  з боку одного або декількох заряджених тіл (рис. 9.2). Сила Кулона здатна переміщувати у просторі вільні заряди  $q$  або зміщувати заряди  $q$  на деяку відстань, якщо вони зв'язані.



**Рисунок 9.2 – Силовий вплив електричного поля**

### Напруженість електричного поля

Кількісною характеристикою силового впливу електричного поля в кожній його точці на пробний заряд  $q$  є напруженість поля  $E$  як векторна величина:

$$E = \frac{f}{q}, \quad (9.1)$$

де  $f$  – сила дії електричного поля в ньютонках (Н) на пробний заряд;  $q$  – величина пробного точкового електричного заряду в кулонах (Кл).

### Передача силового впливу електричного поля

Якщо заряд  $Q$  тіла або його положення у просторі змінюється в часі  $t$ , то сила  $f$  та напруженість  $E$  в місці знаходження пробного заряду  $q$  теж змінюються, але з деякою затримкою в часі  $\Delta t$ . Ця затримка обумовлена відстанню  $l$  між електричним зарядом  $Q$  тіла і пробним зарядом  $q$  та кінцевою швидкістю передачі силової взаємодії, яка не перевищує швидкість світла  $c$ :

$$\Delta t \geq \frac{l}{c}. \quad (9.2)$$

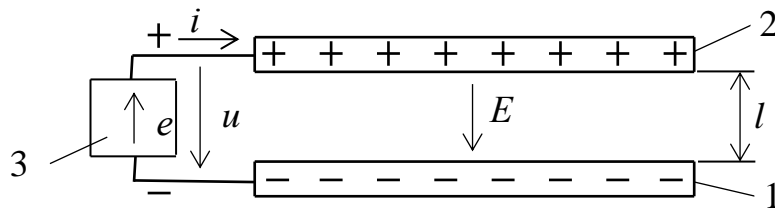
Затримкою в часі  $\Delta t$  зазвичай нехтують. Але у випадках великої відстані  $l$ , дуже швидких змін або великої частоти змін заряду  $Q$  врахування затримки  $\Delta t$  може стати принципово важливим.



## Однорідне електричне поле

### Створення однорідного електричного поля

В однорідному електричному полі напруженість поля  $E$  однакова в будь-якій його точці. Таке поле можна створити двома різнойменно зарядженими плоскими і паралельними між собою металевими пластинами чи обкладинками 1 і 2 (рис. 9.3). Обкладинки 1 і 2 можуть накопичувати (конденсувати) заряди завдяки їх підключенню до електричного джерела 3 з електрорушійною силою  $e$  і електричною напругою  $u$  на виході джерела. Електрорушійна сила  $e$  або напруга  $u$  можуть бути постійними або змінними в часі.



**Рисунок 9.3 – Однорідне електричне поле плоского конденсатора**

### Напруженість однорідного електричного поля

Числове значення напруженості  $E$  однорідного електричного поля плоского конденсатора (рис. 9.3) можна визначити за формулою:

$$E = \frac{u}{l}, \text{ В/м}, \quad (9.3)$$

де  $u$  – напруга електричного джерела (різниця потенціалів) у вольтах, завдяки якому на пластинах 1 і 2 може накопичуватись електричний заряд  $Q$  (напруга в один вольт відповідає енергії в один джоуль, яку потрібно витратити для переміщення у просторі заряду в один кулон ( $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}$ );  $l$  – відстань між металевими пластинами 1 і 2 в метрах (м).

### Ємність плоского конденсатора

Ємність конденсатора  $C$  характеризує здатність конденсатора накопичувати заряди  $Q$  і вимірюється фарадами (Ф). Один фарад відповідає заряду конденсатора в один кулон, який створює між обкладинками конденсатора електричну напругу в один вольт ( $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл}/1 \text{ В}$ ). Ємність плоского конденсатора пропорційна площі  $S$  його обкладинок, збільшу-

ється у міру посилення взаємодії між його обкладинками, а значить обертено пропорційно відстані  $l$  (рис. 9.3) і залежить від властивостей середовища:

$$C = \frac{Q}{u} = \frac{S\varepsilon_a}{l}, \quad (9.4)$$

де  $\varepsilon_a = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність середовища між обкладинками конденсатора, Ф/м;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютна діелектрична проникність вакууму (повітря має практично таке ж значення абсолютної діелектричної проникності);  $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_0}$  – відносна діелектрична проникність середовища між обкладинками конденсатора.

Елементарні заряди можуть накопичуватись (конденсуватись) не тільки внаслідок дії напруги  $u$  електричного джерела  $\mathcal{E}$ , але й під впливом інших явищ, наприклад, внаслідок тертя діелектричних матеріалів. У таких випадках напругу  $u$  слід розглядати вже як наслідок процесу накопичення зарядів.

### Енергія електричного поля

#### Енергія електричного поля двох заряджених тіл

Система заряджених тіл завдяки силовому характеру електричного поля цієї системи здатна виконувати певну роботу на переміщення зарядів у просторі (на створення електричного струму). Тому вона має енергію  $W_e$ , яка називається енергією електричного поля і вимірюється у джоулях (Дж). Зокрема, у випадку системи двох заряджених тіл 1 і 2 (рис. 9.2 або 9.3) цю енергію можна визначити, як:

$$W_e = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Qu}{2} = \frac{Cu^2}{2}, \quad (9.5)$$

де  $u = \frac{q}{C}$  – миттєве значення електричної напруги між обкладинками конденсатора, яка зменшується в процесі його розрядження від початкового значення  $u = \frac{Q}{C}$  до нуля;  $q$  – миттєве значення накопиченого заряду, що зменшується в процесі розрядження конденсатора від початкового значення  $Q$  до нуля.

### Об'ємна густина енергії електричного поля

При аналізі електричного поля часто користуються об'ємною густиною енергії електричного поля  $w_e$  (Дж/м<sup>3</sup>). Величину  $w_e$  для плоского конденсатора можна визначити за такою формулою:

$$w_e = \frac{W_e}{V} = \frac{1}{V} \frac{Cu^2}{2} = \frac{1}{V} \frac{\epsilon_a S (El)^2}{2l} = \frac{\epsilon_a E^2}{2}, \quad (9.6)$$

де  $V = S \cdot l$  – об'єм простору, де існує однорідне поле плоского конденсатора;  $E = \frac{u}{l}$  – напруженість електричного поля, В/м (9.3).

## **9.2 Електричний струм**

Існує велике розмаїття електричних зарядів та їх переміщення – обертання електронів навколо своїх осей та ядра атому (рис. 9.1), переміщення зарядів при радіоактивному розпаді ядра, теплові коливання зарядів, переміщення вільних зарядів під впливом електрорушійних сил, зміщення зв'язаних зарядів, інерційне переміщення звільнених зарядів. Кожен з цих видів переміщення при певних умовах може вважатись упорядкованим і називатись *електричним струмом*.

### Упорядкований рух електричних зарядів

У більшості випадків в якості упорядкованого переміщення зарядів (електричного струму) розглядається переміщення в провідниках електричного струму вільних зарядів  $q$  у замкненому електричному колі між пластинами 1 і 2 під дією електрорушійної сили  $e$  електричного джерела 3 (рис. 9.2). Електричний струм зазвичай створюють електрони, які по чергово залишають свої атоми і переходять на звільнені місця сусідніх атомів. Якщо матеріал кола має рідку чи газоподібну структуру, то у створенні електричного струму приймають участь також позитивні іони. Переміщення іонів по суті означає переміщення речовини такого провідника, причому іони і електрони переміщуються в протилежні сторони. Якщо ж матеріал має тверду структуру, то переміщення іонів у цьому матеріалі дуже обмежене.

За позитивний напрям електричного струму прийнято напрям переміщення позитивних зарядів. Якщо ж носіями струму є негативні заряди (електрони), що зазвичай буває, то напрям переміщення електронів протилежний напрямку електричного струму. Кількісну характеристику електричного струму прийнято визначати як величину зарядів  $q$ , які пройшли в певному напрямку через поперечний перетин провідника електричного струму за одиницю часу  $t$ , тобто швидкість зміни зарядів у часі [3]:

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad (9.8)$$

де  $i$  – миттєве значення електричного струму в амперах (А),  $1\text{А}=1\text{Кл}/1\text{с}$ ;  $q$  – миттєве значення електричного заряду в кулонах (Кл).

### Закон Ома

Процесу переміщення електричних зарядів, тобто електричному струму, в електропровідному середовищі чиниться опір. У найбільш простих випадках, коли опір електричному струму створюють лише мікро-частинки середовища, виникає теплове поле з енергією  $W_T$ , яка розсіюється у просторі. В таких випадках закономірність цього процесу можна описувати законом Ома в найбільш простій його формі [4]:

$$i = \frac{u}{R}, \quad (9.9)$$

де  $i$  – електричний струм окремої ділянки електричного кола, А (9.8);  $u$  – електрична напруга чи різниця електричних потенціалів на окремій ділянці електричного кола у вольтах (В);  $R$  – активний опір електричному струму з боку цієї ділянки в омах (Ом), який впливає на процес виділення теплової енергії.

Електричний струм  $i$  може бути не тільки наслідком дії електрорушійної сили  $e$  чи електричної напруги  $u$  (9.9), але й причиною виникнення напруги, ( $u = i \cdot R$ ), а також фактором впливу на електричний опір ( $R = \frac{u}{i}$ ). Величина  $R$  в свою чергу може розглядатись як процес, що заважає переміщенню зарядів, як кількісна характеристика цього процесу, а також як елемент електричної схеми.

### Теплова енергія електричного струму

Теплова енергія  $W_T$ , яка протягом деякого часу  $t$  виділяється внаслідок подолання електричним струмом  $i$  активного опору  $R$  і потім передається в навколишнє середовище, визначається за формулою [4]

$$W_T = I^2 R t. \quad (9.10)$$

### Діюче значення електричного струму

Якщо електричний струм  $i$  змінюється в часі за періодичним (синусоїдальним) законом  $i(t) = I_m \sin \omega t$ , то в якості електричного струму  $I$  у формулі (9.10) зазвичай діюче значення електричного струму:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (9.11)$$

де  $I_m$  – амплітуда синусоїдального струму, А;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота зміни електричного струму, 1/с;  $f = \frac{1}{T}$  – циклічна частота зміни електричного струму в герцах (Гц);  $T$  – тривалість циклу зміни електричного струму, с.

Діюче значення напруги  $u$ , яка змінюється за синусоїдальним законом  $u = U_m \sin \omega t$ , можна розрахувати за формулою, аналогічною формулі (9.11).

### Поняття реактивного опору

У ситуаціях, коли енергія електричного або магнітного поля змінюється в часі, відбувається реакція на цю зміну у формі реактивного падіння напруги і відповідного реактивного опору електричному струму без виділення теплової енергії [3, 4]. Наприклад, якщо в електричному колі змінного синусоїдального струму є ділянка у вигляді конденсатора ємністю  $C$ , то падіння напруги на цій ділянці згідно з формулою (9.4) і (9.8) можна записати так:

$$u_c = I_m X_c \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = U_{cm} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (9.12)$$

де  $I_m$  – амплітуда зарядно-розрядного струму конденсатора, А;  $X_c = \frac{1}{\omega C}$  – реактивний опір конденсатора (ємнісний опір) в омах (Ом);

$U_m = I_m \cdot X_c$  – амплітуда електричної напруги на обкладинках конденсатора, В;  $\frac{\pi}{2}$  – фазовий зсув напруги  $u_c$  відносно струму  $i$  (знак “мінус” означає відставання  $u_c$  від  $i$  за фазою на кут  $\frac{\pi}{2}$ ).

### 9.3 Магнітне поле

Якщо неподалік рухомих електричних зарядів або електричного струму розміщена стрілка магнітного компаса, то на неї діють сили, що підтверджується відповідним поворотом магнітної стрілки. Ці сили називають електродинамічними або магнітними, а простір їх існування – магнітним полем. Магнітні сили впливають не тільки на магнітну стрілку, але й на будь-які рухомі заряди. Магнітне поле зображують замкненими магнітними силовими лініями. Силовий характер магнітного поля часто використовується на практиці – перш за все в електричних машинах [1, 2, 3].

#### Магнітна індукція

Магнітна індукція  $B$  визначає силовий характер магнітного поля навколо рухомих зарядів або навколо провідника 1 з електричним струмом  $i_1$ . Магнітна індукція  $B$  є векторною величиною і спричиняє силову дію  $f$  на рухомий заряд  $q$ . Напрямок вектору магнітної індукції  $B$  в деякій точці замкненого контуру 2 визначається за так званим правилом правоходного гвинта чи буравчика – перпендикулярно вектору електричного струму  $i_1$  в напрямку провертання гвинта, зорієнтованого за напрямком електричного струму  $i_1$  (рис. 9.4)

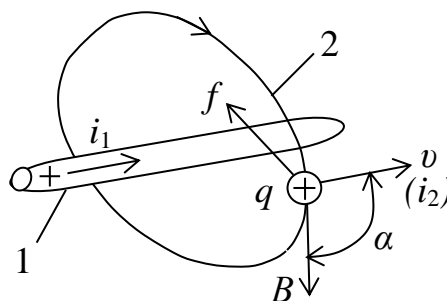


Рисунок 9.4 – Визначення напрямку векторів магнітної індукції  $B$  та сили  $f$

### Сила Лоренца

Силу дії  $f$  на рухомий точковий заряд  $q$  з боку магнітного поля називають силою Лоренца, яка діє додатково до сили Кулона (рис. 9.4):

$$f = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (9.13)$$

де  $v$  – швидкість переміщення точкового заряду  $q$ ;  $B$  – числове значення магнітної індукції в теслах (Тл) як наслідок струму  $i_1$ ;  $\alpha$  – кут між вектором магнітної індукції  $B$  і вектором швидкості  $v$  (рис.9.4).

### Сила Ампера

Замість одного заряду  $q$  може бути безліч таких зарядів, що рухаються у тому ж напрямку. Якщо цей напрям задається іншим провідником струму  $i_2$ , то краще користуватись поняттям сили Ампера:

$$f = i_2 \cdot l_2 \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (9.14)$$

де  $l_2$  – довжина частини іншого провідника зі струмом  $i_2$ , яка знаходиться у магнітному полі з індукцією  $B$ ;  $\alpha$  – кут між вектором індукції  $B$  і напрямом електричного струму  $i_2$ .

Напрямок дії сили  $f$  на рухомі заряди чи провідник зі струмом визначають за так званим правилом лівої руки – напрям дії сили  $f$  покаже відставлений великий палець лівої руки, якщо вектор магнітної індукції  $B$  входить в долонь, а інші випрямлені пальці лівої руки напрям струму  $i_2$ .

Зазвичай вважається, що сила Ампера діє на провідник зі струмом, який розміщений в магнітному полі. Але це має місце лише в однорідному магнітному полі. Насправді ж сила Ампера протидіє причині зміни магнітної енергії у просторі, і тому, в деяких випадках, сила Ампера майже не діє на такий провідник. Зокрема, в електричних двигунах і генераторах, де магнітне поле створюється у магнітопроводі і повітряному зазорі з різними властивостями, сила Ампера діє в основному на магнітопровід, в якому нерухомо розміщені електричні провідники.

### Магнітний потік

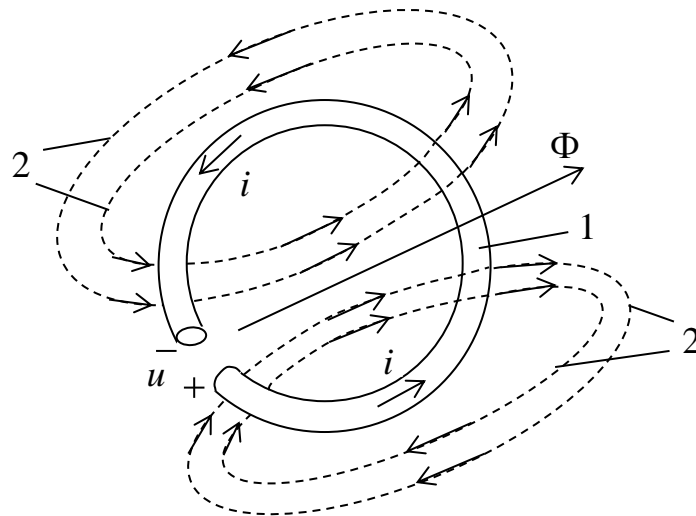
В якості інтегральної характеристики магнітних силових ліній ви-

користовується магнітний потік  $\Phi$  у веберах (Вб), який пронизує поверхню з обмеженою площею  $S$ . Якщо всі елементи  $dS$  цієї поверхні перпендикулярні вектору магнітної індукції  $B$ , то магнітний потік:

$$\Phi = \int_S B dS, \quad (9.15)$$

де  $B$  – магнітна індукція в деякій точці магнітного поля в теслах (Тл);  $S$  – загальна площа поверхні, яку пронизує магнітний потік  $\Phi$ .

Поверхню  $S$  бажано вибирати так, щоб врахувати максимальну кількість магнітних силових ліній 2. Цю умову можна виконати, якщо провідник 1 зі струмом  $i$  розглядати як частину замкненого електричного кола у вигляді замкненого витка провідника (рис. 9.5). Тому поверхня  $S$  повинна бути обмежена витком провідника 1 з електричним струмом  $i$ . За таких умов прийнято вважати, що магнітний потік  $\Phi$  пронизує виток провідника з електричним струмом  $i$  або зчеплюється з цим витком (рис. 9.5).



**Рисунок 9.5 – Магнітний потік одного витка провідника зі струмом**

#### Залежність магнітного потоку від струму

Залежність магнітного потоку  $\Phi_1$  від електричного струму  $i$  у разі використання одного витка провідника зі струмом (рис.9.5):

$$\Phi_1 = L_1 \cdot i, \quad (9.16)$$

де  $L_1$  – індуктивність одного витка провідника в Генрі (Гн)



### Потокозчеплення. Індуктивність котушки

Якщо магнітний потік  $\Phi$  створюється декількома витками провідника, то такий провідник називається  $N$ -витковою котушкою індуктивності. Магнітний потік  $\Phi$  такої котушки відповідно збільшується майже в  $N$  разів відносно  $\Phi_1$  і до того ж зчеплюється з більшою кількістю витків котушки. В таких випадках краще користуватись терміном потокозчеплення  $\Psi$ , яке майже в  $N$  разів більше магнітного потоку  $\Phi_1$  одного витка провідника з тим самим струмом  $i$ :

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i \approx N \cdot \Phi_1 = L \cdot i, \quad (9.17)$$

де  $\Psi$  – зчеплення потоку  $\Phi$  з  $N$  витками котушки (потокозчеплення), Вб;  $L = N^2 L_1$  – індуктивність  $N$ -виткової котушки, яка більше відносно  $L_1$  в  $N^2$  разів через збільшення в  $N$  разів потоку  $\Phi$  відносно  $\Phi_1$  і через збільшення в такій самій мірі кількості зчеплених з потоком  $\Phi$  витків (9.24).

### Напруженість магнітного поля

Електричні струми і магнітне поле як наслідок цих струмів зазвичай діють у різних середовищах з принципово різними властивостями. Тому виникає потреба у використанні зручного посередника між електричними струмами та магнітною індукцією. Таким посередником є напруженість  $H$  магнітного поля, яка розглядається одночасно як наслідок дії електричних струмів і як причина магнітної індукції  $B$ , яка співпадає за напрямом з напруженістю  $H$  в кожній точці магнітного поля. Напруженість  $H$  діє в магнітному середовищі і не залежить від властивостей цього середовища, де діє магнітне поле. Такий підхід дозволяє скористатись аналогією з електричними колами і спростити таким чином аналіз магнітних кіл, з вектором магнітної індукції  $B$ .

### Закон повного струму

Зв'язок між напруженістю  $H$  магнітного поля та електричними струмами визначається законом повного струму. За цим законом ліній-

ний інтеграл по замкненому контуру 2 (рис. 9.4 або рис. 9.5) від напруженості магнітного поля  $H$  дорівнює повному струму, що проходить через перетин, який обмежений цим контуром:

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_k i_k = F, \quad (9.18)$$

де  $\vec{H} \cdot d\vec{l}$  – скалярний добуток векторів напруженості магнітного поля і елементарної ділянки замкненого контуру 2 (рис.9.4);  $l$  – довжина замкненого контуру 2;  $\sum_k i_k$  – алгебраїчна сума струмів, які охоплюються замкненим контуром 2 (цю суму називають намагнічуючою або магніто-рушійною силою  $F$  в амперах).

На практиці часто виникає ситуація, коли напруженість магнітного поля практично однакова за своїм числовим значенням у всіх точках замкненого контуру 2 і співпадає за напрямом з елементарними ділянками цього контуру. В таких ситуаціях формула (9.18) закону повного струму спрощується:

$$H \cdot l \approx \sum_k i_k = F. \quad (9.19)$$

#### Залежність магнітної індукції від магнітної напруженості

Залежність магнітної індукції  $B$  від напруженості  $H$  магнітного поля визначається властивостями середовища, в якому створюється магнітне поле. В найпростішому випадку, коли середовище ізотропне за своїми магнітними властивостями, а швидкість зміни напруженості магнітного поля  $H$  незначна, залежність  $B = f(H)$  можна записати так [5...7]:

$$B = \mu_a \cdot H, \quad (9.20)$$

де  $\mu_a = \mu_r \cdot \mu_0$  – абсолютна магнітна проникність середовища, в якому створюється магнітне поле, Гн/м;  $\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – абсолютна магнітна проникність вакууму (повітря має практично таке саме, що й значення абсолютної магнітної проникності);  $\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0}$  – відносна магнітна проникність середовища;  $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютна діелектрична проникність вакууму;  $c \approx 300 \cdot 10^9$  м/с – швидкість світла у вакуумі.

Абсолютна магнітна проникність  $\mu_a$  середовища часто є функцією магнітної індукції, і тому залежність (9.20) в загальному випадку – є нелінійною.

## Електромагнітна індукція

### Закон Фарадея

Електромагнітна індукція – це явище виникнення електрорушійної сили  $e$  (ЕРС) в замкненому електропровідному контурі внаслідок зміни у часі магнітного потоку  $\Phi$ , що пронизує цей контур. Закономірність цього явища називається законом електромагнітної індукції або законом Фарадея:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (9.21)$$

Внаслідок дії ЕРС ( $e$ ) в замкненому електропровідному контурі виникає електричний струм  $i$ , який, називають індукційним струмом. Цей струм умовно можна назвати вторинним струмом  $i_2$ , якщо первинним вважати електричний струм  $i_1$  як причину магнітного потоку  $\Phi$ . Залежність магнітного потоку  $\Phi_1$  від первинного струму  $i_1$  визначена наведеними вище формулами (9.16), (9.18) і (9.20). Таким чином, закон Фарадея визначає магнітний взаємозв'язок між первинним та вторинним електричними струмами. При цьому електричний (гальванічний) зв'язок чи контакт між цими струмами може не існувати. Ця особливість використовується в електричних та електромагнітних пристроях.

Знак «мінус» у формулі (9.21) означає, що індукційний струм протидіє причині його виникнення, тобто протидіє змінам магнітного потоку  $\Phi$ .

### Реактивний опір котушки індуктивності

Якщо змінний магнітний потік  $\Phi_1(t)$  спричиняється змінним струмом  $i(t)$  в одному витку провідника, то ця протидія проявляється виникненням падіння напруги  $u_L$  в цьому провіднику:

$$u_{L1} = -e = \frac{d\Phi_1}{dt} = \frac{d(L_1 i)}{dt} = L_1 \frac{di}{dt}, \quad (9.22)$$

де  $e$  – електрорушійна сила (ЕРС) самоіндукції, (В);  $L_1$  – індуктивність одного витка провідника, Гн;  $\Phi_1 = L_1 i$  – магнітний потік одного витка провідника змінного струму, (Вб).

Падіння напруги  $u_L$  на  $N$ -витковій котушці з тим самим струмом  $i$  збільшиться в  $N^2$  разів порівняно з одновитковою котушкою

$$u_L = -e = \frac{d\psi}{dt} \approx N \frac{d\Phi}{dt} \approx N \frac{d(N\Phi_1)}{dt} \approx N^2 \frac{d(L_1 i)}{dt} = L \frac{di}{dt}, \quad (9.23)$$

де  $\Psi \approx N \cdot \Phi$  – потокозчеплення магнітного потоку  $\Phi$  з  $N$  витками котушки, Вб;  $\Phi \approx N \cdot \Phi_1$  – змінний магнітний потік  $N$ -виткової котушки, який збільшився майже в  $N$  разів відносно до потоку  $\Phi_1$  одного витка провідника;  $L \approx N^2 \cdot L_1$  – індуктивність  $N$ -виткової котушки.

Зокрема, якщо електричний струм змінюється в часі за періодичним (синусоїдальним) законом  $i(t) = I_m \sin \omega t$ , то формула (9.23) перетвориться до виду

$$u_L = I_m X_L \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_{Lm} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right), \quad (9.24)$$

де  $I_m$  – амплітуда електричного струму в котушці індуктивності, А;  $X_L = \omega L$  – реактивний опір котушки індуктивності, Ом;  $U_{Lm} = I_m \cdot X_L$  – амплітуда електричної напруги на котушці індуктивності, В;  $\frac{\pi}{2}$  – фазове випередження напруги  $u_L$  відносно струму  $i$ .

### **Енергія магнітного поля**

Магнітне поле своїм силовим впливом на рухомі заряди (на електричний струм) здатне виконувати певну роботу і тому має магнітну енергію  $W_M$ , яка вимірюється в джоулях (Дж).

Розглянемо магнітну енергію  $W_M$ , яка накопичена в  $N$ -витковій котушці з індуктивністю  $L$  при наявності в ній електричного струму  $i$ . Якщо таку котушку замкнути провідником і відімкнути від електричного джерела, то електричний струм в ній швидко не зміниться, а значить протягом певного часу буде витрачена вся накопичена енергія  $W_M$ . Цю енергію можна визначити:

$$W_M = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi NI}{2}, \quad (9.25)$$

де  $L = N^2 L_1 = \frac{N^2 \Phi_1}{i} = \frac{N\Phi}{i}$  – індуктивність  $N$ -виткової котушки, Гн (9.23);  $\Phi$  – початкове значення магнітного потоку, створеного електричним струмом  $i$  в  $N$ -витковій котушці.

### Об'ємна густина енергії магнітного поля

При аналізі магнітного поля доволі часто виникає потреба у визначенні об'ємної густини енергії магнітного поля  $w_M$  (Дж/м<sup>3</sup>) в окремих його точках:

$$w_M = \frac{B \cdot H}{2}. \quad (9.26)$$

З формули (9.26) випливає, що магнітне поле може існувати і характеризуватися, певною енергією  $W_M$  чи  $w_M$  навіть у разі відсутності електричного струму у звичайному розумінні цього терміну, якщо в магнітному матеріалі (наприклад, в постійному магніті) створена залишкова магнітна індукція  $B = B_r$ .

### Градiєнт енергії магнітного поля

Силу  $f$  взаємодії рухомих зарядів як основи існування магнітного поля можна визначити через швидкість зміни у просторі (через градієнт) енергії магнітного поля аналогічно визначенню сили електричного поля (9.7):

$$f = - \frac{dW_M}{dx}, \quad (9.27)$$

де  $dW_M$  – елементарна зміна енергії магнітного поля внаслідок зміщення будь-якого елемента системи рухомих зарядів чи магнітопроводу на елементарну відстань  $dx$ . Знак «мінус» означає протидію сили  $f$  причині зміни магнітної енергії, наприклад, причині зміщення системи рухомих зарядів на елементарну відстань  $dx$ .

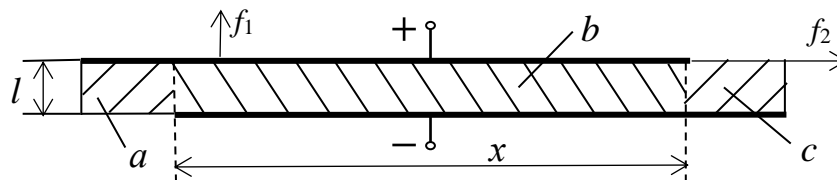
Таким же чином може бути визначений силовий вплив магнітного поля попередньо намагніченого постійного магніту на матеріали, які здатні намагнічуватись, наприклад, силу протягування магнітом залізних елементів.

## **9.4 Приклади розрахунку**

### Розрахунок сил електричного поля

Завдання. Розрахувати електростатичні сили взаємодії між зарядженими обкладинками плоского конденсатора. Його обкладинки мають форму квадрата площею  $S = 2 \text{ м}^2$ , ізолювані між собою діелектриком з

відносно діелектричною проникністю  $\epsilon_r = 5$  і товщиною  $l = 0,2$  мм, взаємно зміщені вздовж діелектрика на 10% відносно площі  $S$  (рис. 9.6) та мають залишковий заряд  $Q = 200$  мкКл.



**Рисунок 9.6 – Сили взаємодії між зарядженими обкладинками плоского конденсатора**

Рішення. Електростатичну силу  $f$  взаємодії між обкладинками конденсатора можна визначити як градієнт енергії електричного поля конденсатора (9.7). Сила  $f$  може мати дві складові: силу  $f_1$  внаслідок віддалення верхньої обкладинки конденсатора від нижньої обкладинки (внаслідок збільшення відстані  $l$ ) на елементарну відстань  $dl$ , і силу  $f_2$  внаслідок зміщення верхньої обкладинки конденсатора вправо (внаслідок збільшення відстані  $x$ ) на елементарну відстань  $dx$  (рис. 9.6).

Враховуючи доволі малу товщину діелектрика порівняно з іншими розмірами конденсатора, можна вважати, що електричне поле сконцентроване в основному в зоні “ $b$ ”. Тому можна враховувати енергію електричного поля лише в зоні “ $b$ ”, нехтуючи енергією електричного поля в зонах “ $a$ ” і “ $c$ ”.

Користуючись формулами (9.4)...(9.7), отримаємо наступне значення сили  $f_1$  (рис. 9.6) в напрямку збільшення відстані  $l$  на елементарну довжину  $dl$ :

$$f_1 = -\frac{Q^2}{2S_b \epsilon_r \epsilon_0} = -\frac{(200 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 1,8 \cdot 5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = -251,1 \text{ Н},$$

де  $S_b = S \cdot 0,9 = 2 \cdot 0,9 = 1,8 \text{ м}^2$  – площа обкладинок конденсатора в зоні « $b$ », яка за умовою задачі на 10% менше площі  $S$ ;

Ємність конденсатора:

$$C = \frac{S_b \cdot \epsilon_r \epsilon_0}{l} = \frac{1,8 \cdot 5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 398,25 \cdot 10^{-9} \text{ Ф};$$

Напруга між обкладинками конденсатора:

$$u = \frac{Q}{C} = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{398,25 \cdot 10^{-9}} = 502 \text{ В.}$$

Негативне значення сили  $f_1$  означає, що ця сила насправді направлена в протилежну сторону – в напрямку зменшення відстані  $l$ , тобто верхня обкладинка конденсатора насправді притягується до нижньої обкладинки.

Для розрахунку сили  $f_2$  потрібно врахувати те, що зона “ $b$ ” має форму прямокутника площею  $S_b = S \cdot 0,9 = 2 \cdot 0,9 = 1,8 \text{ м}^2$  зі сторонами  $y = \sqrt{S} = \sqrt{2} = 1,414 \text{ м}$  і  $x = \frac{S_b}{y} = \frac{1,8}{1,414} = 1,273 \text{ м}$ . Користуючись формулами (9.4)...(9.7), отримаємо значення сили  $f_2$  в напрямку збільшення  $x$  на елементарну відстань  $dx$ :

$$f_2 = \frac{Q^2 l}{2yx^2 \epsilon_r \epsilon_0} = \frac{(200 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,414 \cdot 1,273^2 \cdot 5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 0,0394 \text{ Н.}$$

Позитивне значення сили  $f_2$  означає, що ця сила діє на верхню обкладинку конденсатора в напрямку збільшення відстані  $x$ .

### Розрахунок сил магнітного поля

**Завдання.** Розрахувати силу взаємодії між двома паралельними провідниками довжиною  $l = 1 \text{ м}$  і діаметром  $d = 2 \text{ мм}$  з постійними або низькочастотними струмами  $i_1 = i_2 = 50 \text{ А}$  різного напрямку дії, які розміщені діелектричному середовищі при відстані  $a = 20 \text{ мм}$  між їх осями.

**Рішення.** Найбільш простим може бути рішення при наступних умовах:  $a \gg d$ ,  $l \gg a$ , густина струму однакова у всіх точках перетину провідників. За таких умов силу взаємодії (силу Ампера) між паралельними провідниками можна розрахувати за виразом:

$$f = i_2 \cdot l \cdot B_1 \cdot \sin \alpha = i_2 \cdot l \cdot \mu_0 H_1 = i_2 \cdot l \cdot i_1 \frac{\mu_0}{2\pi a} = 50 \cdot 1 \cdot 50 \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi \cdot 0,02} = 0,025 \text{ Н,}$$

де  $B_1 = \mu_a \cdot H_1$  – індукція магнітного поля, створеного струмом  $i_1$  першого провідника в точках розміщення другого провідника, Тл;  $H_1 = \frac{i_1}{2\pi a}$  – напруженість магнітного поля від струму  $i_1$  першого провідника в точках розміщення другого провідника, А/м;  $\alpha = \frac{\pi}{2}$  – кут між вектором індукції  $B$  і напрямом електричного струму  $i_2$ ;  $\mu_a \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – абсолютна магнітна проникність діелектричного середовища.

Під дією цієї сили провідники з електричними струмами різного напрямку взаємно відштовхуються згідно з правилом лівої руки.

### Контрольні запитання

1. Пояснити електричний заряд та одиницю його виміру. Що таке елементарний заряд?
2. За якою ознакою можна встановити існування зарядженої частинки чи тіла?
3. Визначити умови, за яких заряджена частинка може стати нейтральною.
4. Назвати причини та умови накопичення чи конденсації електричних зарядів.
5. Сформулювати зв'язок електричного заряду конденсатора з його електричною напругою та ємністю.
6. Визначити поняття електричного поля. Назвіть причини та умови виникнення електричного поля. За якою ознакою можна встановити існування електричного поля?
7. Визначити поняття напруженості електричного поля та пояснити одиницю її виміру.
8. Чим відрізняється однорідне електричне поле від неоднорідного електричного поля?
9. Який існує зв'язок напруженості електричного поля з електричним зарядом та силою дії поля на цей заряд?
10. Сформулювати залежність напруженості електричного поля плоского конденсатора від електричної напруги та відстані між його обкладками?
11. Поясніть енергію електричного поля та одиницю її виміру. Яким чином може проявитись енергія електричного поля?
12. Сформулювати, зв'язок між енергією електричного поля та силою його дії на заряджені частинки.
13. Сформулювати залежність електричної енергії конденсатора від його електричної напруги та ємності.
14. Пояснити електричний струм та одиницю його виміру.
15. Сформулювати залежність електричного струму в окремій ділянці електричного кола від електричної напруги та електричного опору цієї ділянки.



16. Який існує зв'язок між електричним струмом і електричним зарядом?
17. Які виникають явища при переміщенні електричних зарядів?
18. Пояснити енергію теплового поля та одиницю її виміру.
19. Які можуть бути причини виділення теплової енергії в електричному колі?
20. Яким чином може проявитись енергія теплового поля?
21. За якою формулою можна розрахувати енергію теплового поля на окремій ділянці електричного кола?
22. Визначити поняття магнітного поля. За якою ознакою можна встановити існування магнітного поля?
23. Назвати причини та умови виникнення магнітного поля.
24. Пояснити індукцію магнітного поля та її зв'язок з магнітним потоком; напруженість магнітного поля та її зв'язок з магнітною індукцією.
25. Сформулювати залежність напруженості магнітного поля від електричних струмів, які спричиняють магнітне поле.
26. Як визначити величину і напрям сили, з якою магнітне поле діє на провідник з електричним струмом і на окремі рухомі заряджені частинки?
27. Визначити явище електромагнітної індукції.
28. Який існує зв'язок між змінним магнітним потоком та електрорушійною силою в замкненому електропровідному контурі?
29. Пояснити причини та умови виникнення індукційного струму.
30. Пояснити індуктивність котушки та одиницю її виміру.
31. Що таке поточозчеплення і як воно пов'язане з магнітним потоком та індуктивністю котушки?
32. Пояснити енергію магнітного поля та наведіть одиницю її виміру.
33. Яким чином може проявитись енергія магнітного поля?
34. Сформулювати зв'язок між енергією магнітного поля та силою його дії на рухомі заряджені частинки.
35. Чим відрізняється енергія магнітного поля від її об'ємної густини.
36. Сформулювати залежність енергії магнітного поля від електричного струму котушки індуктивності.

## РОЗДІЛ 10

### ДІЕЛЕКТРИЧНІ МАТЕРІАЛИ

Головна особливість діелектричних матеріалів – це мала кількість вільних зарядів, здатних створювати електричний струм. Це дозволяє використовувати діелектрики в якості електроізоляційних матеріалів за умови запобігання їх електричного пробою. Практично всі заряджені частинки діелектрика здатні лише зміщуватись під впливом сил електричного поля. Цей процес називається поляризацією діелектрика. Таким чином, електрична ізоляція та здатність поляризуватись є найбільш важливими властивостями діелектриків [5...7].

#### 10.1 Поляризація діелектриків

*Поляризація* – це процес зміщення зв'язаних електричних зарядів діелектрика під впливом сил електричного поля, який інколи називають електричним струмом зміщення.

##### Основні види поляризації

*Електронна поляризація* – це пружне зміщення орбіт електронів відносно ядер атомів діелектрика під впливом електричного поля за дуже короткий термін – близько  $10^{-15}$  с. Електронна поляризація виникає у будь-якому діелектрику незалежно від наявності інших видів поляризації. Втрат енергії електричного поля за повний цикл дії поля зазвичай не відбувається.

*Іонна поляризація* – це пружне зміщення іонів діелектрика під впливом електричного поля. Вона характерна для твердих тіл з іонною будовою і протікає повільніше через більшу масу іонів – протягом  $\approx 10^{-13}$  с. Іонна поляризація також може відбуватись без втрат енергії електричного поля. В деяких випадках можуть все ж виникати втрати електричної енергії і нагрів діелектрика. Така поляризація називається іонно-релаксаційною.

*Дипольна поляризація* – це поворот або переорієнтація дипольних молекул діелектрика силами електричного поля. Вона характерна для полярних діелектриків і належить до уповільнених видів поляризації. Час

поляризації складає від  $10^{-10}$  с до  $10^{-2}$  с. Поворот дипольних молекул під дією електричного поля потребує подолання сил внутрішнього «тертя» в речовині, що викликає втрати електричної енергії в діелектрику – нагрівом діелектрику.

*Міграційна поляризація* характерна для діелектриків, які мають домішки у вигляді дрібного порошку провідникових матеріалів. Під час дії електричного поля вільні електрони та іони електропровідних включень починають переміщуватись (мігрувати) в межах цих включень, накопичуватись і створювати таким чином поляризовані області. Цей процес досить повільний, може тривати секунди і навіть хвилини, супроводжується значними втратами енергії навіть при низькій частоті зміни електричного поля.

*Самочинна (спонтанна) поляризація* має місце у твердих нелінійних діелектриках з доменною структурою. В таких матеріалах є свої внутрішні поля, які створюють макроскопічні поляризовані області (домени). Дія зовнішнього поля сприяє переважній орієнтації цих доменів по напрямку поля, що створює ефект дуже сильної поляризації. Самочинна поляризація діелектрика супроводжується значним його нагріванням. Діелектрична проникність  $\epsilon_r$  залежить від напруженості електричного поля та температури діелектрика нелінійно (з максимумом) і може перевищувати значення 100000. Матеріали з таким видом поляризації називаються сегнетоелектриками.

### **Основні характеристики процесу поляризації**

Характерними ознаками процесу поляризації діелектриків є накопичення електричних зарядів за рахунок зміщення зв'язаних електричних зарядів під впливом сил електричного поля, а також деякі втрати енергії в діелектрику. Зазначені характеристики діелектриків залежать від діелектричної проникності і тангенса кута діелектричних втрат.

*Діелектрична проникність* діелектрика є характеристикою процесу поляризації і визначається діелектричною  $\epsilon_r$  відносно абсолютної діелектричної проникності вакууму  $\epsilon_0$ . Для визначення відносної діелектричної проникності  $\epsilon_r$  діелектрик розміщують в змінному однорідному електричному полі конденсатора з плоскими паралельними зарядженими пластинами (рис. 10.1).

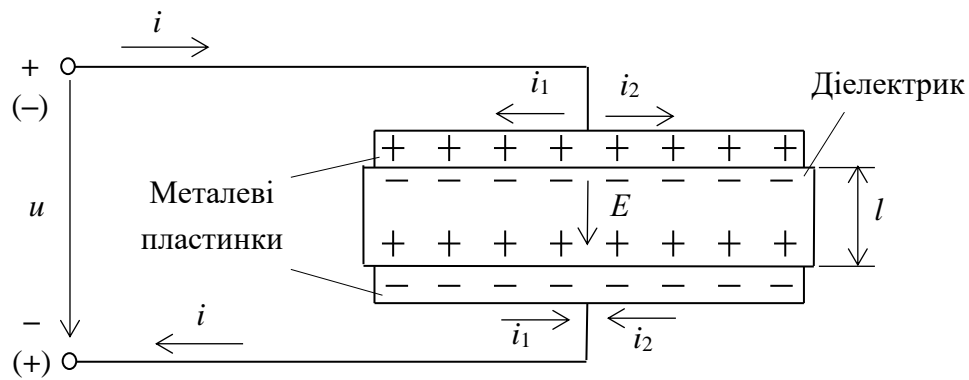


Рисунок 10.1 – Діелектрик в однорідному електричному полі

Принцип виміру відносної діелектричної проникності  $\epsilon_r$  діелектрика оснований на прямій залежності ємності конденсатора  $C$  від абсолютної діелектричної проникності  $\epsilon_a$  його діелектрика:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0} = \frac{C}{C_0}, \quad (10.1)$$

де  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – абсолютна діелектрична проникність вакууму чи повітря;  $C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{l}$  – розрахункова ємність цього конденсатора в фарадах (Ф) з використанням вакууму замість досліджуваного діелектрика;  $C$  – ємність конденсатора з досліджуваним діелектриком, яку можна виміряти з допомогою вимірювального моста змінного струму (рис. 10.2);  $S$  – площа металевих обкладинок конденсатора, м<sup>2</sup>;  $l$  – товщина діелектрика, м (рис. 10.1).

У більшості випадків величина  $\epsilon_r = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0}$  складає близько 2...10 відносних одиниць. Але для виготовлення малогабаритних конденсаторів з великою ємністю створюють спеціальні діелектрики з дуже великим значенням діелектричної проникності  $\epsilon_r$  – від декількох сотень до декількох сотень тисяч [8].

Зміщені заряди поляризованого діелектрика можна вважати додатковими зарядами через їх здатність наводити вільні заряди протилежного знаку на металевих обкладинках конденсатора силами Кулона. Наведені заряди в свою чергу можуть вільно переміщуватись в провідниках за межами конденсатора. В деяких діелектриках поляризація та її зникнення може бути доволі сповільненою. Наприклад, для надійного розрядження

відімкненого від електричного джерела високовольтного кабелю потрібно замикає його жили на доволі довгий час – протягом приблизно кількох хвилин.

*Діелектричні втрати* – це потужність  $P$  енергії, яка втрачається під впливом змінного електричного поля і приводить до нагрівання діелектрика:

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi = U^2 \cdot \omega \cdot C \frac{tg\delta}{1+tg^2\delta} \approx U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta, \quad (10.2)$$

де  $U$  – діюче значення змінної (синусоїдальної) електричної напруги, прикладеної до обкладинок конденсатора з діелектриком, В;  $I$  – діюче значення змінного (синусоїдального) струму ззовні конденсатора, зумовленого процесом циклічного перезарядження конденсатора, А;  $\phi$  – кут фазового випередження струму  $I$  відносно напруги  $U$ , який менше  $90^\circ$  на величину  $\delta$  ( $\phi=90^\circ-\delta$ ) через діелектричні втрати;  $\delta$  – кут діелектричних втрат;  $tg\delta$  – тангенс кута діелектричних втрат, який вимірюється за допомогою моста змінного струму (рис. 10.2);  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота зміни напруги на обкладинках конденсатора, 1/с;  $f$  – циклічна частота зміни напруги на обкладинках конденсатора, Гц;  $C = \epsilon_r \cdot C_0$  – ємність конденсатора з досліджуваним діелектриком, яку можна виміряти за допомогою моста змінного струму (рис. 10.2).

Питомі діелектричні втрати

$$p = \frac{P}{V} = E^2 \omega \epsilon_r \epsilon_0 tg\delta \text{ (Вт)}, \quad (10.3)$$

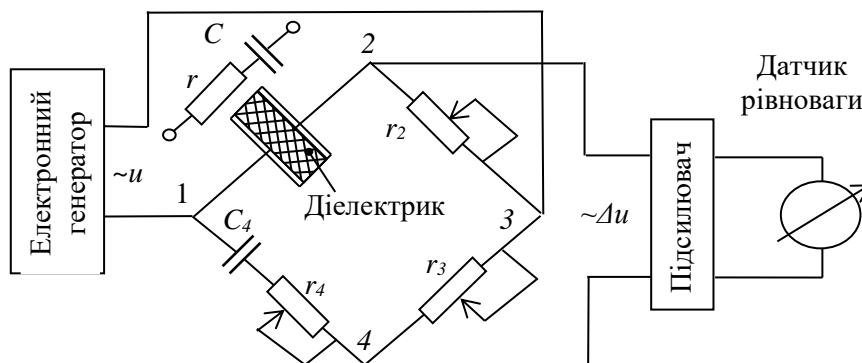
де  $V = S \cdot l$  – об'єм діелектрика, м<sup>3</sup>;  $E = \frac{U}{l}$  – напруженість електричного поля (9.3).

З формули (10.3) видно, що від величини  $tg\delta$  залежать діелектричні втрати, які викликають нагрів діелектрика, особливо при великих значеннях напруги  $U$  і частоти  $\omega$ . Тому, діелектрики з малим значенням  $tg\delta$  (менше  $5 \cdot 10^{-4}$ ) називають іноді високочастотними. Якщо частота  $f$  або напруга  $U$  невеликі, то можна використовувати низькочастотні діелектрики з відносно великими значеннями  $tg\delta$ . Головною перевагою таких діелектриків може бути велике значення діелектричної проникності  $\epsilon_r$  і

малі габарити конденсаторів. Величина  $tg\delta$  залежить від різних зовнішніх чинників – в першу чергу від температури, напруги та її частоти. Якщо напруга  $U$  незмінна в часі, то нагрів діелектрика визначається лише переміщенням вільних зарядів, яких в діелектрику надзвичайно мало. В таких випадках діелектричними втратами нехтують.

### **Вимірювання діелектричної проникності і діелектричних втрат**

Діелектричну проникність  $\epsilon_r$  і тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta$  вимірюють з допомогою вимірювального моста змінного струму при підключенні плоского конденсатора з досліджуваним діелектриком до джерела змінної напруги  $u$  (рис. 10.2).



**Рисунок 10.2 – Схема для визначення відносної діелектричної проникності  $\epsilon_r$  і тангенса кута діелектричних втрат  $tg\delta$**

Вимірювальний міст змінного струму містить чотири електричних плеча, одне з яких – плоский конденсатор з досліджуваним діелектриком і невідомими параметрами ( $r, C$  при послідовному їх з'єднанні або  $R, C_p$  при паралельному їх з'єднанні), а три інші – резистори і конденсатор ( $r_2, r_3, r_4, C_4$ ) з відомими параметрами (рис. 10.2). В першу діагональ моста (між вузлами 1 і 3) подається від електронного генератора напруга  $u$ , яка змінюється з частотою  $\omega$  за синусоїдальним законом. Напруга на другій діагоналі моста  $\Delta u$  (між вузлами 2 і 4) підсилюється і контролюється датчиком рівноваги моста. Під час виміру резистори  $r_2, r_3, r_4$  регулюються з метою встановлення електричної рівноваги моста ( $\Delta u \approx 0$ ). У разі рівноваги моста виконується таке рівняння:

$$\left(r - j\frac{1}{\omega \cdot C}\right) \cdot r_3 = \left(r_4 - j\frac{1}{\omega \cdot C_4}\right) \cdot r_2, \quad (10.4)$$

де  $r, C$  – еквівалентні параметри конденсатора з досліджуваним діелектриком (опір  $r$  враховує наявність діелектричних втрат).

Рівняння (10.4) виконується за умови рівності його дійсних і уявних частин:

$$C = C_4 \frac{r_3}{r_2}; r = r_4 \frac{r_2}{r_3}. \quad (10.5)$$

Значення відносної діелектричної проникності  $\epsilon_r$  можна визначити за формулами (10.1) і (10.5), а значення тангенса кута діелектричних втрат  $tg\delta$  – за приведеною нижче формулою, яка впливає з (10.5):

$$tg\delta = \omega \cdot r \cdot C = \omega \cdot r_4 \cdot C_4. \quad (10.6)$$

Конструкція вимірювального моста змінного струму передбачає автоматичне використання приведених формул і дозволяє таким чином отримати готовий результат виміру  $C$  і  $tg\delta$  за умови встановлення рівноваги цього моста.

Для діелектриків з великими значеннями  $tg\delta$  у вимірювальному мості передбачений другий діапазон виміру  $tg\delta$ , в якому використовується інша схема заміщення конденсатора з досліджуваним діелектриком – у вигляді паралельного з'єднання інших за значеннями елементів  $R$  і  $C_p$ . Переключення мосту в другий діапазон не впливає на результати виміру  $tg\delta$ , але дещо впливає на результати виміру ємності  $C_p = \frac{C}{(1+tg^2\delta)}$ , а значить і на визначення діелектричної проникності  $\epsilon_r$  [5].

Еквівалентна схема діелектрика, який знаходиться під впливом змінного електричного поля, представлена на рис. 10.3 [5...7].

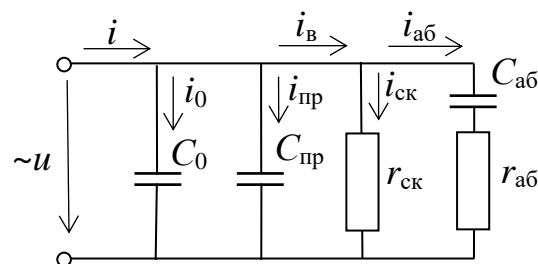


Рисунок 10.3 – Еквівалентна схема діелектрика

У цій схемі використані такі елементи, які враховують найбільш важливі особливості процесів, що відбуваються в діелектрику:

$C_0$  – ємність конденсатора без діелектрика, до обкладинок якого підводиться змінна електрична напруга  $u$  для створення в діелектрику змінного електричного поля. Накопичення чи перезарядження  $C_0$  здійснюється електричним струмом  $i_0$  практично миттєво і без діелектричних втрат. Цю ємність можна визначити за формулою (9.4);

$C_{пр}$  – додаткова ємність конденсатора, яка обумовлена пружними видами поляризації діелектрика – електронною та іонною поляризацією. Накопичення чи перезарядження конденсатора  $C_{пр}$  здійснюється електричним струмом  $i_{пр}$  також практично миттєво і без діелектричних втрат. Ця ємність в декілька разів більша, ніж  $C_0$ ;

$C_{аб}$  – додаткова ємність конденсатора, яка обумовлена уповільненими (релаксаційними) видами поляризації діелектрика – дипольною, міграційною та самочинною (спонтанною) поляризацією. Зарядження чи перезарядження  $C_{аб}$  здійснюється струмом абсорбції  $i_{аб}$  дуже сповільнено (в деяких випадках протягом декількох хвилин) і з доволі великими діелектричними втратами. Ця ємність може бути значно більша, ніж  $C_0$  і  $C_{пр}$ ;

$r_{аб}$  – електричний опір, який враховує наявність діелектричних втрат внаслідок сповільнених (релаксаційних) видів поляризації діелектрика;

$r_{ск}$  – електричний опір, який враховує деяку кількість вільних зарядів всередині і на поверхні діелектрика. Ці заряди спричиняють наскрізний електричний струм  $i_{ск}$ , який разом зі струмом абсорбції  $i_{аб}$  створюють струм витікання  $i_v$ . Зазвичай струмом  $i_{ск}$  нехтують, тобто приймають  $i_{ск} \approx 0$ .

### **Електричні струми при поляризації діелектрика**

Процес поляризації діелектрика під впливом сил електричного поля конденсатора (сил Кулона) супроводжується не тільки зміщенням зв'язаних електричних зарядів, але й наведенням і відповідним переміщенням вільних зарядів, тобто електричним струмом, за межами діелектрика. Якщо цей процес часто повторюється, то електричний струм за межами діелектрика конденсатора збільшується пропорційно цій частоті. Вказаний процес наведення і переміщення вільних зарядів зберігається навіть



у тих випадках, коли у просторі між обкладинками конденсатора практично відсутні заряджені частинки, тобто знаходиться вакуум чи повітря.

### Зарядно-розрядний струм у процесі поляризації діелектрика

У більшості випадків до обкладинок конденсатора подається змінна напруга  $u$ , яка зазвичай змінюється за синусоїдальним законом  $u(t) = U_m \sin \omega t$ . Це супроводжується зарядно-розрядним струмом, діюче значення якого можна розрахувати за законом Ома:

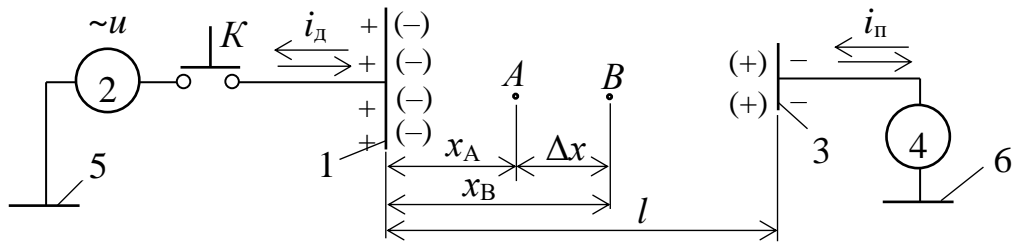
$$I = \frac{U}{X_c}, \quad (10.7)$$

де  $U$  – діюче значення змінної напруги на обкладинках конденсатора, В;  
 $X_c = \frac{1}{\omega C}$  – реактивний опір конденсатора, Ом.

З формули (10.7) може скластися помилкове враження про здатність діелектрика пропускати доволі великий струм  $I$ , хоча в ньому практично відсутні вільні заряди, а також про порушення першого закону Кірхгофа. Наприклад, якщо в деякий момент часу заряди входять в обкладинку конденсатора з боку електропровідної частини замкненого кола, то за цим законом у цей самий момент заряди повинні начебто виходити з неї в бік діелектрика. Але такого не може бути через відсутність вільних зарядів у діелектрику. Насправді ж, заряди виходять не в бік діелектрика, а в різні боки цієї саме обкладинки, на що не завжди звертають увагу [9]. На рисунку 10.1 зображені струми  $i_1, i_2$  як складові струму  $i$  за першим законом Кірхгофа.

### Передача у просторі силового впливу електричного поля

Розглянемо процес періодичного перезарядження конденсатора (рис.10.1), в якому відстань  $l$  між обкладинками може бути дуже великою. Навіть в дуже віддаленій металевій обкладинці такого «конденсатора» зарядно-розрядний струм виникає при включенні джерела змінного струму і зникає при виключенні цього джерела [9]. Зрозуміло, що цей струм дуже малий при великих відстанях  $l$ , але за певних обставин може бути контрольованим. Це означає можливість передачі контрольованих електричних сигналів чи інформації на велику відстань у повітрі чи космічному просторі без електричних провідників (рис. 10.4).



**Рисунок 10.4 – Схема передачі інформації у просторі змінним електричним полем**

Одна з металевих обкладинок 1 «конденсатора» виконує роль антени передавача сигналів від джерела 2 змінного струму  $i_d$ , а інша металева обкладинка 3 – роль приймальної антени. Якщо замкнути ключ  $K$ , то обкладинка 1 заряджається від джерела 2 струмом  $i_d$ , наприклад, спочатку позитивними зарядами. Ці заряди вступають в силу взаємодію із зарядами інших матеріальних тіл, у тому числі із зарядами приймальної антени 3, і притягують негативні заряди відповідно до закону Кулона. При цьому вважається, що ця сила діє по прямій лінії, яка з'єднує антени 1 і 3. Внаслідок цього антена 3 заряджається негативними зарядами, що супроводжується відповідним електричним струмом  $i_p$  приймача 4 сигналів. Аналогічним чином відбувається процес взаємодії зарядів антен 1 і 3 при їх перезарядженні. Зникнення струму  $i_p$  може свідчити про розмикання ключа  $K$ . Саме в цьому і полягає принцип передачі інформації на велику відстань у вигляді змінних електричних сигналів. Таку передачу інформації прийнято називати передачею радіосигналів. Заземлення 5 і 6 у цій схемі (рис. 10.4) не є обов'язковим, а лише дозволяє отримати більший за рівнем сигнал приймача  $i_p$ .

Головною умовою перезарядження такого «конденсатора», а значить передачі інформації на відстань, є зміна в часі струму  $i_d$  як за величиною, так і за напрямом. Найбільш природнім законом зміни струму  $i_d$  є синусоїдальний закон.

### Хвильовий характер змінного електричного поля

Якщо силу Кулона контролювати в двох точках  $A$  і  $B$  на відстані  $x_A$  і  $x_B$  від первинного джерела змінних зарядів (від антени 1), то в разі си-

нусоїдального закону струму  $i_d$  сила Кулона  $f_B$  в точці В буде змінюватися з деякою затримкою в часі  $\Delta t$  порівняно із силою Кулона  $f_A$  в точці А (рис. 10.4):

$$f_A = F_{mA} \sin(\omega t); \quad f_B = F_{mB} \sin(\omega t - \phi), \quad (10.8)$$

де  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота електричного струму  $i_d$  і сили Кулона, 1/с;  $f = \frac{1}{T}$  – циклічна частота електричного струму  $i_d$  і сили Кулона, Гц;  $T = \frac{\lambda}{v}$  – тривалість циклу чи періоду коливань електричного струму  $i_d$  і сили Кулона, с;  $v$  – швидкість розповсюдження у просторі силового впливу електричного поля, яка не може перевищувати швидкість світла у вакуумі  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с;  $\lambda$  – відстань, на яку розповсюджується силовий вплив протягом одного періоду коливань  $t = T$  (величину  $\lambda$  прийнято називати довжиною хвиль);  $\phi = \omega \Delta t$  – фазовий зсув синусоїдальних сил Кулона;  $\Delta t = \frac{\Delta x}{v} = \frac{(x_B - x_A)}{v}$  – затримка в часі процесу передачі силового впливу електричного поля у просторі (9.2), яка обумовлена різницею у відстані  $\Delta x$  між точками А і В та обмеженням швидкістю  $v$ .

Закон зміни зарядно-розрядного струму  $i_d$  може бути будь-яким – не обов'язково синусоїдальним. Несинусоїдальний струм  $i_d$  за бажанням можна представити у вигляді суми синусоїдальних струмів (гармонік) і розглядати як кожну з цих гармонік окремо.

Процес розповсюдження силового впливу електричного поля для зручності представляють (моделюють) у вигляді переміщення радіохвиль довжиною  $\lambda = T \cdot v$  зі швидкістю  $v$ , близькою до швидкості світла  $c$  у вакуумі. Насправді ж, спостерігається вплив сили Кулона на заряди матеріальних частинок, які зустрілися на шляху розповсюдження цієї сили і які коливаються з періодичністю коливання сили Кулона.

### **Поняття електромагнітного поля**

Перезарядження обкладинок конденсатора чи антени супроводжується електричним струмом, а значить магнітним полем. Магнітне поле також має силовий характер впливу на електричні заряди матеріальних частинок. Силовий вплив магнітного поля обумовлений електрорушій-

ною силою (ЕРС) відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея та силою Лоренца чи Ампера. ЕРС (рис. 10.4) діє з боку змінного магнітного поля антени 1 на будь-які заряди антени 3, у той час як сила Лоренца або Ампера діє лише на рухомі заряди антени 3. Силовий вплив магнітного поля розповсюджується у просторі аналогічно силовому впливу електричного поля.

Змінні електричні і магнітні поля настільки тісно взаємопов'язані, що їх зазвичай розглядають як єдине електромагнітне поле. Коливання електромагнітних сил цього поля розповсюджуються у будь-якому просторі з обмеженою швидкістю, в тому числі у вакуумі. Матеріальні частинки простору здатні лише заважати процесу розповсюдження електромагнітних коливань або змінювати напрям їх розповсюдження.

Електромагнітні коливання виникають внаслідок коливань чи змін положення заряджених частинок в електричних колах або у складі атомів чи ядра. Навіть зникнення заряджених частинок, наприклад, електронів внаслідок їх анігіляції є дуже швидкою зміною заряду, і тому супроводжується високочастотними коливаннями електромагнітних сил – анігіляційними гама-квантами. Електромагнітні коливання, які зазвичай називають електромагнітними хвилями, поділяють на декілька діапазонів частоти  $f$  або довжини хвиль  $\lambda$  в залежності від характеру їх взаємодії із середовищем:

– радіохвилі

$$f < 3 \dots 3 \cdot 10^{11} \text{ Гц}, \lambda = 10^4 \dots 10^{-3} \text{ м};$$

– інфрачервоні промені

$$f = 3 \cdot 10^{11} \dots 3,85 \cdot 10^{14} \text{ Гц}, \lambda = 10^{-3} \dots 7,8 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

– видиме світло

$$f = 3,85 \cdot 10^{14} \dots 7,89 \cdot 10^{14} \text{ Гц}, \lambda = 7,8 \cdot 10^{-7} \dots 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

– ультрафіолетові промені

$$f = 7,89 \cdot 10^{14} \dots 3 \cdot 10^{16} \text{ Гц}, \lambda = 3,8 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ м};$$

– рентгенівські промені

$$f = 3 \cdot 10^{16} \dots 6 \cdot 10^{19} \text{ Гц}, \lambda = 10^{-8} \dots 5 \cdot 10^{-12} \text{ м};$$

– гамма-промені

$$f > 6 \cdot 10^{19} \text{ Гц}, \lambda < 5 \cdot 10^{-12} \text{ м.}$$

Якщо на шляху розповсюдження силового впливу електромагнітного поля знаходиться матеріальний об'єкт, то в ньому відбувається часткове поглинання енергії електромагнітного поля та переміщення заряджених частинок аналогічно переміщенню зарядів у антені 3 приймача (рис. 10.4). Тому цей об'єкт може стати джерелом вторинних чи віддзеркалених електромагнітних хвиль, які можуть контролюватись прийомною антеною 3 і приймачем 4 (рис. 10.4). Прийняті вторинні електромагнітні хвилі можна використовувати для контролю місця знаходження матеріального об'єкта (наприклад, при радіолокації літака), при контролі температури поверхні до інфрачервоного випромінювання або при гама-локації. Процес прийняття частково поглинутих прямих електромагнітних хвиль може бути використаний для визначення місця знаходження літака завдяки контролю частково поглинення гама-променів космічного походження, а також гама-контролю рівня матеріалів у технологічній ємності.

## 10.2 Електропровідність діелектриків

Електропровідність діелектрика проявляється наскрізним електричним струмом  $i_{ск}$  (рис. 10.3) і обумовлена наявністю вільних електричних зарядів. Для визначення електропровідності діелектрик розміщують в електричному полі між металевими провідниками і вимірюють величину електричного струму витоку  $i_{в}$ . Електропровідність діелектрика визначають при використанні постійної електричної напруги  $u$  через можливий вплив зарядно-розрядних струмів  $i_0, i_{пр}, i_{аб}$ . З моменту підведення цієї напруги струми  $i_0, i_{пр}$  майже миттєво зникають, а струм абсорбції  $i_{аб}$  знижується в часі  $t$  поступово (рис. 10.5).

Враховуючи вищесказане при визначенні електропровідності діелектрика потрібно почекати деякий час  $t_n$  (близько хвилини) після подачі напруги  $u$ , коли струм абсорбції  $i_{аб}$  знизиться практично до нуля, а струм витоку  $i_{в} = i_{аб} + i_{ск}$  знизиться до  $i_{ск}$ .

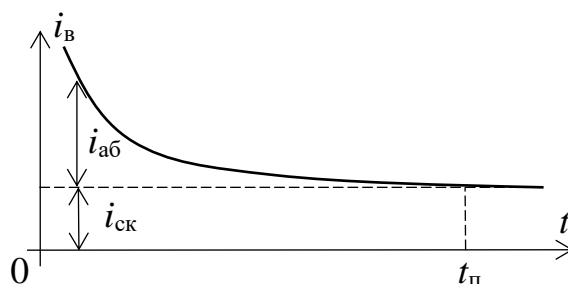


Рисунок 10.5 – Залежність від часу струму витікання через діелектрик

### Електропровідність газоподібних діелектриків

Електропровідність газоподібних діелектриків може виникати внаслідок електричного пробою або іонізації нейтральних молекул, тобто розщеплення молекул на вільні іони та електрони. Іонізація може відбуватися під впливом зовнішніх факторів (внаслідок значного нагрівання газу, ультрафіолетового, рентгенівського, радіоактивного, космічного чи гама-випромінювання) або внаслідок ударної іонізації.

На рисунку 10.6 зображена залежність наскрізного струму  $i_{ск}$  від електричної напруги  $u$ , прикладеної до металевих електродів чи обкладинок конденсатора.

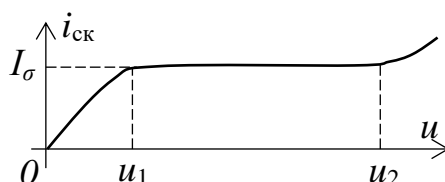


Рисунок 10.6 – Залежність наскрізного електричного струму  $i_{ск}$  газоподібного діелектрика від електричної напруги  $u$

На початковій ділянці приведенного графіку при  $u < u_1$  має місце практично лінійна залежність  $i_{ск}$  від  $u$  завдяки наявності вільних іонів та електронів, які не встигли рекомбінувати. При  $u_1 < u < u_2$  практично всі вільні заряди задіяні в електричному струмі  $i_{ск}$ , і тому цей струм досягає струму насичення  $I_σ$ . Зокрема, у повітрі струм  $i_{ск}$  при звичайних умовах досягає величини  $I_σ$  при відстані між електродами  $l = 10$  мм і напруженості електричного поля  $0,6$  В/м. Густина цього струму – приблизно  $10^{-15}$  А/м<sup>2</sup> [5]. Лише при  $u > u_2$  відбувається подальше зростання струму  $i_{ск}$  під впливом ударної іонізації та емісії електронів з поверхні

металевих електродів. При дуже великих значеннях напруги  $u$  відбувається електричний пробій діелектрика.

Графік на рисунку 10.6 демонструє можливість практичного використання електропровідності газоподібних діелектриків для контролю інтенсивності іонізуючого випромінювання радіоактивних речовин шляхом вимірювання електричного струму насичення  $I_{\sigma}$  при напрузі  $u_1 < u < u_2$ . Іншим прикладом широкого використання електропровідності повітря є електрична дуга, висока температура якої дозволяє різати, плавити або зварювати метал.

Здатність повітря проводити електричний струм у більшості випадків слід розглядати як негативну його властивість. Зокрема, внаслідок розриву кола електричного струму у повітрі виникають електричні розряди, які здатні призвести до вибуху газу чи пожежі. Тому у вибухонебезпечних приміщеннях чи зонах доводиться запроваджувати відповідні запобіжні заходи. В якості таких заходів можуть бути використані технічні пристрої запобігання іскрінню, які діють за принципом упередженого та примусового відключення електричного струму.

При розгляді вакууму, як дуже розрідженого газоподібного діелектрика, можуть скластися суперечливі враження. З одного боку, вакуум через відсутність у ньому матеріальних частинок може розглядатись як ідеальний електричний ізолятор. Але при високих напруженостях поля починається емісія електронів з катода і замість вакууму ми маємо дуже розріджену плазму, що стає провідником. З іншого ж боку, відсутність цих частинок означає нездатність вакууму чинити опір рухомих зарядам, тобто надає «надпровідникові» властивості вакууму. Прикладами використання «надпровідникових» властивостей вакууму можуть бути електровакуумні прилади в електроніці, телевізійні електронно-променеві трубки, прискорювачі елементарних частинок. У природі найбільш поширеним явищем переміщення зарядів у вакуумі є так званий сонячний вітер – потік високоенергетичних іонізованих частинок Сонця зі швидкістю 300 ... 1200 км/с. Цей потік зарядів здатний викликати на Землі магнітні бурі, іонізувати верхні шари атмосфери і навіть зносити молекули атмосфери у відкрий космос.

### Електропровідність рідких діелектриків

Електропровідність рідких діелектриків тісно пов'язана з молекулярною будовою рідини та присутністю домішок [5]. Електричний струм створюють в основному іони та заряджені колоїдні частинки. Особливо велика електропровідність має місце у тих діелектриків, які містять багато молекул полярної (дипольної) будови. Найбільш поширеним способом очищення рідкого діелектрика є видалення вологи, тобто його просушування. При тривалій дії електричного поля іони можуть осідати на електродах і нейтралізуватися, що призводить до деякого очищення діелектрика від домішок. Електропровідність рідкого діелектрика зростає з підвищенням температури внаслідок зниження його в'язкості та збільшення рухливості іонів.

Залежність наскрізного електричного струму  $i_{ск}$  від напруги  $u$  в рідкому діелектрику має нелінійний характер, як і в газоподібних діелектриках (рис. 10.6), але без явно виділеної ділянки насичення струму.

Найбільш поширеним у використанні рідким діелектриком є трансформаторне масло. Його питомий опір при температурі  $+20^{\circ}\text{C}$   $\rho \approx 10^{10} \dots 10^{13}$  Ом·м, а відносна діелектрична проникність  $\epsilon_r \approx 2.2$  [5...8].

### Електропровідність твердих діелектриків

Електропровідність твердих діелектриків обумовлена переміщенням в основному слабо закріплених іонів випадкових домішок та іонів самого діелектрика, особливо при високих температурах. У деяких діелектриках має місце електронна електропровідність, особливо в сильних електричних полях. Характерною ознакою іонної електропровідності є перенесення електричним струмом деякої кількості речовини, яка відкладається на електродах. Вільні заряди можуть виникати не тільки в середині діелектрика (в його об'ємі), але й в тонкому шарі вологи та забруднень на його поверхні. Тому в твердих діелектриках розрізняють об'ємну та поверхневу електропровідності.

Поверхнева електропровідність виникає через здатність діелектрика адсорбувати на своїй поверхні вологу і пил. Гладенька поверхня діелектрика адсорбує менше вологи і забруднюючих речовин, особливо якщо діелектрик неполярний. При підвищенні температури діелектрика



зростає рухливість його вільних іонів та їх концентрація завдяки тепловій дисоціації молекул, що викликає зростання електропровідності.

За величинами питомого об'ємного  $\rho_v$  і питомого поверхневого  $\rho_s$  опорів (або питомої об'ємної  $\gamma_v$  і питомої поверхневої  $\gamma_s$  електропровідності) діелектрики умовно поділяють на три основні групи:

– високоякісні

$$\rho_v = \frac{1}{\gamma_v} = 10^{13} \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad \rho_s = \frac{1}{\gamma_s} = 10^{14} \dots 10^{16} \text{ Ом};$$

– якісні

$$\rho_v = \frac{1}{\gamma_v} = 10^9 \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad \rho_s = \frac{1}{\gamma_s} = 10^{10} \dots 10^{13} \text{ Ом};$$

– задовільні

$$\rho_v = \frac{1}{\gamma_v} = 10^6 \dots 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad \rho_s = \frac{1}{\gamma_s} = 10^8 \dots 10^9 \text{ Ом}.$$

### **Вимірювання електричного опору твердих діелектриків**

Вимірювання об'ємного  $R_v$  і поверхневого  $R_s$  опорів діелектрика необхідно проводити при постійній напрузі і з деякою затримкою в часі (близько однієї хвилини), доки не зникне зарядно-розрядний струм в електродах. Для виміру  $R_v$  та  $R_s$  використовують зазвичай три електроди циліндричної форми, за допомогою яких розділяють загальний електричний струм витоку  $i_B$  на дві його складові – на об'ємний  $i_v$  і поверхневий  $i_s$  (рис. 10.7).

Струм витоку  $i_B$  від клеми «+» джерела розгалужується з електрода 1 на об'ємний  $i_v$  струм до електрода 2 і поверхневий струм  $i_s$  до електрода 3. Струми  $i_v, i_s$  сходяться в клемі «-» джерела, проходячи через датчик 4. Опори  $R_v, R_s$  визначають шляхом почергового включення датчика 4 у вітці зі струмами  $i_v$  та  $i_s$ , залишаючи перемичку на колишньому місці датчика. Значення цих струмів настільки невеликі, що для вимірювання  $R_v, R_s$  використовують підсилювач постійного струму з доволі високим коефіцієнтом підсилювання.

За результатами виміру (рис. 10.7) об'ємного  $R_v$  і поверхневого  $R_s$  опорів можна визначити, відповідно, питомий об'ємний  $\rho_v$  (Ом·м) і питомий поверхневий  $\rho_s$  (Ом) опори за такими формулами [5]:

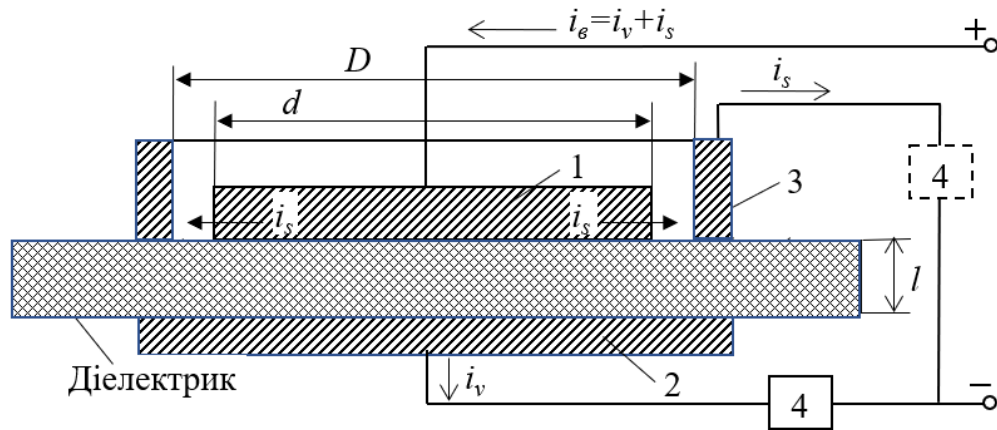


Рисунок 10.7 – Схема відокремлення об'ємного і поверхневого струмів діелектрика

$$\rho_v = R_v \frac{S}{l}; \rho_s = R_s \frac{L}{g}, \quad (10.9)$$

де  $S = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$  – площа контактної поверхні електрода 1;  $d$  – діаметр електрода 1;  $l$  – відстань між електродами 1 і 2, яку долають об'ємні заряди;  $L = \frac{\pi \cdot (D+d)}{2}$  – ефективний периметр електрода 1, з якого виходять поверхневі вільні заряди;  $D$  – внутрішній діаметр електрода 3;  $g = \frac{(D \cdot d)}{2}$  – відстань між електродами 1 і 3, яку долають поверхневі заряди.

### Визначення концентрації вільних зарядів

Питома електропровідність  $\gamma_v$  речовини пропорційна концентрації вільних зарядів  $n_0$  в об'ємі діелектрика, їх рухливості  $u_q$  і величині заряду  $q$  іона чи електрона [5]. Тому концентрацію вільних зарядів можна підрахувати, знаючи величину об'ємного питомого опору  $\rho_v$  діелектрика (10.9):

$$n_0 = \frac{1}{\rho_v u_q q}, \text{ м}^{-3}, \quad (10.10)$$

де  $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд іона чи електрона;  $u_q = \frac{v}{E}$  – середня рухливість вільних зарядів,  $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ;  $v$  – середня швидкість переміщення вільних зарядів,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $E$  – напруженість електричного поля,  $\text{В}/\text{м}$  (9.3).

Рухливість іонів і електронів відповідна  $u_q \approx 10^{-13} \dots 10^{-16} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  і  $u_q \approx 3,5 \cdot 10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  [5]. В орієнтовних розрахунках  $n_0$  можна приймати  $u_q \approx 10^{-9} \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , враховуючи наявність в діелектриках обох видів носіїв струму.

### 10.3 Електричний пробій діелектриків

Електричний пробій – це явище, коли діелектрик під впливом електричного поля втрачає свої електроізоляційні властивості. Напруженість поля  $E_{\text{пр}}$ , при якій це відбувається, називається електричною міцністю [5]:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{l}, \text{ В/м}, \quad (10.11)$$

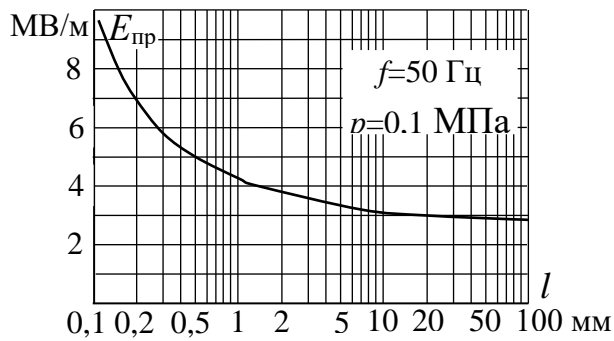
де  $U_{\text{пр}}$  – електрична напруга, при якій відбувається електричний пробій, В;  
 $l$  – відстань між електродами (товщина діелектрика), м.

#### Електричний пробій газоподібних діелектриків

Пробій газоподібного діелектрика обумовлений ударною і фотонною іонізацією, тобто суто електричними і дуже швидкими процесами. Тому при визначенні електричної міцності  $E_{\text{пр}}$  (10.11) таких діелектриків використовують максимальні (амплітудні) значення напруги  $U_{\text{пр}}$ .

Ударна іонізація відбувається внаслідок зіткнення з нейтральними молекулами вільних електронів як найбільш рухливих зарядів, які під впливом електричного поля отримали велику швидкість переміщення (близько 1000 км/с), а значить велику, кінетичну енергію, якої достатньо для іонізації молекул. Якщо процес іонізації розвивається лавиноподібно, то відбувається пробій діелектрика. Цей процес прискорюється, якщо внаслідок ударної іонізації додатково виникають фотони, енергії яких достатньо для іонізації інших молекул газу [5]. Пробій газу відбувається протягом  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с при  $l = 1$  см.

Вплив відстані між електродами на електричний пробій газу відображений на рисунку 10.8 на прикладі повітря [5].

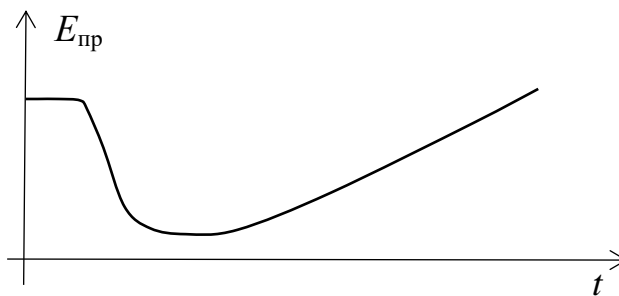


**Рисунок 10.8 – Залежність електричної міцності повітря від відстані між електродами**

Зокрема, електрична міцність повітря зростає з 3 МВ/м при  $l = 20$  мм до 7 МВ/м при  $l = 0,2$  мм. Через цю залежність випробування діелектриків на їх електричну міцність проводять при стандартній товщині діелектрика (чи відстані між електродами)  $l_{\text{ст}} = 2,5$  мм.

#### Вплив тиску газу на його електричний пробій

При підвищенні тиску збільшується щільність газу, зменшується довжина вільного пробігу електронів та їх здатність здійснювати ударну іонізацію. Тому в звичайних умовах електрична міцність газу  $E_{\text{пр}}$  пропорційно залежить від його тиску  $p$  (права частина графіка на рис. 10.9).



**Рисунок 10.9 – Залежність електричної міцності газу від його тиску**

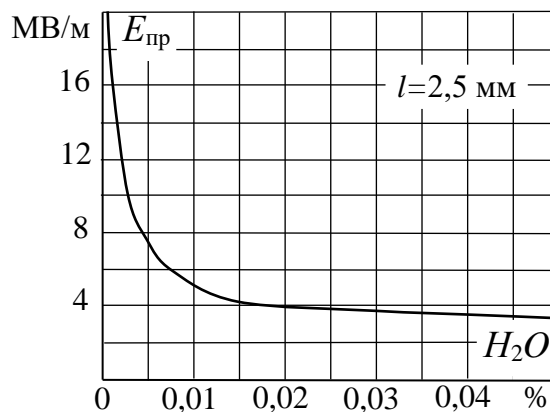
В дуже розрідженому газі знижується вірогідність зіткнення електронів з молекулами, і тому залежність  $E_{\text{пр}}$  від  $p$  стає обернено пропорційною (ліва частина графіка на рис. 10.9). У стані майже вакууму ( $p \approx 0$ ) домінує вплив холодної емісії, тобто виривання електронів з електродів силами Кулона. В таких випадках значення  $E_{\text{пр}}$  залежить лише від матеріалу електродів.

В неоднорідному електричному полі перед пробоем може виникати частковий пробій газу у вигляді корони поблизу електродів з малими розмірами, тобто в місцях підвищеної напруженості  $E$ . Особливо знижується електрична міцність газу, якщо електрод з малими розмірами підключений до позитивної клеми джерела постійного струму.

### Електричний пробій рідких діелектриків

Рідкі діелектрики (зазвичай – це нафтове або трансформаторне масло) відрізняються від газоподібних більшою щільністю, а значить меншою довжиною вільного пробігу електронів і більш високою електричною міцністю. Електричний пробій (втрата електроізоляційних властивостей) відбувається внаслідок іонізаційних теплових процесів. Основними факторами негативного впливу на електричну міцність трансформаторного масла  $E_{пр}$  (10.11) є температура та вода, яка потрапляє в масло з вологого повітря і знаходиться в ньому у стані емульсії.

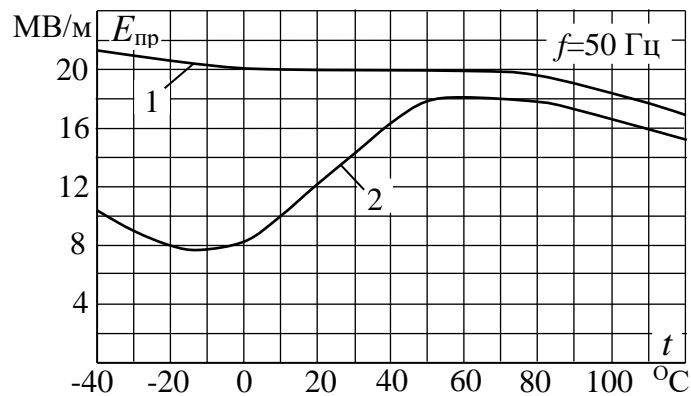
Вплив вологи на електричний пробій масла стає особливо значним, якщо вміст води перевищує 0,01% (рис. 10.10)



**Рисунок 10.10 – Залежність електричної міцності трансформаторного масла від вмісту води**

Негативна дія вологи посилюється волокнистими домішками, які інтенсивно вбирають воду. Пробій рідких діелектриків пояснюється тим, що полярні домішки (емульсійна вода, волокна, тверді частинки) орієнтуються в електричному полі вздовж його силових ліній, утворюючи ланцюжки, в яких протікає струм, що викликає інтенсивне місцеве нагрівання [5].

Вплив температури на електричний пробій масла розглянутий на рисунку 10.11. Електрична міцність  $E_{\text{пр}}$  трансформаторного масла починає суттєво знижуватись при температурі більше  $80^{\circ}\text{C}$ , коли починають закипати легкі фракції масла з виникненням багатьох газових бульбашок.



**Рисунок 10.11 – Залежність електричної міцності трансформаторного масла від температури при  $l = 2,5$  мм (1 – висушене масло, 2 – експлуатаційне масло)**

Наявність домішок води в експлуатаційному маслі суттєво знижує його електричну міцність  $E_{\text{пр}}$ . Зростання  $E_{\text{пр}}$  експлуатаційного масла в діапазоні температур  $0...60^{\circ}\text{C}$  пояснюється переходом домішок води із стану емульсії в стан молекулярного розчину. Підвищення  $E_{\text{пр}}$  у процесі охолодження масла в діапазоні температур  $-10...-40^{\circ}\text{C}$  пояснюється збільшенням в'язкості масла та замерзанням краплинок води.

### **Електричний пробій твердих діелектриків**

Тверді діелектрики, на відміну від газоподібних та рідких діелектриків, не відновлюють свої електроізоляційні властивості після електричного пробою. Електричний пробій твердого діелектрика може мати такі чотири різновиди.

*Пробій однорідного діелектрика* – це суто електричний пробій внаслідок ударної іонізації при майже повній відсутності електропровідності і діелектричних втрат, що характерно для газоподібних і рідинних діелектриків під впливом однорідного електричного поля. Процес пробою відображається дуже швидко – упродовж  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  с. Електрична міцність деяких однорідних діелектриків в однорідному електричному полі

може перевищувати електричну міцність трансформаторного масла в декілька разів [8]. Наприклад, електрична міцність скла, слюди і просоченого рідким діелектриком паперу сягає 100 ... 300 МВ/м, тобто на порядок більше, ніж у трансформаторного масла [5...8].

*Неоднорідність твердих діелектриків* спричиняється часто газовими включеннями в них та пористістю. До неоднорідних твердих діелектриків відносяться не просочені рідинним діелектриком папір та дерево, пориста кераміка. Їх електрична міцність дещо перевищує електричну міцність повітря. Якщо ж щільність цих матеріалів підвищена або якщо газові включення витіснені рідким діелектриком, то їх електрична міцність зростає.

*Тепловий пробій* обумовлений нагрівом діелектрика через його прямий контакт з провідником електричного струму (9.10), через наявність стороннього джерела тепла, а також через електричний струм та діелектричні втрати безпосередньо в діелектрику, особливо при великих значеннях напруженості  $E$  електричного поля, частоти поля  $\omega$ , діелектричної проникності  $\epsilon_r$  і тангенса кута діелектричних втрат  $tg\delta$  діелектрика (10.3). Нагрів діелектрика в свою чергу суттєво збільшує  $\epsilon_r$  і  $tg\delta$ , що сприяє подальшому нагріву діелектрика. Якщо в окремих зонах діелектрика тепловиділення перевищує теплопередачу, то процес розігріву цих зон до критичних для даного діелектрика температур (близько 100...150°C, інколи 200...300°C) розвивається лавиноподібно.

*Електрохімічний пробій* виникає внаслідок електролітичних процесів у діелектрику, які зумовлюють його поступове хімічне руйнування, незворотне погіршення електроізоляційних властивостей та зниження електричної міцності. Це явище називають старінням діелектрика, яке відбувається повільно, супроводжується утворенням невеликої кількості хімічно активних речовин або напівпровідних сполучень. Старіння діелектрика прискорюються під впливом підвищеної температури та високої вологості повітря.

## 10.4 Теплові властивості діелектриків

Серед теплових властивостей діелектриків найбільш важливими є теплостійкість та теплопровідність.

*Теплостійкість* – це здатність електроізоляційних матеріалів витримувати короточасне сильне нагрівання без втрати чи погіршення його властивостей.

*Нагрівостійкість* – це здатність електроізоляційних матеріалів виконувати свої основні функції без пошкоджень і недопустимого погіршення властивостей під впливом високої температури на протязі певного часу (як правило 20000 год). Час витримки під дією високої температури обмежується тепловим старінням діелектрика.

### **Класи діелектриків щодо нагрівостійкості**

Можливість підвищення робочої температури ізоляції надзвичайно важлива. Вона дозволяє отримати більшу потужність обладнання при збереженні габаритів або зменшити габарити та вартість виробів при збереженні потужності. Зменшення габаритів особливо важливо для пересувних видів обладнання. Електроізоляційні матеріали, які використовуються в електричних машинах, трансформаторах та апаратах, поділяють на сім основних класів нагрівостійкості в залежності від допустимої робочої температури [5...8] (температурного індексу):

Клас Y (до 90°C) – волокнисті матеріали на основі целюлози, бавовни, шовку та поліамідів, які не просочені і не занурені в рідкий електроізоляційний матеріал (пряжа, тканини, стрічки, папір, картон, деревина); полівінілхлорид; гума з натурального каучуку; поліетилен; полістирол.

Клас A (до 105°C) – ті ж самі волокнисті матеріали, але просочені масляними, масляно-смоляними та іншими лаками або занурені в рідкий діелектрик; поліамідна плівка; ізоляція емальованих провідників полівінілацетатними лаками.

Клас E (до 120°C) – пластмаси з органічним наповнювачем та термореактивними сполуками (гетинакс, текстоліт); епоксидні і поліуретанові смоли та компаунди; полікарбонатні плівки; ізоляція емальованих провідників на поліуретанових і епоксидних лаках.



Клас В (до 130°C) – матеріали на основі слюди, азбесту, скловолокна з органічними сполуками і просоченими матеріалами та на органічних підкладках (міканіти, склотекстоліти, склолакотканини); поліуретанові лаки; епоксидні компаунди з неорганічним наповнювачем.

Клас F (до 155°C) – міканіти без підкладок або з неорганічними підкладками із застосуванням органічних сполук підвищеної теплостійкості, епоксидних і кремнійорганічних смол.

Клас H (до 180°C) – матеріали на основі слюди, азбесту, скловолокна разом з кремнійорганічними смолами підвищеної теплостійкості; кремнійорганічні еластополімери; фторопласт-4.

Клас C (до 200°C) – неорганічні матеріали без органічних сполук і просочених матеріалів (слюда, керамічні матеріали, скло, кварц, азбест, теплостійкі міканіти).

Для матеріалів, які мають працювати при більш високих температурах, уведено класи 220 і 250 (робочі температури 220 і 250°C). До них належать деякі види слюди, керамічні матеріали, скло. Для ще більш високих робочих температур допускається введення класів 275, 300 ... (через кожні 25°C).

Матеріали відносять до певного класу нагрівостійкості на основі досвіду експлуатації або випробувань. Аналіз даних багаторічної експлуатації електричних машин виявив, що термін служби їх ізоляції, а отже і машин, різко скорочується при перевищенні температури обмотки максимально допустимого значення (відповідного класу теплостійкості ізоляції). Так, для ізоляції класів А і В при перевищенні температури приблизно на кожні 10°C термін служби зменшується вдвічі.

### **Теплопровідність діелектриків**

Важливість теплопровідності діелектриків обумовлена необхідністю постійної передачі через діелектрик теплової енергії від працюючого електрообладнання в оточуюче середовище. Основними джерелами теплової енергії є електричні втрати в провідниках з електричним струмом, діелектричні втрати (10.3) і магнітні втрати. Діелектрики мають низьку теплопровідність через надзвичайно малу кількість вільних електронів, які виконують важливу роль у теплопередачі. Серед поширених у використанні діелектриків низьку питому теплопровідність  $\gamma_m$  мають:

- повітря ( $\gamma_m = 0,05 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ );
- папір ( $\gamma_m = 0,1 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ );
- лакотканина ( $\gamma_m = 0,13 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ).

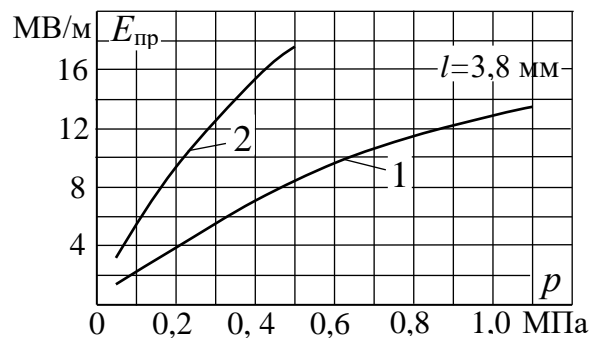
Відносно велику теплопровідність мають:

- гетинакс ( $\gamma_m = 0,35 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ );
- фарфор ( $\gamma_m = 1,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ );
- кристалічний кварц ( $\gamma_m = 12,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ).

## 10.5 Діелектричні матеріали різних агрегатних станів

### Газоподібні діелектричні матеріали

*Повітря* в багатьох випадках залишається основним діелектриком, незважаючи на ряд його недоліків. Маються на увазі перш за все його низькі значення діелектричної проникності  $\epsilon_r$ , електричної міцності  $E_{\text{пр}}$  і теплопровідності  $\gamma_m$  (рис. 10.8, 10.9 і 10.12).



**Рисунок 10.12** – Залежність електричної міцності повітря (1) і елегазу (2) від тиску

*Елегаз* – це сульфур(VI) фторид (гексафторид сірки або шестифториста сірка)  $SF_6$ . Назва цього діелектрика походить від словосполучення «електричний газ» через його високі електроізоляційні властивості. Відносно повітря електрична міцність елегазу в 2,5 рази, а густина – в 6,1 рази вище. Елегаз прозорий, не токсичний та хімічно стійкий. Особливо великі переваги перед повітрям має елегаз при підвищеному тиску (рис. 10.12). При підвищеній температурі, зокрема, в зоні електричної дуги під

час розмикання провідника з електричним струмом молекули елегазу розкладаються на фтор і сірку, забираючи значну частину електричної енергії і сприяючи гасінню дуги. Забрана енергія потім поступово повертається внаслідок поновлення елегазу. Елегаз успішно використовується в електричних вимикачах підвищеної напруги та потужності, а також у конденсаторах та електричних кабелях.

*Водень.* Важливими його перевагами є велика питома теплопровідність і теплоємність, а також дуже мала щільність при звичайному тиску. Ці властивості дозволяють ефективно використовувати водень для охолодження рухомих частин дуже потужних електричних машин, зокрема, синхронних турбогенераторів та компенсаторів. Ефективність використання водню проявляється в суттєвому покращенні охолодження машин, зниженні втрат потужності машини на тертя та вентиляцію, в підвищенні потужності машини та її коефіцієнту корисної дії, покращенні роботи електричних щіток, уповільненні старіння електричної ізоляції. Водень завдяки малим розмірам атомів легко розчиняється в металах, особливо в літій  $Li$ , що дозволяє зручно і безпечно зберігати і транспортувати водень. Наприклад, кілограм літій гідриду  $LiH$  може вмістити  $2,8 \text{ м}^3$  водню. Перелічені переваги компенсують головний недолік водню – його високу вибухонебезпечність у середовищі, де є кисень. Цей недолік змушує використовувати ряд технічних засобів попередження можливого вибуху водню як електроізоляційного та охолоджуючого газу.

*Азот ( $N_2$ )* отримують з повітря скраплення з подальшою ректифікацією. Зміст чистого азоту в газоподібному стані коливається в межах 99-99,9%, в рідкому - 96%.

Основні параметри азоту: щільність, теплопровідність, електрична міцність, коефіцієнт діелектричної проникності і питомий опір такого ж порядку, як і у повітря.

При нормальній температурі ( $20^\circ\text{C}$ ) азот хімічно інертний і не реагує з металами, за винятком літію. При нагріванні з'єднується з магнієм і кальцієм, а при дуже високій температурі – з киснем і воднем.

У чистому вигляді азот використовується як ізолююче середовище у високовольтних конденсаторах і електровакуумній техніці, а також як захисне середовище (мікроелектроніка, трансформатори).

Найбільш широке застосування азот як ізолююче середовище перебувають у суміші з елегазом.

*Інертні гази.* До них відносяться гелій *He*, неон *Ne*, аргон *Ar*, криптон *Kr*, ксенон *Xe* і радон *Rn*. Ці гази хімічно дуже інертні, мають низьку щільність і легко іонізуються через малу електричну міцність  $E_{\text{пр}}$ .

Інертні гази мають дуже низький потенціал іонізації, тому їх електрична міцність низька (наприклад, у гелію в 17 разів нижче, ніж у повітря). Інертні гази застосовуються в техніці слабких струмів в газорозрядних приладах. Кожен з інертних газів мають свої особливі і навіть унікальні властивості, які дозволяють використовувати їх у досить незвичайних умовах.

✓ Гелій *He* має найменшу температуру зрідження, що дозволяє використовувати його як ефективний низькотемпературний охолоджувач, у тому числі для створення умов надпровідності електричних провідників. Зокрема, температура зрідження основного ізотопу гелію  $^4\text{He}$  складає 4,216 К при атмосферному тиску, в'язкість рідкого гелію практично нульова, а теплопровідність – навпаки, дуже велика.

✓ Неон *Ne* має відносно низьку температуру зрідження (27,1 К) при значно більшій теплоті пароутворення у порівнянні з гелієм, і тому інколи використовується якості низькотемпературного охолоджувача. Неоном заповнюють газорозрядні та сигнальні лампи яскраво-червоного кольору, які використовуються в рекламі, радіотехнічній апаратурі, а також на маяках та аеродромах завдяки слабкому розсіюванню в тумані променів червоного кольору. Суміш неону з гелієм використовують як робоче середовище в газових лазерах. Широкому використанню неону заважає його висока вартість, яка в декілька сотень разів вище вартості гелію.

✓ Аргон *Ar* зріджується при температурі 87,1 К. Його отримують як побічний продукт при розділення повітря на кисень і азот у промислових масштабах, і тому має відносно низьку вартість. Аргон використовується в газорозрядних трубках фіолетово-голубого кольору, аргонових лазерах, для наповнення звичайних освітлювальних ламп розжарювання, для створення захисного (без кисню) середовища при зварюванні деяких металів, наприклад, алюмінію.

✓ Криптон *Kr* зріджується при температурі 119,8 К. Його отримують з повітря у вигляді криптон-ксенонової суміші і використовують для наповнення газорозрядних трубок зеленуватого кольору та рентгенівських трубок, а також для виготовлення надпотужних ультрафіолетових газових лазерів.

✓ Ксенон *Xe* зріджується при температурі 112 К, що дуже близько до температури зрідження криптону. Його отримують з криптон-ксенонової суміші і використовують для виготовлення потужних газорозрядних та імпульсних джерел світла, як робоче середовище лазерів, а також як робоче тіла в іонних реактивних двигунах.

✓ Радон *Rn* – це продукт радіоактивного розпаду багатьох радіоактивних речовин, який не має стабільних ізотопів, не виробляється і майже не використовується. Цей газ здатний накопичуватись у погано провітрюваних приміщеннях через наявність у будівельних матеріалах деякої кількості радіоактивних речовин.

### **Рідкі діелектричні матеріали**

Рідкі діелектрики органічно поєднують в собі дві дуже важливі функції – забезпечення високої електричної міцності ізоляції та відведення тепла від обмоток та магнітопроводів діючого електричного обладнання. Виконання першої функції ґрунтується на значно вищій електричній міцності рідких діелектриків у порівнянні з газоподібними діелектриками та на здатності рідких діелектриків витіснити з волокнистих діелектриків газові порожнини, тобто просочувати волокнисті діелектрики. Виконання другої функції ґрунтується на значно більшій теплоємності і теплопровідності рідких діелектриків у порівнянні з газоподібними діелектриками та на можливості фізичного переміщення і переносу тепла, тобто на конвекції, на що не здатні тверді діелектрики. Окрім зазначених функцій рідкі діелектрики здатні ефективно гасити енергію електричної дуги в електричних вимикачах. Ця енергія накопичується в магнітному полі навколо провідників електричного струму і потім майже повністю виділяється в місті розриву електричного струму відповідно до закону збереження енергії.

Рідкі діелектрики, які використовуються в електрообладнанні, можна поділяти на три основні групи – нафтові електроізоляційні масла, рослинні масла та синтетичні рідинні діелектрики.

### Нафтові електроізоляційні масла

Основну частину нафтових електроізоляційних масел складають вуглеводневі складові. Нафтові масла отримують методом ретельного чищення залишкових фракцій нафти відповідного рівня в'язкості. Нафтові електроізоляційні масла є горючими рідинами і становлять велику небезпеку. Пожежна небезпека оцінюється по температурі спалаху парів рідкого діелектрика в суміші з повітрям. Ця температура повинна бути не нижче 135 ... 140°C. До них відносять *трансформаторне, конденсаторне та кабельне* масло.

*Трансформаторне масло* – це суміш різноманітних вуглеводнів, отриманих з нафти шляхом ступінчатої перегонки з виділенням потрібних фракцій масла і подальшого ретельного їх очищення від домішок. Найбільш важливою властивістю трансформаторного масла є його електрична міцність, яка залежна від вмісту вологи (рис. 10.10), газових включень і температури (рис. 10.11). Електричну міцність визначають експериментально при використанні металевих дискових електродів діаметром 25 мм із закругленими кінцями при відстані між цими електродами  $l = 2,5$  мм. У таблиці 10.1 наведені норми мінімально допустимих значень електричної міцності двох типів масла – «свіжого» (чистого і сухого) масла, підготовленого до заливки в трансформатор чи інший апарат, і «експлуатаційного», яке знаходиться в експлуатації [5].

**Таблиця 10.1 – Норми електричної міцності трансформаторного масла**

Номинальна напруга апарата, наповненого маслом, кВ	Електрична міцність масла $E_{пр}$ (не менше), МВ/м	
	для «свіжого»	для «експлуатаційного»
До 15 включно	10	8
Від 15 до 35 включно	12	10
Від 60 до 220 включно	16	14
Від 330 і вище	20	18

*Конденсаторне масло* використовується для просочення паперової електричної ізоляції конденсаторів. Просочений маслом папір має більшу діелектричну проникність  $\epsilon_r$  і більшу електричну міцність  $E_{пр}$ , що дозволяє знизити габарити, масу і вартість конденсаторів при заданих ро-

бочій напрузі, частоті і ємності. Конденсаторне масло схоже на трансформаторне за технологією виготовлення, але потребує більш ретельного очищення. Електрична міцність просушеного конденсаторного масла має бути не менше 20 МВ/м.

*Кабельне масло* використовується для просочення паперової електричної ізоляції електричних силових кабелів. Кабельне масло буває декількох типів в залежності від величини робочої напруги, які відрізняються в'язкістю. У високовольтних кабелях з напругою 110...500 кВ використовують особливо ретельно очищене і дегазоване масло створюючи додатковий тиск  $\approx 0,3...0,4$  МПа під час експлуатації кабелю.

Рослинні електроізоляційні масла – в'язкі рідини, які отримують з насіння різних рослин. Серед цих масел найбільш важливими є висихаючі масла. Висихання відбувається внаслідок хімічних процесів на основі окисної полімеризації. При нагріванні плівка висушеного рослинного масла не розчиняється. Прикладами рослинного електроізоляційного масла є *конопляне, тунгове і касторове* масло.

#### Синтетичні рідкі електроізоляційні діелектрики

Серед синтетичних масел, які за деякими показниками краще нафтових, можна відзначити *хлоровані вуглеводні, силіційорганічні і фторорганічні* рідини [5...8].

*Хлорований вуглеводень* – це хлорований продукт дифенілу  $C_{12}H_{10}$  з різним ступенем хлорування. Частіше використовують пентахлоробіфеніл (хлорований вуглеводень)  $C_{12}H_5Cl_5$ , який називають соволом. У порівнянні з нафтовими маслами совол має кращі властивості:

$$\epsilon_r \approx 5; tg\delta \approx 0,005 \dots 0,01; \rho \approx 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}; E_{пр} \approx 15 \text{ МВ/м.}$$

Недоліком соволу є токсичність газових виділень, які виникають під впливом електричної дуги. **В даний час використання хлорованих вуглеводнів типу соволу і совтолу заборонено!**

*Силіційорганічні рідини* – це речовини, молекули яких складаються з атомів силіцію і карбону та мають лінійну будову. У порівнянні з нафтовими маслами силіційорганічні рідини мають кращі властивості, особливо щодо теплостійкості (до 250°C):

$$\varepsilon_r = 2,4 \dots 2,8; \operatorname{tg} \delta = 0,0001 \dots 0,0003;$$

$$\rho = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}; E_{\text{пр}} \approx 14 \dots 18 \text{ МВ/м.}$$

Ці рідини мають високу вартість і тому використовуються лише при підвищених робочих температурах.

*Фторорганічні рідини* – це речовини, молекули яких складаються з атомів карбону і фтору, мають хімічну властивість  $C_m F_n$  та лінійну будову. Ці речовини можуть бути в рідкому, газоподібному чи твердому стані. Головною перевагою фторорганічних рідин є висока теплостійкість (до 300°C), негорючість і здатність до інтенсивного відведення тепла. Інші характеристики фторорганічних рідин:

$$\varepsilon_r = 2,2 \dots 2,5; \operatorname{tg} \delta = 0,0001 \dots 0,0002;$$

$$\rho = 10^{12} \dots 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}; E_{\text{пр}} \approx 12 \dots 19 \text{ МВ/м.}$$

### **Тверді діелектричні матеріали**

Загальною відмінністю більшості з твердих діелектриків від газоподібних і рідких діелектриків є здатність витримувати механічні навантаження окрім основних електроізоляційних функцій.

### Смоли і полімери

Смоли є основним початковим матеріалом або важливим компонентом для виготовлення багатьох твердих діелектриків. При звичайній температурі смоли – це аморфні скловидні речовини, які при нагріванні стають пластичними і потім рідкими з клейкими властивостями. За своїм походженням смоли бувають природними і синтетичними. Найбільше практичне значення мають синтетичні смоли, які отримані в результаті полімеризації або поліконденсації. Тому в деяких випадках синтетичні смоли називають полімерами. Полімери можуть створюватися з мономерів шляхом полімеризації або поліконденсації. Процес полімеризації відбувається за участю однієї речовини (мономера) під дією нагріву, високого тиску, ультрафіолетових променів, каталізаторів без виділення побічних продуктів. Внаслідок полімеризації утворюються лінійні полімери, молекули яких мають вигляд ланцюжків або ниток. Лінійні полі-



мери гнучкі та еластичні, більшість з них при помірному підвищенні температури розм'якшуються та плавляться, і тому часто називаються термопластичними. Процес поліконденсації відбувається за участю не менше двох різних хімічних речовин з виділенням побічних продуктів (води, карбон(IV) оксиду, аміаку). Внаслідок поліконденсації утворюються просторові полімери чи смоли, молекули яких розвинуті у різних напрямках простору. Просторові полімери та смоли зазвичай тверді, крихкі; важко піддаються плавленню і розчиненню, і тому часто називаються термореактивними.

Смоли й полімери можна розділити на три основні групи – *природні смоли, термопластичні і термореактивні* синтетичні смоли і полімери.

*Природні смоли* є продуктом життєдіяльності деяких комах або смолоносних рослин. Одержують їх майже в готовому вигляді лише при нескладних операціях очищення і переплавки.

✓ Шелак – смола, яка виділяється на деревах комахами у тропіках. При нагріванні до 60°C стає гнучким, при > 60°C плавиться, а при тривалому нагріванні запікається і отримує термореактивні властивості. Електроізоляційні властивості:

$$\rho_v = 10^{13} \dots 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r \approx 3,5, tg\delta \approx 0,01, E_{пр} = 20\dots 30 \text{ МВ/м.}$$

✓ Каніфоль – крихка смола, складається в основному з органічних кислот, розчиняється в рідких вуглеводнях, розм'якшується при температурі +50...70°C. Каніфоль отримують з природної смоли сосни. Розчин каніфолі в нафтовому маслі, використовується при виготовленні масляних лаків і кабельних компаундів. Електроізоляційні властивості:

$$\rho_v = 10^{12} \dots 10^{13}; \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r \approx 3; tg\delta \approx 0,03; E_{пр} = 10\dots 15 \text{ МВ/м.}$$

✓ Копали – тугоплавкі, тверді і важкорозчинні смоли. Їх добувають як викопні продукти розкладу дерев-смолоносіїв, наприклад, у вигляді бурштину. Копали використовуються як домішки до масляних лаків. Електроізоляційні властивості копалів:

$$\rho_v = 10^{15} \dots 10^{17} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r \approx 2,8, tg\delta \approx 0,001.$$

*До термопластичних полімерів з лінійною будовою молекул належать поліетилен, полівінілхлорид, фторопласт-4, полістирол, поліімідні смоли.*

✓ Поліетилен – продукт полімеризації газоподібного етилену  $C_2H_4$ , безбарвний, прозорий, твердий, жирний на дотик, неполярний, стійкий до дії кислот та випромінювання; у полум'ї оплавляється і горить, має доволі високі електроізоляційні властивості:

$$\rho_v = 10^{13} \dots 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 2,3\dots 2,4;$$
$$tg\delta = 0,0001\dots 0,0005; E_{пр} = 15\dots 20 \text{ МВ/м.}$$

Із поліетилену виготовляють плівки, шланги, трубки для ізоляції кабелів, каркаси котушок. Зараз поліетилен широко використовують також для ізоляції проводів та високовольтних кабелів.

✓ Полівінілхлорид (ПВХ) – продукт полімеризації газоподібного хлороетену (вінілхлориду)  $C_2H_3Cl$  у присутності перекису водню. ПВХ має жовтуватий колір, твердий, крихкий, горить тільки у полум'ї, стійкий проти дії води, кислот, спирту, гасу, бензину, озону, опромінення. ПВХ є полярним діелектриком і тому має знижені діелектричні властивості порівняно з неполярними полімерами:

$$\rho_v = 10^{13} \dots 10^{14} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 3,2\dots 3,6;$$
$$tg\delta = 0,03\dots 0,08; E_{пр} = 15\dots 20 \text{ МВ/м.}$$

ПВХ використовують для ізоляції проводів та кабелів низької напруги, трубок для допоміжної ізоляції, липких ізоляційних стрічок, плівок.

✓ Політетрафторетилен (фторопласт-4) – продукт полімеризації газоподібного тетрафторетилену  $C_2F_4$ . Фторопласт-4 – фторорганічний полімер, білий або сіруватий на вигляд матеріал, порівняно м'який, неполярний. За електроізоляційними властивостями фторопласт-4 є одним з найкращих діелектриків:

$$\rho_v = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 1,9\dots 2,1;$$
$$tg\delta = 0,0001\dots 0,0003; E_{пр} = 20\dots 30 \text{ МВ/м.}$$

Фторопласт-4 має надзвичайно високу теплостійкість (+250°C), зберігає гнучкість при температурі нижче -80°C, надзвичайно хімічно стійкий, негорючий, не змочується рідинами, має незначну радіаційну стійкість. Фторопласт-4 застосовується у відповідальних випадках при

одночасній дії на ізоляцію високих або низьких температур та хімічно активних середовищ.

✓ Полістирол – продукт полімеризації рідкого стиrolу  $C_8H_8$ . Електроізоляційні властивості полістиролу приблизно такі самі як у поліетилену. Полістирол широко використовується в техніці високих і надвисоких частот. Його недоліками є крихкість при низьких температурах та схильність до виникнення поверхневих тріщин.

✓ Поліімідні смоли мають у собі угруповання атомів ...-CO-N-CO-... Вони є дуже якісними діелектричними матеріалами. Поліімідні смоли найбільш теплостійкі серед полімерів (не менш  $+220^\circ\text{C}$ ), мають значну морозостійкість (до  $-269^\circ\text{C}$ ), стійкі до органічних розчинників, масел та розбавлених кислот, а також до дії іонізуючого випромінювання. Електроізоляційні властивості поліімідів:

$$\rho_v = 10^{15} \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 3,5;$$
$$tg\delta = 0,0006\dots 0,0016; E_{\text{пр}} = 160\dots 200 \text{ МВ/м.}$$

З поліімідів виробляють плівки, які використовують у конденсаторах, теплостійких кабельних виробках, ізоляції електричних машин, а також для виготовлення деяких пластмас і лаків для покриття провідників та просочення невеликих котушок.

До *терморезистивних синтетичних смол і полімерів* відносяться фенолформальдегідні смоли, епоксидні смоли у твердому стані, кремнійорганічні смоли.

✓ Фенолформальдегідні (бакелітові) смоли є продуктами поліконденсації водяних розчинів фенолу  $C_6H_5OH$  і формальдегіду  $H_2CO$  з каталізатором. У разі надлишку формальдегіду при використанні лужного каталізатора (аміаку) одержують терморезистивну смолу (бакеліт) з непоганими діелектричними характеристиками:

$$\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 5\dots 6,5;$$
$$tg\delta = 0,01\dots 0,1; E_{\text{пр}} = 10\dots 20 \text{ МВ/м.}$$

Бакеліт стійкий до дії води, спирту, ацетону, бензину, масел, сульфатної та хлоридної кислот. Бакелітову смолу використовують для виготовлення гетинаксу, текстоліту, паперово-бакелітових циліндрів, трубок,

ізоляційних втулок. На основі бакеліту виготовляють порошки для гарячого пресування масових виробів – вимикачів, розеток, кнопок, штепсельних вилок.

✓ Епоксидна смола в звичайному стані є термопластичним матеріалом. Але після додавання отверджувача епоксидна смола протягом декількох годин стає термореактивною внаслідок полімеризації. Епоксидні смоли використовуються при виготовленні клеїв, лаків, компаундів. Більшість епоксидних смол у процесі їх полімеризації мають токсичний вплив на організм людини.

✓ Силіційорганічні смоли мають силоксанові групи циклічно повторюваних атомів силіцію та кисню. Вони можуть бути як термопластичними з лінійною будовою молекул, так і термореактивними з просторовою будовою молекул. Силіційорганічні смоли використовуються при виготовленні лаків, компаундів, пластмас. Їх високі електроізоляційні властивості зберігаються навіть при підвищених температурах. Недоліком цих смол є відносно висока їх ціна, а також низька механічна міцність.

Електроізоляційні лаки та компаунди – це багатокомпонентні матеріали, які в стадії зберігання та виготовлення ізоляції знаходяться в рідкому стані, а на заключній стадії – твердіють [5...8]. Основними їх компонентами є смоли, полімери, бітуми та рослинні масла, які здатні висихати. Лаки поділяються на *просочувальні*, *покривні* і *клеючі*.

✓ Просочувальними лаками заповнюють пористу ізоляцію для підвищення електричної міцності, теплостійкості, діелектричної проникності.

✓ Покривними лаками утворюють на поверхні діелектриків гладку і вологостійку плівку. Деякі покривні лаки (так звані емаль-лаки) наносяться безпосередньо на поверхню електропровідного металу, утворюючи електроізоляційний шар.

✓ Клеючими лаками склеюють між собою листи твердих діелектричних матеріалів, наприклад, при виготовленні міканітів.

✓ Компаунди – це електроізоляційні просочувальні і заливні речовини, які складаються із суміші різних смол, бітумів і масел. На момент використання компаунди перебувають у рідкому стані. Потім компаунди

твердіють у результаті охолодження або хімічних процесів. Для поліпшення механічних властивостей у них вводять наповнювачі, пластифікатори і отверджувачі. Компаунди використовують для просочення обмоток електричних машин і трансформаторів, для заливання радіоприладів, для герметизації електротехнічних вузлів.

Волокнисті матеріали складаються з частинок витягнутої форми. Повітряні порожнечі між цими частинками суттєво погіршують діелектричні властивості волокнистих матеріалів. Тому їх зазвичай просочують рідкими діелектриками, маслами, лаками чи смолами. До волокнистих матеріалів відносяться *дерево, папір, фібра, тканина* та інші волокнисті матеріали природного, штучного або синтетичного походження.

✓ Дерево має непогані механічні властивості. Діелектричні властивості дерева покращуються шляхом висушування та подальшого просочення його парафіном, конопляним маслом, різноманітними смолами.

✓ Електротехнічний папір і картон – це листові або рулонні матеріали, які виготовляють в основному із деревної целюлози. Дерев'яну тирсу варять у розчині натрій гідроксиду  $NaOH$  для видалення шкідливих домішок, промивають, висушують і прокатують валками, намагаючись мінімізувати об'єм повітряних проміжок. Картон відрізняється від паперу лише товщиною (до 3 мм).

✓ Кабельний папір застосовується для ізоляції (обмотування) провідників силових високовольтних кабелів напругою до 500 кВ. Його просочують масляно-каніфольним компаундом.

✓ Конденсаторний папір є найбільш тонким і високоякісним волокнистим електроізоляційним матеріалом. Його просочують нафтовим конденсаторним маслом для підвищення  $\epsilon_r$  і  $E_{пр}$  та зменшення  $tg\delta$ .

✓ Текстильні електроізоляційні матеріали – це бавовняні, шовкові, синтетичні тканини або склотканини, які просочують електроізоляційними маслами та лаками для покращення їх електроізоляційних властивостей. Якщо для просочення використовуються лаки, то ці матеріали називають лакотканинами або лакованими стрічками.

Пластмаси (пластики) є багатокомпонентними матеріалами, які складаються зі сполучного, наповнювача та деяких додаткових компонентів.

*Сполучне* – це органічна високомолекулярна сполука (органічна смола або полімер), яка має клеючу здатність, а також здатність до пластичної деформації під дією зовнішнього тиску та нагріву.

*Наповнювач* – речовина, яка зчіплюється зі сполучним під дією тиску і підвищеної температури та формується. Наповнювач суттєво здешевлює пластмасу і одночасно може поліпшувати її механічні властивості, особливо, якщо в якості наповнювача використовується листовий волокнистий матеріал, наприклад, папір (гетинакс) або тканина (текстоліт чи склотекстоліт).

*Додатковими компонентами* також можуть бути пластифікатори, які збільшують пластичність та зменшують крихкість матеріалів, отверджувачі, мастильні речовини, барвники.

Гуми – вулканізовані багатокомпонентні системи на основі натурального чи синтетичного каучуку. Гуми завдяки своїй високій еластичності відносяться до еластомерів. При виготовленні гуми до її складу вводять також сірку або тетраметилтіурамдисульфід (тіурам), прискорювачі процесу вулканізації, наповнювачі (крейда, тальк, каолін) для поліпшення механічних властивостей та зниження вартості гуми, пом'якшувачі (стеарин, парафін) для поліпшення технологічних властивостей [6]. В залежності від кількості сульфуру буває м'яка гума (1...3% сульфуру) і тверда гума, яка називається ебонітом (30...35% сульфуру). Чиста (вільна) сірка здатна вступати в хімічну реакцію з купрумом. Тому в разі необхідності ізоляції мідних провідників використовують гуму з додаванням тіураму замість сірки. Гума широко використовується у виробленні провідників і кабелів, діелектричних рукавичок і калош. Суттєвим недоліком гуми є її низька стійкість до дії кисню, світла, тепла та електричних розрядів.

Керамічні діелектрики отримують шляхом спікання дуже роздроблених і ретельно перемішаних мінералів і окислів металів. Вони мають більш високу стійкість до електричного і теплового старіння і до тривалого механічного навантаження у порівнянні з органічними діелектриками.

Серед керамічних діелектриків найбільш відомим є *електротехнічний фарфор*, який використовується при низькій частоті. До його складу входять ~50% каоліну, ~25% кварцу  $SiO_2$  і ~25% польового шпату. Електротехнічний фарфор має такі діелектричні характеристики:

$$\rho_v = 10^{11} \dots 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 5\dots 7;$$

$$tg\delta = 0,025\dots 0,035; E_{пр} = 25\dots 30 \text{ МВ/м.}$$

Для роботи при низькій частоті призначена також низькочастотна конденсаторна кераміка, яку отримують шляхом синтезу чистих оксидів стронцію, вісмуту, титану, стануму, цинку і мангану.

До *високочастотної кераміки* відносяться стеатитова (на основі кліноенстатита  $MgO \cdot SiO_2$ ), форстеритова (на основі форстериту  $2MgO \cdot SiO_2$ ), шпинельно-форстеритова (на основі шпинелі  $MgO \cdot Al_2O_3$  і форстериту  $2MgO \cdot SiO_2$ ), вилемитова (на основі вилемиту  $2ZnO \cdot SiO_2$ ), глиноземиста (на основі алюміній оксиду  $Al_2O_3$ ) і корундова відповідно [6]. Найбільшою теплостійкістю володіє корундова кераміка (високі значення електричних характеристик зберігаються при температурі до  $400^\circ\text{C}$ , а механічні характеристики зберігаються при температурі до  $1600^\circ\text{C}$ ). Корундова кераміка має такі діелектричні характеристики при частоті 1 МГц:

$$\rho_v = 10^{14} \dots 10^{15} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 9,3\dots 10,5;$$

$$tg\delta = 0,0001\dots 0,0005; E_{пр} = 28\dots 50 \text{ МВ/м.}$$

### Слюдяні матеріали

Слюда як основа слюдяних матеріалів – це природний діелектрик, який має дуже високі діелектричні властивості. Слюда зустрічається в природі у вигляді кристалів різних відтінків. Їх характерною особливістю є властивість легко розшаровуватися на дуже тонкі пластинки. Слюда зустрічається в двох видах – *мусковіт* і *флогопіт*. Їх хімічні формули приблизно такі: *мусковіт* –  $K_2O \cdot 3Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ ; *флогопіт* –  $K_2O \cdot 6MgO \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2 \cdot 2H_2O$ . До складу слюди можуть також входити сполуки феруму, натрію і кальцію.

За діелектричними властивостями *мусковіт* краще:

$$\rho_v = 10^{12} \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 6,8\dots 7,2;$$

$$\text{tg}\delta = 0,0003 \text{ при частоті } 1 \text{ МГц і } 0,015 \text{ при частоті } 50 \text{ Гц};$$

$$E_{\text{пр}} \approx 200 \text{ МВ/м.}$$

Діелектричні властивості *флогопіту*:

$$\rho_v = 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}; \varepsilon_r = 6\dots 6,2;$$

$$\text{tg}\delta = 0,0015 \text{ при частоті } 1 \text{ МГц і } 0,05 \text{ при частоті } 50 \text{ Гц};$$

$$E_{\text{пр}} \approx 100 \text{ МВ/м.}$$

Слюда належить до матеріалів з високою теплостійкістю (550...900°C), крихка, хоч і має достатню механічну міцність та вологостійкість. Слюда використовується в слюдяних конденсаторах, при виготовленні клеєних електроізоляційних матеріалів (міканіти, мікалекси, мікастрічки, мікофолій, слюденіти) та ізоляційних прокладок. Для склеювання слюдяних пластинок використовують кремнійорганічні та фенолформальдегідні смоли або лаки на основі цих смол.

Крім природної слюди для електричної ізоляції виробляють синтетичну слюду – *фторфлогопіт*. Він відрізняється від флогопіту тим, що в його кристалічних ґратках гідроксильні групи *ОН* заміщені іонами фтору *F*. Фторфлогопіти мають більш високу теплостійкість – до +1000°C.

Оксидні діелектричні плівки утворюються на поверхні металу у вигляді хімічної сполуки цього металу з киснем і називаються оксидною ізоляцією. Найкраща оксидна плівка  $Al_2O_3$  створюється на поверхні алюмінію. В звичайних умовах алюміній завжди покритий дуже тонкою оксидною плівкою, яка здатна як діелектрик витримувати лише невелику напругу – близько 1 В. Тому для забезпечення прийнятних діелектричних властивостей спеціальною обробкою алюмінію створюють значно товщу оксидну плівку (близько 0,01...0,07 мм), яка здатна витримувати напругу 100...300 В [5]. Для цього використовують електрохімічну анодну обробку поверхні алюмінію.



Для ізоляції при виготовленні резисторів зі сплавів високого опору, а також електронагрівальних приладів використовується оксидна плівка, яка створюється шляхом термічного оксидування провідникового сплаву на повітрі при температурі до 900°C. Провідник з таким покриттям можна намотувати в котушці витками впритул один до одного.

Оксидна ізоляція використовується також для покриття пластин електротехнічної сталі, з яких збирають (шихтують) більшість магнітопроводів електричних машин, трансформаторів та інших видів електрообладнання змінного струму. Такої ізоляції цілком достатньо для обмеження вихрових струмів у магнітопроводах, незважаючи на невисоку електроізоляційну властивість плівки ферум оксиду [5].

## 10.6 Активні діелектрики

На властивості активних діелектриків можна впливати за допомогою зовнішніх енергетичних факторів: електричного або магнітного поля, механічної сили, температури або світлового потоку [6]. В активних діелектриках можуть спостерігатися *сегнетоелектричний*, *п'єзоелектричний* або *електрооптичний* ефекти.

### Сегнетоелектрики

Залежно від механізму спонтанної поляризації сегнетоелектрик поділяють на *іонні* і *дипольні*.

Іонні сегнетоелектрики – це кристали з переважно іонними зв'язками. До них відносяться:

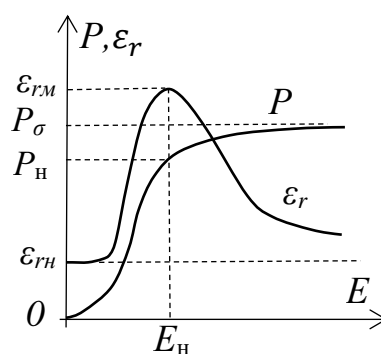
- барію титанат  $BaTiO_3$  ( $T_K = 120^\circ\text{C}$ );
- плюмбум титаніт  $PbTiO_2$  ( $T_K = 490^\circ\text{C}$ );
- кадмій титанат  $CdTiO_3$  ( $T_K = 223^\circ\text{C}$ );
- плюмбум метаніобат  $PbNbO_3$  ( $T_K = 570^\circ\text{C}$ );
- калій ніобат  $KNbO_3$  ( $T_K = 435^\circ\text{C}$ );
- калій йодат  $KJO_3$  ( $T_K = 210^\circ\text{C}$ ) [6].

Дипольні сегнетоелектрики – це речовини, атоми яких зв'язані між собою хімічним (ковалентним) зв'язком. До цих речовин відносяться:

- сегнетова сіль  $NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$  ( $T_K = 24^\circ C$ );
- тригліцинсульфат  $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$  ( $T_K = 49^\circ C$ );
- натрій нітрат  $NaNO_2 \cdot 4H_2O$  ( $T_K = 163^\circ C$ );
- калій дигідрофосфат  $KH_2PO_4$  ( $T_K = -151^\circ C$ ) [6].

Дипольні і іонні сегнетоелектрики в елементарному осередку містять атом (іон) або групу атомів (іонів), які мають два положення рівноваги і створюють настільки сильне власне поле, що зумовлюють поляризацію навколишнього діелектрика без прикладання зовнішнього поля, внаслідок чого виникає спонтанна поляризація.

Самовільна (спонтанна) поляризація обумовлена наявністю відносно великих за розмірами областей (доменів), що мають сильне власне електричне поле – дипольний момент  $P_c = \sum p_0$  самовільної поляризації, де  $p_0$  – електричний (дипольний) момент елементарного осередку домену [6]. Зовнішнє електричне поле сприяє переважній орієнтації дипольних моментів доменів у одному напрямку, що дає ефект сильної поляризації  $P$  з відповідним збільшенням діелектричної проникності  $\epsilon_r$  до максимуму  $\epsilon_{rм}$  при  $E = E_H$ . Коли ж практично всі домени переорієнтувалися, то подальше підсилення зовнішнього електричного поля вже не здатне підвищити поляризацію більш ніж на  $P_\sigma$ . Тому для сегнетоелектриків характерна нелінійна залежність поляризованості  $P$  і діелектричної проникності  $\epsilon_r$  від напруженості зовнішнього електричного поля (рис. 10.13).

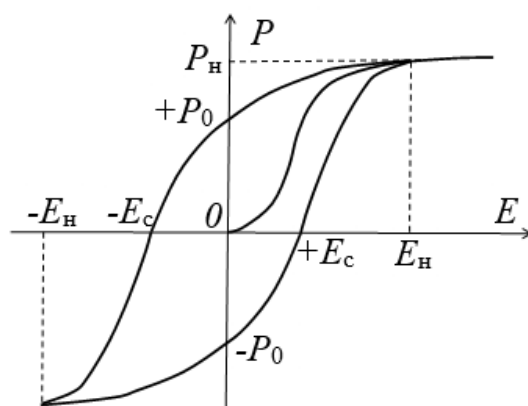


**Рисунок 10.13 – Залежність поляризованості  $P$  і діелектричної проникності  $\epsilon_r$  сегнетоелектрика від напруженості електричного поля  $E$**

Завдяки залежності  $\epsilon_r = f(E)$  самовільною поляризацією сегнетоелектриків можна керувати напруженістю зовнішнього електричного

поля. Їх використовують для виготовлення малогабаритних низькочастотних конденсаторів – *варикондів*, ємність яких змінюється при зміні напруженості прикладеного поля.

Процес переорієнтації електричних моментів доменів при зміні полярності напруженості електричного поля  $E$  супроводжується значними втратами енергії, тобто має місце діелектричний гістерезис аналогічно магнітному гістерезису (рис. 10.14), де  $P_0$  – залишкова поляризованість;  $E_c$  – коерцитивна сила. Площа петлі гістерезису пропорційна питомим втратам енергії за один цикл переорієнтації діелектричних доменів.



**Рисунок 10.14 – Залежність поляризованості  $P$  (Кл/м<sup>2</sup>) і діелектричної проникності  $\epsilon_r$  сегнетоелектрика від напруженості електричного поля  $E$**

Сегнетоэффект зникає при нагріванні діелектрика до температури Кюрі  $T_K$  незалежно від прикладеного ззовні електричного поля. При температурі  $T$  нижче  $T_K$  одне з положень рівноваги стає більш збалансованим – відбувається спонтанна поляризація, в елементарному осередку виникає дипольний момент. У результаті відбувається фазовий перехід діелектрика з параелектричного стану в сегнетоелектричний.

Для виготовлення запам'ятовуючих елементів обчислювальних машин сегнетоелектрики вибирають такими, щоб отримати максимально можливе значення діелектричної проникності  $\epsilon_r$  при мінімально можливій залежності  $\epsilon_r$  від температури і значенні коефіцієнта прямокутності петлі гістерезису

$$K_{\text{ппг}} = \frac{P_0}{P_{\text{нГ}}} > 0,9.$$

## П'єзоелектрики

При поляризації під впливом електричного поля всі діелектрики змінюють свої геометричні розміри. Це явище називається електрострикцією. В більшості діелектриків це явище не має зворотного, тобто під впливом механічних сил діелектриків зазвичай не поляризується. Але існують тверді анізотропні кристалічні асиметричні діелектрики, які поляризуються під дією механічних напружень за відсутності зовнішнього електричного поля – на їх поверхні виникають електричні заряди. Це явище отримало назву «*прямий п'єзоелектричний ефект*», а діелектрики з таким ефектом – п'єзоелектриками [6]. Виникаюча при цьому поляризованість п'єзоелектрика  $P$  (Кл/м<sup>2</sup>) і поверхневі електричні заряди густиною  $\sigma$  (Кл/м<sup>2</sup>) прямо пропорційні механічній напруженості  $G$  (Н/м<sup>2</sup>) з урахуванням полярності (напрямку дії) механічної напруги:

$$P = \sigma = \pm d \cdot G \quad (10.12)$$

де  $d = 10^{-10} \dots 10^{-12}$  Кл/Н – коефіцієнт пропорційності, названий п'єзо-модулем.

Прямий п'єзо ефект використовують для перетворення механічних напружень або деформацій в електричні сигнали – для виготовлення звукознімачів, датчиків деформацій, приймачів ультразвуку.

При зворотному п'єзоелектричному ефекті відбувається механічна деформація кристала  $\frac{\Delta l}{l}$ , пропорційна напруженості  $E$  прикладеного електричного поля:

$$\frac{\Delta l}{l} = \pm d \cdot E. \quad (10.13)$$

Зворотний п'єзо ефект використовують для перетворення електричних сигналів на механічні коливання – для виготовлення акустичних випромінювачів, генераторів ультразвуку. П'єзоелектрики, які використовують на практиці, можна поділити на три групи – монокристалічні п'єзоелектрики, п'єзокерамічні і полімерні п'єзоелектрики.

*Монокристалічні п'єзоелектрики.* Найбільш поширеним у використанні монокристалічним п'єзоелектриком є кварц. З монокристалу кварцу випилюють пластини, шліфують їх поверхні, напиляють на них металеві електроди і утворюють таким чином електромеханічний резонатор з високою механічною добротністю і малим значенням  $tg\delta \approx 10^{-4}$  [6]. Якщо на такий резонатор подати змінну напругу, частота якої співпадає

з частотою власних механічних коливань, то виникають сильні механічні коливання резонансної частоти, тобто проявляється зворотний п'єзоелектричний ефект. Такі пластинки використовуються як стабілізатори частоти. При механічному навантаженні на таку пластинку кварцу з тиском  $10^4$  Па виникає різниця потенціалів 6 мВ, тобто проявляється прямий п'єзоелектричний ефект. Крім монокристалічного кварцу використовуються також монокристали літій сульфату, ніобату і танталату та сегнетової солі, які мають ще кращі характеристики, ніж кварц.

*П'єзокераміка* – це поляризована сегнетокераміка [6]. Для додання сегнетокераміці п'єзоелектричних властивостей її витримують у сильному постійному електричному полі з напруженістю 2...4 МВ/м при температурі 100...150°C протягом близько години [6]. Після зняття дії поля кераміка зберігає залишкову поляризацію і переходить в анізотропний стан. П'єзокераміку виготовляють в основному із полікристалічного сегнетоелектрика – плюмбум цирконату-титанату (ЦТС)  $PbZrO_3 - PbTiO_3$ . Її головна перевага перед монокристалами – це можливість виготовлення активних елементів складної форми і будь-яких розмірів. Недоліком п'єзокераміки є занадто великі значення  $\epsilon_r$ ,  $tg\delta$  та механічних втрат, через що стає практично неможливим її використання на високих частотах.

*Полімерні п'єзоелектрики.* У плівках деяких полімерних матеріалів, текстурованих витяжкою і поляризованих у постійному електричному полі, може виникати п'єзоэффект. Серед таких матеріалів практичний інтерес викликає полівініліденфторид або фторопласт-2 [6]. При витягуванні плівки цього матеріалу на 300...400% утворюється особлива конформація полімерних ланцюгів, які в сильному електричному полі одержують п'єзоэффект. Полімерна п'єзокераміка за своїми властивостями близька до п'єзокераміки, але має перевагу – має приблизно в 4 рази меншу електронну «густину». Ця перевага та висока гнучкість роблять полімерну п'єзокераміку більш перспективним матеріалом у виробництві п'єзоелектричних перетворювачів.

### **Піроелектрики**

*Піроелектричний ефект* – це здатність матеріалу змінювати спонтанну поляризацію  $\Delta P_c$  при зміні температури  $\Delta T$  за відсутності зовнішнього електричного поля:

$$\Delta P_c \approx p \cdot \Delta T, \quad (10.14)$$

де  $p$  – пірокоефіцієнт в Кл/(м<sup>2</sup>К), який залежить від температури, та досягає свого максимуму при  $T \approx T_K$  і падає до нуля при  $T > T_K$ .

Цей ефект має місце у всіх сегнетоелектриках через залежність спонтанної поляризації  $P_c$  від температури  $T$  при  $T < T_K$ , особливо поблизу точки Кюрі  $T_K$ . Піроелектричний ефект у найбільшій мірі проявляється в монокристалічному стані сегнетоелектрика, коли власні електричні поля монодоменних кристалів орієнтовані переважно в одному напрямку майже незалежно від зовнішнього електричного поля [6]. На відмінність від звичайного сегнетоелектрика, вектор спонтанної поляризації «ідеального» піроелектрика неможливо змінити зовнішнім електричним полем аж до стану електричного пробою. Піроелектрики використовуються в теплових детекторах, у тому числі в чутливих детекторах інфрачервоного випромінювання.

Для отримання монодоменних кристалів здійснюють поляризацію готового детектора або вирощеного монокристала постійним електричним полем при температурі  $T \ll T_K$  і фіксують поляризований стан шляхом опромінення, введенням певних летючих домішок або використанню пари електродів з різних металів [6]. Для виготовлення низькочастотних детекторів застосовують леговані або опромінені кристали тригліцинсульфат  $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$  ( $p = 360$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r = 25$ ). Найстабільніші піроелектричні властивості мають літій ніобат  $LiNbO_3$  ( $p = 51$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r = 29$ ) і літій танталат ( $p = 176$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r = 43$ ). Максимальний піроелектричний коефіцієнт  $p$  мають сегнетоелектрики зі значеннями  $T_K$ , близькими до кімнатної температури, наприклад, твердий розчин стронцій-барій-ніобат ( $p = 2800$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r = 8200$ ,  $T_K = 49^\circ\text{C}$ ) або матеріали на основі твердих розчинів плюмбум титанату і плюмбум цирконату, які легують лантаном для зниження температури  $T_K$  до кімнатної температури ( $p = 1760$  мкКл/(м<sup>2</sup>К),  $\epsilon_r = 3980$ ).

*Електрокалоричний ефект* як зворотний піроелектричний – це здатність матеріалу змінювати температуру  $\Delta T$  внаслідок зміни напруженості  $\Delta E$  зовнішнього електричного поля:

$$\Delta T \approx q \cdot \Delta E, \quad (10.15)$$

де  $q$  – коефіцієнт електрокалоричного ефекту, який пропорційний піроелектричному коефіцієнту  $p$  і протилежний за знаком [6].

Електрокалоричний ефект можуть проявляти всі піроелектрики. У них при зміні напруженості  $\Delta E$  зовнішнього електричного поля відбувається зміна спонтанної поляризації  $\Delta P_c$ , що завдяки електрокалоричному ефекту приводить до охолодження або нагрівання кристалу в умовах адіабатичного процесу (при відсутності підведення або відведення тепла). Кристал нагрівається, якщо знак  $q$  позитивний і вектор напруженості  $E$  електричного поля співпадає з вектором спонтанної поляризації  $P_c$ , і охолоджується, якщо вектор  $E$  не співпадає з вектором  $P_c$ . Електрокалоричний ефект спостерігається в максимальній мірі в області фазового переходу сегнетоелектрика (при температурі  $T \approx T_K$ ), особливо, якщо  $T_K$  близька до кімнатної температури.

### Електрооптичні матеріали

Електрооптичний ефект – це зміна діелектричної проникності  $\epsilon_r$ , показника переломлення  $n$  і розсіювання світла під дією зовнішнього електричного поля, а також під впливом теплового поля і тиску. Електрооптичні матеріали використовують для виготовлення активних елементів (модуляторів), призначених для зміни основних параметрів випромінювання в оптичному діапазоні за допомогою зовнішнього електричного поля. В якості технічної характеристики електрооптичного ефекту матеріалів використовують напівхвильову напругу  $U_{\lambda/2}$ , при якій фаза вихідного із кристала світла змінюється на  $180^\circ$  [6]. Залежно від виду електрооптичного ефекту розрізняють електрооптичні матеріали з *лінійним*, *квадратичним* і *динамічним* електрооптичними ефектами.

*Матеріали з лінійним електрооптичним ефектом* мають лінійну залежність  $\epsilon_r$  і  $n$  від напруженості  $E$  електричного поля. До них відносяться кристали п'єзоелектриків і сегнетоелектриків, які не мають центра симетрії [6]:

- кристали калій дигідрофосфату  $KH_2PO_4$   
область прозорості  $\lambda = 0,2 \dots 1,35$  мкм  $U_{\lambda/2} = 10$  кВ при  $\lambda = 0,546$  мкм;
- кристали літій ніобату  $LiNbO_3$

область прозорості  $\lambda = 0,4 \dots 0,5$  мкм,  $U_{\lambda/2} = 3$  кВ при  $\lambda = 0,546$  мкм;

– кристали літій танталату  $LiTaO_3$

область прозорості  $\lambda = 0,3 \dots 0,6$  мкм,  $U_{\lambda/2} = 1,5$  кВ при  $\lambda = 0,546$  мкм.

Окрім перелічених сегнетоелектричних кристалів використовуються також деякі кристали з кубічною структурою подібно до структури алмаза:

– кадмій телурид  $CdTe$

область прозорості  $\lambda = 2 \dots 28$  мкм,  $U_{\lambda/2} = 53$  кВ при  $\lambda = 0,546$  мкм;

– цинк сульфід  $ZnS$

область прозорості  $\lambda = 0,4 \dots 12$  мкм,  $U_{\lambda/2} = 12$  кВ при  $\lambda = 0,546$  мкм;

– купрум хлорид  $CuCl$

область прозорості  $\lambda = 0,4 \dots 20$  мкм,  $U_{\lambda/2} = 6$  кВ при  $\lambda = 0,546$  мкм.

Такі кристали широко використовуються як модулятори лазерного випромінювання.

*Матеріали з квадратичним електрооптичним ефектом* не залежать від знаку прикладеної напруги, але залежать від квадрата напруженості електричного поля. До них належать кристали, які мають центр симетрії, а також деякі ізотропні рідкі середовища [6], наприклад барій титанат  $BaTiO_3$

область прозорості  $\lambda = 0,4 \dots 4,5$  мкм.,  $U_{\lambda/2} = 0,5$  кВ при  $\lambda = 0,546$  мкм.

*Матеріали з динамічним електрооптичним ефектом* мають безперервну хаотичну зміну показника переломлення світла в діелектриках під впливом зовнішнього електричного поля, а також в деяких випадках під впливом теплового поля і тиску. До цих матеріалів відносяться рідкі кристали, які перебувають у проміжному стані між твердим кристалічним і рідким ізотропним станами [6]. Рідкі кристали так само, як і сегнетоелектрики, мають доменну структуру. Тому в змінному електричному полі проявляється петля діелектричного гістерезису. У точці фазового переходу діелектрична проникність  $\epsilon_r$  має максимум, який зникає з підвищенням частоти. У рідких кристалах переорієнтація диполів повільна у порівнянні із сегнетоелектриками, і тому максимум  $\epsilon_r$  має місце при дуже низьких частотах (менше 1 Гц). Структура рідких кристалів дуже рухлива, легко змінюється під впливом зовнішнього енергетичного впливу



(електричного або магнітного поля, температури, тиску), що призводить до змін електричних і оптичних властивостей. Ця особливість і покладена в основу роботи деяких приладів. Керуюче електричне поле може бути постійним або змінним при частоті 100...10000 Гц. Оскільки рідкі кристали мають високий питомий опір ( $\rho = 10^6 \dots 10^{10} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), то споживана ними потужність не перевищує 1 Вт/м<sup>2</sup>, що на декілька порядків менше споживаної потужності газорозрядних і люмінофорних індикаторів. Тому такі матеріали перспективні у використанні, особливо в малогабаритних електронно-обчислювальних машинах.

### Електрети

Електретами називають тверді діелектрики, які довго зберігають поляризований стан (залишкову поляризацію) і утворюють в навколишньому середовищі електростатичне поле – аналогічно постійним магнітам, які утворюють в навколишньому середовищі постійне магнітне поле [6]. Важливою характеристикою електретів є поверхнева густина зарядів  $\sigma$ . Значення  $\sigma$  помітно змінюється в перші години і навіть кілька діб після виготовлення електрета. Тому на практиці використовують сталі значення  $\sigma$ , яке називається поверхневою густиною стабілізованого заряду. Ця характеристика в різних діелектриках становить величину  $10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$ .

Заряд електрета в часі зменшується, у тому числі через електропровідність. Час розряду електрета з дуже високим питомим опором може становити багато років і навіть сотень років. Швидкість розряду електрета зростає з підвищенням температури і вологості навколишнього середовища.

Якщо пластинку електрета товщиною  $l_e$  помістити між обкладками плоского конденсатора, в якому передбачений повітряний проміжок шириною  $l_n$ , то напруженість електричного поля в цьому проміжку [6]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \left(1 + \varepsilon_r \frac{l_n}{l_e}\right)}, \quad (10.16)$$

де  $\sigma$  – густина залишкових електричних зарядів, Кл/м<sup>2</sup>;  $l_e, l_n$  – товщина пластинки електрета і повітряного проміжку, м;  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  –

абсолютна діелектрична проникність вакууму;  $\epsilon_r$  – відносна діелектрична проникність електрета.

Як електрети можуть використовуватися природні діелектрики (віск, парафін, каніфоль, янтар, шелак, слюда), синтетичні полімери (політетрафторетилен, полістирол, поліпропілен, полікарбонати, полівінілхлорид), неорганічні матеріали (сірка, кадмій сульфід  $CdS$ , цинк сульфід  $ZnS$ , ситалли), органічні сполуки (нафталін  $C_{10}H_8$ ), керамічні титановмістні матеріали. Наприклад, кераміка на основі  $CaTiO_3$  здатна мати найстійкіший залишковий заряд [6]:

$$\sigma = 80 \dots 250 \text{ мкКл/м}^2, \epsilon_r = 150, \rho_v = 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}.$$

Залежно від методу виготовлення відомі: *термоелектрети* (нагрівання до плавлення кристалічних або розм'якшення аморфних речовин з подальшим охолодженням у сильному електричному полі), *електроелектрети* (дія сильного електричного поля протягом декількох годин), *короноелектрети* (дія коронним розрядом у газовому проміжку між поверхнею діелектрика й електродом – найпоширеніший промисловий метод), *фотоелектрети* (дія світла і постійного електричного поля). Електрети використовуються як датчики сигналів або перетворювачі – електретні конденсаторні мікрофони, датчики тиску, вібродатчики, тахометри, дозиметри проникаючої радіації, барометри.

## 10.7 Приклади розрахунку завдань з визначення параметрів діелектричних матеріалів

### Визначення параметрів поляризації діелектриків

Завдання. Розрахувати напруженість і енергію електричного поля, а також діелектричні втрати в двох різних діелектриках, які ізолюють обкладинки плоского конденсатора площею  $S = 1,6 \text{ м}^2$ . Конденсатор приєднаний до джерела синусоїдального струму з діючою напругою  $U = 100 \text{ В}$  і частотою  $f = 1 \text{ кГц}$ . Один з цих діелектриків має товщину  $l_1 = 3 \text{ мм}$ , відносну діелектричну проникність  $\epsilon_1 = 2$  і тангенс кута

діелектричних втрат  $tg\delta_1 = 10^{-3}$ , а інший діелектрик – прошарок повітря шириною  $l_2 = 1$  мм.

Рішення. Оскільки діелектрики розміщені послідовно з напрямком дії сил електричного поля, то це відповідає двом послідовно з'єднаним конденсатором (9.4)

$$C_1 = \frac{S \cdot \varepsilon_1 \varepsilon_0}{l_1} = \frac{1,6 \cdot 2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{3 \cdot 10^{-3}} = 9,44 \cdot 10^{-9} \text{Ф};$$

$$C_2 = \frac{S \cdot \varepsilon_2 \varepsilon_0}{l_2} = \frac{1,6 \cdot 1 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}}{10^{-3}} = 14,16 \cdot 10^{-6} \text{Ф}.$$

Електрична напруга  $U$  розподіляється між двома ділянками  $U_1$  і  $U_2$  електричної ізоляції прямо пропорційно реактивним опорам двох конденсаторів  $X_1 = \frac{1}{\omega C_1}$  і  $X_2 = \frac{1}{\omega C_2}$  (9.12). Виходячи з другого закону Кірхгофа  $U \approx U_1 + U_2$ ,  $X \approx X_1 + X_2$  і враховуючи дуже мале значення  $tg\delta$  запишемо

$$U_1 = \frac{X_1 U}{X_1 + X_2} = \frac{C_2 \cdot U}{C_1 + C_2} = \frac{14,16 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{9,44 \cdot 10^{-9} + 14,16 \cdot 10^{-9}} = 60 \text{В};$$

$$U_2 = \frac{X_2 U}{X_1 + X_2} = \frac{C_1 \cdot U}{C_1 + C_2} = \frac{9,44 \cdot 10^{-9} \cdot 100}{9,44 \cdot 10^{-9} + 14,16 \cdot 10^{-9}} = 40 \text{В}.$$

Діюче значення напруженості електричного поля в кожному діелектрику (9.3)

$$E_1 = \frac{U_1}{l_1} = \frac{60}{3 \cdot 10^{-3}} = 20 \cdot 10^3 \text{В/м}; \quad E_2 = \frac{U_2}{l_2} = \frac{40}{10^{-3}} = 40 \cdot 10^3 \text{В/м}.$$

Енергія електричного поля між обкладинками конденсатора (9.5)

$$W_e = C \frac{U^2}{2} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \cdot \frac{U^2}{2} = \frac{9,44 \cdot 10^{-9} \cdot 14,16 \cdot 10^{-9}}{9,44 \cdot 10^{-9} + 14,16 \cdot 10^{-9}} \cdot \frac{100^2}{2} = 2,832 \cdot 10^{-5} \text{Дж}.$$

Діелектричні втрати в першому діелектрику (10.2)

$$P_1 = U_1^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C_1 \cdot tg\delta_1 = 60^2 \cdot 2\pi \cdot 10^3 \cdot 9,44 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-3} = 0,21 \cdot 10^{-3} \text{Вт}.$$

Діелектричні втрати у повітрі дуже малі, і тому ними можна знехтувати.

## Визначення параметрів електропровідності діелектриків

Завдання. Розрахувати електричний струм, що споживається плоским конденсатором з обкладинками  $10 \times 1000$  мм, які ізольовані між собою твердим діелектриком товщиною  $l = 0,1$  мм. Діелектрик має відносну діелектричну проникність  $\epsilon_r = 3$ , тангенс кута діелектричних втрат  $tg\delta = 10^{-3}$ , питомий об'ємний опір  $\rho_v = 10^8$  Ом·м і питомий поверхневий опір  $\rho_s = 10^{10}$  Ом. Електричний струм розрахувати при під'єднанні конденсатора до електричного джерела:

а) постійного струму з напругою  $U = 100$  В;

б) синусоїдального струму з діючою напругою  $U = 100$  В і частотою  $f = 400$  Гц.

Рішення:

а) У разі приєднання до електричного джерела постійного струму конденсатор споживає лише об'ємний  $I_v$  і поверхневий  $I_s$  електричні струми, які визначаються, відповідно, об'ємним  $R_v$  і поверхневим  $R_s$  опорами (10.9):

$$I_v = \frac{U}{R_v} = \frac{U}{\rho_v \frac{l}{S}} = \frac{100}{10^8 \frac{10^{-4}}{10^{-2}}} = 10^{-4} \text{ А};$$

$$I_s = \frac{U}{R_s} = \frac{U}{\rho_s \frac{l}{L}} = \frac{100}{10^{10} \frac{10^{-4}}{(0,01+1) \cdot 2}} = 2,02 \cdot 10^{-4} \text{ А}.$$

Загальний електричний струм, який споживає конденсатор при постійній напрузі (струм витоку):

$$I_e = I_v + I_s = 10^{-4} + 2,02 \cdot 10^{-4} = 0,302 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

б) У разі приєднання конденсатора до електричного джерела синусоїдального струму тієї ж самої напруги  $U = 100$  В діюче значення струму витоку  $I_B$  таке саме, як і в попередніх розрахунках, тобто  $I_B = 3,02 \cdot 10^{-4}$  А. Цей струм співпадає за фазою із синусоїдальною напругою  $U$ , тобто є активним. Додатково до цього струму конденсатор буде споживати зарядно-розрядний струм  $I_c$  відповідно до величини реактивного опору  $X = \frac{1}{\omega C}$  конденсатора тоді

$$I_c = \frac{U}{X_c} = U\omega C = U\omega \frac{S \cdot \epsilon_r \epsilon_0}{l} =$$

$$= 100 \cdot 2\pi \cdot 400 \frac{10^{-2} \cdot 3,8,85 \cdot 10^{-12}}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 0,667 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Зарядно-розрядний струм  $I_c$  випереджає за фазою синусоїдальну напругу  $U$  на кут  $\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta = \frac{\pi}{2} - 10^{-3} \approx \frac{\pi}{2}$ , тобто є по суті чисто реактивним. Загальне діюче значення синусоїдального струму, що споживає конденсатор:

$$I = \sqrt{I_g^2 + I_c^2} = \sqrt{(0,302 \cdot 10^{-3})^2 + (0,667 \cdot 10^{-3})^2} = 0,732 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

### **Визначення параметрів електричного пробою діелектриків**

**Завдання.** Обкладинки плоского конденсатора ізольовані між собою двома діелектриками. Один з цих діелектриків має товщину  $l_1 = 1$  мм, відносну діелектричну проникність  $\epsilon_{r1} = 15$  і електричну міцність  $E_{пр1} = 20$  МВ/м, а інший діелектрик – прошарок повітря шириною  $l_2 = 0.5$  мм, електрична міцність якого при цій ширини складає  $E_{пр2} = 5$  МВ/м [5]. Розрахувати два значення електричної напруги  $u_{пр}$  між обкладинками такого конденсатора, при який відбудеться:

- а) частковий пробій;
- б) повний пробій його електричної ізоляції.

**Рішення.** При заданому розміщенні двох діелектриків (послідовно з напрямом к дії сил електричного поля) конденсатор можна розглядати як дві послідовно з'єднані ємності  $C_1$  і  $C_2$  з різними значеннями товщини діелектрика, напруги і напруженості електричного поля.

Ємності цих конденсаторів можна розрахувати за формулами (9.4):

$$C_1 = \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_0}{l_1} S; C_2 = \frac{\epsilon_{r2} \epsilon_0}{l_2} S; C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_{r2} \epsilon_0}{\epsilon_{r1} l_2 + \epsilon_{r2} l_1} S.$$

Електрична напруга  $u$  конденсатора розподіляється між двома ділянками діелектрика обернено пропорційно ємностям конденсаторів, виходячи з умов  $Q_1 = Q_2, C_1 u_1 = C_2 u_2$  і  $u_1 + u_2 = u$ :

$$u_1 = \frac{C_2 u}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_{r2} l_1 u}{\epsilon_{r1} l_2 + \epsilon_{r2} l_1}; u_2 = \frac{C_1 u}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_{r1} l_2 u}{\epsilon_{r1} l_2 + \epsilon_{r2} l_1}.$$

Напруженість електричного поля в кожному із діелектриків (9.3):

$$E_1 = \frac{u_1}{l_1} = \frac{\epsilon_{r2} l_1 u}{(\epsilon_{r1} l_2 + \epsilon_{r2} l_1) \cdot l_1} = \frac{\epsilon_{r2} u}{\epsilon_{r1} l_2 + \epsilon_{r2} l_1};$$

$$E_2 = \frac{u_2}{l_2} = \frac{\varepsilon_{r1} l_2 u}{(\varepsilon_{r1} l_2 + \varepsilon_{r2} l_1) \cdot l_2} = \frac{\varepsilon_{r1} u}{\varepsilon_{r1} l_2 + \varepsilon_{r2} l_1}.$$

З наведених формул і числових даних видно, що пробій діелектрика відбудеться в першу чергу у повітряному прошарку, в якому виникає більша напруженість електричного поля  $E_2$  і який має меншу електричну міцність  $E_{np2}$ . Цей пробій можна назвати частковим, тому що він не приведе до повного пробію ізоляції конденсатора. Частковий пробій відбудеться при напрузі між обкладинками конденсатора  $u \geq u_a$  за умови  $E_2 \geq E_{np2}$ :

$$u \geq u_a = E_{np2} \frac{\varepsilon_{r1} l_2 + \varepsilon_{r2} l_1}{\varepsilon_{r1}} = 5 \cdot 10^6 \frac{15 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{15} = 2833 \text{ В}.$$

Внаслідок часткового пробію повітряного прошарку при  $u \geq u_a$  вся напруга  $u$  буде прикладена до першого діелектрика, і тому напруженість електричного поля в першому діелектрику буде визначатись іншою формулою ( $E_1 = \frac{u}{l_1}$ ). Повний пробій відбудеться при напрузі між обкладинками конденсатора  $u \geq u_b$  за умови  $E_1 \geq E_{np1}$ :

$$u \geq u_b = E_{np1} l_1 = 20 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 20000 \text{ В}.$$

Таким чином, при напрузі між обкладинками конденсатора  $u \geq 2833$  В відбудеться частковий пробій, а при  $u \geq 20000$  В – повний пробій його ізоляції.

### **Визначення параметрів активних діелектриків**

**Завдання.** Пластинка діелектрету товщиною  $l_1 = 20$  мм на основі титанового матеріалу кальцій титанату  $\text{CaTiO}_3$  з діелектричною проникністю  $\varepsilon_r = 150$  отримала залишковий електричний заряд густиною  $\sigma = 200$  мкКл/м<sup>2</sup> внаслідок тривалої дії сильного електричного поля. Цю пластинку розмістили між металевими паралельними обкладинками плоского конденсатора з деяким повітряним прошарком шириною  $l_2$  з метою створення в ньому електростатичного поля напруженістю  $E_2 = 1$  МВ/м. Необхідно розрахувати ширину  $l_2$  повітряного прошарку.

**Рішення.** Для розрахунку ширини  $l_2$  повітряного прошарку конденсатора можна скористатись формулою (10.16):

$$E_2 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \left(1 + \varepsilon_r \frac{l_2}{l_1}\right)}$$

Звідки

$$l_2 = \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 E_2} - 1\right) \frac{l_1}{\varepsilon_r} = \left(\frac{200 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 10^6} - 1\right) \frac{20 \cdot 10^{-3}}{150} = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Таким чином, товщина повітряного прошарку має дорівнювати 2,9 мм для отримання в ньому електростатичного поля напруженістю 1 МВ/м за допомогою заданої пластинки електрету.

### Контрольні запитання

1. Які основні властивості мають діелектричні матеріали? Визначити основні відмінності діелектрика від провідника електричного струму.
2. Яким фізичним законам підкоряється процес поляризації діелектрика? Що таке діелектрична проникність діелектрика?
3. В яких випадках діелектрик з великою діелектричною проникністю має переваги?
4. Який існує зв'язок між ємністю конденсатора і діелектричною проникністю.
5. Пояснити вплив змінного електричного поля на поведінку діелектрика. Що таке електричний струм зміщення в діелектрику?
6. Пояснити відмінність електричного струму зміщення в діелектрику конденсатора від його зарядно-розрядного струму.
7. Яким чином передається у просторі силовий вплив електричного поля?
8. Чим обумовлена електропровідність діелектрика?
9. Які електричні заряди можуть створювати електричний струм в газоподібному діелектрику?
10. Як використовують електропровідність газоподібних діелектриків?
11. Як пов'язана електропровідність газоподібного діелектрика з емісією електронів з поверхні електродів?

12. Чим відрізняються між собою електропровідності рідких і газоподібних діелектриків?
13. Пояснити здатність дуже розрідженого повітря або вакууму одночасно виконувати функцію діелектрика і надпровідника.
14. Чим відрізняється електропровідність твердих діелектриків від електропровідності рідких і газоподібних діелектриків?
15. Що таке об'ємна і поверхнева електропровідність діелектрика?
16. Пояснити принцип визначення об'ємного і поверхневого опору твердого діелектрика.
17. При якій напрузі (постійній чи змінній) необхідно вимірювати опір діелектриків?
18. Як може впливати поляризація діелектрика на результати виміру його опору?
19. Що таке діелектричні втрати? Що характеризує тангенс кута діелектричних втрат?
20. За якими формулами можна визначити діелектричні втрати?
21. Яким чином впливають частота і напруженість електричного поля та діелектрична проникність на діелектричні втрати?
22. Пояснити явище електричного пробоя діелектрика.
23. Що таке електрична міцність діелектрика?
24. Пояснити залежність електричної міцності діелектрика від його товщини.
25. Чому електрична міцність газоподібних діелектриків значно менше електричної міцності рідких і твердих діелектриків?
26. Пояснити залежність електричної міцності рідкого діелектрика від його температури та вмісту в ньому води та інших домішок.
27. Пояснити схему експериментального визначення електричної міцності діелектриків.
28. Що таке теплостійкість діелектриків? Навести приклади розподілу електроізоляційних матеріалів за окремими класами теплостійкості.
29. Яке практичне значення має теплостійкість електроізоляційних матеріалів?
30. Яким чином впливає температура діелектрика на його основні функції? Назвати найбільш важливі причини нагріву діелектриків.



31. Чим відрізняється теплостійкість діелектриків від їх теплопровідності?
32. Яке практичне значення має теплопровідність діелектриків?
33. Що таке конвекція і яке відношення вона має до теплопровідності діелектрика?
34. Назвати найбільш поширені у використанні газоподібні діелектрики.
35. Які переваги має водень як діелектрик у порівнянні з повітрям?
36. Назвати основні переваги елегазу в порівнянні з повітрям.
37. Назвати головні переваги рідких діелектриків над газоподібними і твердими діелектриками. Які матеріали використовують для виготовлення рідких діелектриків?
38. Назвати головні переваги твердих діелектриків над газоподібними і рідкими діелектриками.
39. Чому повітряні порожнечі в твердих діелектриках погіршують якість діелектриків?
40. В чому полягає користь просочення твердих діелектриків рідкими діелектриками?
41. Назвати головні компоненти пластмас.
42. Чим відрізняються між собою термопластичні та термореактивні смоли та полімери?
43. В яких випадках можна використовувати оксидні плівки в якості електричної ізоляції?

## РОЗДІЛ 11 ПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ

До провідникових матеріалів відносяться метали та їх сплави, вуглецеві матеріали, розчини, розплави електролітів та іонізовані гази, які використовуються як провідники електричного струму у поєднанні з електроізоляційними матеріалами. Найбільш широко використовуються тверді метали та їх сплави. З металів високої електропровідності з питомим опором не більше 0,05 мкОм·м виготовляють електричні дроти, жили електричних кабелів, обмотки трансформаторів та електричних машин. З металів і сплавів з питомим опором не менше 0,3 мкОм·м виготовляють резистори та електронагрівальні прилади.

Деякі інші матеріали та хімічні сполуки також здатні виконувати електропровідні функції, якщо для цього створені особливі умови. Маються на увазі надпровідники та кріопровідники в умовах наднизьких температур, а також напівпровідники під впливом додаткових фізичних факторів. Надпровідники зовсім не створюють, а кріопровідники майже не створюють опір електричному струму. Вони мають обмежене використання через складність створення умов наднизьких (кріогенних) температур. Напівпровідники дуже швидко розширюють сферу свого використання в електротехніці і особливо в електроніці завдяки їх специфічним та керованим електропровідним властивостям.

### 11.1 Фізичні процеси і явища в провідникових матеріалах

Головним фізичним процесом у провідникових матеріалах є переміщення вільних зарядів (електронів та іноді іонів) під дією напруженості електричного поля. Електричний струм у металах в твердому і в рідкому їх стані обумовлений переміщенням лише електронів, і тому метали відносяться до *провідників першого роду*. Цей струм супроводжується тепловим, електричним і магнітним полями, а також емісійними і контактними явищами. Виключенням є надпровідники, які в стані надпровідності не виділяють теплову енергію.

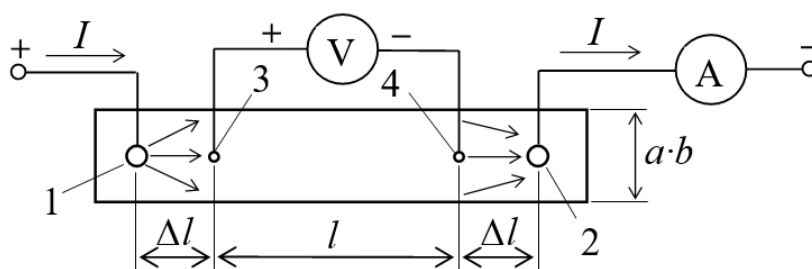
У провідникових матеріалах другого роду переміщуються не тільки електрони, але й іони як носії речовини. Тому електричний струм у провіднику другого роду додатково супроводжується переміщенням речовини, відкладенням цієї речовини на підведених електродах та зміною хімічного складу цього провідника. До провідників другого роду або електролітів відносяться водянні, кислотні та лужні розчини різноманітних речовин та розплави кристалічних речовин з іонною структурою. До провідників другого роду відносяться також пари рідин і металів та сильно іонізований газ (плазма) за умови, якщо напруженість електричного поля перевищує напруженість ударної або фотонної іонізації.

### Активний опір провідникових матеріалів

Електричний опір, який обумовлений зміною в часі енергії теплового поля, називається активним опором  $R$ , а відповідне падіння напруги – активним падінням напруги  $u_a$ . Активний опір  $R$  провідника виникає як при постійному, так і при змінному електричному струмі. Він обумовлений опором мікрочастинок цього провідника і враховує процес виділення (зміни в часі  $t$ ) теплової енергії

$$W_T = f(t) = Pt = I^2 R t .$$

Вимірювання активного опору  $R$  здійснюють зазвичай при постійному струмі  $I$  за методом амперметра і вольтметра з наступним його обчисленням  $R = \frac{U}{I}$ . Якщо потрібно визначити питомий опір провідникового дроту  $\rho$  за величиною  $R$ , то для виміру  $R$  необхідно виключити вплив перехідного опору в контактах і створити однакову густину електричного струму у всіх точках дроту в межах його довжини  $l$  (рис. 11.1).



**Рисунок 11.1 – Схема виміру активного опору  $R$  провідника при постійному струмі**

Перехідний опір у силових клемах 1 і 2 підключення провідника до джерела струму та нерівномірність розподілу густини струму майже не впливає на результати виміру опору  $R$ , якщо потенціальні клемами 3 і 4 для виміру напруги  $U$  знаходяться на достатній відстані  $\Delta l$  від клем 1 і 2.

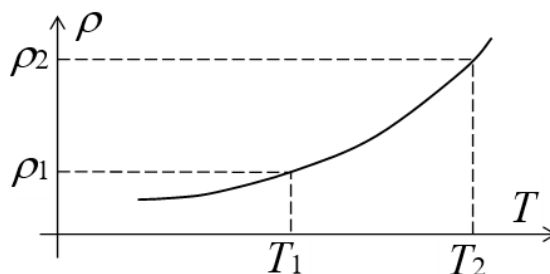
Зразок провідника повинен мати постійну площу поперечного перерізу  $S$  на ділянці між потенціальними клемами 3 і 4 для забезпечення постійності густини електричного струму. Питомий опір  $\rho$  (Ом·м) можна розрахувати за такою формулою:

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (11.1)$$

де  $S$  – площа поперечного перерізу зразка провідникового матеріалу, м<sup>2</sup>;  $l$  – відстань між потенціальними клемами 3 і 4 для виміру напруги  $U$ , м;  $R = \frac{U}{I}$  – активний опір зразка провідникового матеріалу як результат виміру за методом амперметра і вольтметра (рис.11.1).

З чотирма клемами (рис. 11.1) виготовляють також спеціальні вимірювальні шунти, за допомогою яких вимірюють електричний струм шляхом виміру з допомогою достатньо чутливим вольтметром падіння напруги  $U$  на ділянці клем 3 і 4 з наступним розрахунком струму за формулою  $I = \frac{U}{R}$ . Деякі амперметри мають вбудовані вимірювальні шунти.

*Вплив температури на питомий опір  $\rho$  більшості провідникових матеріалів доволі суттєвий і має пропорційний характер (рис. 11.2).*



**Рисунок 11.2 – Впливу температури  $T$  на питомий опір  $\rho$  провідникового матеріалу**

При зміні температури  $T$  у незначних межах допускається кусково-лінійна апроксимація нелінійної залежності  $\rho$  від  $T$ :

$$\rho_2 \approx \rho_1[1 + \alpha_\rho(T_2 - T_1)], \quad (11.2)$$

де  $\rho_1, \rho_2$  – питомий опір провідникового матеріалу (Ом·м) при температурі, відповідно,  $T_1$  і  $T_2$  (табл. 11.1, [8]);  $\alpha_\rho$  – середній температурний коефіцієнт питомого опору ( $K^{-1}$ ) в діапазоні температур  $T_1 \dots T_2$  (табл. 11.1, [8]).

**Таблиця 11.1 – Основні провідникові властивості деяких металів при 20°C**

Метал	Густина $d$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_\rho$ , K <sup>-1</sup>	$T_{\text{плавл.}}$ , °C	Робота $A$ виходу електрона, еВ	Абсолютна питома термо-ЕРС $\psi$ , мкВ/К
Срібло - (Ag)	10,49	0,015	0,0041	961	4,3	+1,5
Мідь - (Cu)	8,92	0,0170	0,0043	1083	4,4	+1,8
Алюміній - (Al)	2,70	0,026	0,0041	660	4,25	-1,3
Вольфрам - (W)	19,3	0,055	0,0050	3400	4,54	+2,0
Кобальт - (Co)	8,85	0,064	0,0060	1500	4,41	-20,1
Нікель - (Ni)	8,96	0,068	0,0067	1453	4,5	-19,3
Залізо - (Fe)	7,87	0,097	0,0062	1540	4,31	+16,6
Платина - (Pt)	21,45	0,098	0,0039	1770	5,32	-5,1
Олово - (Sn)	7,29	0,113	0,0045	232	4,38	-1,1
Хром - (Cr)	7,19	0,13	0,0024	1900	4,58	+18
Свинець - (Pb)	11,34	0,19	0,0042	327	4,0	-1,2
Ртуть - (Hg)	13,5	0,958	0,0009	-39	4,52	+8,1
Бісмут - (Bi)	9,80	1,16	0,0042	271	4,4	-75

У більшості металів при переході з твердого стану в рідкий суттєво збільшується питомий опір через зменшення густини розплавленого металу. Наприклад, коефіцієнт збільшення питомого опору при плавленні становить 2,4 для міді і 1,64 для алюмінію [5]. Виключення складають галій  $Ga$  і бісмут  $Bi$ , у яких при переході з твердого стану в рідкий питомий опір зменшується приблизно вдвічі через збільшення густини розплавленого металу.

*Питомий опір сплавів* залежить не тільки від концентрації компонентів, але й від формування структури остигаючого сплаву. Якщо сплаваються два метали у вигляді спільного розчину, то при його затвердінні створюється спільна кристалева решітка. У таких випадках пито-

мий опір може суттєво збільшуватись з формуванням екстремальної залежності  $\rho$  і  $\alpha_\rho$  від вмісту одного з компонентів сплаву. На рисунку 11.3 розглянута така залежність на прикладі сплаву міді  $Cu$  з нікелем  $Ni$ .

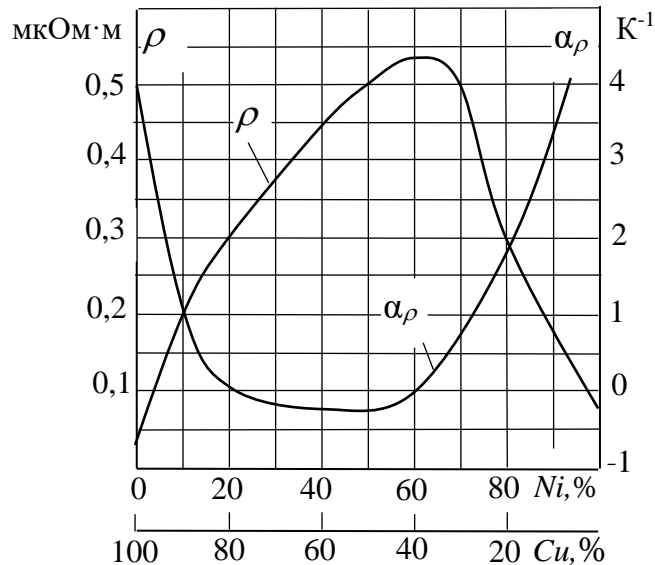


Рисунок 11.3 – Залежність  $\rho$  і  $\alpha_\rho$  сплаву мідь-нікель від його складу [5]

Якщо при затвердінні сплаву двох металів створюються окремі кристалеві решітки, то питомий опір залежить від вмісту одного з компонентів сплаву приблизно лінійно [5].

Вплив частоти струму на активний опір провідника обумовлений ефектом витіснення впливу змінного електричного струму на поверхню провідника (скін-ефектом). На рис. 11.4 зображена схема, яка пояснює цей ефект у випадку, коли навколо провідника немає замкнених магнітопроводів.

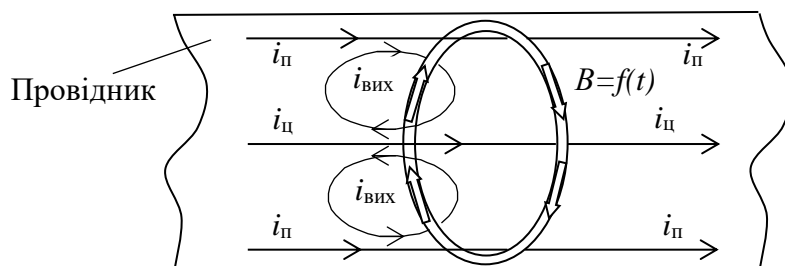


Рисунок 11.4 – Схема витіснення впливу змінного струму на поверхню провідника

Для пояснення цього ефекту розглянемо змінні (синусоїдальні) струми в центральній  $i_{\text{ц}}$  і в периферійній  $i_{\text{п}}$  частинах електричного провідника, які зображені векторами. Ці струми спричиняють замкнені лінії змінної магнітної індукції  $B = f(t)$  за правилом буравчика в площині, перпендикулярній векторам струмів. Магнітна індукція  $B = f(t)$  у свою чергу відповідно до закону електромагнітної індукції (9.21) спричиняє електрорушійні сили та вихрові струми  $i_{\text{вих}}$  в площині, перпендикулярній вектору магнітної індукції. Ці струми пропорційні відношенню  $\frac{dB}{dt}$ , а значить пропорційні частоті струму.

На рисунку 11.4 видно, що вихрові струми  $i_{\text{вих}}$ , направлені назустріч струму  $i_{\text{ц}}$ , в центральній частині провідника, співпадають за напрямком зі струмами  $i_{\text{п}}$  в периферійній частині провідника. Таким чином створюються умови витіснення впливу струму з центральної частини провідника  $i_{\text{ц}}$  на його поверхню, що призводить до збільшення активного опору провідника пропорційно частоті електричного струму. Тому при дуже високій частоті через скін-ефект вигідно використовувати провідники трубчастого (коаксіального) вигляду або багатожильні провідники з дуже тонкими ізольованими між собою жилами.

В електричних машинах, в яких навколо провідників зі змінним струмом є замкнені магнітопроводи, скін-ефект проявляється дещо по-іншому. Це пов'язано з тим, що лінії магнітної індукції  $B = f(t)$  замикаються в основному в магнітопроводах завдяки їх великій магнітній проникності. Характерним прикладом використання цього ефекту є асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, в провідниках якого струм витісняється у бік зовнішньої поверхні ротора в період пуску двигуна. Завдяки цьому покращуються умови пуску такого двигуна.

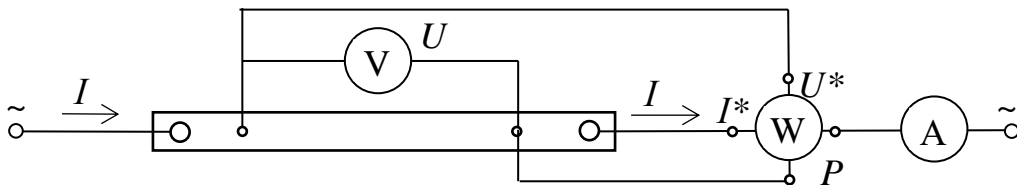
### **Реактивний опір провідникових матеріалів**

Електричний опір, який зумовлений синусоїдальним струмом та відповідною зміною в часі енергії електричного або магнітного поля, називається реактивним опором.

Реактивний опір, який пов'язаний зі зміною енергії електричного поля, називається ємнісним опором  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ , а відповідне падіння напруги – ємнісним падінням напруги  $u_C$  (9.12).

Реактивний опір, який пов'язаний зі зміною енергії магнітного поля, називається індуктивним опором  $X_L = \omega L$ , а відповідне падіння напруги – індуктивним падінням напруги  $u_L$  (9.24).

Реактивний опір визначається лише геометричними параметрами електричного провідника та окремих його частин. Тому він не має прямого відношення до властивостей матеріалу провідника та його ізоляції. Реактивний опір може лише опосередковано впливати на результати визначення цих властивостей у разі використання змінного струму чи напруги. Наприклад, якщо виникає потреба визначити активний і реактивний опір провідника під дією синусоїдального струму, то необхідно врахувати залежність електричного струму не тільки від падіння напруги на активному опорі  $R$  (рис. 11.1), але й від падіння напруги на індуктивному  $X_L$  і ємнісному  $X_C$  опорах. Для цього, крім амперметра і вольтметра, потрібен додатковий прилад – ватметр (рис. 11.5).



**Рисунок 11.5 – Схема виміру активного і реактивного опору при змінному струмі**

За результатами вимірювань за схемою на рисунку 11.5 можна розрахувати активний  $R$  і реактивний  $X$  опори за допомогою таких формул:

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{U^2}{P}; \quad X = \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R^2}, \quad (11.3)$$

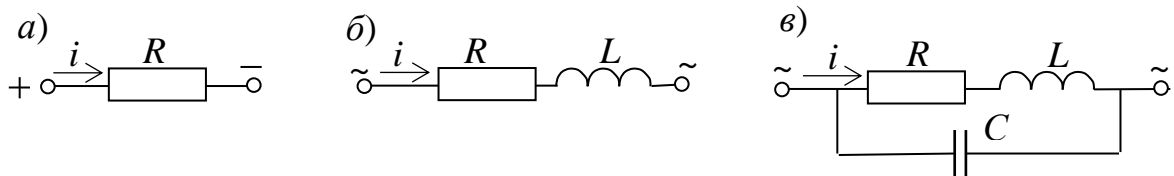
де  $I$ ,  $U$  – діючі значення синусоїдального струму і напруги;  $P$  – активна потужність (показання ватметра).



Якщо струм змінюється за неперіодичним законом, то поняття реактивного опору стає некоректним, оскільки реактивний опір має значення лише при синусоїдальному законі зміни струму і напруги.

### Еквівалентні схеми електричних провідників

Існує декілька еквівалентних схем провідника електричного струму залежно від його геометричних параметрів, частоти електричного струму та деяких інших обставин. Еквівалентна схема провідника має найбільш простий вид, якщо електричний струм не змінюється в часі або якщо його величина не супроводжується суттєвими змінами енергії магнітного або електричного поля (рис. 11.6, а). У цьому разі проявляється лише енергія теплового поля, що в еквівалентній схемі враховано активним опором  $R$ .



**Рисунок 11.6 – Еквівалентні схеми електричного провідника**

Якщо в провіднику існує змінний електричний струм, то додатково виникає енергія магнітного поля через її зміни. Для врахування проявів магнітного поля в еквівалентну схему провідника додають індуктивність  $L$  (рис. 11.6, б). Ця схема використовується зазвичай при виготовленні з провідників дроту котушки індуктивності чи електричного дроселя низької частоти. Інколи доводиться користуватися цією схемою навіть при постійному струмі, якщо провідник розмикається або замикається. Якщо ж у провіднику котушки індуктивності існує струм високої частоти, або коли струм має значні високочастотні складові, то доводиться враховувати ще й електричне поле. Для цього в еквівалентній схемі провідника використовують ємність  $C$  (рис. 11.6, в).

У тих випадках, коли задіяні системи провідників електричного струму, між якими існує тісний взаємозв'язок через магнітні та електричні поля, то використовують спеціальні еквівалентні електричні схеми. Прикладами таких систем є довгі повітряні та особливо кабельні лінії

електропостачання, трансформатори, електричні машини, імпульсні електронні системи та високочастотні лінії з розподіленими у просторі параметрами.

### Емісійні і контактні явища в металах

*Емісія електронів* – це явище виходу електронів з поверхні металу. В металі дуже багато практично вільних електронів. Для їх переміщення майже не потрібно витратити енергію. Але для виходу кожного електрона за межі металу потрібно все ж виконати деяку роботу  $A$  для подолання потенціального бар'єру (різницю потенціалів  $\varphi$ ) на межі метал-вакуум:

$$A = q_e \cdot \varphi = W_{\text{вак}} - W_{\text{ф}}, \quad (11.4)$$

де  $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – модуль заряду електрона (за знаком він негативний);  $W_{\text{вак}}$  – енергія електрона у вакуумі;  $W_{\text{ф}}$  – енергія електрона в найвищому заповненому рівні твердого металу при температурі абсолютного нуля за шкалою Кельвіна (рівень Фермі).

Потенціальний бар'єр  $\varphi$  обумовлений силами притягнення електрона до атома чи молекули, яка при виході електрона стає позитивним іоном (“діркою”), а також силами відштовхування від тих електронів, які вже вийшли з металу і утворили поблизу поверхні цього металу електронну «хмару». Робота  $A$  виходу електрона з поверхні більшості чистих металів при температурі  $+20^\circ\text{C}$  складає близько 4 еВ (електрон-вольт), (табл. 11.1). Емісія електронів при такій низькій температурі називається холодною (автоелектронною) емісією. Для деяких сплавів та оксидів металів величина  $A$  може бути значно меншою, що дозволяє використовувати їх для покриття чистого металу і створення таким чином більш сприятливих умов практичного використання емісії електронів. Наприклад, якщо на поверхню вольфраму  $W$  нанести шар оксиду лужноземельного металу (галію  $Ga$ , стронцію  $Sr$ , барію  $Ba$ ), то робота виходу  $A$  знизиться з 4,54 еВ до 1,2...2 еВ, а густина потоку емісійних електронів збільшиться на декілька порядків [6].

Емісію електронів у вакуумі використовують у різноманітних електронних приладах. У цих приладах практично повністю викачують по-

вітря, щоб воно не заважало переміщенню емісійних електронів. Для зниження напруженості електричного поля і підвищення густини потоку емісійних електронів до прийнятних значень використовують гарячу (термоелектронну) емісію. Для цього поверхню металу (емітер або катод) нагрівають до температури 1700 ... 2200°C.

*Контактна різниця потенціалів* виникає при контакті між собою двох різних металів. Тому в просторі, що оточує метали, утворюється електричне поле. Причина цього явища – різне значення роботи  $A$  виходу електрона і різна концентрація електронів провідності у різних металів. При контакті різних металів частина електронів переходить від металу з меншою роботою  $A$ , заряджаючи його позитивно, до іншого металу, заряджаючи його негативно. Контактна різниця потенціалів  $\varphi_{12}$  двох контактуючих металів відповідно до класичної електронної теорії може бути розрахована за формулою

$$\varphi_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 + \frac{kT}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2}, \quad (11.5)$$

де  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  – потенціальний бар'єр для виходу електрона за межі, відповідно, першого і другого металу (11.4);  $n_1$ ,  $n_2$  – концентрація електронів провідності, відповідно, в першому і другому металах (10.10);  $k = 1,3806488 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – фізична стала Больцмана, яка визначає зв'язок між температурою і енергією;  $T$  – температура двох металів у місці їх контакту, (вимірюється в Кельвінах).

#### *Термоелектрорушійна сила. Ефект Зеебека*

Для виміру контактної різниці потенціалів  $\varphi_{12}$  (11.5) потрібен ще один контакт для створення замкненого вимірювального контуру, тобто потрібна мінімум пара спаяних контактів (спаїв). Якщо температури цих спаїв  $T_1$  і  $T_2$  однакові ( $T_1 = T_2 = T$ ), то сума двох контактних різниць потенціалів  $U_{12}$  в цьому контурі згідно з формулою (11.5) буде нульовою ( $U_{12} = \varphi_{12} + \varphi_{21} = 0$ ). Якщо  $T_1 \neq T_2$ , то сума двох контактних різниць потенціалів  $U_{12}$  в цьому контурі (термоелектрорушійна сила) згідно з виразом (11.5) буде відрізнятися від нуля (рис. 11.7) [5]:

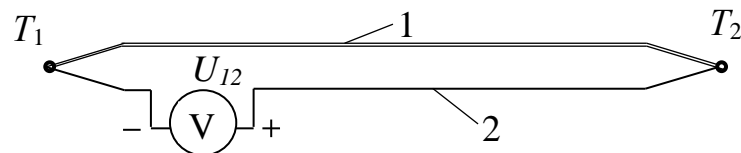
$$U_{12} = \varphi_2 - \varphi_1 + \frac{kT_1}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2} - \varphi_2 + \varphi_1 + \frac{kT_2}{q_e} \ln \frac{n_2}{n_1} =$$

$$= \frac{k}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2} (T_1 - T_2) \approx \psi_{12} \cdot (T_1 - T_2), \quad (11.6)$$

де  $\psi_{12} = \frac{k}{q_e} \cdot \ln \frac{n_1}{n_2}$  – відносна питома термоелектрорушійна сила (термо-ЕРС) для вибраної пари провідників чи напівпровідників (коефіцієнт термо-ЕРС або коефіцієнт Зеєбека), В/К;  $T_1 - T_2 = \Delta T$  – різниця температур двох спаїв, К.

Знак приблизної рівності у формулі (11.6) обумовлений тим, що в ній не врахований електротермічний ефект Томсона. Більш точна формула для визначення термоелектрорушійної сили має вигляд [8]

$$U_{12} = \int_T^{T+\Delta T} \psi_{12} dT \approx \psi_{12} \Delta T. \quad (11.7)$$



**Рисунок 11.7 – Термоелектрорушійна сили в термопарі**

При цьому, враховуючи доцільність абсолютної системи відліку питомої термоелектрорушійної сили, коефіцієнт  $\psi_{12}$  можна розрахувати так:

$$\psi_{12} = \psi_1 - \psi_2 = \psi_{13} - \psi_{23}, \quad (11.8)$$

де  $\psi_1$  і  $\psi_2$  – абсолютні питомі термо-ЕРС окремо для першого і другого провідників чи напівпровідників вибраної пари.

Кінцева частина формули (11.8) означає, що розрахувати термо-ЕРС однієї речовини відносно іншої можна не тільки за абсолютною питомою термо-ЕРС, яка наводиться в довідниках, але й за відносною питомою термо-ЕРС відносно третьої речовини. Довідковими даними щодо абсолютної питомої термо-ЕРС потрібно користуватися таким чином. Якщо потрібно визначити значення питомої термо-ЕРС, наприклад, нікелю відносно міді (табл. 11.1), то потрібно від абсолютної питомої термо-ЕРС нікелю ( $-19,3$ ) відняти абсолютну питому термо-ЕРС міді ( $+1,8$ ), отримавши  $\psi_{12} = (-19,3) - (+1,8) = -21,1$  (мкВ/К).

Ефект Зеєбека, який був відкритий у 1826 році, часто використовують для контролю температури за допомогою так званої термопари – спеціально підібраних та ізольованих між собою пар металевих проводів. За допомогою термопари можна визначити температуру  $T_2$  другого спаю, вимірюючи напругу  $\underline{U}$  та знаючи коефіцієнт Зеєбека  $\psi_{12}$  і температуру  $T_1$  (11.6). Термопари використовуються також для підвищення безпеки використання побутових газових плит – для автоматичного вимикання газового клапана у разі неконтрольованого гасіння полум'я газової горілки, яке супроводжується зникненням термо-ЕРС і електричного струму в термопарі.

Ефект Зеєбека використовують також для прямого (безмашинного) перетворення теплової енергії в електричну за допомогою термоелектричних генераторів. Для постійної роботи термоелектричного генератора під навантаженням  $R$  необхідно забезпечити хороший тепловий контакт спаїв провідників першого 1 і другого 2 видів з двома середовищами, де має місце достатня різниця температур  $T_1 - T_2$  (рис. 11.8).

Для підведення тепла до гарячих спаїв і підтримання необхідної різниці температур  $T_1 - T_2$  використовуються різноманітні джерела тепла – сонячні концентратори, органічне паливо, радіоактивні ізотопи і навіть ядерні реактори.

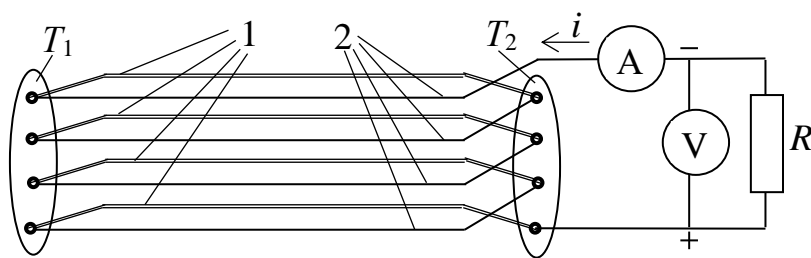


Рисунок 11.8 – Схема термоелектричного генератора

Ефект Зеєбека як природне явище може проявлятися в планетарних масштабах. Температурна та структурна неоднорідність Землі згідно з цим ефектом спричиняє термо-ЕРС та відповідний електричний струм в Землі. Саме цей струм і стає причиною створення захисного магнітного поля Землі, яке відхиляє силою Лоренца потік швидких і високоенергетичних заряджених частинок Сонця (сонячного вітру швидкістю

300...1200 км/с) при їх наближенні до земної атмосфери, і таким чином зберігає повітря, воду і життя на Землі.

*Електротермічний ефект Пельтьє* – це явище виділення або поглинання тепла контактами двох різних провідників чи напівпровідників при проходженні через них постійного електричного струму. Ефект Пельтьє був відкритий у 1834 році. Це явище зворотне явищу виникнення термоелектрорушійної сили (ефект Пельтьє зворотний ефекту Зеебека). Тому дію ефекту Пельтьє можна розглядати так само, як і ефект у Зеебека (рис. 11.7 і 11.8) з тою лише відмінністю, що електрична енергія не отримується від термоелементів, а навпаки, підводиться до них від джерела.

Ефект Пельтьє можна пояснити існуванням різниці потенціалів на контакті двох різних провідників чи напівпровідників, тобто електричного контактного поля (11.5). Якщо електричний струм протікає проти напрямку дії контактного поля, то зовнішнє джерело струму має витрачати додаткову енергію. Ця енергія буде витрачена на нагрівання контакту. Якщо ж електричний струм протікає за напрямом дії контактного поля, то це поле підтримує електричний струм, тобто виконує роботу на переміщення зарядів. Необхідна для цього енергія буде відбиратись від провідника і охолоджувати на контакт. Таким чином, електричний струм переносить тепло з одного боку елемента Пельтьє на протилежний бік, створюючи різницю температур.

Кількість теплоти  $Q$ , яка виділяється чи поглинається контактом при проходженні струму  $I$ , пропорційна величині струму та часу  $t$  його протікання:

$$Q = \Pi \cdot I \cdot t, \quad (11.9)$$

де  $\Pi = \psi T$  – коефіцієнт Пельтьє, який простіше розрахувати за допомогою коефіцієнта  $\psi$  термоелектрорушійної сили (11.6) згідно з другим співвідношенням Томсона (11.12).

Ефект Пельтьє більш помітний у напівпровідниках і тому частіше використовується в напівпровідникових елементах (в елементах Пельтьє). Незважаючи на невеликий коефіцієнт корисної дії, елементи Пельтьє, завдяки відсутності додаткових рухомих механізмів, широко використовуються для охолодження морозильних камер холодильників, інфрачервоних сенсорів, діодних лазерів та різноманітних електронних і

комп'ютерних пристроїв. Прикладом підвищення ефективності використання елементів Пельтьє є поєднання холодильника та електричної плити в єдиному пристрої, де холодні контакти розміщують у морозильній камері, а гарячі контакти – поряд з нагрівальними елементами електроплити. Елементи Пельтьє складаються з декількох пар напівпровідникових паралелепіпедів з електронною ( $n$ ) і електронно-дірковою ( $p$ ) електропровідністю – зазвичай з бісмут(III) телуриду  $Bi_2Te_3$  та сполук германію з силіцієм.

*Електротермічний ефект Томсона* – це явище виділення або поглинання тепла при проходженні електричного струму через неоднорідно нагрітий провідник. Якщо уздовж провідника з електричним струмом  $I$  виникає різниця температур ( $\Delta T = T_1 - T_2$ ), то крім теплової енергії Джоуля  $W = I^2 R t$  (9.10) в об'ємі провідника протягом деякого часу  $t$  виділяється або поглинається додаткова кількість теплоти  $Q_T$ , яка називається теплотою Томсона:

$$Q_T = \sigma \cdot I \cdot \Delta T \cdot t, \quad (11.10)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт Томсона, який залежить від матеріалу провідника.

У диференціальній формі кількість тепла  $dQ_T$ , що виділяється протягом часу  $dt$  на відрізку  $dx$  провідника об'ємом  $dV$ , визначається як:

$$dQ_T = -\sigma \cdot \nabla T \cdot J \cdot dt \cdot dV, \quad (11.11)$$

де  $\nabla T = \frac{dT}{dx}$  – градієнт температури провідника вздовж його довжини  $dx$ ;

$J = \frac{dl}{dS}$  – густина електричного струму;  $dV = dS \cdot dx$  – елементарний об'єм провідника.

При проходженні носіїв заряду (електронів провідності) через деякий відрізок неоднорідно нагрітого провідника чи напівпровідника, наприклад, із області високої температури  $T_1$  з більшою енергією електронів в область низької температури  $T_2$  ( $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$ ) електрони передають надлишкову енергію і додатково нагрівають цей відрізок. При зворотному напрямку переміщення електронів з області низької температури  $T_2$  в область високої температури  $T_1$  електрони поповнюють свою

енергію за рахунок навколишніх атомів і тому охолоджують цей відрізок провідника.

Ефект Томсона був відкритий в 1856 році. Воно за своєю природою є абсолютним явищем, тому що не потребує контактів різних матеріалів (на відміну від інших електротермічних явищ). Це дозволило Томсону на основі першого і другого законів термодинаміки зв'язати між собою три електротермічні ефекти (зв'язати коефіцієнти Зеєбека  $\psi$ , Пельтьє  $\Pi$  і Томсона  $\sigma$ ) і ввести абсолютну систему відліку питомої термоелектрорушійної сили  $\psi$  (табл. 11.1) для кожного провідника чи напівпровідника окремо:

$$\sigma = T \frac{d\psi}{dT}; \quad \Pi = T \cdot \psi = \int_0^T \frac{\sigma}{T} dT, \quad (11.12)$$

де  $T$  – абсолютна температура провідника чи напівпровідника в місці контакту, К.

Ефект Томсона у порівнянні з ефектом Пельтьє і законом Джоуля проявляється в незначній мірі через відносно невеликі значення коефіцієнта Томсона  $\sigma$  в звичайних умовах. Наприклад, для бісмуту при кімнатній температурі коефіцієнт  $\sigma$  сягає лише  $\sim 10^{-5}$  В/К. Тому вплив ефекту Томсона враховують лише при підвищених вимогах до точності вимірів чи розрахунків.

### **Блукаючі струми**

Блукаючими струмами зазвичай називають ті струми, які виникають у землі. Серед причин цих струмів розглянемо лише ті, які виникають внаслідок електричного контакту з нею металевих провідників з електричним струмом і пов'язані з діяльністю людини.

*Блукаючі струми* обумовлені електричним контактом із землею провідників з електричним струмом. Контакт провідників із землею допускають зазвичай тоді, коли це потрібно з міркувань безпеки експлуатації електричного обладнання – для захисного заземлення електричного обладнання і зрівняння електричного потенціалу його корпусу з електричним потенціалом землі. Це заземлення має бути достатньо надійним (з мінімально можливим перехідним опором) для виключення випадко-



вого враження людини електричним струмом. Виникаючі в таких випадках блукаючі струми є безумовно корисними, тому що завдяки цим струмам вирівнюються потенціали корпусу і землі. Доволі розповсюдженим джерелом блукаючих струмів є рейковий електротранспорт, в якому рейкові колії використовуються як провідники електричного струму та при цьому знаходяться в безпосередньому електричному контакті з землею. При протіканні електричного струму  $I$  в рейковій колії, яка має електричний опір  $R_p$ , виникає падіння напруги  $\Delta U = I_p \cdot R_p$  відповідно до закону Ома (9.9). У свою чергу, рейкова колія завдяки наявності в ній падіння напруги  $\Delta U$  є джерелом блукаючих струмів  $I_{бл}$  в землі.

*Найбільш негативні наслідки блукаючих струмів* мають місце на рейковому (залізничному) електротранспорті, де використовується постійний чи випрямлений струм. Під впливом цих струмів суттєво прискорюється електрохімічна корозія тих ділянок наземних та підземних металевих конструкцій, які знаходяться у вологому ґрунті і з яких виходять блукаючі струми  $I_{бл}$ . Такі ділянки називаються анодними зонами. Справа в тому, що у вологому ґрунті, як і в електроліті, носіями електричних зарядів є не тільки негативні електрони, але й позитивні іони. Іони до того ж є носіями речовини, що входить до складу згаданих металевих конструкцій. Тому участь іонів у блукаючих струмах означає поступове переміщення речовини в анодних зонах з металоконструкцій у землю, тобто їх прискорену корозію і руйнування та суттєве скорочення терміну їх експлуатації. До найбільш дорогих і важливих промислових об'єктів, які підпадають під негативний вплив блукаючих струмів, відносяться тунелі, магістральні металеві трубопроводи, рейки та опори на залізниці, кабельні лінії електропостачання, підземні споруди великих міст. Блукаючі струми здатні також створювати різницю електричних потенціалів між окремими частинами металевих конструкцій в будь-яких місцях, у тому числі у досить віддалених від рейкового електротранспорту місцях, і викликати вибухонебезпечне іскріння при випадковому замиканні і розмиканні цих частин. У таких місцях можуть виявитись вибуховий газ, бензин, нафта, вугільний і текстильний пил, вибухівка та інші горючі і вибухонебезпечні речовини. Тому на газових, нафтопереробних, вугільних, хімічних та інших подібних вибухонебезпечних підприємствах потрібно

не тільки знижувати середньорічний рівень блукаючих струмів, але й не допускати небезпечні потенціали блукаючих струмів у будь-яку мить.

*Обмеження блукаючих струмів та їх потенціалів.* Найбільш дієвими є активні методи обмеження блукаючих струмів, в яких передбачається використання додаткових регульованих джерел постійного струму з метою компенсації падіння напруги на окремих ділянках залізничного шляху або в додаткових паралельних кабелях. Для захисту тунелів як найбільш важливих споруд від корозійного впливу блукаючих струмів використовується так званий тунельний захист. В ньому передбачене приєднання тягових джерел струму в електричний розрив залізничної колії згідно зі струмом на ділянці тунелю. Для захисту всіх ділянок рейкової колії і зниження блукаючих струмів та їх електричних потенціалів до безпечного рівня використовується додатковий електричний кабель, який з'єднує ці ділянки з «мінусом» тягової підстанції через додаткові регульовані джерела струму.

## **11.2 Метали високої електропровідності**

### **Мідь та її сплави**

Мідь *Cu* отримують шляхом переробки сульфідних руд. За електропровідністю мідь поступається лише сріблу (табл. 11.1). Мідь має високу механічну міцність і корозійну стійкість, легко витягується у дріт малого діаметру, добре піддається паянню. Мідь частіше використовують у м'якому стані, який отримують після відпалу при температурі +270°C з подальшим охолодженням. М'яка мідь має на 3...5 % більшу електропровідність, ніж тверда мідь. Стандартна мідь у відпаленому стані має питомий опір  $\rho = 0,017241$  мкОм·м. Домішки суттєво знижують електропровідність міді. Тому для використання в електротехніці її обов'язково піддають електролітичному очищенню. Мідь марки М1 має домішок не більше 0,1 %, а марки М0 - не більше 0,05 %. Найчистішою є мідь марки М006, яка має не більше 0,01 % домішок і виплавляється у вакуумних індукційних печах.

Для отримання спеціальних або додаткових властивостей використовують різноманітні мідні сплави. Серед цих сплавів найбільш відомими і поширеними у використанні є бронза і латунь.

*Бронза* – це сплав міді з домішками в невеликій їх кількості. В якості цих домішок можуть використовуватись олово *Sn*, фосфор *P*, цинк *Zn*, свинець *Pb*, нікель *Ni*, алюміній *Al*, марганець *Mn*, залізо *Fe*, берилій *Be*, титан *Ti*, кремній *Si*, магній *Mg*, кадмій *Cd*. Бронзи маркуються як Бр, після чого вказують букви і цифри, які означають легуючі елементи та їх вміст у процентах. Берилієва бронза БрБ2 (*CuBe<sub>2</sub>*) містить 2 % берилію, з неї виготовляють мембрани та пружні контакти електричних пристроїв. Кадмієва бронза БрКд1 (*CuCd1*) містить 1 % кадмію, з неї виготовляють контактні проводи для електротранспорту та колекторні пластини. Фосфориста бронза БрОФ6,5 – 0,15 (*CuSnP6,5 – 0,15*) містить 6,5 % олова і 0,15 % фосфору, використовується для виготовлення струмопровідних пружин в електроприладах.

*Латунь* – це мідний сплав, в якому основним легуючим елементом є цинк *Zn* в кількості до 45 %. Вона значно пластичніше і дешевше міді, і тому широко використовується в електротехніці для виготовлення струмопровідних деталей методом штамповки. В деяких марках латуні для поліпшення окремих властивостей вводять у невеликій кількості інші метали – олово, свинець, марганець, нікель або алюміній. Маркують латуні буквою Л і цифрою, яка вказує процентний вміст міді. Наприклад, латунь марки Л63 містить 63 % міді, а решта – цинк. До речі, латунь цієї марки має максимальну пластичність. У латуней складного вмісту в маркуванні вказується легуючий елемент. Наприклад, латунь марки ЛС59-1 містить 59 % міді, 1 % свинцю, а решта – цинк.

### **Алюміній та його сплави**

За електропровідністю алюміній займає третє місце після срібла і міді – лише в 1,53 рази гірше міді (табл. 11.1), а за щільністю – перше місце (в 3,3 рази легший за мідь). Алюмінієвий провідник вдвічі легше мідного з таким же опором. Тому алюміній має суттєві переваги над іншими провідниковими матеріалами, особливо, якщо врахувати відносно невелику вартість алюмінію. Невисокі механічні властивості алюмінію

інколи компенсують за допомогою додаткових сталевих провідників. Зокрема, у високовольтних лініях електропередачі використовують сталєалюмінієві провідники.

Алюміній отримують шляхом розчинення чистого алюміній(III) оксиду (глинозему)  $Al_2O_3$  в розплавленому кріоліті і при температурі  $\approx 950^\circ C$  методом електролізу виділяють з нього алюміній. Первинне очищення алюмінію продуванням через його розплав хлору дозволяє знизити кількість домішок в алюмінію до 0,3 %. Подальше зниження домішок до 0,01 % можливе при електролітичному рафінуванні алюмінію. Технічно чистий алюміній марок А85, А8, А7, А6, А5 і А0 містить алюмінію не менше 99,85 %, 99,8 %, 99,7 %, 99,6 %, 99,5 % і 99,0 % відповідно. Хімічно чистий алюміній марок А995, А99, А97 і А95 містить алюмінію відповідно не менше 99,995 %, 99,99 %, 99,97 % і 99,95 %. Особливо чистий алюміній марки А999 містить алюмінію не менше 99,999 %. Для напівпровідникової техніки за методом зонної плавки виготовляють надчистий алюміній з чистотою 99,9999 % (до 0,0001 % домішок). Особливо чистий і надчистий алюміній використовують в якості кріопровідника з дуже малим питомим опором. Наприклад, при  $20^\circ K$  його питомий опір знижується в 2000...6000 разів [5].

Алюміній – дуже активний метал, який швидко окислюється на повітрі та покривається тонкою і щільною оксидною плівкою  $Al_2O_3$ . Ця плівка у звичайних умовах захищає внутрішні шари алюмінію від подальшого окислення (корозії) і навіть може виконувати електроізоляційні функції. У разі порушення цієї плівки, наприклад, під впливом електричної дуги при розмиканні провідника, процес окислення алюмінію енергетично підтримує горіння дуги. Тому алюміній забороняється використовувати в умовах небезпеки пожежі або вибуху. Здатність алюмінію до активного окислення та сильного нагріву використовують в металургії у вигляді залізо-алюмінієвого терміту – порошковидної суміші алюмінію (25 %) і ферум(III) оксиду  $Fe_2O_3$  (75 %).

Алюміній має негативну абсолютну питому термоелектрорушійну силу (табл. 11.1). Тому алюмінієвий дріт у контакті з мідним чи сталевим дротом створює гальванічну пару. В цій парі алюміній є анодом і тому в присутності вологи схильний до прискореної електрохімічної корозії, особливо за наявності електричного струму.

Серед електротехнічних алюмінієвих сплавів найбільш відомим є *альдрей*, який крім алюмінію містить магній  $Mg$  (0,3...0,5 %), кремній  $Si$  (0,4...0,7 %) і залізо  $Fe$  (0,2...0,3 %). Цей сплав за електропровідністю майже не поступається чистому алюмінію, а за механічними властивостями наближається до міді [5].

### 11.3 Надпровідники

Надпровідники відрізняються від звичайних електричних провідників нульовим питомим опором при низьких (криогенних) температурах. Надпровідність відкрив голландський вчений Каммерлінг-Оннес у 1911 році.

#### Надпровідність

Надпровідність – явище переходу деяких провідників електричного струму зі звичайного стану в стан надпровідності при дуже низькій температурі  $T < T_K$  і магнітній індукції  $B < B_K$ , де  $T_K$  і  $B_K$  називаються критичною температурою і критичною магнітною індукцією. Провідникові матеріали з такою властивістю називають надпровідниками. Їх питомий електричний опір у надпровідному стані має надзвичайно мале значення  $\rho < 5 \cdot 10^{-24}$  Ом·м, яке не піддається виміру, і тому вважається нульовим. Стан надпровідності зникає, якщо температура  $T$  надпровідника або якщо магнітна індукція на його поверхні  $B$  перевищить критичне значення ( $T > T_K$  або  $B > B_K$ ).

Температура надпровідника  $T$  не залежить від електричного струму  $I$  в ньому через нульове значення питомого опору  $\rho$ . Тому умова існування надпровідності ( $T < T_K$ ) не обмежує електричний струм. Але магнітна індукція  $B$  на поверхні надпровідника є наслідком електричного струму в ньому, і тому друга умова існування надпровідності ( $B < B_K$ ) обмежує електричний струм. Зв'язок магнітної індукції  $B$  на поверхні надпровідника зі струмом  $I$  в ньому можна записати у вигляді:

$$B = \mu_a \cdot H = \frac{\mu_a}{\pi D} I = \frac{\mu_a D}{4} J, \quad (11.13)$$

де  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність надпровідника на його поверхні, яка може бути прирівняна до  $\mu_0$  (до абсолютної магнітної проникності вакууму  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м);  $H$  – напруженість магнітного поля на поверхні надпровідника, А/м;  $I$  – електричний струм у надпровіднику, А;  $D$  – діаметр надпровідника, м;  $J = \frac{I}{\frac{\pi D^2}{4}}$  – середня густина струму в надпровіднику, А/м<sup>2</sup>.

### **Ефект Мейснера**

З формули (11.13) видно, як умову існування надпровідності можна використовувати не тільки обмеження за магнітною індукцією на поверхні надпровідника ( $B < B_K$ ), але й обмеження за напруженістю магнітного поля ( $H < H_K$ ). Використання ж густини  $J$  електричного струму для визначення умов існування надпровідності ( $J < J_K$ ) не зовсім коректне з двох причин. По-перше, магнітна індукція  $B$ , як фундаментальний фактор надпровідності, залежить не тільки від густини  $J$  електричного струму, але й від геометричних параметрів (11.14). По-друге, густина електричного струму в надпровіднику розподіляється надзвичайно нерівномірно через прояв ефекту Мейснера.

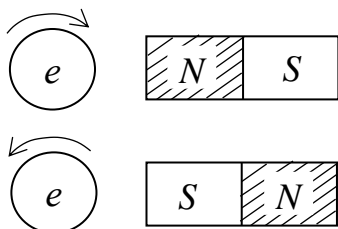
*Ефект Мейснера* – це витіснення магнітного поля у поверхневий і дуже тонкий шар надпровідника. У цьому ефекті полягає друга фундаментальна відмінність надпровідників від звичайних провідників електричного струму. Товщина цього шару згідно з дослідженнями німецьких фізиків Фріца і Гайнца Лондонів складає близько  $10^{-2}$  мкм. При цьому не має принципового значення, які електричні струми спричинили магнітне поле – зовнішні чи внутрішні струми надпровідника. Це означає, що електричний струм надпровідника як першопричина магнітного поля відповідно до закону повного струму (9.19) також витісняється у поверхневий і дуже тонкий шар надпровідника. Ця особливість змушує, як надпровідники, використовувати кабелі з великою кількістю тонких надпровідних жил або плівок, які розміщують у його зовнішньому тонкому шарі.

Умови існування ефекту Мейснера співпадають з умовами існування надпровідності, якщо використовується надпровідник першого роду і не співпадають, якщо використовується надпровідник другого роду.

## Природа надпровідності

Найбільш визнаною теорією, яка на мікроскопічному рівні пояснює фізичну природу надпровідності, вважається так звана БКШ-теорія – квантова теорія надпровідності американських вчених Бардіна, Купера і Шріффера. Нажаль, ця теорія не здатна повністю пояснити всі явища, які пов’язані з надпровідністю. Особливо це стосується пояснення глибинних причин високотемпературної надпровідності. Тому вчені різних країн, враховуючи перспективи практичного використання надпровідності, постійно та інтенсивно працюють над удосконаленням теорії надпровідності.

В основі БКШ-теорії лежить уявлення, що електрони провідності з антипаралельними спінами (з протилежними напрямками обертання електронів навколо своїх осей) можуть об’єднуватися в так звані куперівські пари. Їх можна уявити як пари мініатюрних магнітів з протилежними магнітними полюсами, які через посередництво кристалічних решіток взаємно притягуються із силою, що перевищує кулонівську силу взаємного відштовхування (рис. 11.9).



**Рисунок 11.9 – Куперівські електронні пари**

Куперівські пари мають сумарний нульовий спін, і тому здатні безперешкодно (без електричного опору) переміщуватись у надпровіднику. Надпровідність зникає, якщо куперівські пари роз’єднуються під дією силового впливу броунівського руху мікрочастинок (при надмірному підвищенні температури), магнітного поля (при надмірному підвищенні магнітної індукції), а також під впливом високої частоти електромагнітного поля.

Точно кажучи, опір надпровідника при змінному струмі дещо відмінний від нуля і збільшується при збільшенні його частоти. Це пояснюється наявністю серед надпровідних електронів (куперівських електронних пар) незначної кількості звичайних електронів, які беруть участь у

створенні змінного електричного струму, і тому спричиняють деякі теплові (джоулеві) втрати. Цей ефект особливо яскраво проявляється при частоті електромагнітного поля  $f > 3 \cdot 10^{11}$  Гц, коли енергії квантів електромагнітного поля  $h \cdot f$  стає достатньою для роз'єднання куперівських пар, де  $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постійна Планка. Ця частота є початковою в діапазоні інфрачервоних променів. Тому надпровідники у світловому діапазоні частот електромагнітних хвиль нічим не відрізняються від звичайних провідників.

Залежно від поведінки надпровідників у магнітному полі розрізняють дві основні їх групи – надпровідники першого і другого роду.

### Надпровідники першого роду

Надпровідники першого роду мають такі характерні особливості (рис. 11.10, *a*): існування однієї зони надпровідного стану з одним значенням критичної магнітної індукції  $B_{K0}$  при  $T_K \approx 0$ ; перехід з нормального стану у надпровідний відбувається стрибкоподібно; повне витіснення зовнішнього магнітного поля з об'єму надпровідника в стані надпровідності (ефект Мейснера).

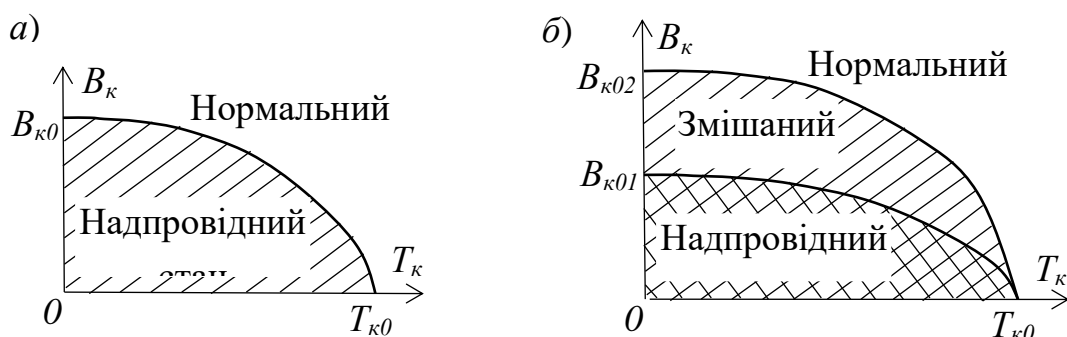


Рисунок 11.10 – Діаграми надпровідників першого (*a*) і другого роду (*б*)

Надпровідники першого роду за давньою традицією інколи називають «м'якими» надпровідниками. До надпровідників першого роду відносяться деякі чисті (елементарні) метали [5]:

- титан  $Ti$  ( $T_{K0}=0,39$  К;  $B_{K0}=0,006$  Тл);
- кадмій  $Cd$  ( $T_{K0}=0,52$  К;  $B_{K0}=0,0028$  Тл);
- цинк  $Zn$  ( $T_{K0}=0,85$  К;  $B_{K0}=0,0055$  Тл);
- галій  $Ga$  ( $T_{K0}=1,08$  К;  $B_{K0}=0,0059$  Тл);
- алюміній  $Al$  ( $T_{K0}=1,2$  К;  $B_{K0}=0,01$  Тл);



- талій Tl ( $T_{K0}=2,37$  К;  $B_{K0}=0,018$  Тл);
- індій In ( $T_{K0}=3,41$  К;  $B_{K0}=0,028$  Тл);
- олово Sn ( $T_{K0}=3,7$  К;  $B_{K0}=0,031$  Тл);
- ртуть Hg ( $T_{K0}=4,2$  К;  $B_{K0}=0,046$  Тл);
- тантал Ta ( $T_{K0}=4,5$  К;  $B_{K0}=0,083$  Тл);
- свинець Pb ( $T_{K0}=7,2$  К;  $B_{K0}=0,08$  Тл).

При таких малих критичних значеннях температури  $T_{K0}$  і магнітної індукції  $B_{K0}$  надпровідники першого роду не викликають практичного інтересу.

### Надпровідники другого роду

Надпровідники другого роду мають такі характерні особливості (рис. 11.10, б): окрім звичайної для надпровідників першого роду зони надпровідного стану існує зона змішаного надпровідного стану з двома значеннями критичної магнітної індукції –  $B_{K01}$  і  $B_{K02}$ ; перехід з нормального стану у надпровідний відбувається не стрибкоподібно, а поступово в деякому інтервалі температур; ефект Мейснера спостерігається в повній мірі лише в зоні надпровідного стану, а в зоні змішаного стану – лише частково. Змішаний стан за питомим опором  $\rho$  не відрізняється від надпровідного, тобто  $\rho = 0$ .

Серед чистих металів до надпровідників другого роду відносяться лише:

- ніобій Nb ( $T_{K0} = 9,22$  К;  $B_{K02} = 0,195$  Тл);
- ванадій V ( $T_{K0} = 5,43$  К;  $B_{K02} = 0,137$  Тл);
- технецій Tc ( $T_{K0} = 7,8$  К;  $B_{K02} = 0,141$  Тл).

Інші надпровідники другого роду – це сплави і різноманітні хімічні сполуки. Їх зазвичай піддають пластичному деформуванню в холодному стані з метою підвищення концентрації дефектів у кристалічних решітках та критичної магнітної індукції  $B_K$  [6]. Такі надпровідники інколи називають «твердими».

До «твердих» надпровідників відносяться:

#### • сплави

- ніобію Nb і титану Ti ( $T_{K0}=10$  К;  $B_{K02}=12$  Тл);
- ніобію Nb і цирконію Zr ( $T_{K0}=9,5$  К;  $B_{K02}=11$  Тл);

- ванадію  $V$  і галію  $Ga$  ( $T_{K0}=14,2$  К;  $B_{K02}=22,6$  Тл);
- ніобію  $Nb$ , алюмінію  $Al$  і германію  $Ge$  ( $T_{K0}=21$  К;  $B_{K02}=41$  Тл);
- хімічні сполуки
  - ніобію  $Nb$  з нітрогеном  $2NbN$  ( $T_{K0}=16$  К;  $B_{K02}=22,3$  Тл);
  - ніобію з германієм  $Nb_3Ge$  ( $T_{K0}=23,2$  К;  $B_{K02}=22,6$  Тл);
  - ніобію зі станумом  $Nb_3Sn$  ( $T_{K0}=18$  К;  $B_{K02}=22$  Тл);
  - п्लомбуму з молібденом і сульфуром  $Pb_1Mo_{5,1}S_6$  ( $T_{K0}=14,4$  К;  $B_{K02}=60$  Тл).

Принципово новими стали керамічні високотемпературні надпровідники (ВТНП) на основі купрум оксиду з критичною температурою  $T_K$  вище 30 К. Такі надпровідники вперше отримали в 1986 році швейцарські вчені К.Мюллер і Дж. Беднорц. До керамічних ВТНП відносяться<sup>^</sup>

- лантанова кераміка – з'єднання лантану  $La$  зі стронцієм  $Sr$ , купрум  $Cu$  і киснем  $O$  ( $T_K=56$  К) або з барієм, купрум і киснем  $La_{1,8}Ba_{0,2}CuO$  ( $T_K=85$  К);
- ітрієва кераміка – з'єднання ітрію з барієм, купрум і киснем  $YBa_2Cu_3O_7$  ( $T_{K0}=90$  К;  $B_{K02}=100$  Тл);
- бісмутова кераміка – сполука бісмуту зі стронцієм, кальцієм, купрум і киснем  $Bi_2Sr_3CaCu_2O_8$  ( $T_K=95$  К);
- талієва кераміка – з'єднання талію з барієм, кальцієм, купрум і киснем  $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$  ( $T_K=110$  К);
- ртутна кераміка – з'єднання гідраргірума з барієм, кальцієм, купрум і киснем  $HgBa_2Ca_2Cu_2O_8$  ( $T_K=125$  К).

Головною перевагою керамічних ВТНП є можливість їх охолодження відносно дешевим зрідженим азотом. Це відкриває шлях для широкого використання надпровідників у промисловості.

## 11.4 Метали високого електричного опору

### Резистивні сплави

Резистивні сплави використовуються для виготовлення вимірвальних приладів та зразкових резисторів. Тому ці сплави повинні мати не

тільки великий питомий електричний опір  $\rho$ , але й високу стабільність  $\rho$  – незначний температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_\rho$ .

*Манганін* – найбільш типовий сплав для виготовлення зразкових резисторів. Він містить мідь *Cu* (85 %), марганець *Mn* (12 %) і нікель *Ni* (3 %) [10]. Його основні електричні властивості: достатньо високий питомий опір  $\rho = 0,42 \dots 0,48$  мкОм·м, досить мале значення температурного коефіцієнта питомого опору  $\alpha_\rho = (6 \dots 50) \cdot 10^{-6} K^{-1}$  і доволі малий коефіцієнт термоелектрорушійної сили в парі з міддю  $\psi_{12} = 1 \dots 2$  мкВ/К. Для отримання малого значення коефіцієнта  $\alpha_\rho$  дріт з манганіну піддається спеціальній термообробці – відпалу у вакуумі при температурі  $+550 \dots 600^\circ\text{C}$ . Гранична робоча температура манганіну  $+200^\circ\text{C}$ .

*Константан* – сплав, який містить мідь *Cu* (58,5 %), нікель *Ni* (40 %) і марганець *Mn* (1,5 %) [10]. Його середній температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_\rho = (-5 \dots -50) \cdot 10^{-6} K^{-1}$  при  $\rho = 0,48 \dots 0,52$  мкОм·м (рис. 11.3). Гранична робоча температура константану  $+450^\circ\text{C}$ . З константану також виготовляють тензочутливі датчики для вимірювання механічних зусиль та деформацій металевих конструкцій. Як недолік константану у порівнянні з манганіном слід відзначити доволі великий коефіцієнт термоелектрорушійної сили в парі з міддю  $\psi_{12} = 45 \dots 55$  мкВ/К, що може позначитися на точності вимірювань (особливо при використанні вимірювальних мостів). Крім цього, константан містить багато відносно дорогого нікелю.

### **Сплави для електронагрівальних елементів**

Сплави для електронагрівальних елементів мають бути достатньо дешевими і працювати, контактуючи з повітрям при досить високих температурах – інколи до  $1000^\circ\text{C}$ . Таким вимогам відповідають різноманітні сплави на основі заліза. Висока теплостійкість таких сплавів пояснюється утворенням суцільної плівки завдяки введенню до їх складу нікелю *Ni*, хрому *Cr* і алюмінію *Al*. Термін служби нагрівальних елементів може суттєво збільшитись при виключенні доступу кисню до поверхні нагрівального проводу. Для цього провід розміщують у середині трубки із

стійкого до окислення металу і заповнюють трубку діелектриком з високою теплопровідністю (магнезією  $MgO$ ). Найбільш вживаними серед сплавів на основі заліза є ніхром і хромаль.

*Ніхром* – сплав заліза з нікелем  $Ni$  (55...78 %), хромом  $Cr$  (15...23 %) і марганцем  $Mn$  (1,5 %). Основні електричні властивості ніхрому: питомий опір  $\rho = 1 \dots 1,2$  мкОм·м, температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_\rho = (1 \dots 2) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , гранична робоча температура 1000 ... 1100°C. Ніхром може легко витягуватись у відносно тонкий провід або стрічку. Головний недолік ніхрому – великий вміст дорогого нікелю. Якщо вміст нікелю зменшити за рахунок збільшення заліза, то гранична робоча температура і термін служби сплаву знижується. Такий сплав називається фероніхромом.

*Хромаль* – сплав заліза з хромом  $Cr$  (12...27 %), алюмінієм  $Al$  (3,5...6,5 %) і марганцем  $Mn$  (0,7 %) з деяким вмістом кремнію  $Si$  (0,6...1,2 %) і вуглецю  $C$  (0,6...0,15 %). Основні електричні властивості хромалю: питомий опір  $\rho = 1,26 \dots 1,4$  мкОм·м, температурний коефіцієнт питомого опору  $\alpha_\rho = (0,5 \dots 1,5) \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , гранична робоча температура 750 ... 1400°C. Хромаль значно дешевше ніхрому, однак через твердість і хрупкість з нього важко виготовляти тонкі проводи чи стрічки. Якщо вміст хрому зменшити за рахунок збільшення заліза, то гранична робоча температура і термін служби сплаву знижується. Такий сплав називається фехралем.

## 11.5 Метали різного призначення

### Тугоплавкі метали

*Вольфрам*  $W$  – дуже щільний ( $d = 19,3 \text{ г/см}^3$ ) і тугоплавкий ( $T_{\text{плавл}} = 3400^\circ\text{C}$ ) метал. Проміжним продуктом його виробництва з вольфрамиту  $FeWO_4 + MnO_4$  і шееліту  $CaWO_4$  є вольфрамова кислота  $H_2WO_4$ , з якої вилучають водень при  $+900^\circ\text{C}$  і отримують дрібний порошок вольфраму. З цього порошку методами порошкової металургії при тиску до 200 МПа пресують і спікають вольфрамові стрижні. З них після складної термічної і механічної обробки у водневій атмосфері отримують

дріт діаметром до 0,01 мм. Завдяки високій тугоплавкості ці вироби можуть працювати при температурі до +2300°C без доступу кисню (у вакуумі або в атмосфері інертного газу). Питомий електричний опір вольфраму  $\rho$  суттєво залежить від температури – збільшується приблизно за лінійним законом від 0,055 мкОм·м при 20°C до 1,05 мкОм·м при 3000°C. Завдяки цій властивості вольфрамові дроти інколи використовують як стабілізатор струму (як баретер). Вольфрам відносно дорогий, важко піддається обробці, і тому його використовують лише там, де потрібна дуже висока робоча температура і термоелектронна емісія – при виготовленні ниток накаливання освітлювальних і електронних ламп, у рентгенівських, електронно-променевих і газорозрядних трубках [6]. Для зниження роботи виходу і збільшення емісії електронів у вольфрам вводять 1...2 % торій(IV) оксиду  $ThO_2$ . Вольфрам слабо схильний до утворення електричної дуги, тому він давно використовується для виготовлення розривних контактів.

*Тантал Ta* – тугоплавкий метал з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}} = 3000^\circ\text{C}$ , має щільність  $d = 16,6 \text{ г/см}^3$  і питомий опір  $\rho = 0,124 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , краще, ніж вольфрам, піддається пластичному деформуванню, у тому числі при низькій температурі. Заготовки з танталу спікають методами порошкової металургії у вакуумі через його здатність поглинати інертні гази і ставати від цього дуже крихкими. Тантал отримують з мало розповсюджених танталатів методом електролізу. Тантал в основному використовують в електровакуумній промисловості для виготовлення анодів і сіток генераторних ламп, електролітичних конденсаторів, а також як надпровідник.

*Молибден Mo* – тугоплавкий метал з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}} = 2620^\circ\text{C}$  з найнижчим питомим опором серед тугоплавких металів ( $\rho = 0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ), має схожі з вольфрамом властивості при значно меншій щільності ( $d = 10,2 \text{ г/см}^3$ ) і значно більшій пластичності. Починає окислюватися при 400°C, у вологій атмосфері – навіть при 250°C. Тому прилади з молибдену можуть працювати лише у вакуумі або в середовищі інертних газів. Молибден отримують з руди молибденіт (молибден(IV) сульфід)  $MoS_2$ . Завдяки високій міцності, твердості і пластичності молибден є одним з кращих матеріалів для виготовлення деталей

складної конфігурації, що працюють в умовах високих температур. Молібден, як і вольфрам, використовують для виготовлення електродів радіоламп, а також розривних електричних контактів. У парі з вольфрамом молібден використовується для виготовлення високотемпературних термомпар, які здатні працювати при температурі до 2000°C в інертних середовищах або вакуумі.

*Ніобій Nb* – тугоплавкий метал з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}} = 2470^{\circ}\text{C}$  та питомим опором  $\rho = 0,155$  мкОм·м, а також щільністю  $d = 8,57$  г/см<sup>3</sup>. За хімічними властивостями і методами обробки ніобій подібний до танталу. Заготовки з ніобію також виготовлюють методами порошкової металургії. Ніобій і деякі його сплави є надпровідниками з відносно високою критичною температурою (для чистого ніобію  $T_K = 9,2$  К, а для сплавів  $T_K = 23,2$  К). Тому його використовують для виготовлення надпровідних електромагнітів, а також в електровакуумній техніці.

### Легкоплавкі метали

*Свинець Pb* – дуже пластичний метал з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}} = 327^{\circ}\text{C}$  і питомим опором  $\rho = 0,19$  мкОм·м. У холодному стані він легко прокатується на фольгу. Свинець стійкий до корозії під дією води, сульфатної і хлоридної кислот, і тому використовується для виготовлення кабельних захисних оболонок, пластин свинцевих кислотних акумуляторів, плавких запобіжників. Свинець дуже ефективно поглинає рентгенівські та гама-промені (на порядок краще сталі і на два порядки краще цегли), і тому використовується в засобах захисту від цих променів. Водорозчинні сполуки плюмбуму отруйні.

*Олово Sn* – м'який і пластичний метал сріблястого кольору з низькою температурою плавлення ( $T_{\text{плавл}} = 332^{\circ}\text{C}$ ) і відносно великим питомим опором ( $\rho = 0,113$  мкОм·м), при згинанні характерно потріскує. Олово стійке до окислення при температурах до 150°C і не піддається впливу води, що дозволяє використовувати його для захисного антикорозійного покриття металевих (сталевих) виробів. Олово у холодному стані легко прокатується на фольгу. Для полегшення прокатування в олово вводять присадки свинцю (до 15 %) і сурми (до 1 %). Тонку олов'яну фольгу використовують у виготовленні конденсаторів. Олово

широко використовується у більшості м'яких (низькотемпературних) припоїв. Сплави на основі або з додаванням олова широко використовуються при виробництві напівпровідникових приладів з кремнію, германію та галій арсеніду завдяки тому, що олово є майже єдиним носієм донорських елементів, особливо фосфору.

*Цинк Zn* – світлий метал, який отримують металургійним шляхом і очищають потім електролітичним способом. Він плавиться при  $T_{\text{плавл}} = 419^{\circ}\text{C}$ , має відносно низький питомий опір  $\rho = 0,0592$  мкОм·м, при нормальних температурах крихкий, але при нагріванні до  $100^{\circ}\text{C}$  стає пластичним. При подальшому нагріванні до  $200^{\circ}\text{C}$  цинк знову стає дуже крихким (навіть розтирається у порошок). Цинк добре кується і прокатується в тонкі листи. На повітрі покривається тонкою захисною оксидною плівкою  $ZnO$ , а в присутності вологи і вуглекислого газу – плівкою цинк дигідрокарбонат  $Zn_2(OH)_2CO_3$ . Завдяки цій властивості цинк застосовують як антикорозійне покриття металевих (сталевих) виробів. Цинк використовується також для металізації паперу конденсаторів шляхом нанесення на папір парів цинку у вакуумі, який випаровується при температурі близько  $600^{\circ}\text{C}$ .

*Кадмій Cd* – ковкий і тягучий метал сріблясто-білого кольору з температурою плавлення  $T_{\text{плавл}} = 321^{\circ}\text{C}$  і питомим опором  $\rho = 0,074$  мкОм·м. В атмосфері вологого повітря вкривається тонкою плівкою окису, яка захищає метал від подальшої корозії. Кадмій застосовують у виробництві лужних кадмієво-нікелевих акумуляторів і в якості захисного (антикорозійного) покриття, входить до складу деяких видів бронзи і низькотемпературних припоїв. Розчинні сполуки кадмію отруйні.

*Ртуть Hg* – єдиний метал, який при нормальних температурах знаходиться в рідкому стані ( $T_{\text{плавл}} = -39^{\circ}\text{C}$ ). Ртуть має доволі великий питомий опір  $\rho = 0,958$  мкОм·м. Вона використовується в газорозрядних лампах завдяки низькому потенціалу іонізації у порівнянні зі звичайними і навіть інертними газами. У ртуті розчиняються багато металів (золото, срібло, платина, магній, алюміній, цинк, олово, свинець, кадмій), утворюючи амальгами. У ртуті не розчиняються вольфрам, залізо і тантал. **Ртуть, її сполуки і особливо пара – отруйні.**

### Благородні метали

В електротехніці до благородних металів належать золото *Au*, срібло *Ag*, платина *Pt* і паладій *Pd*. Ці метали та їх сплави мають високу хімічну стійкість.

*Золото Au* має дуже високу пластичність (можна отримати фольгу товщиною до 0,01 мкм), з кислотами і лугами не взаємодіє, розчиняється лише в суміші нітратної та хлоридної кислот (в «царській горілці»), плавиться при  $T_{\text{плавл}} = 1063^{\circ}\text{C}$ , має питомий опір  $\rho = 0.0225$  мкОм·м. В електронній техніці золото використовується при виготовленні напівпровідникових фоторезисторів та фотоелементів, прецизійних контактних елементів у особливо відповідальних випадках. У менш відповідальних випадках застосовують сплави золота зі сріблом, нікелем і цирконієм, які мають підвищену твердість.

*Срібло Ag* – білий блискучий пластичний метал з рекордною електропровідністю ( $\rho = 0.015$  мкОм·м), плавиться при  $T_{\text{плавл}} = 961^{\circ}\text{C}$ , легко піддається механічній обробці, при температурі вище  $200^{\circ}\text{C}$  починає окислюватися з утворенням  $\text{AgO}_2$  і  $\text{AgO}$ . При нормальній температурі срібло з'єднується із сіркою ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ), і тому його не рекомендують використовувати поблизу речовин, які містять сульфур, наприклад, поблизу вулканізованої гуми чи ебоніту. Срібло використовується як контактний матеріал у комутаційних пристроях, у складі деяких припоїв, у виготовленні срібно-цинкових і срібно-кадмієвих акумуляторів. Сплави срібла з платиною (3,6...12,6 % *Pt*), паладієм (19,6...40,5 % *Pd*), міддю (2,7...50,5 % *Cu*), магнієм, нікелем, магнієм і цирконієм успішно використовуються як провідникові матеріали при виготовленні конденсаторів, гальванічне покриття надвисокочастотних пристроїв, а також як струмопровідні плівки.

*Платина Pt* – блискучий тугоплавкий ( $T_{\text{плавл}} = 1770^{\circ}\text{C}$ ), дуже щільний ( $d = 21,45$  г/см<sup>3</sup>), пластичний і хімічно дуже стійкий метал, має питомий опір  $\rho = 0,098$  мкОм·м. Платина повільно розчиняється лише в «царській горілці». Платина через високу вартість використовується дуже обмежено – при виготовленні високотемпературних термопар у парі з платино-родієм, а також при створенні сплавів з паладієм, сріблом, золотом, іридієм, родієм, рутенієм, міддю, нікелем з подальшим їх використанням як контактних матеріалів та припоїв.



*Паладій Pd* – сріблясто-білий метал з питомим опором  $\rho = 0.108$  мкОм·м, плавиться при 1550°C, при кімнатній температурі реагує з хлором і бромом. На повітрі при нагріванні до 600...700°C паладій окислюється. В одному об'ємі паладію може розчинитися 900 об'ємів водню, який потім виділяється при 350...500°C. Паладій в 4...5 разів дешевше платини, близький за властивостями до платини, і тому в деяких випадках замінює її.

## **11.6 Неметалеві провідникові матеріали та вироби**

Серед неметалевих провідникових матеріалів найбільше значення мають електротехнічні вугільні матеріали. Вони мають досить високу електро- і теплопровідність, дуже низький коефіцієнт тертя, високу хімічну стійкість і нагрівостійкість. В якості первинної сировини для отримання таких матеріалів використовують графіт, сажу і антрацит.

*Природний графіт* – м'яка кристалічна речовина темно-сірого кольору, має шарувату будову. Окремі шари графіту віддалені один від одного і легко відшаровуються, що важливо для роботи ковзних контактів. Цю властивість використовують у сухих мастилах.

*Саж* – вугільний порошок високого ступеня дисперсності з домішками смолистих речовин. Графітова структура сажі не цілком сформована. Сажу отримують при неповному згорянні різних органічних речовин.

*Антрацит* – викопне вугілля блискучого чорного кольору, має найбільш високу ступінь зміни структури серед інших видів кам'яного вугілля.

З вугільних матеріалів виготовляють електроди для електродугових печей та електролітичних ванн, електричні щітки для електричних машин та автотрансформаторів, вугільні порошки для мікрофонів і резисторів.

### **Вугільні електроди**

Вугільні електроди виробляють з роздрібненої вугільної маси разом зі сполучною речовиною. З цієї маси виготовляють заготовки шляхом її продавлення через мундштук або пресування в прес-формах. В якості сполучної речовини використовують кам'яновугільну смолу (побічний

продукт коксування кам'яного вугілля), а також інколи рідке скло. Вугільні заготовки проходять процес випалу при температурі близько 800°C і потім, у разі потреби в покращенні виробів, процес графітування при температурі 2200...2500°C. Графітування дозволяє суттєво зменшити питомий опір вугільних електродів – з  $\rho = 50$  до 15 мкОм·м, знизити твердість та підвищити допустиму густину електричного струму в них з  $J_{\text{доп}} = 1.5$  до  $J_{\text{доп}} = 2.0$  А/мм<sup>2</sup> [5]. Для вугільних електродів, що працюють при високих температурах, процес графітування проводять при ще більш високій температурі – при 3000°C.

### **Електричні щітки**

Електричні щітки призначені для забезпечення ковзного електричного контакту між рухомою частиною електричної машини (колектором) і нерухомою частиною з урахуванням того, що між щіткою і колектором можуть виникати іскри і навіть електричні дуги внаслідок комутаційних процесів. Звідси – особливі вимоги до електричних щіток з урахуванням питомого опору  $\rho$ , допустимої густини струму  $J_{\text{доп}}$ , допустимої лінійної швидкості ковзання  $v_{\text{доп}}$ , коефіцієнта тертя, перехідного опору контактів та інших особливостей. З врахуванням цих вимог виробляють різноманітні електричні щітки, які розрізняються складом компонентів, технологічним процесом виготовлення та своїми електромеханічними характеристиками [5, 11]:

- вугільно-графітні  
 $\rho = 18 \dots 60$  мкОм·м,  $J_{\text{доп}} = 6 \dots 8$  А/мм<sup>2</sup>,  $v_{\text{доп}} = 10 \dots 15$  м/с;
- графітні  
 $\rho = 10 \dots 46$  мкОм·м,  $J_{\text{доп}} = 7 \dots 11$  А/мм<sup>2</sup>,  $v_{\text{доп}} = 12 \dots 25$  м/с;
- електрографітовані  
 $\rho = 10 \dots 45$  мкОм·м,  $J_{\text{доп}} = 9 \dots 11$  А/мм<sup>2</sup>,  $v_{\text{доп}} = 25 \dots 45$  м/с;
- мідно-графітні  
 $\rho = 0.05 \dots 1.2$  мкОм·м,  $J_{\text{доп}} = 12 \dots 20$  А/мм<sup>2</sup>,  $v_{\text{доп}} = 12 \dots 25$  м/с.

### **Вугільні порошки для мікрофонів і резисторів**

Вугільні порошки виготовляють частіше з антрациту (менше з графіту) шляхом їх дроблення в порошок. Питомий опір порошку залежить

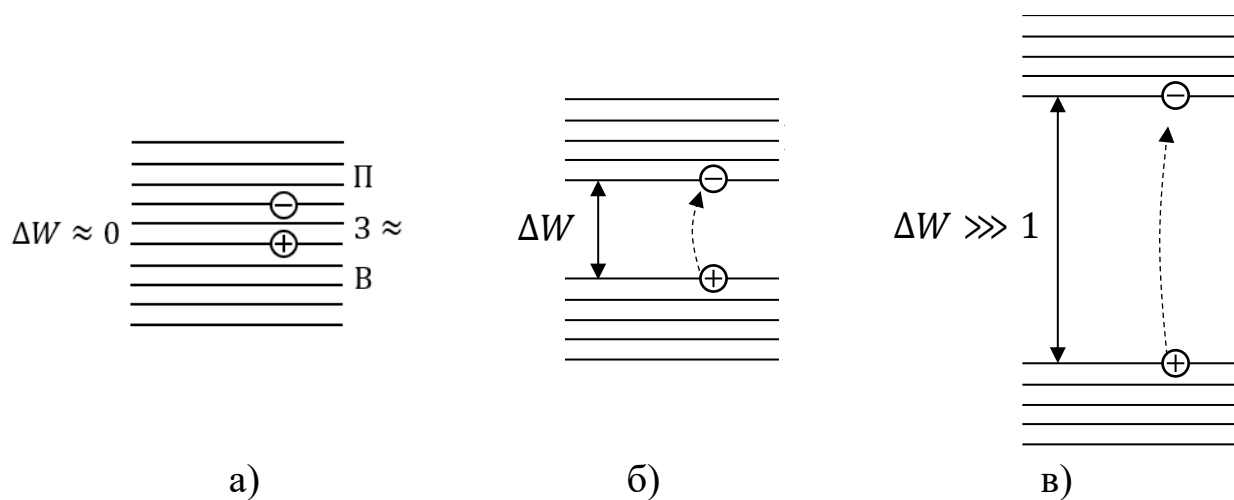
від крупності зерен, щільності їх засипки, тиску та режиму термообробки. Він може змінюватись у дуже широкому діапазоні ( $\rho = 0.01 \dots 400 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Дрібнозернисті порошки отримують після просіювання крізь сито з 52 отворами, а крупнозернисті – з 45 отворами на кожному  $1 \text{ см}^2$  поверхні сита. В процесі випалу порошку при температурі  $600 \dots 800^\circ\text{C}$  його питомий електричний опір збільшується. Порошки не повинні злежуватися та зліплюватися під впливом підвищеної вологи. Вугільні резистори мають переваги перед провідниковими – менші розміри, високу верхню межу номінального опору, незначну залежність опору від напруги, температури і вологи. В якості первинного матеріалу для виготовлення вугільних резисторів використовують сажу, піролітичний вуглець і боровуглецеві плівки [5].

### 11.7 Напівпровідники

Напівпровідникові матеріали за питомим опором ( $\rho = 10^{-6} \dots 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) займають проміжну позицію між провідниками ( $\rho = 10^{-8} \dots 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) і діелектриками ( $\rho = 10^7 \dots 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Їх питомий опір  $\rho$  може суттєво зменшитись під впливом домішок та різноманітних енергетичних факторів – температури, світла, електричного поля, магнітного поля, іонізуючого випромінювання, механічної сили.

Напівпровідники мають повністю заповнену валентну зону, яка відділена від зони провідності неширокою забороненою енергетичною зоною  $\Delta W$  (у напівпровідниках  $\Delta W < 3 \text{ eV}$ ). Ця зона суттєво звужується (до  $\Delta W = 0,05 \text{ eV}$ ) завдяки спеціально підібраним домішкам, які легко іонізуються, віддаючи електрони в зону провідності або забираючи їх з валентної зони. Тому при посиленні впливу енергетичних факторів підвищується ймовірність збудження електронів і перехід їх в зону провідності (рис. 11.11).

Таким чином, напівпровідники за своїми властивостями наближаються до провідників, в більшості випадків використовуються для виготовлення управляючих напівпровідникових елементів і рідко використовуються в якості діелектриків. До напівпровідників належать деякі прості хімічні елементи та величезна кількість сплавів та хімічних сполук.



**Рисунок 11.11 – Енергетичні рівні провідників (а), напівпровідників (б) та діелектриків (в)**

### **Фізичні процеси в напівпровідниках та їх застосування**

Робота більшості напівпровідникових приладів основана на домішкочовій електропровідності. Для цього напівпровідникові матеріали легують заздалегідь визначеним і точно дозованим хімічним елементом (домішкою). Перед легуванням напівпровідник ретельно очищають від випадкових та шкідливих домішок за допомогою спеціальних технологій. Залежно від концентрації та виду домішок напівпровідники поділяють на:

- ✓ власні (без домішок);
- ✓ *n*-типу (донори, атоми яких віддають електрони в зону провідності при енергії теплових флуктуацій більше енергії активації електронів донора  $\Delta W_d$ );
- ✓ *p*-типу (акцептори, атоми яких забирають електрони із зони провідності при енергії теплових флуктуацій більше енергії активації «дірок» акцептора  $\Delta W_a$ );
- ✓ компенсовані (концентрація донорів урівноважує концентрацію акцепторів, внаслідок чого напівпровідник поводить себе як власний).

При дуже високій концентрації домішок напівпровідник стає вродженим і поводить себе як метал.

Головною перевагою напівпровідникових приладів є їх керованість або суттєва залежність з боку теплової енергії (терморезистори), світла (фоторезистори), механічної сили (тензорезистори), електричної напруги

(варистори). Особливий інтерес викликають унікальні властивості так званих *p-n*-переходів (контакти напівпровідників *n*-типу і *p*-типу). Здатність *p-n*-переходів пропускати електричний струм лише в одному напрямку широко використовується при виготовленні діодів, транзисторів, тиристорів та надзвичайно різноманітних інтегральних мікросхем та мікрочіпів.

### Електропровідність власних напівпровідників

Власні напівпровідники не містять легуючої домішки. До них відносяться дуже чисті прості напівпровідники (їх всього дев'ять – кремній *Si*, германій *Ge*, селен *Se* тощо), а також багато напівпровідникових хімічних сполук (галій арсенід *GaAs*, індій стибід *InSb*, індій арсенід *InAs* тощо). У власних напівпровідниках електропровідність забезпечується переходом електронів з валентної зони в зону провідності, якщо енергія їх теплових флуктуацій перевищить ширину забороненої енергетичної зони  $\Delta W$ . З відходом електрона в зону провідності валентна зона стає не повністю заповненою. На колишньому місці виникає дефіцит електрона – залишається так звана дірка, яку вважають позитивно зарядженою частинкою. Таким чином, у кристалі напівпровідника утворюється пара вільних носіїв заряду (електрон в зоні провідності і дірка у валентній зоні), які створюють власну електропровідність напівпровідників – електронно-діркову провідність [6].

За відсутності зовнішнього електричного поля електрон і дірка здійснюють теплові хаотичні рухи в межах кристала. За наявності ж зовнішнього електричного поля буде відбуватися направлений рух електрона проти електричного поля і дірки в напрямку електричного поля, тобто виникне електричний струм. При цьому дірка, як позитивна частинка твердого напівпровідника, переміщуватись фізично не може. Насправді переміщується захоплений діркою електрон сусіднього атома, який створює дірку на колишньому своєму місці та ілюзію переміщення дірки. Слід зазначити, що вільні електрони мають більшу рухливість, ніж дірки. Тому при однаковій концентрації вільних електронів і дірок власна електропровідність напівпровідників має переважно електронний тип.

### Електропровідність напівпровідників *n*-типу

Легування власних напівпровідників донорами дозволяє отримати напівпровідники *n*-типу. Для напівпровідників четвертої групи періодичної таблиці, наприклад, для силіцію донорами можуть бути домішки елементів п'ятої групи таблиці (фосфор, арсен, стибій). Ці атоми мають на валентній оболонці на один електрон більше, ніж атоми напівпровідника, тобто «зайвий» електрон. При енергії теплових флуктуацій атомів більше енергії активації електронів донора  $\Delta W_d$  «зайві» електрони зі значною ймовірністю переходять у зону провідності, і тому можуть брати участь в електричному струмі за наявності зовнішнього електричного поля. У напівпровідниках *n*-типу, електрони вважаються основними носіями заряду, а електропровідність – електронною. Кількість електронів у зоні провідності залежить від концентрації донорів, енергії донорських рівнів, ширини забороненої енергетичної зони напівпровідника, температури. Легування донорами проводиться до рівня  $10^{13} \dots 10^{19}$  атомів на  $1 \text{ см}^3$ . При занадто високій концентрації донорів напівпровідник може виродитись у провідник.

### Електропровідність напівпровідників *p*-типу

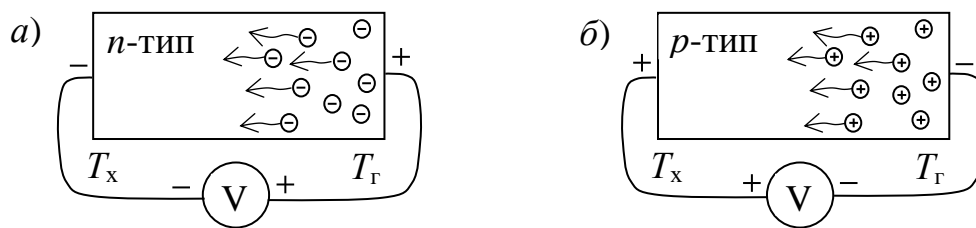
Легування власних напівпровідників акцепторами дозволяє отримати напівпровідники *p*-типу. Для напівпровідників четвертої групи періодичної таблиці, наприклад, для силіцію акцепторами можуть бути домішки елементів третьої групи таблиці (бор, алюміній, індій). Якщо кремній легувати 3-валентним індієм, то для утворення зв'язків з силіцієм у атома індію не вистачає одного електрона. В результаті у валентній зоні утворюється дефіцит електронів, який прийнято називати діркою. При енергії теплових флуктуацій атомів більше енергії активації дірок акцептора  $\Delta W_a$  «зайві» дірки зі значною ймовірністю переходять у зону провідності, і тому можуть брати участь в електричному струмі за наявності зовнішнього електричного поля. У напівпровідниках *p*-типу дірки вважаються основними носіями заряду, а електропровідність – дірковою

### Визначення типу електропровідності напівпровідників

Існування «зайвих» електронів і електропровідність напівпровідника *n*-типу можна підтвердити дуже простим експериментом – нагріти

один з кінців напівпровідника і визначити полярність електричних потенціалів гарячого і холодного його кінців. Під впливом тепла «зайві» електрони почнуть у більшій кількості переходити в зону провідності і далі переміщуватись до холодного кінця, де їх у вільному стані набагато менше. В результаті такого переміщення холодний кінець напівпровідника  $n$ -типу з температурою  $T_x$  заряджатиметься негативно, а гарячий його кінець з температурою  $T_r$  – позитивно (рис. 11.12, *a*).

Аналогічним чином можна підтвердити існування «зайвих» дірок і електропровідність напівпровідника  $p$ -типу. Під впливом тепла «зайві» дірки почнуть у більшій кількості переходити в зону провідності і далі мігрувати до холодного кінця, де їх у вільному стані набагато менше (рис. 11.12, *б*). В результаті цього холодний кінець напівпровідника  $p$ -типу заряджатиметься позитивно, а гарячий його кінець – негативно.

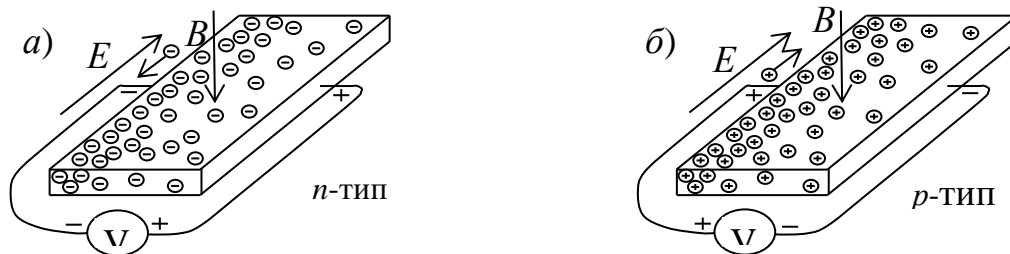


**Рисунок 11.12 – Визначення напівпровідника  $n$ -типу (а) і  $p$ -типу (б) шляхом нагрівання одного з його кінців і виміру різниці потенціалів**

Тип електропровідності напівпровідників можна також визначити на основі ефекту Холла. Для цього пластинку напівпровідника необхідно помістити в зовнішнє поперечне магнітне поле (першу пару його граней розмістити перпендикулярно вектору магнітної індукції  $B$ ), прикласти різницю електричних потенціалів між другою парою його граней, створюючи уздовж напівпровідника електричне поле напруженістю  $E$ , і визначити полярність електричних потенціалів на третій парі граней напівпровідника (рис. 11.13).

Під впливом сил електричного поля «зайві» електрони в напівпровіднику з електропровідністю  $n$ -типу будуть переміщуватись проти вектору напруженості  $E$  електричного поля і створювати таким чином електричний струм уздовж напівпровідника (рис. 11.13, *a*). Одночасно з цим ці електрони будуть зміщуватися вліво під впливом сил Ампера чи Лоре-

нца за правилом лівої руки при вибраних на рис. 11.13 напрямках векторів  $E$  і  $B$ . Внаслідок цього зміщення ліва грань пластинки напівпровідника  $n$ -типу буде заряджатися негативно, а права – позитивно.



**Рисунок 11.13 – Визначення напівпровідника  $n$ -типу (а) і  $p$ -типу (б) за допомогою ефекту Холла**

Якщо в таких же умовах буде знаходитись напівпровідник з електропровідністю  $p$ -типу, то його «зайві» дірки будуть переміщуватись в напрямку вектору напруженості  $E$  електричного поля (рис. 11.13, б). Одночасно з цим ці позитивні за полярністю дірки будуть зміщуватися вліво за тими ж законами і правилами. Внаслідок цього зміщення ліва грань пластинки напівпровідника  $p$ -типу буде заряджатись навпаки позитивно, а права – негативно.

Ефект Холла цікавий не тільки для визначення типу електропровідності напівпровідника, але і як основа створення напівпровідникових приладів для вимірювання напруженості магнітного поля або перемноження двох аналогових величин при вимірюванні електричної потужності.

Вплив температури на електропровідність домішкових напівпровідників пов'язаний з енергією теплових флуктуацій атомів. Якщо ця енергія перевищує енергію активації електронів донора  $\Delta W_d$  (для напівпровідників  $n$ -типу) або енергію активації дірок акцептора  $\Delta W_a$  (для напівпровідників  $p$ -типу), то вірогідність переходу носіїв заряду в зону провідності, а значить і електропровідність, сильно зростає за мірою збільшення температури. Ця особливість використовується в *терморезисторах* – в напівпровідникових резисторах, які значно змінюють свій електричний опір при зміні температури. До основних характеристик терморезисторів можна віднести номінальний опір  $R$  і його температурну залежність  $R = f(T)$ . Якщо ця залежність має обернено пропорційний характер



( $R$  зменшується при збільшенні  $T$ ), то такі терморезистори називають *термісторами*. Їх виготовляють зазвичай з напівпровідникової кераміки на основі оксидів титану, ванадію, хрому, марганцю, заліза, кобальту, міді або цинку. Якщо ж залежність  $R = f(T)$  має пропорційний характер ( $R$  збільшується при зростанні  $T$ ), то такі терморезистори називають *позисторами*. Їх виготовляють зазвичай з напівпровідникової кераміки на основі барій титанату  $BaTiO_3$  (із сегнетоелектрика) і використовують при температурі вище точки Кюрі  $T_K$ . При нагріванні такого позистора його електричний опір може збільшуватись у тисячі і навіть у десятки тисяч разів [6].

Фотопровідність – це здатність напівпровідників збільшувати електропровідність під впливом електромагнітного випромінювання в світловому діапазоні завдяки невеликій ширині забороненої енергетичної зони  $\Delta W$ . Напівпровідникові прилади, яким властива фотопровідність, називаються *фоторезисторами*. У фотопровідності проявляється квантова природа світла. За рахунок поглинання енергії квантів світла збільшується енергія теплових флуктуацій атомів напівпровідника, а значить вірогідність до переходу більшої кількості носіїв заряду з валентної зони в зону провідності. Це призведе до збільшення електричного струму у напівпровіднику за наявності електричного поля (прикладеної електричної напруги). Різниця між електричним струмом у напівпровіднику під впливом електромагнітного випромінювання (світловий струм) і електричним струмом в темноті (темновий струм) при незмінній напрузі називається фотострумом  $i_\phi = \gamma_\phi \cdot u$ , де  $u$  – електрична напруга, яка прикладена до напівпровідника і  $\gamma_\phi$  – фотопровідність, яка нелінійно залежить від властивостей напівпровідника, освітленості (щільності світлового потоку) і частоти чи довжини хвиль електромагнітних коливань у світловому діапазоні (енергії світлових фотонів). Залежність  $\gamma_\phi$  напівпровідників від освітленості використовується для виготовлення фоторезисторів та створення різноманітних фоточутливих приладів у потрібному діапазоні електромагнітних коливань – від інфрачервоних до ультрафіолетових хвиль. Для цього широко використовують кадмій сульфід, селенід і телурид

( $CdS$ ,  $CdSe$ ,  $CdTe$ ), плумбуму ( $PbS$ ,  $PbSe$ ,  $PbTe$ ) і бісмуту ( $Bi_2S_3$ ,  $Bi_2Se_3$ ,  $Bi_2Te_3$ ), а також монокристали силіцію  $Si$  і германію  $Ge$ .

Вплив електричного поля на електропровідність напівпровідників суттєво проявляється лише в сильних електричних полях, коли напруженість електричного поля перевищує певне критичне значення  $E_{кр}$ , яке залежить від особливостей напівпровідника, його температури та концентрації домішки, і складає близько  $10^4 \dots 10^6$  В/м. Розрізняють чотири різновиди механізму впливу електричного поля на електропровідність напівпровідників – термоелектронна іонізація, тунельний ефект, ударна іонізація і тепловий пробій.

✓ Термоелектронна іонізація відбувається під впливом сильного електричного поля (при  $E > E_{кр}$ ) і відносно низьких температурах. Електричне поле збільшує кінетичну енергію носіїв зарядів під час їх теплових рухів, що полегшує термічну активацію (термоелектронну іонізацію), знижує енергію активації  $\Delta W$ , яка необхідна для теплового перекидання носіїв заряду з домішкових рівнів (із зони валентності) в зону провідності, і таким чином призводить до збільшення питомої електропровідності  $\gamma$  напівпровідника. У слабких електричних полях (при  $E < E_{кр}$ ) питома електропровідність  $\gamma$  від напруженості електричного поля  $E$  практично не залежить.

✓ Тунельний ефект (електростатична іонізація) настає при значно більшій напруженості електричного поля (при  $E > 10^7$  В/м) майже незалежно від температури, і дещо нагадує холодну емісію електронів з металів. При напруженості  $E \approx E_{кр}$  відбувається процес поступового надходження носіїв заряду з валентної і домішкової зон у зону провідності. Цей процес називають тунельним просоченням. При збільшенні напруженості електричного поля (при  $E > 10^7$  В/м) і зменшенні ширини, забороненої енергетичної зони,  $\Delta W$  ймовірність тунельного просочення носіїв заряду різко посилюється, а значить різко зростає густина тунельного струму.

✓ Ударна іонізація – процес лавиноподібного збільшення концентрації вільних носіїв заряду при напруженості електричного поля  $E = 10^7 \dots 10^8$  В/м, який дещо нагадує електричний пробій газоподібного діелектрика. При такій великій напруженості електричного поля вільні

електрони на довжині  $\lambda$  їх вільного пробігу встигають настільки «розігритись» (прискоритись), що здатні при зіткненні з атомами домішки чи напівпровідника закинути зв'язані з ними електрони в зону провідності. При  $E > E_{\text{проб}}$  відбувається електричний пробій. На відміну від електричного пробою твердих діелектриків електричний пробій напівпровідника не призведе до його електричного руйнування і є нормальним режимом роботи деяких напівпровідникових приладів, наприклад, стабілітронів.

✓ Тепловий пробій напівпровідника настає тоді, коли порушена рівновага між процесом виділення теплової енергії в напівпровіднику і процесом її передачі в оточуюче середовище. Тепловий пробій приводить до руйнування напівпровідника, тобто є незворотнім процесом.

### **Технології створення напівпровідникових матеріалів**

При виробництві напівпровідників ставляться надто високі вимоги до їхньої чистоти. Якість очищення має бути такою, щоб електропровідність очищеного напівпровідника була не більшою, ніж його власна електропровідність. Наприклад, вміст випадкових домішок не повинен перевищувати  $10^{-11}\%$  в силіцію  $Si$ ,  $5 \cdot 10^{-90}\%$  в германію  $Ge$ ,  $8 \cdot 10^{-30}\%$  в селені  $Se$ . Особливо чисті монокристалічні злитки отримують за приблизно такою схемою [6]:

- виготовлення технічно чистого простого напівпровідника;
- попереднє очищення напівпровідника;
- приготування полікристалічних злитків;
- глибоке очищення полікристалічних злитків методами зонної плавки або вирощування кристалів.

В процесі отримання монокристалічного злитка напівпровідник легують, якщо це передбачено технологією створення.

Прості напівпровідники при  $20^\circ\text{C}$  мають заборонені енергетичні зони шириною  $\Delta W = 0,36 \dots 2,5$  еВ. До простих напівпровідників відносяться дев'ять хімічних елементів [5]:

- бор  $B$  ( $\Delta W = 1,1$  еВ);
- силіцій  $Si$  ( $\Delta W = 1,12$  еВ);
- германій  $Ge$  ( $\Delta W = 0,72$  еВ);
- фосфор  $P$  ( $\Delta W = 1,5$  еВ);

- арсен  $As$  ( $\Delta W = 1,2$  eВ);
- сульфур  $S$  ( $\Delta W = 2,5$  eВ);
- селен  $Se$  ( $\Delta W = 1,7$  eВ);
- телур  $Te$  ( $\Delta W = 0,36$  eВ);
- йод  $I$  ( $\Delta W = 1,25$  eВ).

Найбільш вживаними серед простих напівпровідників є *кремній* і *германій*.

*Силіцій* є другим за поширеністю хімічним елементом у природі після кисню, у вільному вигляді в природі не зустрічається – в основному у вигляді силіцій(IV) оксиду  $SiO_2$ . Силіцій кристалізується з утворенням кубічних просторових решіток типу алмазу зі сторонами розміром 0,356 нм. Кожен атом силіцію в цих решітках знаходиться на однаковій відстані від чотирьох сусідніх атомів. Кремній плавиться при температурі 1417°C, інтенсивно окислюється при температурі вище 900°C. При температурі нижче 6,7 К і тиску вище 12 ГПа кремній переходить в надпровідний стан. Відносно широка заборонена енергетична зона кремнію ( $\Delta W = 1,12$  eВ) дозволяє виготовляти з нього напівпровідникові прилади з високою робочою температурою (до 120...200°C). Ступінь очищення кремнію визначають шляхом вимірювання його питомого електричного опору – чим більше питомий електричний опір, тим чистіше кремній. Питомий опір особливо чистого кремнію при власній його електропровідності  $\rho = 2,3 \cdot 10^3$  Ом·м.

*Германій* є одним з перших напівпровідникових матеріалів, який найбільш широко використовують при виробництві напівпровідникових приладів. Його вміст у земній корі дуже невеликий і не має значних скопчень. Германій кристалізується з утворенням кубічних просторових решіток типу алмазу зі сторонами розміром 0,356 нм. Атоми германію утримуються у вузлах решіток за рахунок рівноцінних ковалентних зв'язків так само, як і у кремнію. Германій плавиться при температурі 936°C. При температурі нижче 5,4 К і тиску вище 11 ГПа германій переходить в надпровідний стан. Відносно вузька заборонена енергетична зона германію ( $\Delta W = 0,72$  eВ) дозволяє виготовляти з нього напівпровідникові прилади зі значно нижчою робочою температурою порівняно з кремнієм (до 70°C). Ступінь очищення германію визначають, як і у кремнію,

орієнтуючись на питомий електричний опір  $\rho = 0,68 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  особливо чистого германію при власній його електропровідності. Германій практично не взаємодіє з кремнієм при нагріванні до  $1500^\circ\text{C}$ , що дозволяє широко використовувати кварцові тиглі для отримання особливо чистих полікристалічних злитків германію.

Селен – використовується для виготовлення діодів та фотоелементів. Температурний інтервал роботи селенових випрямлячів від  $-60^\circ\text{C}$  до  $+75^\circ\text{C}$ . За своїми властивостями селенові випрямлячі значно поступаються перед германієвими і, тим більше, перед кремнієвими.

Напівпровідникові хімічні сполуки мають різні властивості, які в багатьох випадках кращі за прості напівпровідники. Деякі з них мають доволі значну заборонену енергетичну зону, що дозволяє підвищити робочу температуру:

- до  $+300^\circ\text{C}$  (галій арсенід  $GaAs$ );
- до  $+400^\circ\text{C}$  (галій фосфід  $GaP$ );
- до  $+600^\circ\text{C}$  (силіцій карбід  $SiC$ ).

З хімічних сполук найбільше використовують бінарні сполуки типу  $A^{IV}B^{IV}$ ,  $A^{III}B^V$ ,  $A^{II}B^{VI}$ . Ці сполуки мають кристалічну структуру, яка подібна решіткам алмазу і відрізняються лише природою і розмірами складових частинок. Крім того, в якості напівпровідникових хімічних сполук використовуються оксидні напівпровідники.

✓ Єдиною напівпровідниковою бінарною хімічною сполукою типу  $A^{IV}B^{IV}$  є силіцій карбід  $SiC$ . Силіцій карбід має високу твердість (майже не поступається алмазу), дуже високу робочу температуру ( $+600^\circ\text{C}$ ). Для утворення монокристалів силіцій карбїду застосовують метод сублимації – вирощення кристалів з газової фази в графітних тиглях в атмосфері інертного газу при температурі  $2500\dots 2600^\circ\text{C}$ . Монокристалічний силіцій карбід використовують при виготовленні світлодіодів, високотемпературних силових напівпровідникових приладів, польових транзисторів, тунельних діодів, терморезисторів, фоторезисторів, варисторів і сонячних елементів.

✓ Для утворення напівпровідникових хімічних сполук типу  $A^{III}B^V$  як елемент  $A^{III}$  III групи періодичної таблиці Менделєєва використовують:

- бор  $B$ ;
- алюміній  $Al$ ;
- галій  $Ga$ ;
- індій  $In$ . Я

Як елемент  $B^V$   $V$  групи періодичної таблиці Менделєєва використовують:

- фосфор  $P$ ;
- арсен  $As$ ;
- стибій  $Sb$ ;
- нітроген  $N$ .

Ці сполуки мають кристалічну структуру. Найбільш вживаними і вивченими сполуками типу  $A^{III}B^V$  є:

- фосфіди (галій фосфід  $GaP$ ),
- арсеніди (арсенід галію  $GaAs$ , арсенід індію  $InAs$ ),
- стибіди (індій стибід  $InSb$ , галій стибід  $GaSb$ ),
- нітриди (алюміній нітрид  $AlN$ , галій нітрид  $GaN$ , індій нітрид  $InN$ ).

Сполуки типу  $A^{III}B^V$  хімічно стійкі і мають високу рухливість електронів. Найважливіші характеристики сполук типу  $A^{III}B^V$  визначаються в основному властивостями і концентрацією домішок. Легування цими домішками здійснюють зазвичай одночасно з вирощуванням монокристалів.

✓ До хімічних сполук тип  $A^{II}B^{VI}$  належать так звані халькогеніди – бінарні хімічні сполуки металів II групи періодичної таблиці Менделєєва з халькогенами (сульфуром  $S$ , селеном  $Se$  і телуrom  $Te$ ). Надлишок металу  $A^{II}$  в цих сполуках обумовлює електронну провідність, а надлишок халькогенів  $B^{VI}$  – діркову провідність. Халькогеніди характеризуються підвищеною чутливістю до електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот – від інфрачервоного до рентгенівського випромінювання. Тому вони широко використовуються при виготовленні фоторезисторів і люмінофорів. Серед халькогенідів найбільшого поширення набули сульфід, селенід і телуриди цинку ( $ZnS, ZnSe, ZnTe$ ), кадмію ( $CdS, CdSe, CdTe$ ) і гідраргіруму ( $HgS, HgSe, HgTe$ ).

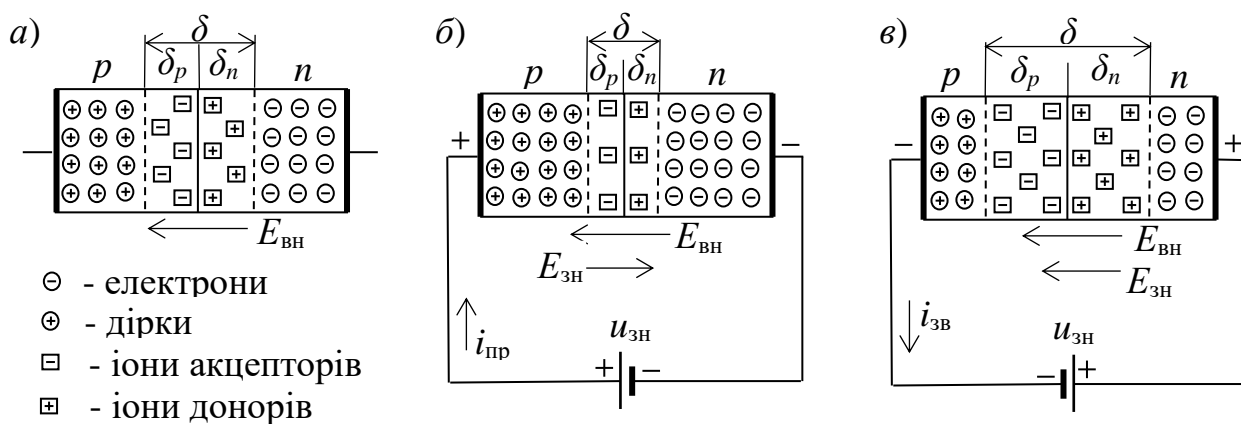
✓ Оксидними напівпровідниками називають бінарні хімічні сполуки з киснем металів перехідної групи періодичної таблиці Менделєєва.

До цих сполук належать оксиди титану  $Ti$ , ванадію  $V$ , хрому  $Cr$ , мангану  $Mn$ , феруму  $Fe$ , кобальту  $Co$ , нікелю  $Ni$ , купруму  $Cu$ , цинку  $Zn$  ( $MnO$ ,  $Mn_3O_4$ ,  $Cu_2O$ ,  $ZnO$ ,  $ZnFeO_4$ ,  $MnCr_2O_4$ ). В оксидних напівпровідниках основним видом електропровідності є електронна провідність. З цих матеріалів виготовляють терморезистори, виристори та інші прилади за методами керамічних технологій.

### Основні властивості $p-n$ – переходів

Властивості  $p-n$  – переходів, які виникають при контактах напівпровідників  $n$ -типу і  $p$ -типу, обумовлені унікальними особливостями перехідного контакту між напівпровідником  $n$ -типу, в якому завдяки донорній домішці електрони є основними носіями заряду, і напівпровідником  $p$ -типу, в якому завдяки акцепторній домішці дірки є основними носіями заряду. Простим дотиком пластин цих двох напівпровідників такий перехідний контакт утворити неможливо через забруднення їх поверхні (навіть при ідеальній технології очищення), а також через порушення кристалічної структури. Тому перехідний контакт отримують методом дифузії або шляхом вплавлення відповідних домішок у пластину монокристала напівпровідника.

Розглянемо явища, які виникають при електричному контакті між напівпровідниковими пластинами  $p$ -типу та  $n$ -типу для трьох варіантів прикладення напруги  $U_z$  від зовнішнього джерела електричного живлення до єдиного кристалу напівпровідників двох типів з  $p-n$  – переходом (рис. 11.14).



**Рисунок 11.14 – Основні властивості  $p-n$  – переходу при:**  
 **$a - u_{зн} = 0$ ; б – при  $u_{зн} > \phi_K$ , коли  $p-n$  – перехід відкритий;**  
**в – при  $u_{зн} < \phi_K$ , коли  $p-n$  – перехід закритий**

✓  $u_{зн}=0$ , коли напруга зовнішнього джерела відсутня. В цьому випадку електрони в  $n$ -області і дірки в  $p$ -області є основними носіями зарядів, які виникають внаслідок іонізації атомів донорної і акцепторної домішок. При не дуже низькій температурі практично всі атоми цих домішок іонізовані. Тому концентрація електронів у  $n$ -області практично дорівнює концентрації донорних атомів, а концентрація дірок у  $p$ -області – концентрації акцепторних атомів [6]. На межі цих областей виникає градієнт концентрації носіїв заряду і взаємна теплова дифузія. Частина електронів з  $n$ -області переходить в  $p$ -область і рекомбінує з дірками  $p$ -області в приграничній зоні. Внаслідок цього в приграничній зоні  $n$ -області шириною  $\delta_n$  практично не залишається вільних електронів. Тому в зоні  $\delta_n$  формується нерухомий об'ємний позитивний заряд іонізованих донорських атомів (рис. 11.13, а).

Аналогічним чином частина дірок з  $p$ -області переходить в  $n$ -область і рекомбінують з електронами  $n$ -області в приграничній зоні. Внаслідок цього в граничній зоні  $p$ -області шириною  $\delta_p$  практично не залишається вільних дірок. Тому в зоні  $\delta_p$  формується нерухомий об'ємний негативний заряд іонізованих акцепторних атомів. Між цими об'ємними зарядами виникає внутрішнє електричне поле напруженістю  $E_{вн}$ . Це поле є гальмівним для основних носіїв заряду і прискорюваним для неосновних носіїв заряду. При певному значенні  $E_{вн} > \varphi_K$ , де  $\varphi_K$  – потенціальний бар'єр, внутрішнє електричне поле перешкоджає подальшій дифузії основних носіїв заряду і спричиняє зворотний дрейфовий струм. Коли дифузійний і дрейфовий струми вирівнюються настає термодинамічна рівновага при незмінній температурі і відсутності зовнішнього електричного поля. Утворюється подвійний запірний шар товщиною  $\delta = \delta_n + \delta_p \approx 1$  мкм ( $p$ - $n$  – перехід) з високим опором через дуже малу концентрацію в цьому шарі вільних електронів і дірок. Для германію потенціальний бар'єр  $\varphi_K = 0,2 \dots 0,4$  В, а для кремнію  $\varphi_K = 0,5 \dots 0,75$  В.

✓ при  $u_{зн} > \varphi_K$ , зовнішнє джерело електричного живлення своїм електричним полем напруженістю  $E_{зн}$  діє назустріч внутрішньому електричному полю  $E_{вн}$  (рис. 11.13, б). В цьому випадку результуюча напруженість поля в  $p$ - $n$ -переході  $E_{рез} = E_{вн} - E_{зн}$  зменшується, що призведе



до зниження його потенціального бар'єру ( $\varphi_{\text{рез}} = \varphi_K - u_{\text{зн}}$ ) і зменшення відстані  $\delta$ . Такий варіант прийнято називати прямим вмиканням  $p$ - $n$  – переходу. В цьому варіанті заперний шар  $\delta$  заповнюється носіями заряду та звужується, і при певному значенні напруги  $u_{\text{зн}}$  зовнішнього джерела  $p$ - $n$  – перехід стає відкритим для так званого прямого електричного струму  $i_{\text{пр}}$ . Цей струм обумовлений рухом основних носіїв заряду з відносно великою енергією, достатньою для подолання потенціального бар'єру  $\varphi_{\text{рез}}$  заперного шару і проникнення в сусідні області. При цьому електрони проникають з  $n$ -області в  $p$ -область, а дірки з  $p$ -області в  $n$ -область, де вони рекомбінують. Падіння напруги на  $p$ - $n$  – переході в такому випадку називають прямим падінням напруги  $U_{\text{пр}}$  і вважають позитивним.

✓ при  $u_{\text{зн}} < \varphi_K$ , зовнішнє джерело електричного живлення своїм електричним полем напруженістю  $E_{\text{зн}}$  співпадає за своїм напрямком дії з внутрішнім електричним полем  $E_{\text{вн}}$  (рис. 11.13, в). Тому результуюча напруженість поля в  $p$ - $n$  – переході  $E_{\text{рез}} = E_{\text{вн}} + E_{\text{зн}}$  збільшується, що призведе до зростання його потенціального бар'єру  $\varphi_{\text{рез}} = \varphi_K + u_{\text{зн}}$  і збільшення  $\delta$ . Такий варіант прийнято називати зворотним вмиканням  $p$ - $n$  – переходу. В цьому варіанті під дією зовнішньої напруги  $u_{\text{зн}}$  електрони і дірки як основні носії заряду зміщуються в різні боки від  $p$ - $n$  – переходу, заперний шар  $\delta$  розширюється, і  $p$ - $n$  – перехід стає закритим для електричного струму. Основні носії заряду не в змозі подолати потенційний бар'єр  $\varphi_{\text{рез}}$   $p$ - $n$  – переходу і перейти в сусідні області. Падіння напруги на  $p$ - $n$  переході в такому випадку називають зворотною напругою  $u_{\text{зв}}$  і вважають негативною. При  $u_{\text{зв}} > |u_{\text{проб}}|$  відбувається пробій  $p$ - $n$  – переходу внаслідок лавиноподібного збільшення концентрації вільних носіїв заряду, де  $u_{\text{проб}}$  – напруга електричного пробую.

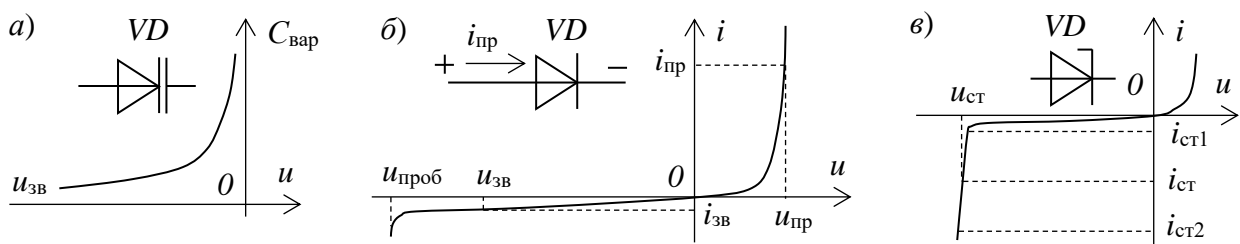
Реальні напівпровідники, окрім основних носіїв заряду (електрони в  $n$ -області і дірки в  $p$ -області), містять дуже невелику кількість неосновних носіїв заряду (електрони в  $p$ -області і дірки в  $n$ -області), для яких потенціальний бар'єр  $p$ - $n$  – переходу взагалі відсутній. Тому виникає дуже малий зворотний струм  $i_{\text{зв}}$  при зворотному вмиканні  $p$ - $n$  – переходу напівпровідників.

## Використання властивостей $p-n$ – переходів

Властивості  $p-n$  – переходів, які виникають при електричних контактах напівпровідників  $n$ -типу і  $p$ -типу, пов'язані з їх здатністю пропускати електричний струм лише в одному напрямку (вентильні властивості), а також керованістю цього процесу. Ці властивості покладені в основу принципу роботи великої кількості напівпровідникових приладів – діодів, транзисторів, тиристорів, стабілітронів, варикапів, інтегральних мікросхем, мікрочіпів. Такі напівпровідникові прилади здатні працювати лише при помірній температурі, при якій домішкова електропровідність домінує над власною електропровідністю напівпровідника. Поява власної електропровідності при надто високій температурі призводить до порушення нормальної роботи і керованості  $p-n$  – переходу.

*Варикап* – напівпровідниковий конденсатор з електрично керованою ємністю. Його робота основана на діелектричних властивостях потенційного бар'єру  $p-n$  – переходу напівпровідників  $\varphi_{рез} = \varphi_k + \varphi_{зп}$  і  $\delta$  при зворотному вмиканні  $p-n$  – переходу. Цей бар'єр змінюється пропорційно зворотній напрузі  $u_{зв}$  зовнішнього джерела (рис. 11.14, в). Ємність плоского варикапа  $C_{вар}$  визначається в принципі за такою ж формулою, як і ємність звичайного плоского конденсатора (9.4), але в якості відстані між обкладинками варикапа потрібно розглядати ширину  $\delta$  запірного шару  $p-n$  – переходу. Залежність ємності варикапа від абсолютного значення зворотної напруги  $u_{зв}$  має обернено пропорційний характер і нагадує гіперболу, враховуючи формулу (9.4), і пряму залежність ширини  $\delta$  запірного шару  $p-n$  – переходу від  $u_{зв}$ , (рис. 11.15, а).

*Діод* – напівпровідниковий прилад, в якому використовуються вентильні властивості  $p-n$  – переходу напівпровідників. Діоди зазвичай використовуються



**Рисунок 11.15 – Основні характеристики варикапа (а), діоду (б) і стабілітрона (в)**

для випрямлення змінного електричного струму. Залежність електричного струму діоду  $i = f(u)$  від прикладеної напруги (вольт-амперна характеристика) має суттєво нелінійний характер (рис. 11.15, б).

При прямому включенні діоду (при  $u > 0$ ) в ньому виникає прямий електричний струм  $i_{\text{пр}}$  і пряме падіння напруги  $u_{\text{пр}}$ , яке може складати 0,2...1,1 В, і в звичайних умовах є головною причиною нагріву діоду через втрати  $\Delta P = u_{\text{пр}} \cdot i_{\text{пр}}$ .

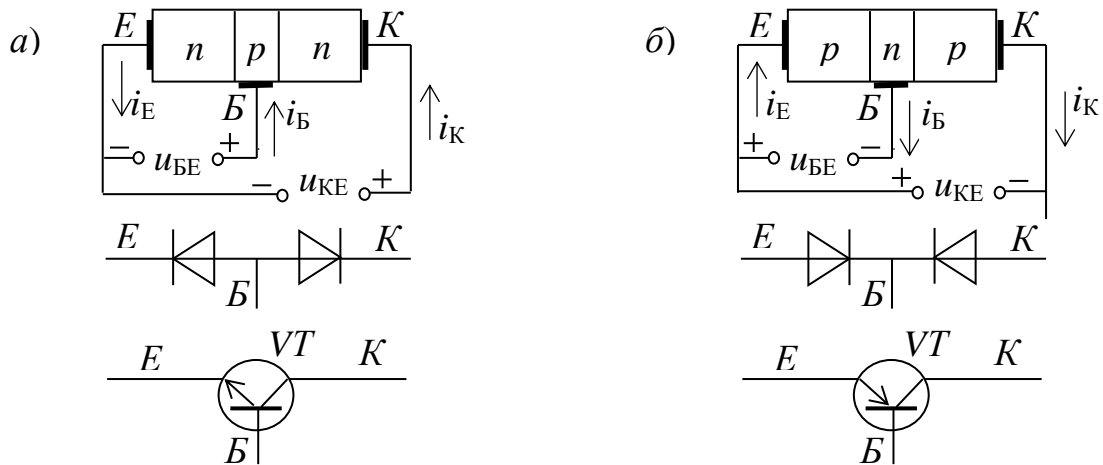
При зворотному включенні діоду (при  $u < 0$ ) діод зазвичай майже не пропускає зворотний струм  $i_{\text{зв}}$ . Тому цим струмом та втратами  $\Delta P = u_{\text{зв}} \cdot i_{\text{зв}}$  часто нехтують.

При використанні діодів у високочастотних пристроях, особливо, коли до діоду прикладена змінна напруга у вигляді прямокутних імпульсів з дуже крутими фронтами, зворотним струмом і втратами від нього, нехтувати не можна. В таких випадках доводиться навіть розглядати роботу діоду в режимі, близькому до короткого замикання, в момент перемикання діоду з провідного стану в непровідний стан. При високій частоті доводиться також враховувати електричну ємність  $p$ - $n$  – переходу, яка залежить від напруги і здатна суттєво уповільнити процес перемикання діодів. При недопустимо великому значенні зворотної напруги (при  $|u_{\text{зв}}| > |u_{\text{проб}}|$ ) відбувається пробій  $p$ - $n$  – переходу і, відповідно, втрата напівпровідникових властивостей.

*Стабілітрон* – напівпровідниковий діод, в якому пробій  $p$ - $n$  – переходу зворотною напругою використовується як робочий режим. Діоди використовують для стабілізації зворотної напруги на рівні  $u_{\text{ст}}$  в доволі широкому діапазоні значень струму стабілізації  $i_{\text{ст}} = i_{\text{ст}} \dots i_{\text{ст}}$ , який протікає через стабілітрон у зворотного напрямку (рис. 11.15, в).

*Транзистор* – триелектродний керований напівпровідниковий прилад. Серед різноманітних видів транзисторів найбільш поширені біполярні транзистори. В таких транзисторах електричний струм уворюють два види носіїв заряду – електрони і дірки. Біполярний транзистор має центральну напівпровідникову область одного типу провідності (базу **Б**) і дві крайні напівпровідникові області іншого типу провідності (емітер **Е** і колектор **К**). Перехідні контакти між ними (два  $p$ - $n$  – переходи) створені,

як і в напівпровідникових діодах, методом дифузії або шляхом вплавлення відповідних домішок у пластину монокристала напівпровідника. У біполярному транзисторі можливі два варіанти чергування напівпровідників –  $n-p-n$  і  $p-n-p$ . Кожен з цих варіантів, враховуючи вентильні властивості  $p-n$  – переходів, можна розглядати як два зустрічно включених напівпровідникових діоди (рис. 11.16).



**Рисунок 11.16 – Управляючі властивості біполярних транзисторів  $p-n-p$  типу (а) і  $n-p-n$  (б) типу**

Колектор  $K$  відрізняється від емітера  $E$  значно більшою площею  $p-n$  – переходу і значно меншою концентрацією легуючих домішок. Крім того, для керування роботою транзистора малими струмами  $i_B$  його база  $B$  повинна мати малу товщину і середню ступінь легуваності домішками.

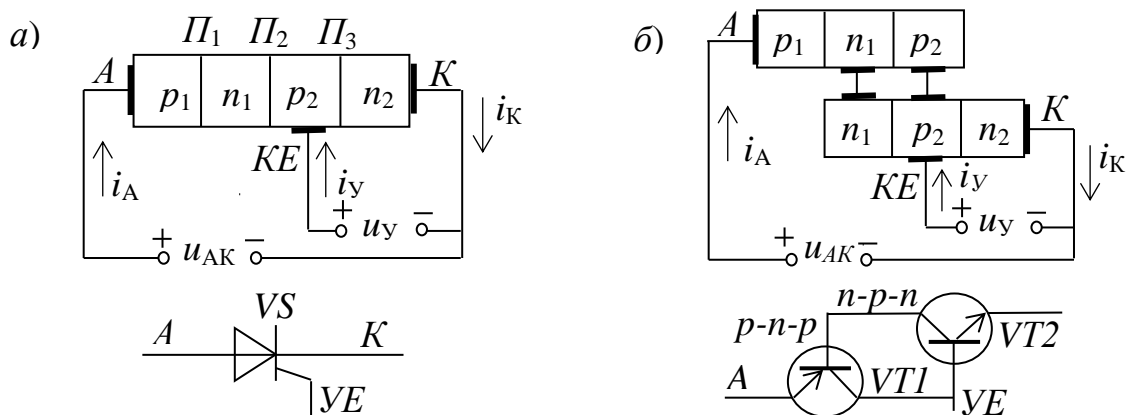
Якщо між базою  $B$  і емітером  $E$  створити напругу  $u_{BE}$  в прямому напрямку, то  $p-n$  – перехід між базою і емітером стає відкритим для переміщення основних носіїв заряду (для прямого струму  $i_B$ ). Ці носії заряду не є основними в базі, і тому легко проникають через  $p-n$  – перехід між базою  $B$  і колектором  $K$ . База виготовляється достатньо тонкою, щоб основні носії заряду емітеру не встигли рекомбінувати і створити значний струм бази. Якщо ж напруга  $u_{BE}$  між базою й емітером буде малою або буде мати протилежну полярність, то струм  $i_B$ , а значить струм  $i_K$  на ділянці колектор-емітер не виникне. Таким чином, незначний струм бази  $\Delta i_B$  здатний значно змінити струм  $\Delta i_K$  в колі колектору за рахунок зміни

електричного опору  $R_{KE}$  на ділянці колектор-емітер. Це вказує на підсилювальні та керуючі можливості транзистора, тобто  $\frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} \gg 1$ .

У режимі керування аналоговими сигналами можуть бути великі втрати потужності  $\Delta P = (i_K)^2 R_{KE}$  в транзисторі. Тому в сучасних електронних пристроях намагаються використовувати транзистори у включеному режимі, коли втрати потужності  $\Delta P$  незначні завдяки мінімальному значенню струму  $i_K$  в закритому стані транзистора або мінімальному значенню  $R_{KE}$  у відкритому стані транзистора.

*Тиристор* – триелектродний частково керований напівпровідниковий прилад, який структурно складається з чотирьох напівпровідникових областей різного типу провідності ( $p-n-p-n$ ) з трьома  $p-n$  – переходами. Крайню  $p$ -область, до якої підключається позитивний полюс джерела живлення  $u_{AK}$ , прийнято називати анодом  $A$ , іншу крайню  $n$ -область, до якої підключається негативний полюс – катодом  $K$ , а проміжну  $p$ -область, на яку надходять позитивні керуючі сигнали  $i_y, u_y$ , керуючим електродом  $KE$  (рис. 11.17, а).

Іноколи для зручності тиристор представляють у вигляді з'єднаних між собою двох транзисторів  $p-n-p$  і  $n-p-n$ -типів (рис. 11.17, б). Як бачимо з рисунку 11.17, перехід  $\Pi_2$  є загальним колекторним переходом двох транзисторів у схемі заміщення тиристора, а переходи  $\Pi_1$  і  $\Pi_3$  – емітерними переходами.



**Рисунок 11.17 – Структура тиристора (а) та схема заміщення його транзисторами (б)**

За відсутності управляючих сигналів  $i_y$  на управляючому електроді  $UE$  тиристор практично не пропускає електричний струм у будь-яку сторону, тобто знаходиться у вимкненому стані. При підвищенні прямої напруги  $u_{AK}$  джерела живлення струм  $i_A$  тиристора підвищується не суттєво, поки напруга  $u_{AK}$  не наблизиться до критичного значення – до напруги включення  $u_{вкл}$ . При  $u_{AK} > u_{вкл}$  під впливом наростаючого електричного поля в переході  $P_2$  виникає різке збільшення кількості носіїв заряду внаслідок ударної іонізації при зіткненні носіїв заряду з атомами. Електрони з області  $n_2$  і дірки з області  $p_1$  спрямовуються в області  $p_2$  і  $n_1$  і насичують їх неосновними носіями заряду. Через це струм у переході  $P_2$ , а значить струм  $i_A$  тиристора різко зростає до максимально можливого значення, яке визначається законом Ома і вертикальною ділянкою вольт-амперної характеристики відкритого тиристора (рис. 11.18).

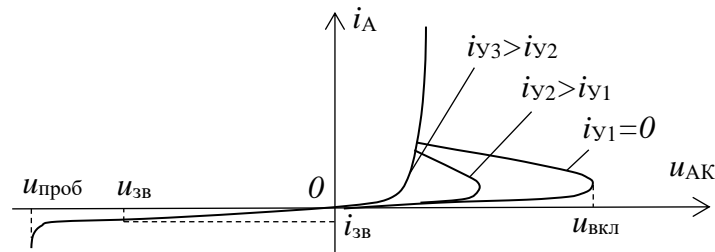


Рисунок 11.18 – Вольт-амперна характеристика тиристора

Тиристор повертається у виключений (розімкнений) стан протягом  $1...100$  мкс, якщо прямий струм  $i_A$  тиристора стане менше струму втримання  $i_{втр}$ . На практиці, якщо потрібно прискорити процес примусового виключення тиристора, створюють короточасні умови для зворотного струму тиристора. Тиристор, як і діод, у зворотному напрямку (при зворотній напрузі  $u_{зв}$ ) струм  $i_{зв}$  практично не пропускає. При недопустимо великому значенні зворотної напруги (при  $|u_{зв}| > |u_{проб}|$ ) відбувається пробій тиристора і, відповідно, втрачаються його напівпровідникові властивості.

Напругу включення  $u_{вкл}$ , при якій починається лавиноподібне зростання струму  $i_A$ , може бути суттєво знижено. Для цього в область  $p_2$  (рис. 11.17, а) потрібно ввести неосновні носії заряду, що дозволить збільшити інтенсивність іонізації в  $p-n$  – переході  $P_2$ . Це здійснюється

шляхом подачі на управляючий електрод  $UE$  імпульсу струму управління  $i_y$ . При достатньо великому значенні цього струму тиристор за своєю вольт-амперною характеристикою наближається до напівпровідникового діода (рис. 11.18).

## 11.7 Приклади розрахунку завдань з визначення параметрів провідникових матеріалів

### Визначення параметрів електропровідності провідників

**Завдання.** Визначити масу мідного проводу діаметром  $D = 1$  мм, з якого виготовлена котушка електромагніту, та її індуктивність  $L$ . Котушка споживає змінний електричний струм  $I = 1,7$  А, промислової частоти при напрузі  $U = 220$  В і нагрівається до температури  $T = 70^\circ\text{C}$  потужністю  $P = 9$  Вт.

**Рішення.** Масу проводу можна визначити через його довжину  $l$ , скориставшись формулами (11.1), (11.2), (11.3) та даними таблиці 11.1:

$$m = V \cdot d = S \cdot l \cdot d = 0,785 \cdot 10^{-6} \cdot 118,4 \cdot 8920 = 0,829 \text{ (кг)},$$

де  $V = S \cdot l$  – об'єм міді, яка витрачена на виготовлення проводу;

$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (10^{-3})^2}{4} = 0,785 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}$  – площа поперечного перетину проводу;

$l \approx R \frac{S}{\rho} = 3,1142 \frac{0,785 \cdot 10^{-6}}{0,020655 \cdot 10^{-6}} = 118,4 \text{ (м)}$  – довжина проводу (11.1);

$R = \frac{P}{I^2} = \frac{9}{1,7^2} = 3,1142 \text{ (Ом)}$  – електричний опір котушки при температурі

$T = 70^\circ\text{C}$  (11.3);  $d = 8,920 \text{ кг/м}^3$  – щільність міді (табл. 11.1).

Питомий опір міді при температурі  $T = 70^\circ\text{C}$ :

$$\begin{aligned} \rho &\approx \rho_0 [1 + \alpha_p (T - T_0)] = 0,017 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 0,0043 \cdot (70 - 20)] = \\ &= 0,020655 \cdot 10^{-6} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}, \end{aligned}$$

де  $\rho_0 = 0,017 \cdot 10^{-6} \text{ (Ом} \cdot \text{м)}$  – питомий опір міді при температурі  $T = 20^\circ\text{C}$  (табл. 11.1);  $\alpha_p = 0,0043 \text{ K}^{-1}$  – середній температурний коефіцієнт питомого опору в діапазоні температур  $T \dots T_0$  (табл. 11.1);

Індуктивність котушки згідно з формулою (11.3):

$$L = \frac{X_L}{\omega} = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{Z^2 - R^2} = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \sqrt{129,41^2 - 3,1142^2} = 0,412(\text{Гн}),$$

де  $Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{1,7} = 129,41$  (Ом) – повний опір котушки (11.3);  $\omega = 2\pi f$  – кутова промислова частота, 1/с;  $f = 50$  Гц – промислова частота.

### **Визначення параметрів термоелектричного генератора**

**Завдання.** Визначити кількість послідовно з'єднаних електричних залізо-кобальтових контурів у складі термоелектричного генератора для отримання на його виході напруги  $U = 9$  В при різниці температур спаїв  $\Delta T = 80^\circ\text{C}$ . Визначити кількість теплової енергії, яка передається від гарячого спаю цього термогенератора до холодного спаю щогодини (протягом  $t = 3600$  с) при навантаженні термогенератора струмом  $I_H = 1$  А.

**Рішення.** Кількість електричних контурів  $N$  термогенератора визначається його напругою  $U$  і різницею потенціалів  $U_{12}$  (термоелектрорушійною силою), яка характерна вибраній парі провідників (заліза і кобальту) при різниці температур спаїв  $\Delta T = 80^\circ\text{C}$  (11.6):

$$N = \frac{U}{U_{12}} = \frac{U}{\psi_{12} \cdot \Delta T} = \frac{9}{36,7 \cdot 10^{-6} \cdot 80} = 3065,$$

де  $\psi_{12} = \psi_1 - \psi_2 = 16,6 \cdot 10^{-6} - (-20,1 \cdot 10^{-6}) = 36,7 \cdot 10^{-6}$  (В/К) – відносна питома термоелектрорушійна сила для вибраної пари провідників або коефіцієнт Зеебека (11.8);  $\psi_1 = 16,6 \cdot 10^{-6}$  (В/К) – абсолютна питома термоелектрорушійна сила заліза (табл. 11.1);  $\psi_2 = -20,1 \cdot 10^{-6}$  (В/К) – абсолютна питома термоелектрорушійна сила кобальту (табл. 11.1).

Кількість теплової енергії, яка передається від гарячого спаю термогенератора до холодного можна визначити за формулою (9.10):

$$W_T = I_H \cdot U \cdot t = 1 \cdot 9 \cdot 3600 = 32400 \text{ Дж} = 7739 \text{ кал.}$$

Таку саму теплову енергію передасть цей термогенератор, понижуючи температуру холодного спаю в морозильній камері, якщо спрямувати струм  $I_H = 1$  А у зворотному напрямку за допомогою стороннього джерела електричної енергії. Це впливає з електротермічного ефекту Пельтьє та його зворотності ефекту Зеебека.



### Визначення параметрів електронагрівального елемента

Завдання. Визначити потужність електронагрівального елемента, який виготовлений з хромальового проводу довжиною  $l = 3$  м і діаметром  $D = 0,5$  мм. Цей елемент підключений до електричного джерела з напругою  $U = 220$  В і в стабільному тепловому режимі має температуру  $T = 300^\circ\text{C}$ .

Рішення. Теплова потужність електронагрівального елемента  $P$  залежить від його електричного струму  $I$  (або напруги  $U$ ) і опору  $R$ , геометричних параметрів проводу (11.1), питомого опору хромалю і його температури  $T$  (11.2):

$$P = \frac{W_T}{t} = I^2 R = \frac{U^2}{R} = \frac{220^2}{21} = 2305 \text{ (Вт)},$$

де  $R = \rho \frac{l}{S} = 1,37 \cdot 10^{-6} \frac{3}{0,196 \cdot 10^{-6}} = 21$  (Ом) – електричний опір хромальового проводу при робочій температурі  $T = 300^\circ\text{C}$  (11.1).

Питомий опір хромалю при робочій температурі  $T = 300^\circ\text{C}$  (11.2):

$$\begin{aligned} \rho &\approx \rho_0 [1 + \alpha_\rho (T - T_0)] = \\ &= 1,33 \cdot 10^{-6} \cdot [1 + 10^{-4} \cdot (300 - 20)] = 1,37 \cdot 10^{-6} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}, \end{aligned}$$

де  $\rho_0 = 1,33 \cdot 10^{-6}$  (Ом $\cdot$ м) – питомий опір хромалю при температурі  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_\rho \approx 10^{-4} \text{ K}^{-1}$  – середній температурний коефіцієнт питомого опору хромалю в діапазоні температур  $T_0 \dots T$ .

Площа поперечного перетину хромальового проводу:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,196 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

### Визначення можливостей надпровідника

Завдання. Визначити максимально можливе значення постійного електричного струму  $I_{max}$  в надпровіднику із ніобію станіду  $Nb_3Sn$  за відсутності зовнішнього магнітного поля при робочій температурі  $T = 10$  К, передбачивши в ньому 40-відсотковий запас за критичним значенням температури  $T_K$  і магнітної індукції  $B_K$ . При цьому діаметр електропровідної частини надпровідного кабелю, яка може складатися з

тонких дротів або плівок станіду ніобію, обмежений значенням  $D_K = 5$  мм.

Рішення. Зона надпровідності ніобію станіду  $Nb_3Sn$ , як відомо, обмежена осями критичних значень температури  $T_K$  і магнітної індукції  $B_K$  та кривою  $B_K = f(T_K)$ . Ця крива у відносних одиницях ( $B_K^* = \frac{B_K}{B_{K0}}$ ,  $T_K^* = \frac{T_K}{T_{K0}}$ ) дуже близька до кола з одиничним радіусом, де  $B_{K0} = 22$  Тл,  $T_{K0} = 18$  К. Крива робочих значень магнітної індукції і температури у відносних одиницях, в яких за умовою завдання потрібно передбачити 40-процентний запас ( $B_K^* = \frac{B}{0,6 \cdot B_{K0}}$ ,  $T_K^* = \frac{T}{0,6 \cdot T_{K0}}$ ), також близька до кола з одиничним радіусом:

$$\left(\frac{B}{0,6 \cdot B_{K0}}\right)^2 + \left(\frac{T}{0,6 \cdot T_{K0}}\right)^2 = 1,$$

де  $T = 10$  К – робоча температура надпровідника (задана за умовами завдання).

Робоча магнітна індукція як результат рішення рівняння:

$$B = 0,6 \cdot B_{K0} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{T}{0,6 \cdot T_{K0}}\right)^2} = 0,6 \cdot 22 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{10}{0,6 \cdot 18}\right)^2} = 4,986 \text{ Тл}.$$

При визначенні максимально можливого значення електричного струму  $I_{max}$  в кабелі потрібно виходити з найбільш критичного його місця, де магнітна індукція максимальна. Таким місцем в надпровідному кабелі є дуже тонкий шар зовнішньої циліндричної поверхні його електропровідної частини, куди витісняється струм згідно з ефектом Мейснера і де робоча магнітна індукція  $B$  сягає свого максимуму за законом повного струму.

$$\begin{aligned} I_{max} &= H \cdot \pi \cdot D_K = \frac{B}{\mu_0} \cdot \pi \cdot D_K = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \pi \cdot D_K = \\ &= \frac{4,986}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot \pi \cdot 0,005 = 62325 \text{ (А)} \end{aligned}$$

де  $H$  – робоча напруженість магнітного поля на циліндричній поверхні надпровідника, яка прямо пропорційна струму  $I_{max}$  і робочій магнітній індукції  $B$ .

## Контрольні запитання

1. Які головні функції здатний виконувати провідник електричного струму?
2. Визначте основні відмінності провідника електричного струму від діелектрика. Які фактори впливають на питомий опір провідника?
3. Назвати основні властивості провідникових матеріалів.
4. Як можна виміряти питомий опір провідника?
5. Яким фізичним законам підкоряється електричний струм в провіднику?
6. Чим обумовлена електропровідність провідника?
7. Назвати головні причини виникнення активного і реактивного опорів. В яких випадках можна користуватися терміном «реактивний опір»?
8. Яким чином впливає частота електричного струму на активний і реактивний опори провідника?
9. Пояснити явище емісії електронів з поверхні металу.
10. Що таке контактна різниця потенціалів?
11. Який існує зв'язок між контактною різницею потенціалів і ефектом Зеебека?
12. В яких випадках може виникнути термоелектрорушійна сила в замкненому електричному колі?
13. Назвати відмінності між ефектами Зеебека і Пельтьє. Яким чином можна використати на практиці ефекти Зеебека і Пельтьє?
14. Пояснити причини виникнення блукаючих струмів. Які негативні наслідки можуть бути від блукаючих струмів?
15. Назвіть засоби зниження блукаючих струмів та їх потенціалів.
16. Які матеріали називають провідниками високої електропровідності?
17. Назвати основні електропровідні сплави на основі міді.
18. Які переваги та недоліки має алюміній як провідник електричного струму порівняно з міддю? Назвати основні електропровідні сплави на основі алюмінію.

19. Яким вимогам повинен відповідати алюміній для його використання як кріопровідника?

20. Що таке надпровідники і які їх головні відмінності від звичайних провідників?

21. Пояснити суть ефекту Мейснера в надпровідниках.

22. Яка фізична природа надпровідності? Пояснити відмінності між надпровідниками 1 та 2 роду. Пояснити практичну цінність надпровідників.

23. Які матеріали називають провідниками високого електричного опору? Назвати електропровідні сплави високого електричного опору на основі міді.

24. Які метали містять сплави для виготовлення електронагрівальних елементів?

25. Назвати тугоплавкі метали та область їх використання. В яких випадках доцільно використовувати благородні метали в якості провідників електричного струму?

26. Назвати легкоплавкі метали та область їх використання.

27. Які неметалеві матеріали доцільно використовувати в якості провідників електричного струму? Назвати головні переваги та недоліки неметалевих провідників порівняно з металевими провідниками. Що таке електричні щітки і в яких випадках вони використовуються?

28. Чим принципово відрізняються напівпровідники від провідників і діелектриків?

29. Назвати причини значної залежності електропровідності напівпровідників від впливу енергетичних факторів (температури, світла, електричного поля)?

30. Чим відрізняються між собою напівпровідники *n*-типу і *p*-типу?

31. Пояснити роль донорів і акцепторів при виготовленні напівпровідникових елементів. Що таке діркова електропровідність напівпровідників?

32. Які властивості *p-n* – переходів між напівпровідниками є найбільш корисними для виготовлення напівпровідникових приладів?

33. Назвати основні відмінності між діодом, варикапом і стабілітроном. Яким чином проявляється керуваність *p-n* – переходів у транзисторі?

34. Назвати основні відмінності між транзистором і тиристором.

## РОЗДІЛ 12

### МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

Всі матеріали в магнітному полі обов'язково вступають у взаємодію з ним і тому проявляють свої магнітні властивості. Силу цієї взаємодії можна назвати силою Лоренца, оскільки будь-які матеріали містять рухомі заряджені частинки. Внаслідок цієї взаємодії заряджені частинки можуть змінити свій рух і таким чином вплинути на результуюче магнітне поле. Матеріали, які сприяють посиленню магнітного поля та концентрації магнітних силових ліній в певній зоні, називаються магнітними матеріалами. Ці властивості найбільш корисні в тих випадках, коли потрібно зв'язати магнітним полем електричні кола чи контури з метою створення в них електрорушійних сил Фарадея та сил Лоренца і Ампера – у трансформаторах, генераторах, двигунах, дроселях, котушках індуктивності та інших електромагнітних пристроях. До магнітних матеріалів відносяться феромагнітні кристалічні речовини (феромагнетики) і феромагнітні хімічні сполуки (ферити).

#### 12.1 Фізичні процеси та явища в магнітних матеріалах

##### Загальні властивості магнітних матеріалів

Магнітні властивості матеріалів обумовлені елементарними круговими струмами на мікроскопічному рівні, які здатні створювати власні магнітні поля (магнітні моменти  $M$ ), змінюватись під впливом зовнішнього магнітного поля і таким чином впливати на результуюче магнітне поле. До елементарних струмів належать в першу чергу обертання електронів навколо власних осей (електронні спіни) та орбітальні обертання електронів в атомах (рис. 9.1). Магнітні моменти ядер на три порядки менше магнітних моментів електронних оболонок атомів, і тому магнітними моментами ядер зазвичай нехтують.

Намагнічений матеріал, що знаходиться в зовнішньому магнітному полі, створює своє власне магнітне поле, яке в ізотропних матеріалах

спрямоване паралельно або антипаралельно зовнішньому полю. Тому магнітна індукція результуючого магнітного поля в матеріалі визначається алгебраїчною сумою індукцій зовнішнього  $B_0$  і внутрішнього  $B_{вн}$  поля:

$$\begin{aligned} B &= B_0 + B_{вн} = \mu_0 H + \mu_0 J_M = \mu_0 \cdot (H + J_M) = \\ &= \mu_0 H \cdot (1 + k_M) = \mu_0 \mu_r H, \end{aligned} \quad (12.1)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля, яка створюється зовнішніми електричними струмами, А/м (9.19);  $B_0$  – магнітна індукція зовнішнього магнітного поля у вакуумі (без врахування впливу магнітного матеріалу), Тл;  $B_{вн}$  – магнітна індукція внутрішнього поля, яка обумовлена внутрішніми магнітними моментами (намагніченістю  $J_M$ ) магнітного матеріалу, Тл;  $J_M = \frac{M}{V} = k_M \cdot H$  – намагніченість магнітного матеріалу під впливом магнітного поля (векторна сума магнітних моментів  $M$  всіх атомів, які перебувають в одиниці об'єму  $V$  магнітного матеріалу), А/м [6];  $k_M = \mu_r - 1$  – магнітна сприйнятливість, яка характеризує здатність матеріалу змінювати свій магнітний момент під впливом зовнішнього магнітного поля;  $\mu_r = \frac{\mu_a}{\mu_0}$  – відносна магнітна проникність матеріалу;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – абсолютна магнітна проникність вакууму (магнітна стала);  $\mu_a = \mu_n \cdot \mu_0$  – абсолютна магнітна проникність матеріалу, Гн/м.

### **Класифікація матеріалів за їх здатністю намагнічуватись**

За здатністю намагнічуватись і впливати на результуюче магнітне поле всі матеріали ділять на п'ять груп – діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, антиферомагнетики і феримагнетики [6].

✓ Діамагнетики – матеріали, в яких атоми чи молекули не мають власного магнітного моменту. У них може існувати лише невеликий наведений магнітний момент протилежної спрямованості по відношенню до зовнішнього магнітного поля, і тому може лише дещо ослаблювати його ( $k_M = -10^{-6} \dots 10^{-7} < 0$ ;  $0 < \mu_r < 1$ ). Негативне значення магнітної сприйнятливості  $k_M$  призводить до виштовхування діамагнетиків з магнітного поля. Діамагнетиками є більшість діелектриків і напівпровідників, ряд металів (мідь  $Cu$ , срібло  $Ag$ , золото  $Au$ , цинк  $Zn$ , ртуть  $Hg$ ,

галій *Ga*) і металоїдів (фосфор *P*, сірка *S*, кремній *Si* тощо), а також речовини в надпровідному стані.

✓ Парамагнетики – матеріали, в яких атоми чи молекули за відсутності зовнішнього магнітного поля мають незначний власний магнітний момент, який виникає внаслідок деякої некомпенсованості спінових магнітних моментів електронів. Ці моменти практично не взаємодіють між собою, орієнтовані хаотично, і тому результуючий магнітний момент  $M = 0$ . Під впливом зовнішнього поля магнітні моменти атомів орієнтуються в напрямі цього поля і тому дещо підсилюють його ( $k_M = 10^{-3} \dots 10^{-6}$ ;  $\mu_r > 1$ ). Парамагнетизм проявляється в лужних металах (натрій *Na*, калій *K*) і в деяких перехідних металах з недобудованою електронною оболонкою (титан *Ti*, ванадій *V*, хром *Cr*, марганець *Mn*).

✓ Феромагнетики подібні до парамагнетиків, але спінові магнітні моменти їх електронів тісно взаємодіють між собою і утворюють магнітні домени об'ємом  $0,001 \dots 10 \text{ мм}^3$ . Домени знаходяться в стані магнітного насичення завдяки однаковій орієнтації магнітних моментів усіх його атомів. Доменна структура формується за відсутності зовнішнього магнітного поля внаслідок самовільної (спонтанної) намагніченості при температурі нижче  $T_K$  (точки Кюрі). Наприклад, для чистого заліза  $T_K = 768^\circ\text{C}$ , для нікелю  $T_K = 358^\circ\text{C}$ , для кобальту  $T_K = 1131^\circ\text{C}$ . За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів орієнтовані майже хаотично, і тому їх результуючий магнітний момент майже нульовий. Але під впливом зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів легко орієнтуються в напрямку цього поля і в багато разів підсилюють його, знаходячись у сильній залежності від напруженості зовнішнього магнітного поля ( $k_M \approx \mu_r = 10^2 \dots 10^6$ ). При цьому домени додатково намагнічуються, збільшуючись у своїх розмірах. До феромагнетиків відносяться три перехідні метали з недобудованою електронною оболонкою і сплави на їх основі (залізо *Fe*, нікель *Ni* і кобальт *Co*), а також деякі рідкоземельні елементи, які не знайшли широкого використання як феромагнетики через дуже низькі значення  $T_K$ .

✓ Антиферомагнетики – матеріали, в яких атоми, як і в парамагнетиках та феромагнетиках, мають власний магнітний момент. Але під впливом зовнішнього магнітного поля і внаслідок обмінної взаємодії магнітні моменти отримують протилежну орієнтацію і майже повністю

компенсують один одного ( $k_M = 10^{-3} \dots 10^{-5}$ ). До антиферомагнетиків відноситься доволі велика кількість сполук на основі мангану  $Mn$ , хрому  $Cr$ , нікелю  $Ni$  і ванадію  $V$ .

✓ Феримагнетики (ферити) – кристалічні матеріали з доменною структурою. Їх домени складаються з двох і більше неоднакових магнітних підрешіток, які зв'язані між собою антипаралельно (антиферомагнітно). В результаті з'являється відмінна від нуля різниця магнітних моментів підрешіток, що призводить до спонтанного намагнічування кристалів. Таким чином, ферити можна розглядати як некомпенсовані антиферомагнетики. За своїми магнітними властивостями ферити поступаються феромагнетикам у магнітній індукції насичення, але мають значно більший питомий опір  $\rho$ , який може сягати  $10^{11}$  Ом·м. Високий питомий опір практично виключає у феритах вихрові струми, що дозволяє використовувати їх у високочастотних магнітних полях. Ферити є складною системою оксидів металів із загальною хімічною формулою  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , де  $MeO$  – оксид двовалентного металу.

### **Намагнічування магнітних матеріалів**

Процес намагнічування магнітних матеріалів (феромагнетиків та феритів) під впливом зовнішнього магнітного поля супроводжується зміщенням границь доменів, поворотом їх магнітних моментів у напрямку дії зовнішнього магнітного поля та збільшенням одних доменів за рахунок інших – аж до стану повного магнітного насичення [5]. У цьому стані практично всі монокристали стають одно-доменними, незмінними за своїми лінійними розмірами і орієнтованими в напрямку дії зовнішнього магнітного поля.

*Магнітострикція* – явище зміни лінійних розмірів феромагнітних монокристалів у процесі намагнічування магнітного матеріалу. Це явище характеризують константою магнітострикції  $\lambda_s = \frac{\Delta l}{l}$  – зміною довжини зразка магнітного матеріалу по відношенню довжини  $l$  цього зразка. Якщо зразок матеріалу подовжується в напрямку дії магнітного поля за рахунок скорочення перпендикулярно напрямку дії магнітного поля, то знак величини  $\lambda_s$  позитивний, а якщо навпаки – негативний. Величина  $\lambda_s$



і навіть її знак залежить від напруженості  $H$  магнітного поля. З трьох основних феромагнетиків найбільша магнітострикція виникає в нікелю ( $\lambda_s = -3,7 \cdot 10^{-5}$ ). Дуже висока магнітострикція виникає в рідкоземельних елементах – у тербію  $Tb$ , диспрозію  $Dy$ , гольмію  $Ho$ , ербію  $Er$ , тулію  $Tm$ . Наприклад, у полікристалічного тербію  $\lambda_s = 3 \cdot 10^{-3}$ , а у монокристалічного  $\lambda_s = 2 \cdot 10^{-2}$  [6]. Магнітострикція використовується в перетворювачах ультразвуку, в яких енергія змінного магнітного поля перетворюється в енергію механічних коливань (або навпаки).

Явище магнітострикції, як і багато інших, може бути зворотним, тобто механічна деформація феромагнетика змінює його намагніченість. Це явище має назву магнітопружний ефект або ефект Вілларі. Цей ефект покладений в основу роботи магнітопружних перетворювачів (тензодатчиків). У них використовується залежність зміни магнітної проникності  $\Delta\mu_r$  або магнітної індукції  $\Delta B$  від механічних напружень та зусиль. Чутливість магнітопружного матеріалу характеризується коефіцієнтом тензочутливості

$$K_T = \frac{\left(\frac{\Delta\mu_r}{\mu_r}\right)}{\lambda_s},$$

де  $\lambda_s = \frac{\Delta l}{l}$  – константа магнітострикції. Коефіцієнт тензочутливості досягає значення 300.

*Магнітна анізотропія* – залежність властивостей магнітного матеріалу від обраного напрямку. Її причина полягає в анізотропному характері магнітної взаємодії між атомними носіями магнітного моменту. Особливо велика магнітна анізотропія виникає у монокристалах феромагнетиків. Вона проявляється в наявності осей найбільш легкого намагнічування, які характеризуються максимальними значеннями магнітної сприйнятливості  $k_M$  (12.1) і мінімальними витратами електричної енергії на процес намагнічування. При відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти доменів самовільно (спонтанно) орієнтуються вздовж однієї з осей легкого намагнічування. При зростанні температури ефект магнітної анізотропії слабне, а при температурі вище точки Кюрі  $T_K$  – зовсім зникає. Ефект анізотропії використовують при виготовленні тонких листів електротехнічної сталі шляхом їх холодної прокатки. У такому

процесі вісь легкого намагнічування співпадає з напрямом прокатки. Використання холоднокатаних листів електротехнічної сталі в магнітопроводах трансформатора суттєво знижує витрати електричної енергії на створення в ньому робочої магнітної індукції.

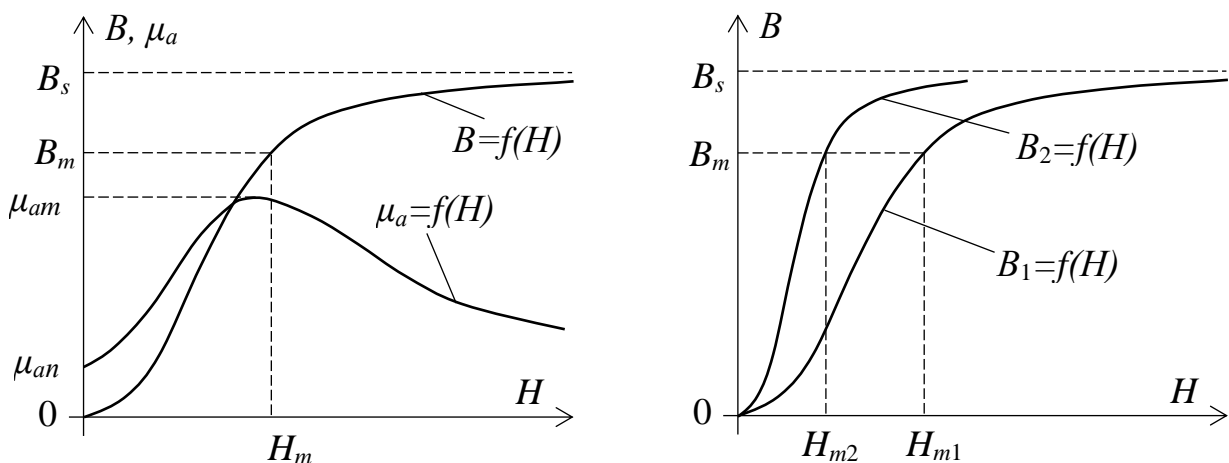
### Основна крива намагнічування магнітних матеріалів

Процес намагнічування магнітних матеріалів характеризують основною (статичною) кривою намагнічування

$$B = f(H) = \mu_a \cdot H,$$

де  $B = \frac{d\Phi}{dS}$  – магнітна індукція або густина магнітного потоку  $\Phi$ ;  $dS$  – елементарна площа поперечного перетину магнітних силових ліній;  $\mu_a$  – абсолютна магнітна проникність магнітного матеріалу;  $H$  – напруженість магнітного поля в певній точці магнітного матеріалу, яка залежить від намагнічуючої (магніторухійної) сили  $F$  зовнішніх струмів  $i_K$ .

Криві намагнічування  $B = f(H)$  подібні для всіх магнітних матеріалів і мають нелінійний характер (рис. 12.1), де  $B_s$  – магнітна індукція насичення;  $B_m$  – максимальна (робоча) магнітна індукція, яка зазвичай вибирається приблизно на 35 % менше індукції насичення ( $B_m \approx 0,65 \cdot B_s$ ) для зменшення негативного впливу нелінійного характеру кривої  $B = f(H)$ .



Р а) нок 12.1 – Магнітна індукція  $B = f(H)$  і абсолютна магнітна проникність  $\mu_a = f(H)$  (б)

Основну криву намагнічування  $B = f(H)$  можна визначити експериментально, якщо процес намагнічування починати з повністю розмагніченого стану магнітного матеріалу і поступово збільшувати напруженість  $H$  до стану насичення матеріалу.

Залежність абсолютної магнітної проникності від напруженості магнітного поля

$$\mu_a = \frac{B}{H} = f(H)$$

також має нелінійний характер (рис. 12.1, *a*), де  $\mu_{an}$  – початкова абсолютна магнітна проникність при  $H = 0$ ;  $\mu_{am}$  – максимальне значення магнітної проникності.

Для розуміння важливості магнітної проникності можна порівняти дві криві намагнічування  $B_1 = f(H)$  і  $B_2 = f(H)$  (рис. 12.1, *б*).

Крива  $B_2 = f(H)$  з більшим значенням  $\mu_a$  має перевагу над кривою  $B_1 = f(H)$ , тому що потребує меншої напруженості магнітного поля ( $H_{m2} < H_{m1}$ ), а значить меншої витрати електроенергії для отримання робочої індукції  $B_m$  при інших рівних умовах.

Абсолютна магнітна проникність  $\mu_a$  знижується з підвищенням частоти змінного магнітного поля через інерційність магнітних процесів [5]. У сильних магнітних полях (при дуже великих значеннях  $H$ )  $\mu_a$  знижується суттєво і навіть може суттєво наблизитись до магнітної проникності вакууму  $\mu_0$ . Стрибкоподібне зниження  $\mu_a$  до  $\mu_0$  відбувається при підвищенні температури феромагнетика вище точки Кюрі.

Важливою характеристикою феромагнетиків при їх використанні в змінних магнітних полях є динамічна магнітна проникність  $\mu_{a\sim}$ :

$$\mu_{a\sim} = \frac{B_m}{H_m} \approx \text{const}, \quad (12.2)$$

де  $B_m, H_m$  – амплітудні значення індукції і напруженості магнітного поля.

При аналізі роботи та проектуванні електротехнічних пристроїв змінного електричного струму динамічну магнітну проникність  $\mu_{a\sim}$  часто приймають постійною ( $\mu_{a\sim} = \text{const}$ ) і незалежною від  $H$ , особливо, якщо амплітудне значення магнітної індукції  $B_m$  вибране значно меншим за індукцію насичення  $B_s$  [11].

## Перемагнічування магнітних матеріалів

### Магнітний гістерезис

Якщо повільно намагнічувати ферромагнетик, а потім зменшувати напруженість магнітного поля  $H$  від будь-якої точки основної кривої намагнічування (рис. 12.1), то індукція  $B$  буде зменшуватись, не за основною кривою намагнічування, а з деяким відставанням. Це явище називається магнітним гістерезисом. Внаслідок цього явища графік залежності  $B = f(H)$  після закінчення повного циклу перемагнічування має вигляд статичної петлі гістерезису. Змінюючи напругу магнітного поля, можна одержати ряд петель гістерезису, як це показано на рис. 12.2.

Петля гістерезису при максимальній індукції  $B = B_m$ , близькій до індукції насичення  $B_s$ , називається граничною петлею гістерезису. Значення  $B$ , яке залишилось при  $H = 0$  в процесі розмагнічування матеріалу зі стану насичення, називається залишковою індукцією  $B_r$ . Для доведення індукції від значення  $B_r$  до нуля необхідно створити зворотну за

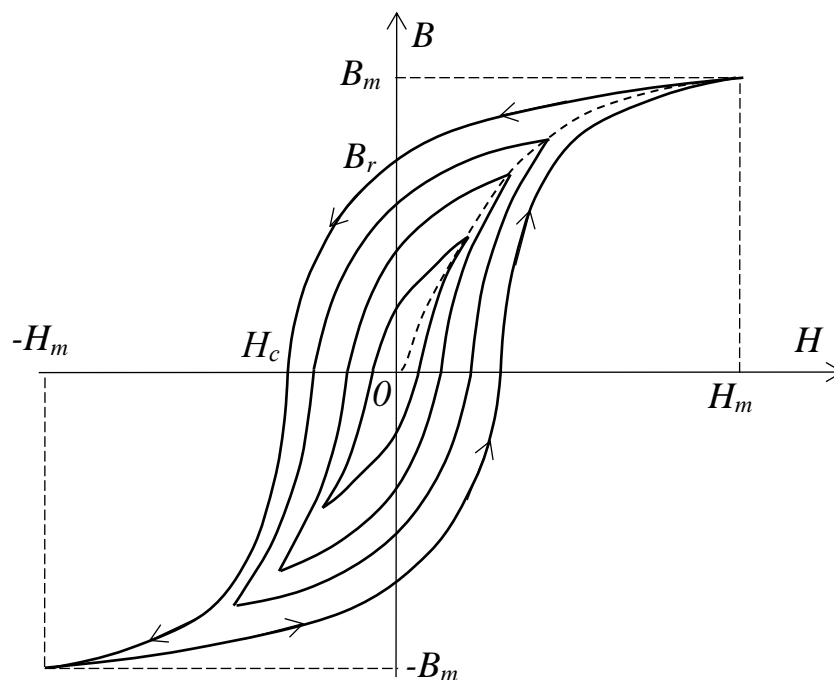


Рисунок 12.2 – Статичні петлі магнітного гістерезису у ферромагнетиках

напрямом дії напруженість  $H_c$ , яка зветься коерцитивною силою. Гістерезисні петлі симетричні відносно початку координат, якщо відсутні постійні складові напруженості магнітного поля  $H_0$  або струму намагнічування  $I_0$ .

Інколи магнітні матеріали використовують в змінному магнітному полі при одночасному підмагнічуванні постійним магнітним полем напруженістю  $H_0$ . У цих випадках процес перемагнічування характеризують частковим гістерезисним циклом (рис. 12.3) з амплітудними значеннями напруженості  $H_{\sim}$  і магнітної індукції  $B_{\sim}$ , а властивості феромагнетиків - диференціальною магнітною проникністю  $\mu_{ад}$ , яка залежить від  $H_0$ :

$$\mu_{ад} = \frac{B_{\sim}}{H_{\sim}} = f(H_0). \quad (12.3)$$

На основі залежності  $\mu_{ад} = f(H_0)$  працюють магнітні підсилювачі. В деяких випадках, наприклад, при живленні намагнічуючої обмотки від електронного інвертора, постійна складова напруженості  $H_0$  може виникнути самовільно.

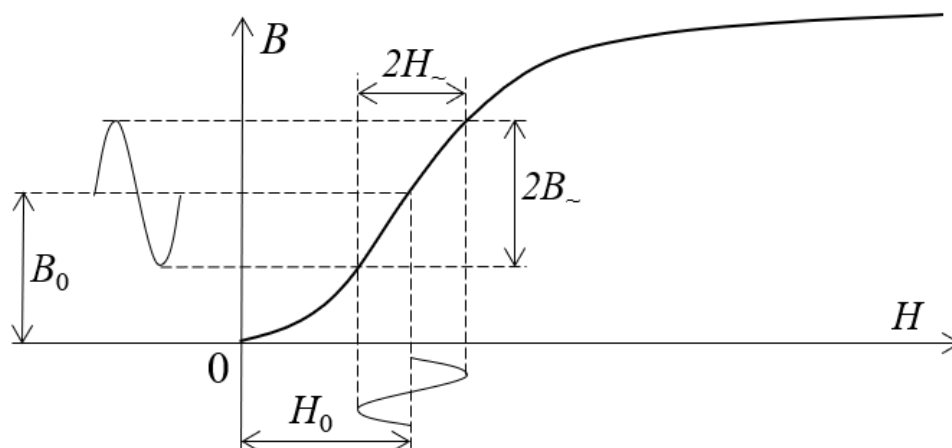


Рисунок 12.3 – Підмагнічування феромагнетиків постійним магнітним полем

### Магнітні втрати

Наявність коерцитивної сили  $H_c$  у гістерезисній петлі (рис. 12.2) означає втрату енергії за кожний цикл статичного перемагнічування феромагнетика, яка пропорційна площі цієї петлі  $S_{\Gamma}$ . Втрати потужності на гістерезис  $P_{\Gamma}$  можна визначити за емпіричною формулою [5]

$$P_{\Gamma} = \eta \cdot f \cdot B_m^n \cdot V, \quad (12.4)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт, який залежить від властивостей матеріалу;  $B_m$  – амплітуда магнітної індукції;  $n = 1,6 \dots 2,0$  – показник ступені;  $f$  – циклічна частота струму;  $V$  – обсяг зразка феромагнетика.

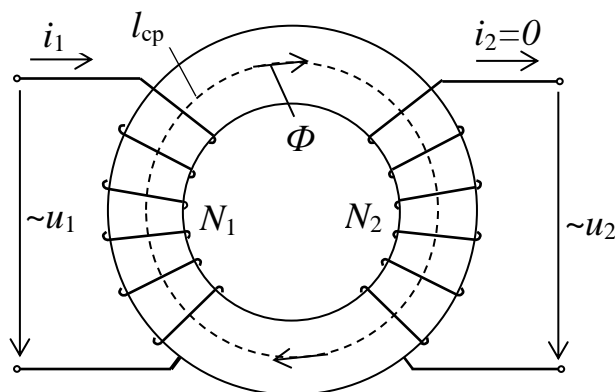
При змінному магнітному полі, окрім втрат на гістерезис, виникають додаткові втрати від вихрових струмів у феромагнетику, а також внаслідок, так званої, магнітної післядії або магнітної в'язкості матеріалу. Тому при експериментальному визначенні магнітних втрат краще користуватись динамічними гістерезисними петлями, які представляють собою залежність миттєвих значень магнітної індукції  $B$  від миттєвих значень напруженості магнітного поля  $H$ . Динамічні гістерезисні петлі дещо ширші (мають більше значення  $H_c$ ) порівняно зі статичними петлями магнітного гістерезису (рис. 12.2). Втрати електричної потужності на вихрові струми  $P_f$  суттєво залежать від частоти магнітного поля та електропровідності феромагнетику. Ці втрати можна визначити за емпіричною формулою [5]

$$P_f = \xi \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot V, \quad (12.5)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт, який залежить від типу і форми феромагнетику, а також від його питомого електричного опору  $\rho$  (11.1).

#### Залежність магнітної індукції від напруги джерела живлення

Розглянемо процес перемагнічування феромагнетиків на прикладі перемагнічування магнітопроводу ненавантаженого однофазного трансформатора. Його первинна обмотка з числом витків  $N_1$  підключена до джерела змінної напруги  $u_1$ , яка у звичайних ситуаціях змінюється за синусоїдальним законом  $u_1 = U_m \cdot \sin\omega t$  (рис. 12.4).



**Рисунок 12.4 – Ненавантажений однофазний трансформатор**

Обмотка  $N_1$  зі струмом  $i_1$  разом з магнітопроводом є по суті котушкою індуктивності з феромагнітним осердям (дроселем), враховуючи відсутність струму навантаження  $i_2$  у вторинній його обмотці  $N_2$ .

Припустимо, що електричний струм  $i_1$ , магнітний потік  $\Phi$  і магнітна індукція  $B$  змінюються за синусоїдальним законом, як і напруга  $u_1$ . Припустимо також, що динамічна магнітна проникність  $\mu_{a\sim}$  феромагнетику згідно з формулою (12.2) постійна ( $\mu_{a\sim} = const$ ) і достатньо велика, завдяки чому практично всі магнітні силові лінії сконцентровані в магнітопроводі, тобто магнітний потік розсіювання  $\Phi_\sigma$  за межами магнітопроводу відсутній ( $\Phi_\sigma \approx 0$ ). Тоді, згідно з законом електромагнітної індукції Фарадея електрорушійна сила (ЕРС) у первинній обмотці трансформатора:

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d}{dt} (B_m S \cdot \sin \omega t) = -B_m 2\pi f N_1 S \cdot \cos \omega t = -E_{m1} \cos \omega t, \quad (12.6)$$

де  $\Phi \approx \Phi_m \cdot \sin \omega t = B_m S \cdot \sin \omega t$  – магнітний потік у магнітопроводі, який пронизує витки обмоток  $N_1$  і  $N_2$  трансформатора і змінюється практично за синусоїдальним законом, Вб;  $B_m = \frac{\Phi_m}{S}$  – амплітуда магнітної індукції, Тл;  $S$  – площа поперечного перерізу магнітопроводу, м<sup>2</sup>;  $\omega = 2\pi f$  – кутова частота зміни електричного струму і магнітного потоку, 1/с;  $f$  – циклічна частота зміни електричного струму і магнітного потоку, Гц;  $E_{m1} = B_m 2\pi f N_1 S$  – амплітуда ЕРС у первинній обмотці трансформатора, В.

Якщо знехтувати падінням напруги на активному опорі первинної обмотки, то з (12.6) впливає наступна формула розрахунку діючих (ефективних) значень напруги в обмотках трансформатора:

$$U_1 \approx \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = 4,44 B_m f N_1 S; \quad U_2 \approx \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = U_1 \frac{N_2}{N_1} = 4,44 B_m f N_2 S. \quad (12.7)$$

Важливо відзначити, що напруга  $U_1$  (12.7) задається джерелом змінного струму і не залежить від магнітної індукції  $B$ , струму  $i_1$  або напруженості  $H$  магнітного поля. Тому напруженість  $H$  на кривій намагнічування  $B=f(H)$  (рис. 12.1) необхідно розглядати як наслідок магнітної індукції  $B$ , яка задається напругою  $U_1$  і прямо пропорційна цій нарузі (12.7). Суттєво нелінійна взаємозалежність  $B$  і  $H$  стає принципово важливою на ділянці насичення феромагнетиків (рис. 12.1). На цій ділянці

незначному збільшенню напруги  $\Delta U_1$ , а значить і магнітної індукції  $\Delta B$ , відповідає суттєве (інколи багаторазове) збільшення напруженості магнітного поля  $\Delta H$  і електричного струму  $\Delta I_1$  у намагнічуючій обмотці. А це означає небезпеку виходу з ладу трансформатора.

## 12.2 Вимірювання основних параметрів магнітних матеріалів

Під основними параметрами феромагнетиків маються на увазі магнітна проникність, магнітні втрати і магнітний опір. Найбільш простий варіант схеми вимірювання цих параметрів приведений на рис. 12.5.

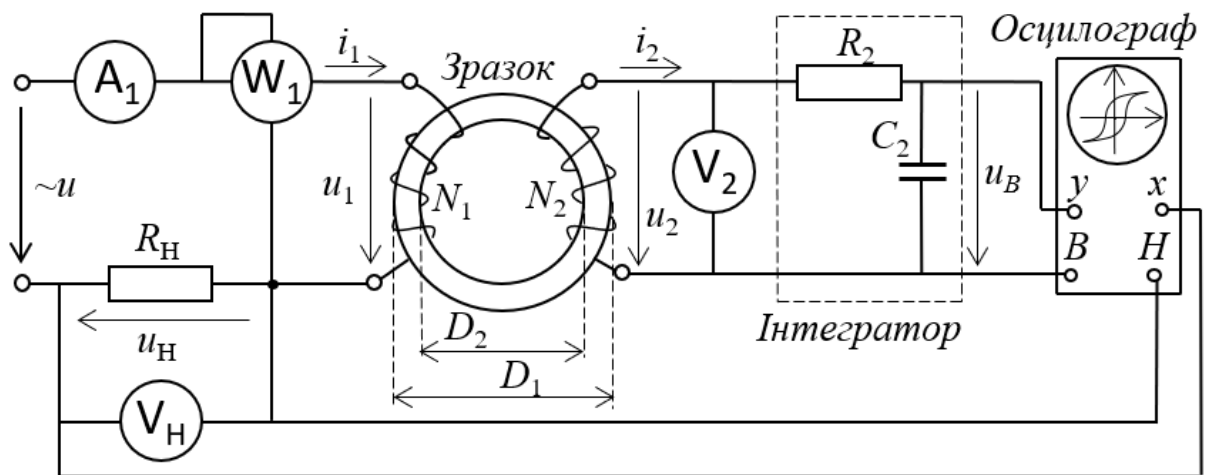


Рисунок 12.5 – Схема вимірювання основних параметрів феромагнетиків

Магнітний потік  $\Phi$  та індукція  $B$  у зразку феромагнетика створюються змінним електричним струмом  $i_1$  в первинній (намагнічуючій) обмотці  $N_1$ , яка підключена до джерела синусоїдальної напруги  $u = U_m \sin \omega t$ . За допомогою шунта з невеликим опором  $R_H$  створюється падіння напруги  $u_H$ , яке прямо пропорційне струму  $i_1$  і напруженості магнітного поля  $H$  та подається на вхід «x» осцилографа. Активна потужність, яку споживає первинна обмотка  $N_1$ , вимірюється ватметром  $W_1$ . Діюче значення струму  $i_1$  вимірюється амперметром  $A_1$ . Закон зміни цього струму відхиляється від синусоїдального закону через нелінійність кривої намагнічування феромагнетика  $B = f(H)$ . Тому для визначення амплітуди цього струму  $I_{m1}$  та напруженості магнітного поля  $H_m$  в схемі



(рис. 12.5) використовується амплітудний вольтметр  $V_H$ , підключений до шунта  $R_H$ .

Вторинна обмотка  $N_2$  використовується для отримання напруги  $u_2$ , яка пропорційна швидкості зміни (похідній) магнітної індукції:

$$u_2 = -e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (12.8)$$

де  $S = 0,5 \cdot (D_1 - D_2) \cdot h$  – площа поперечного перерізу зразка феромагнетиту,  $m^2$ ;  $h$  – товщина зразка феромагнетиту,  $m$ ;  $N_2$  – число витків вторинної обмотки.

Діюче значення цієї напруги вимірюється вольтметром  $V_2$ . Напруга  $u_2$  інтегрується  $RC$ -інтегратором для формування напруги  $u_B$ , прямо пропорційної миттєвому значенню магнітної індукції  $B$  (12.8), і далі подається на вхід “у” осцилографа.

Таким чином, на входах “х” і “у” осцилографа формуються електричні напруги  $u_H$  і  $u_B$ , прямо пропорційні миттєвим значенням напруженості магнітного поля  $H$  і магнітної індукції  $B$ . Це дозволяє отримати на екрані осцилографа динамічну петлю магнітного гістерезису  $B(H)$  і за нею визначити основні властивості чи параметри феромагнетиту.

### **Визначення магнітної проникності за показаннями приладів**

За показаннями електровимірювальних приладів (рис. 12.5) можна визначити амплітудні значення напруженості  $H_m$  магнітного поля і магнітної індукції  $B_m$  у зразку феромагнетиту, що досліджується для подальшого розрахунку динамічної магнітної проникності  $\mu_{a\sim}$  (12.2).

Амплітуда напруженості  $H_m$  визначається відповідно до закону повного струму за показаннями вольтметра  $V_H$ , який реагує на амплітуду напруги на шунті  $R_H$ :

$$H_m = \frac{I_{m1} \cdot N_1}{l} = \frac{U_{mH} \cdot N_1}{R_H l}, \quad (12.9)$$

де  $I_{m1}$  – амплітуда змінного струму  $i_l$  в намагнічуючій (первинній) обмотці  $N_1$ ;  $N_1$  – число витків первинної обмотки;  $l = \frac{\pi(D_1 + D_2)}{2}$  – середня довжина магнітних силових ліній зразка феромагнетиту, виготовленого

у формі кільця;  $D_1, D_2$  – зовнішній і внутрішній діаметри зразка феромагнетика;  $U_{mH} = I_{m1} \cdot R_H$  – амплітуда напруги на шунті  $R_H$  (показання вольтметра  $V$ ).

Амплітуда магнітної індукції  $B_m$  розраховується відповідно до закону електромагнітної індукції на основі формули (12.7) за показаннями вольтметра  $V_2$ , який реагує на діюче значення напруги  $U_2$  на вторинній обмотці:

$$B_m = \frac{U_2}{4,44fN_2S}. \quad (12.10)$$

Результати розрахунків  $H_m$  і  $B_m$  за формулами (12.9) і (12.10) дозволяють визначити динамічну магнітну проникність  $\mu_{a\sim} = \frac{B_m}{H_m}$ .

### **Визначення магнітних втрат за площею петлі гістерезису**

Площа динамічної петлі гістерезису  $S_\Gamma$ , отриманої з допомогою осцилографа, характеризує втрачену енергію в одиниці об'єму  $V$  феромагнетика за кожний цикл його перемагнічування. Тому потужність магнітних втрат  $P_M$  (Вт) можна визначити за такою формулою:

$$P_M = P_\Gamma + P_f = S_\Gamma \cdot f \cdot m_B \cdot m_H \cdot V, \quad (12.11)$$

де  $S_\Gamma$  – площа динамічної петлі гістерезису на екрані осцилографа,  $\text{мм}^2$ ;  $f$  – циклічна частота перемагнічування феромагнетика, Гц;  $m_B = \frac{B_m}{l_{yM}}$  – масштаб по осі ординат (масштаб магнітної індукції), Тл/мм;  $l_{yM}$  – відхилення променя осцилографа по осі ординат відповідно амплітуді магнітної індукції  $B_m$  (12.10), мм;  $m_H = \frac{H_m}{l_{xM}}$  – масштаб по осі абсцис осцилографа (масштаб напруженості магнітного поля), А/м/мм;  $l_{xM}$  – відхилення променя осцилографа по осі абсцис відповідно амплітуді напруженості магнітного поля  $H_m$  (12.9), мм;  $V = 0,25 \cdot \pi \cdot (D_1^2 - D_2^2) \cdot h$  – об'єм зразка феромагнетика,  $\text{м}^3$ .

Питомі магнітні втрати (Вт/кг):

$$p_M = \frac{P_M}{m} = \frac{S_\Gamma \cdot f \cdot m_B \cdot m_H \cdot V}{m} = \frac{S_\Gamma \cdot f \cdot m_B \cdot m_H}{d}, \quad (12.12)$$

де  $m = d \cdot V$  – маса зразка феромагнетика, кг;  $d$  – щільність феромагнетика,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Регулюючи напругу  $u$  на обмотці  $N_1$  (рис. 12.5), можна отримати сімейство гістерезисних петель (рис. 12.2) та побудувати за ними основну криву намагнічування, яка зображена на рис. 12.2 пунктирною лінією, а також залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля  $\mu_a = f(H)$ , як це зображено на рис. 12.1, *a*. Далі за допомогою залежності  $\mu_a = f(H)$  при необхідності можна визначити інші значення магнітної проникності – початкову  $\mu_{an}$ , максимальну  $\mu_{am}$  та диференційну  $\mu_{ад}$ .

### **Визначення магнітних втрат за показаннями приладів**

Схема, зображена на рисунку 12.5, дозволяє для порівняння визначити ті ж самі властивості феромагнетика, але без використання осцилографа. Зокрема, магнітні втрати  $P_M$  (Вт) можна визначити за показаннями ватметра  $P_{W1}$  і амперметра  $A_1$ , тобто як

$$P_M = P_T + P_f = P_{W1} - I_1^2 R_1, \quad (12.13)$$

де  $R_1$  – активний опір первинної обмотки  $N_1$ .

Питомі магнітні втрати (Вт/кг) розраховуються за формулою:

$$p_M = \frac{P_M}{m} = \frac{P_M}{d \cdot V}. \quad (12.14)$$

### **Вимірювання комплексного магнітного опору**

Для розрахунків магнітопроводів часто використовують методи, аналогічні методам розрахунків електричних кіл синусоїдального струму. Зокрема, користуються символічним методом розрахунку з використанням комплексних чисел, в основі якого лежить синусоїдальний закон зміни напруги  $u = U_m \sin \omega t$  джерела живлення та характерних величин феромагнетиків. Для цього вводять поняття комплексного магнітного опору магнітопроводу, замінюючи магнітну індукцію  $B$  і напруженість  $H$  магнітного поля еквівалентними синусоїдальними функціями часу  $t$  ( $B = B_{me} \sin \omega t$  і  $H = H_{me} \sin \omega t$ ).

### **Еквівалентна петля гістерезису**

При синусоїдальній напрузі  $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$  (рис. 12.5), коли магнітна індукція в магнітопроводі також практично синусоїдальна, в якості

амплітуди  $B_{me}$  її еквівалентної синусоїди  $B = B_{me} \sin \omega t$  вибирають реальну амплітуду  $B_m$  ( $B_{me} = B_m$ ). Амплітуду  $H_{me}$  еквівалентної синусоїди  $H = H_{me} \sin \omega t$  напруженості магнітного поля доцільно вибрати, виходячи з рівності магнітних втрат. Для цього динамічну петлю гістерезису  $B = f(H)$  заміняють еквівалентним еліпсом з такою самою площею (рис. 12.6).

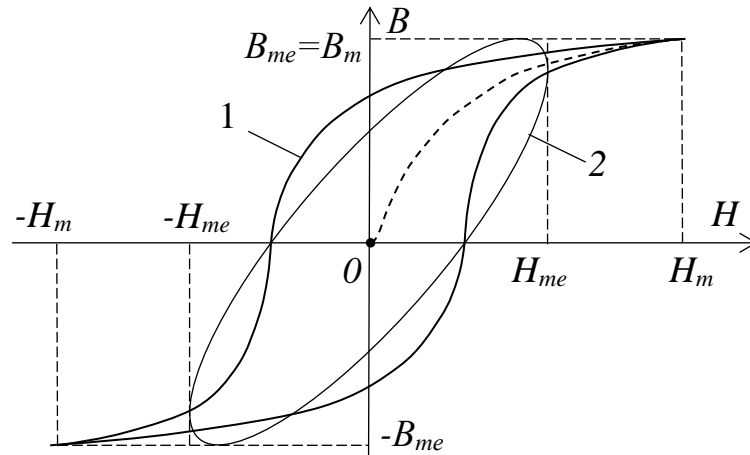


Рисунок 12.6 – Динамічна петля гістерезису (1) та еквівалентний еліпс (2)

При цьому амплітуду  $H_{me}$  еквівалентної синусоїди напруженості магнітного поля і магніторушійної сили (МРС)  $F_m$  можна визначити через діюче значення  $I_1$  еквівалентної синусоїди намагнічуючого струму  $i_1$  (показання амперметра  $A_1$  в схемі на рис. 12.5):

$$H_{me} = \frac{\sqrt{2} I_1 N_1}{l}; F_m = \sqrt{2} I_1 N_1. \quad (12.15)$$

#### Схема заміщення котушки з феромагнітним осердям

Після введення еквівалентних синусоїд котушку індуктивності з феромагнітним осердям (рис. 12.5) можна вважати лінійним елементом для конкретної незмінної за величиною напруги, побудувати векторну діаграму котушки і, відповідно, представити схему її заміщення (рис. 12.7).

У схемі заміщення котушки з феромагнітним осердям та на векторній діаграмі котушки використані такі позначення:

$R_1$  – активний опір котушки або намагнічуючої обмотки  $N_1$ , який враховує нагрів цієї обмотки електричним струмом  $I_1$ , Ом (рис. 12.5);

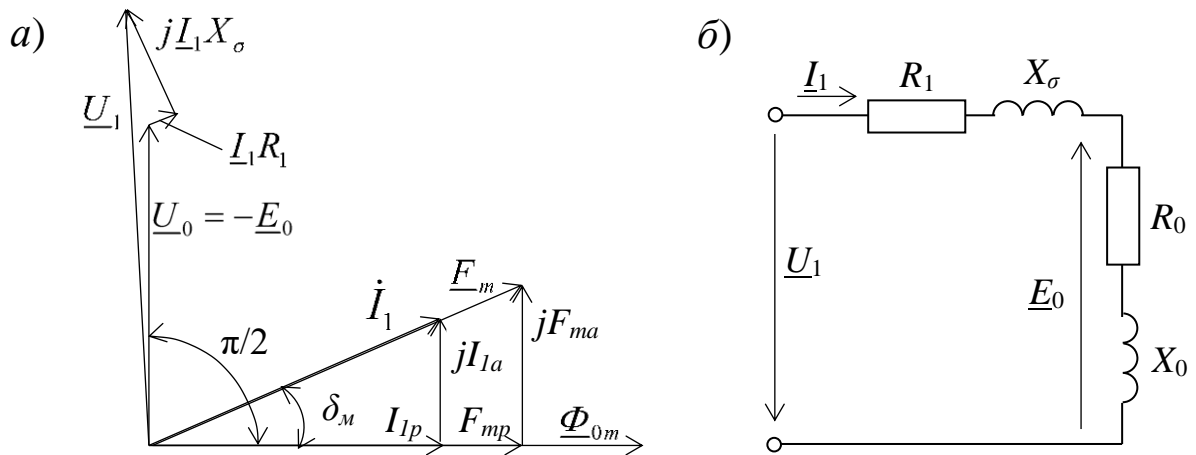


Рисунок 12.7 – Векторна діаграма (а) і схема заміщення (б) котушки з осердям

$$R_0 = \frac{P_M}{I_1^2} = \frac{U_0 \cdot I_{1a}}{I_1^2} - \text{активний опір, Ом, який враховує магнітні втрати}$$

$P_M$  у феромагнітному осерді котушки (12.13);

$I_1$  – діюче значення намагнічуючого струму (показання амперметра  $A_1$  в схемі на (рис. 12.5), який спричиняє напруженість магнітного поля амплітудою  $H_{me}$  і магніторушійну силу (МРС) амплітудою  $F_m$  (12.15);

$$U_0 = \frac{U_2 \cdot N_1}{N_2} - \text{основна складова прикладеної до котушки напруги } U_1$$

(12.6), яка зрівноважує ЕРС  $E_0$ , знаходиться з нею в протифазі і випереджає вектор основного магнітного потоку  $\Phi_{0m}$  за фазою на кут  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 12.7);

$N_1, N_2$  – число витків первинної і вторинної обмоток (рис. 12.5);

$I_1 R_1, I_1 X_\sigma$  – інші складові напруги  $U_1$  (рис. 12.7);

$$I_{1a} = \frac{P_M}{U_0} - \text{активна складова струму } I_1, \text{ яка зумовлена магнітними}$$

втратами  $P_M$  і спричиняє активну складову МРС  $F_{ma} = F_m \cdot \sin \delta_m$  (рис. 12.7, а);

$I_{1p} = \sqrt{I_1^2 - I_{1a}^2}$  – реактивна складова струму  $I_1$ , яка спричиняє реактивну складову МРС  $F_p = F_m \cdot \cos \delta_m$  і основний магнітний потік  $\Phi_{0m}$  (рис. 12.7, а);

$U_2$  – діюча напруга на вторинній обмотці  $N_2$  (показання вольтметра  $V_2$ );

$\delta_m$  – фазовий кут відставання магнітного потоку  $\Phi_{0m}$  від струму  $I_1$  та МРС  $F_m$  (кут магнітних втрат), який зумовлений магнітними втратами  $P_M$ ;

$\Phi_{0m} = B_m S$  – амплітуда основної частини магнітного потоку (Вб), що замикається у феромагнітному осерді і викликає в намагнічуючій обмотці електрорушійну силу (ЕРС)  $E_0$  (його комплексна амплітуда позначена на векторній діаграмі як  $\dot{\Phi}_{0m}$ );

$$B_m = \frac{U_2}{(4,44fN_2 \cdot S)} \text{ – амплітуда магнітної індукції в осерді (12.7), Тл;}$$

$S$  – площа поперечного перетину феромагнітного осердя, м<sup>2</sup>;

$f$  – циклічна частота зміни магнітного потоку, Гц;

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}, Z_0 = \frac{U_0}{I_1} \text{ – індуктивний і повний опори котушки,}$$

Ом, зумовлені основним магнітним потоком  $\Phi_{0m}$  (без врахування  $R_1$ );

$X_\sigma = -X_0 + \sqrt{Z^2 - (R_1 + R_0)^2}$  – індуктивний опір котушки, Ом, який зумовлений магнітним потоком розсіювання  $\Phi_\sigma$ ;

$$Z = \frac{U_1}{I_1} \text{ – повний опір котушки з феромагнітним осердем.}$$

### Визначення комплексного питомого магнітного опору

Для визначення магнітного опору скористаємося законом Ома для магнітного кола, який аналогічний закону Ома для електричних кіл.

*Комплексний магнітний опір:*

$$\underline{Z}_M = \frac{F_m}{\Phi_{0m}} = \frac{H_m \cdot l}{B_m \cdot S} = |Z_M| e^{j\delta_M} = \underline{\rho}_Z \frac{l}{S} = (\rho_R + j\rho_X) \frac{l}{S} = R_M + jX_M, \quad (12.16)$$

*Модуль комплексного магнітного опору, 1/Гн.*

$$|Z_M| = \frac{F_m}{\Phi_{0m}}.$$

Складові магнітного опору:

– *уявна складова магнітного опору*

$$X_M = \frac{F_{m\alpha}}{\Phi_{0m}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{1\alpha} \cdot N_1}{\Phi_{0m}} = \frac{\sqrt{2} \cdot P_M \cdot N_1}{\Phi_{0m} \cdot U_0} = \frac{P_M}{\Phi_{0m}^2 \pi \cdot f} = |Z_M| \sin \delta_M, \quad 1/\text{Гн};$$

– *дійсна складова магнітного опору,*

$$R_M = \frac{F_{mp}}{\Phi_{0m}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{1p} \cdot N_1}{\Phi_{0m}} = \sqrt{|Z_M|^2 - X_M^2} = |Z_M| \cos \delta_M, \quad 1/\text{Гн};$$

де  $\underline{F}_m$  – комплексна амплітуда магніторушійної сили, (А), модуль якої згідно із законом повного струму  $F_m = \sqrt{2}I_1 \cdot N_1 = H_{me}l$ ;  $\underline{\Phi}_{0m}$  – комплексна амплітуда основної частини магнітного потоку, Вб;  $l = \frac{\pi(D_1+D_2)}{2}$  – середня довжина магнітних силових ліній зразка феромагнетика, виготовленого у формі кільця (рис. 12.5);  $I_{1a} = \frac{P_M}{U_0}$  – активна складова струму  $I_1$ , яка зумовлена магнітними втратами  $P_M$  і спричиняє активну складову МРС:

$$F_{ma} = F_m \sin \delta_m = \sqrt{2}I_{1a} \cdot N_1;$$

$P_M = P_{W1} - I_1^2 R_1$  – магнітні втрати, Вт;  $P_{W1}$  – активна потужність, яку споживає котушка з феромагнітним осердям (показання ватметра  $W_1$  в схемі на рис. 12.5).

*Комплексний питомий магнітний опір*

$$\underline{\rho}_Z = Z_M \frac{S}{l} = \frac{\dot{H}_{me}}{\dot{B}_m} = \frac{1}{\dot{\mu}_{a\sim}} = \rho_Z \cdot e^{j\delta_m},$$

де  $\dot{\mu}_{a\sim}$  – комплексна динамічна магнітна проникність феромагнетика, Гн/м.

*Модуль питомого магнітного опору, м/Гн*

$$\rho_Z = \frac{H_{me}}{B_m} = \frac{\sqrt{2}I_1 N_1}{l B_m} = \sqrt{\rho_R^2 + \rho_X^2}, \text{ м/Гн}$$

Складові питомого магнітного опору:

– дійсна складова питомого магнітного опору

$$\rho_X = X_M \frac{S}{l} = \frac{P_M S}{\Phi_{0m}^2 l \pi \cdot f} = \rho_Z \sin \delta_m, \text{ м/Гн}$$

– уявна складова питомого магнітного опору

$$\rho_R = R_M \frac{S}{l} = \sqrt{\rho_Z^2 - \rho_X^2} = \rho_Z \cos \delta_m, \text{ м/Гн.}$$

### 12.3 Деякі магнітні матеріали

Магнітні матеріали можна розділити на три основні групи – *низькочастотні магнітні матеріали, високочастотні магнітні матеріали і магнітнотверді матеріали.*

### Низькочастотні магнітно-м'які матеріали

Магнітні матеріали з малим значенням коерцитивної сили  $H_c < 100$  А/м, великою магнітною проникністю  $\mu_a$ , відносно великим питомим електричним опором  $\rho$  і малими втратами на перемагнічування називають *магнітно-м'якими*. Низькочастотні магнітно-м'які матеріали застосовують для виготовлення магнітопроводів електричних машин, трансформаторів та інших пристроїв, в яких використовується змінний магнітний потік частотою від нуля (постійний магнітний потік) до декількох тисяч герц.

✓ *Технічно чисте залізо* містить невелику кількість (менше 0,1 %) домішок карбону, сульфур, мангану, силіцію та інших елементів, які погіршують його магнітні властивості. Через низький питомий опір ( $\rho = 0,1$  мкОм·м) технічно чисте залізо використовують зазвичай в постійному магнітному полі – для виготовлення магнітопроводів електричних машин постійного струму, полюсних наконечників електромагнітів та електровимірювальних приладів. У таблиці 12.1 наведені основні властивості декількох різновидів заліза.

**Таблиця 12.1 – Основні магнітні властивості заліза [5]**

Різновид заліза	Вміст домішок, %		Магнітні властивості		
			Відносна магнітна проникність		Коерци- тивна сила $H_c$ , А/м
	Карбон	Окси- ген	Почат- кова $\mu_{r n}$	Макси- мальна $\mu_{r m}$	
Технічно чисте	0,02	0,06	250	7000	64
Електролітичне	0,02	0,01	600	15000	28
Карбонільне	0,005	0,005	3300	21000	6,4
Електролітичне переплавлене у вакуумі	0,01	-	-	61000	7,2
Відпалене у водні	0,005	0,003	6000	200000	3,2

✓ *Кремениста електротехнічна сталь* – це сплав заліза з кремнієм. Наявність кремнію підвищує питомий електричний опір, що змен-



шує втрати на вихрові струми. Крім того, кремній сприяє виділенню карбону у вигляді графіту, а також майже повному розкисленню сталі, тобто переведенню кисню на шлак (кремнезем). Це призводить до збільшення  $\mu_{rn}$  та зменшення  $H_c$ . З іншого боку, наявність кремнію призводить до зменшення індукції насичення  $B_s$  та погіршення механічних властивостей (підвищується твердість та крихкість). Тому концентрація кремнію в сталі не повинна перевищувати 4,8 %.

Листи кременистої сталі виготовляють прокаткою заготовок у нагрітому чи холодному стані. Тому розрізняють гарячекатану та холоднокатану кременисті сталі. У процесі холодної прокатки (з великим обтиском та особливою термічною обробкою) одержують текстуровану сталь крупнокристалічної будови, в листах якої кристали орієнтовані осями легкого намагнічування у напрямку прокатки. Магнітні властивості такої сталі в напрямку прокатки значно кращі порівняно з гарячекатаною. Застосування холоднокатаних текстурованих сталей вимагає такої конструкції магнітопроводу, в якій магнітний потік проходить у напрямку найкращих магнітних властивостей, тобто в напрямку прокатки.

Сталь електротехнічна тонколистова (товщиною 0,1 ... 1 мм) випускається у вигляді листів чи рулонів, маркується чотирма цифрами [8].

**Перша цифра** означає клас, тобто структурний стан та вид прокатки:

- 1 – гарячекатана ізотропна;
- 2 – холоднокатана ізотропна;
- 3 – холоднокатана анізотропна з ребровою текстурою;
- 5 – холоднокатана ізотропна з площинною кубічною текстурою).

**Друга цифра** означає приблизну концентрацію кремнію:

- 0 – до 0,4 %;
- 1 – 0,4 ... 0,8 %;
- 2 – 0,8 ... 1,8 %;
- 3 – 1,8 ... 2,8 %;
- 4 – 2,8 ... 3,8 %;
- 5 – 3,8 ... 4,8 %.

**Третя цифра** означає групу за основними нормованими (гарантованими) характеристиками:

0 – питомі магнітні втрати на перемагнічування  $p_{1,7/50}$  при магнітній індукції  $B_m = 1,7$  Тл та частоті  $f = 50$  Гц;

1 –  $p_{1,5/50}$  при  $B_m = 1,5$  Тл та  $f = 50$  Гц;

2 –  $p_{1,0/400}$  при  $B_m = 1,0$  Тл та  $f = 400$  Гц;

4 –  $p_{0,5/3000}$  при  $B_m = 0,5$  Тл та  $f = 3000$  Гц;

6 – магнітна індукція  $B_{0,4}$  у слабких магнітних полях при напруженості поля  $H = 0,4$  А/м;

7 – магнітна індукція  $B_{10}$  у середніх магнітних полях при напруженості поля  $H = 10$  А/м).

**Четверта цифра** визначає порядковий номер типу сталі (з поліпшенням магнітних властивостей у міру зростання цього номера від 1 до 8).

Максимальна відносна магнітна проникність  $\mu_{r m}$ :

– гарячекатаних сталей (клас 1)  $\mu_{r m} = 3000 \dots 10000$ ,

– холоднокатаних (клас 3)  $\mu_{r m} > 40000$ .

Питомі магнітні втрати в сталі товщиною 0,35 мм:

– класу 1 (сталь 1513)  $p_{1,5/50} = 2,5$  Вт/кг;

– класу 2 (сталь 2411)  $p_{1,5/50} = 3,0$  Вт/кг;

– класу 3 (сталь 3414)  $p_{1,5/50} = 1,1$  Вт/кг.

Електротехнічну сталь застосовують в електричних машинах, апаратах та приладах, які працюють в середніх та сильних магнітних полях на змінному струмі промислової частоті (50 Гц) та при підвищеній частоті (400, 800 Гц).

✓ *Пермалой* – це сплав заліза з нікелем, який відзначається високою магнітною проникністю (особливо в слабких магнітних полях) та малою коерцитивною силою. Високо–нікелеві пермалої мають вміст нікелю 70...80 %, а низько–нікелеві – 40...50 %. Пермалої, наприклад, 79НМ, 80НХС маркуються так: число означає процентний вміст нікелю, буква Н визначає нікель, М – манган, Х – хром, С – карбон, К – кобальт, Д – купрум, П – з прямокутною петлею гістерезису.

Низько–нікелеві пермалої (45Н, 50Н, 50НХС) мають такі властивості:

$$\mu_{r n} = 1700 \dots 3200; \mu_{r m} = 15000 \dots 35000; H_c = 8 \dots 32 \text{ А/м};$$

$$B_m = 1,0 \dots 1,5 \text{ Тл}; \rho = 0,45 \dots 0,9 \text{ мкОм}\cdot\text{м}.$$

Високо-нікелеві пермалої (79НМ, 80НХС, 76НХД) мають такі властивості:

$$\mu_{r n} = 16000 \dots 35000; \mu_{r m} = 5000 \dots 22000; H_c = 1,0 \dots 5,2 \text{ А/м};$$
$$B_m = 0,65 \text{ Тл}; \rho = 0,55 \text{ мкОм}\cdot\text{м}.$$

Пермалої поряд з хорошими магнітними властивостями мають недоліки – містять дефіцитний нікель, потребують складної термообробки, під дією механічного напруження магнітні властивості помітно погіршуються, мають нижчі значення магнітної індукції насичення  $B_s$  та питомого електричного опору  $\rho$  порівняно з електротехнічною сталлю. Сплави виготовляють у вигляді холоднокатаних стрічок товщиною 0,02...2,5 мм, гарячекатаних та кованих прутків діаметром 8...10 мм. Застосовують пермалої для виготовлення осередь малогабаритних трансформаторів, дроселів, імпульсних трансформаторів, магнітних підсилувачів, магнітних екранів.

✓ *Альсифер* – сплав заліза  $Fe$  (84,9 %) з кремнієм  $Si$  (9,5 %) та алюмінієм  $Al$  (5,6 %). За своїми основними властивостями альсифер майже не поступається високо-нікелевим пермалоєм:

$$\mu_{r n}=35000; \mu_{r m}=120000; H_c=1,8 \text{ А/м}; B_m=1,8 \text{ Тл}; \rho=0,8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}.$$

Але через труднощі одержання точного складу компонентів промислові альсифери мають значно гірші показники. Через підвищену твердість та крихкість альсиферу вироби з нього виготовляють литвом з товщиною стінки не менше 2 мм.

✓ *Аморфні сплави* містять один або декілька перехідних металів (залізо  $Fe$ , нікель  $Ni$ , кобальт  $Co$ ) у кількості 75...85 % як основну складову та металоїд – склоутворювач (бор  $B$ , вуглець  $C$ , кремній  $Si$ , фосфор  $P$ ) у кількості 15...20 %. Аморфні сплави містять легуючі метали (хром  $Cr$ , тантал  $Ta$ , ванадій  $V$ , марганець  $Mn$ ), які надають їм специфічних властивостей. Аморфні сплави формують при дуже швидкому охолодженні, коли частинки не встигають вишикуватися в кристалічну структуру. За властивостями аморфні сплави близькі до пермалоїв, але менш підвладні впливу механічних напружень, мають високу корозійну стійкість та міцність при збереженні пластичності. При цьому питомий електричний опір аморфних сплавів у 2...3 рази більший, ніж у пермалоїв, що значно

зменшує втрати на вихрові струми. Завдяки відносній простоті технології виготовлення аморфні сплави набули широкого застосування.

### **Високочастотні магнітно-м'які матеріали**

✓ *Магнітодіелектрик* – це пластична маса, яку пресують з використанням діелектрика як сполучного (фенол-формальдегідна смола, полістирол, бакеліт, нітролаки, скло) і порошку магнітно-м'якого феромагнетика в якості наповнювача (альсифер, пермалой, ферум карбоніл). Магнітодіелектрики мають дуже великий питомий електричний опір, і тому їх використовують при високих частотах ( $f = 0,1 \dots 100$  МГц). З іншого боку, наявність проміжків між феромагнітними частинками суттєво знижує магнітну проникність матеріалу ( $\mu_r = 10 \dots 250$ ) і магнітну індукцію насичення ( $B_s = 0,3 \dots 0,4$  Тл). З магнітодіелектриків виготовляють кільцеві, циліндричні та броньові осердя для роботи в слабких високочастотних магнітних полях.

✓ *Магнітно-м'які ферити* – це хімічні сполуки ферум(III) оксиду  $Fe_2O_3$  з оксидами деяких металів відповідно до формули  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , де  $Me$  – символ двовалентних металів (марганцю  $Mn$ , нікелю  $Ni$ , цинку  $Zn$ , кобальту  $Co$ ). Ферити поєднують хороші магнітні властивості з надзвичайно високим питомим електричним опором, який в  $10^6 \dots 10^{11}$  разів більший відносно металевих феромагнетиків. При виготовленні феритових виробів попередньо одержують порошок із тонкоподрібнених, перемішаних і попередньо обпалених оксидів відповідних металів. До порошку додають пластифікатор та одержаної маси пресують під великим тиском виробити потрібної форми і обпалюють їх при температурі  $1100 \dots 1400^\circ C$ .

Початкова магнітна проникність магнітно-м'яких феритів  $\mu_{r n}$  коливається від декількох одиниць до 20000, максимальна магнітна проникність  $\mu_{r m} = 35000$ , коерцитивна сила  $H_c = 8 \dots 2240$  А/м, індукція насичення  $B_s = 0,08 \dots 0,5$  Тл, тангенс кута магнітних втрат  $tg\delta_m = 0,005 \dots 0,1$ . Питомий електричний опір феритів ( $\rho = 0,001 \dots 10^{10}$  Ом·м), і тому магнітні втрати від вихрових струмів дуже малі. Більшість феритів мають малі втрати на гістерезис.

Найбільш поширені у використанні ферити: марганцево-цинкові, нікелево-цинкові, літєво-цинкові. Маркування феритів (наприклад, 20000НМ, 600НН, 20ВЧ2):

- перше число – початкова магнітна проникність,
- подальші букви позначають частотний діапазон роботи:
  - Н – низькочастотні ферити ( $f=0,1...50$  МГц),
  - ВЧ – високочастотні ферити ( $f=50...600$  МГц).
- далі буквами позначається склад фериту:
  - М – марганцево-цинковий,
  - Н – нікелево-цинковий,
  - Л – літєво-цинковий;
- подальші цифри означають різновид фериту.

Магнітно-м'які ферити використовують для виготовлення осердь високочастотних котушок індуктивності, трансформаторів, магнітних антен, деталей відхиляючих систем вакуумних трубок і багатьох інших пристроїв високочастотної (більше 1000 Гц) та імпульсної техніки.

### **Магнітно–тверді матеріали**

Матеріали з дуже великою коерцитивною силою  $H_c$  називають магнітно-твердими. Вони намагнічуються чи перемагнічуються в дуже сильних магнітних полях і використовуються в основному для виготовлення постійних магнітів. Магнітно-твердими умовно вважають матеріали, в яких  $H_c > 4000$  А/м. У кращих магнітно-твердих матеріалів  $H_c > 500\,000$  А/м. Магнітно-тверді матеріали поділяються на леговані мартенситні сталі, литі магнітно-тверді сплави, металопорошкові магніти і магнітно-тверді ферити.

### **Крива розмагнічування і густина магнітної енергії**

Основними характеристиками магнітно-твердих матеріалів є коерцитивна сила  $H_c$ , залишкова магнітна індукція  $B_r$ , а також крива розмагнічування  $B = f(H)$  як частина граничної петлі гістерезису (рис. 12.2) і крива густини енергії магнітного поля  $w_m = \frac{B \cdot H}{2}$  (9.27) в повітряному проміжку  $l$  (в робочому просторі) постійного магніту (рис. 12.8).

Густина енергії магнітного поля  $w_m$  у повітряному зазорі суттєво залежить від величини цього зазору  $l$ . При замкнутому стані магнітного кола постійного магніту, коли  $l = 0$  і  $B = B_r$ , магнітна енергія в зазорі нульова через нульове значення  $H$ . При дуже великому зазорі, коли

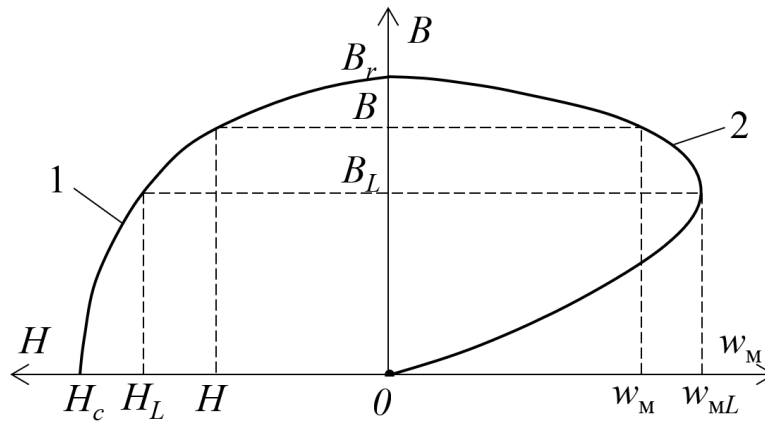


Рисунок 12.8 – Криві розмагнічування (1) і густини енергії магнітного поля (2)

$l = \max$  і  $H = H_c$ , магнітна енергія в зазорі також практично нульова через майже нульове значення  $B$ . Отже, при деякій (оптимальній) величині зазору  $l = L$ , коли  $B = B_L$  і  $H = H_L$ , густина магнітної енергії в робочому просторі сягає свого максимуму ( $w_M = w_{ML} = \max$ ). Для характеристики магнітно-твердих матеріалів використовують добуток  $B_L \cdot H_L$  або коефіцієнт випуклості  $\gamma$  кривої розмагнічування [5]:

$$\gamma = \frac{B_L \cdot H_L}{2B_r \cdot H_c}. \quad (12.17)$$

✓ *Легована мартенситна сталь* – найбільш простий і доступний матеріал для виготовлення постійних магнітів. Ця сталь легується домішками хрому  $Cr$  (1,3...10 %), вольфраму  $W$  (0...6,2 %), кобальту  $Co$  (0...16,5 %) і молібдену  $Mo$  (0...1,7 %). Її основні магнітні властивості:

$$H_c = 4,6 \dots 13,6 \text{ кА/м}, B_r = 0,8 \dots 1,0 \text{ Тл}, w_{ML} = 1 \dots 4 \text{ кДж/м}^3.$$

Ці властивості гарантуються після термообробки мартенситної сталі і 5-годинної структурної стабілізації в кип'ячій воді [5]. Леговані мартенситні сталі мають обмежене використання через їх невисокі магнітні властивості. Головна перевага мартенситних сталей – невисока ціна і простота механічної обробки.

✓ *Литі магнітно-тверді сплави* – це сплави заліза  $Fe$  з алюмінієм  $Al$  і нікелем  $Ni$  (сплави альні) з додаванням кремнію  $Si$  (альнісі) або кобальту  $Co$  (альніко або магніко). Після спеціальної обробки ці сплави отримують такі властивості [5]:

$$H_c = 40 \dots 87 \text{ кА/м}, B_r = 0,5 \dots 1,33 \text{ Тл}, w_{ML} = 3,6 \dots 26,4 \text{ кДж/м}^3, \\ \gamma = 0,34 \dots 0,74.$$

Литі магнітно-тверді сплави за своїми магнітними властивостями в декілька разів кращі відносно легованих мартенситних сталей. Основним їх недоліком є труднощі виготовлення виробів з точними розмірами через підвищену твердість і крихкість.

✓ *Метало-порошкові магніти* виготовляють методами порошкової металургії. Розрізняють два різновиди цих магнітів – металокерамічні і метало-пластичні. Металокерамічні магніти виготовляють шляхом пресування дрібнодисперсного порошку литого магнітно-твердого сплаву з подальшим спіканням при високих температурах аналогічно процесу відпалу кераміки. Метало-пластичні магніти виготовляють із зерен литого магнітно-твердого сплаву, скріплених сполучним, аналогічно виготовленню пластмасових деталей. Металопорошкові магніти використовують при масовому виготовленні деталей за достатньо точними розмірами, які не потребують подальшої механічної обробки.

Металокерамічні магніти мають механічну міцність, що в декілька разів перевищує механічну міцність литих магнітно-твердих сплавів, але на 10...20 % гірші магнітні властивості. Наприклад, з порошку магніко (8 % *Al* + 15 % *Ni* + 24 % *Co* + 3 % *Cu*) виробляють металокерамічні магніти з такими властивостями [5]:

$$H_c = 50 \text{ кА/м}, B_r = 1,0 \text{ Тл}, w_{ML} = 11,7 \text{ кДж/м}^3, \gamma = 0,47.$$

Дуже велику коерцитивну силу  $H_c$  мають металокерамічні магніти на основі сплавів кобальту *Co* (61,5...64 %) з рідкоземельними металами (36...38,5 %) – самарієм *Sm* і празеодімом *Pr* [5] у яких:

$$H_c = 500 \dots 560 \text{ кА/м}, B_r = 0,77 \dots 0,9 \text{ Тл}, w_{ML} = 5 \dots 72 \text{ кДж/м}^3.$$

Метало-пластичні магніти за своїми магнітними властивостями суттєво поступаються литим магнітно-твердим сплавам через велику кількість немагнітного сполучного. Наприклад, із зерен альні (15 % *Al* + 24 % *Ni* + 4 % *Cu*) виробляють метало-пластичні магніти з такими властивостями [5]:

$$H_c = 38 \text{ кА/м}, B_r = 0,3 \text{ Тл}, w_{ML} = 1,62 \text{ кДж/м}^3, \gamma = 0,28.$$

✓ *Магнітно-тверді ферити* – це зазвичай барієві ферити ( $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Розрізняють дві марки барієвих магнітів – ізотропні і анізотропні. Барієві ізотропні магніти, виробництво яких подібне виробництву магнітно-м'яких феритів, мають такі властивості [5]:

$$H_c = 114 \dots 144 \text{ кА/м}, B_r = 0,18 \dots 0,22 \text{ Тл}, w_{ML} = 2,8 \dots 4,4 \text{ кДж/м}^3.$$

Барієві анізотропні магніти, виробництво яких передбачає пресування в постійному магнітному полі напруженістю до 800 кА/м, мають такі властивості [5]:

$$H_c = 128 \dots 240 \text{ кА/м}, B_r = 0,3 \dots 0,4 \text{ Тл}, w_{ML} = 8,0 \dots 14,0 \text{ кДж/м}^3.$$

Барієві магніти виготовлять у вигляді шайб або тонких дисків, мають високу стабільність під впливом зовнішніх магнітних полів. Недоліком барієвих магнітів є низька механічна міцність, крихкість і сильна залежність магнітних властивостей від температури.

## 12.4 Приклади розрахунку завдань з визначення параметрів магнітних матеріалів

### Розрахунок сили дії магнітного поля на провідник зі струмом

Завдання. Визначити силу дії магнітного поля на провідник зі струмом  $I = 20 \text{ А}$  в повітряному зазорі електромагніту, а також магнітну енергію  $W_M$  електромагніту. В намагнічуючій котушці електромагніту створений постійний електричний струм  $I_K = 2 \text{ А}$ . Число витків котушки  $N = 500$ . Феромагнітне осердя котушки має форму розімкненого кільця з повітряним зазором  $\delta = 2 \text{ мм}$  (рис. 12.9). Зовнішній діаметр феромагнітного кільця  $D_1 = 20 \text{ см}$ , внутрішній діаметр  $D_2 = 16 \text{ см}$ , товщина  $b = 2 \text{ см}$ . Відносна магнітна проникність феромагнітного осердя  $\mu_r = 1000$ .

Розв'язок. Згідно з законом повного струму

$$H \cdot l + H_\delta \cdot \delta = I_K \cdot N,$$

де  $H = \frac{B}{\mu_a}$  – магнітна напруженість в кільці, А/м;  $\mu_a = \mu_r \cdot \mu_0$  – абсолютна магнітна проникність феромагнітного осердя;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  –



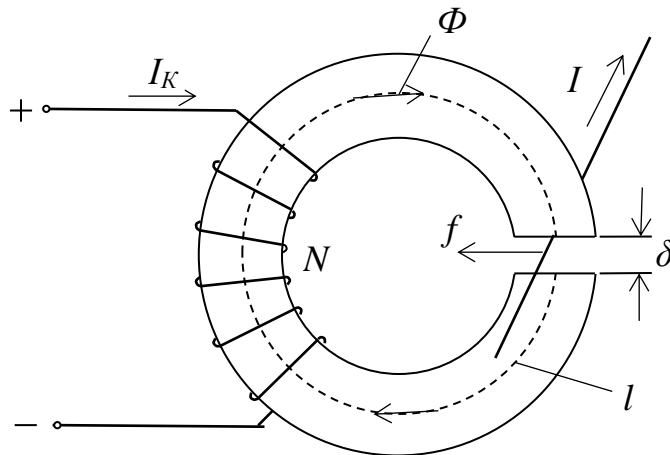


Рисунок 12.9 – Схема котушки з розімкненим кільцевим осердям

абсолютна магнітна проникність повітря;  $B$  – магнітна індукція у феромагнітному кільці і повітряному зазорі, Тл;  $l$  – середня довжина магнітних силових ліній кільцеподібного феромагнітного осердя;  $H_\delta = \frac{B}{\mu_0}$  – магнітна напруженість у повітряному зазорі, А/м.

Середня довжина магнітних силових ліній кільцеподібного феромагнітного осердя:

$$l = \frac{\pi \cdot (D_1 + D_2)}{2 - \delta} = \frac{\pi \cdot (0,2 + 0,16)}{2 - 0,002} = 0,5632 \text{ м.}$$

Магнітна індукція  $B$  у повітряному зазорі

$$B = \frac{I_k N \mu_0}{\frac{l}{\mu_r} + \delta} = \frac{2 \cdot 500 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{\frac{0,5632}{1000} + 0,002} = 0,49 \text{ Тл.}$$

Силу дії магнітного поля на провідник зі струмом у повітряному зазорі електромагніту можна розрахувати за формулою Ампера:

$$f = I \cdot b \cdot B \cdot \sin \alpha = 20 \cdot 0,02 \cdot 0,49 \cdot 1 = 0,196 \text{ Н,}$$

Енергію  $W_M$  електромагніту можна визначити за виразами:

$$W_M = \frac{\Phi N I_k}{2} = \frac{B S N I_k}{2} = \frac{0,49 \cdot 0,0004 \cdot 500 \cdot 2}{2} = 0,098 \text{ Дж;}$$

$$W_M = \frac{B \cdot H}{2} V + \frac{B \cdot H_\delta}{2} V_\delta = \frac{B^2 S}{2\mu_0} \left( \frac{l}{\mu_r} + \delta \right) =$$

$$\frac{0,49^2 \cdot 0,0004}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} \left( \frac{0,5632}{1000} + 0,002 \right) = 0,098 \text{ Дж,}$$

де  $S$  – площа поперечного перетину феромагнітного кільця;  $\Phi = B \cdot S$  – магнітний потік, Вб;  $V = l \cdot S$  – об’єм феромагнітного осердя котушки електромагніту;  $V_\delta = \delta \cdot S$  – об’єм повітряного зазору феромагнітного осердя.

Площа поперечного перетину феромагнітного кільця

$$S = 0,5 \cdot (D_1 - D_2) \cdot b = 0,5 \cdot (0,2 - 0,16) \cdot 0,02 = 0,0004 \text{ м}^2.$$

### Розрахунок параметрів феромагнетику

Завдання. Дослідження кільцеподібного зразка феромагнетику за схемою на рис. 12.5 дали наступні показання електровимірвальних приладів: діюче значення струму (показання амперметра  $A_1$ ) та активна потужність  $P$  (показання ватметра  $W_1$ ), які споживає намагнічуюча обмотка з числом витків  $N_1 = 900$  при частоті 50 Гц, складають  $I_1 = 0,2$  А і  $P = 10$  Вт; діюча напруга  $U_2$  на вторинній обмотці з числом витків  $N_2 = 300$  (показання вольтметра  $V_2$ ) складає  $U_2 = 25$  В. Активний опір намагнічувальної обмотки  $R_1 = 200$  Ом. Зразок феромагнетику має зовнішній діаметр  $D_1 = 20$  см, внутрішній  $D_2 = 16$  см, товщину  $b = 2$  см і щільність  $d = 7800$  кг/м<sup>3</sup>. Визначити динамічну магнітну проникність  $\mu_{a\sim}$ , магнітні втрати  $P_M$ , питомі магнітні втрати  $p_M$  і тангенс кута магнітних втрат  $tg\delta_M$  феромагнетику.

Розв’язок. Амплітуда магнітної індукції у феромагнетику

$$B_m = \frac{U_2}{4,44fN_2S} = \frac{25}{4,44 \cdot 50 \cdot 300 \cdot 0,0004} = 0,938 \text{ Тл},$$

де  $S$  – площа поперечного перетину феромагнітного кільця:

$$S = 0,5 \cdot (D_1 - D_2) \cdot b = 0,5 \cdot (0,2 - 0,16) \cdot 0,02 = 0,0004 \text{ м}^2.$$

Амплітуда еквівалентної синусоїди напруженості магнітного поля

$$H_{me} = \frac{\sqrt{2}I_1N_1}{l} = \frac{\sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot 900}{0,565} = 450 \text{ А/м},$$

де  $l = \frac{\pi(D_1+D_2)}{2} = \frac{\pi(0,2+0,16)}{2} = 0,565$  м – середня довжина магнітних силових ліній кільцеподібного феромагнітного зразка.

Абсолютна та відносна динамічна магнітна проникність феромагнетику

$$\mu_{a\sim} = \frac{B_m}{H_m} = \frac{0,938}{450} = 0,002084 \text{ Гн/м}; \quad \mu_{r\sim} = \frac{\mu_{a\sim}}{\mu_0} = \frac{0,002084}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 1659.$$

Магнітні втрати у феромагнетику

$$P_M = P_{W1} - I_1^2 R_1 = 10 - 0,2^2 \cdot 200 = 2 \text{ Вт.}$$

Питомі магнітні втрати

$$p_M = \frac{P_M}{m} = \frac{P_M}{d \cdot V} = \frac{2}{7800 \cdot 0,0002261} = 1,134 \text{ Вт/кг,}$$

де  $V = \frac{\pi}{4}(D_1^2 - D_2^2) \cdot b = \frac{\pi}{4}(0,2^2 - 0,16^2) \cdot 0,02 = 0,0002261 \text{ м}^3$  – об'єм зразка феромагнітного кільця.

Тангенс кута магнітних втрат

$$\text{tg} \delta_M = \frac{I_{1a}}{I_{1p}} = \frac{0,02667}{0,1982} = 0,1346,$$

де  $I_{1a}$  – активна складова струму  $I_1$ , яка зумовлена магнітними втратами  $P_M$  і спричиняє активну складову магніторухійної сили;  $U_0$  – основна складова прикладеної до котушки напруги;  $I_{1p}$  – реактивна складова струму  $I_1$ , яка спричиняє реактивну складову магніторухійної сили.

активна складова струму  $I_1$ :

$$I_{1a} = \frac{P_M}{U_0} = \frac{2}{75} = 0,02667 \text{ А};$$

основна складова прикладеної до котушки напруги:

$$U_0 = \frac{U_2 \cdot U_1}{N_2} = \frac{25 \cdot 900}{300} = 75 \text{ В};$$

реактивна складова струму  $I_1$ :

$$I_{1p} = \sqrt{I_1^2 - I_{1a}^2} = \sqrt{0,2^2 - 0,02667^2} = 0,1982 \text{ А.}$$

## Контрольні питання

1. Поясніть процес намагнічування матеріалу.
2. Яким фізичним законам підкоряється процес намагнічування матеріалу?
3. Яким чином створюється магнітне поле у феромагнетику?
4. Назвати головну відмінність феромагнетиків і феритів від інших матеріалів. Які головні функції здатний виконувати феромагнетик?
5. Поясніть явище магнітострикції. Які існують характеристики процесу намагнічування матеріалу?
6. Поясніть явище магнітної анізотропії.
7. Поясніть залежність процесу намагнічування феромагнетику від температури.
8. Поясніть зв'язок між магнітною індукцією і напруженістю магнітного поля феромагнетику. Що таке основна крива намагнічування?
9. Поясніть залежність магнітного потоку і магнітної індукції від електричного струму в намагнічуючій обмотці.
10. Що таке процес магнітного насичення феромагнетику?
11. Поясніть практичну цінність феромагнетиків. В яких ситуаціях стає вигідніше використовувати повітря чи вакуум порівняно з магнітними матеріалами для створення магнітного поля?
12. Що таке абсолютна і відносна магнітна проникність?
13. В якій мірі магнітна проникність феромагнетику може відрізнитись від магнітної проникності діелектрика чи вакууму?
14. Чим обумовлена підвищена магнітна проникність феромагнетиків?
15. Що таке початкова і максимальна магнітна проникність? Поясніть техніко-економічні переваги феромагнетиків з підвищеною магнітною проникністю.
16. В яких випадках виникає потреба в перемагнічуванні магнітних матеріалів?
17. Поясніть поняття магнітного гістерезису.
18. Що таке втрати на гістерезис і як можна зменшити ці втрати?
19. Поясніть поняття коерцитивної сили і залишкової магнітної індукції.

20. Що таке втрати на вихрові струми і як можна зменшити ці втрати?
21. Поясніть відмінності динамічної петлі гістерезису від статичної петлі.
22. Що таке динамічна магнітна проникність?
23. Чим відрізняються магнітні втрати феромагнетика від втрат на гістерезис і вихрові струми?
24. Яким чином впливає частота перемагнічування феромагнетика на магнітні втрати?
25. В яких випадках підмагнічують феромагнетики постійною складовою струму чи напруженості магнітного поля?
26. Який існує взаємозв'язок між напругою джерела змінного струму і магнітною індукцією?
27. Поясніть причину залежності напруженості магнітного поля і електричного струму в намагнічуючій обмотці від величини напруги джерела живлення.
28. В яких випадках електричний струм в намагнічуючій обмотці може суттєво збільшуватись при незначному збільшенні напруги, прикладеної до цієї обмотки?
29. Поясніть схему вимірювання основних магнітних характеристик феромагнетиків.
30. Як потрібно формувати електричні сигнали для отримання осцилограми динамічної петлі гістерезису?
31. Поясніть можливість визначення магнітних втрат за осцилограмою динамічної петлі гістерезису.
32. Як за показаннями амперметра і ватметра можна визначити магнітні втрати?
33. Поясніть можливість вимірювання магнітної проникності феромагнетика з допомогою звичайних електровимірювальних приладів.
34. Поясніть поняття еквівалентної петлі гістерезису.
35. Як можна визначити амплітуду еквівалентної синусоїди напруженості магнітного поля і намагнічуючої сили за показаннями амперметра в колі намагнічуючої обмотки?
36. Що таке комплексний магнітний опір і питомий магнітний опір і як їх можна визначити?

37. Поясніть поняття дійсної і уявної складових магнітного опору і питомого магнітного опору.

38. Який існує зв'язок між уявною складовою питомого магнітного опору і магнітними втратами?

39. Поясніть схему заміщення котушки з феромагнітним осердям. Яким чином можна визначити параметри схеми заміщення котушки з феромагнітним осердям?

40. Що таке магнітний потік розсіювання і як він впливає на параметри схеми заміщення котушки?

41. Поясніть векторну діаграму котушки з феромагнітним осердям. Яким чином впливають магнітні втрати на фазовий зсув між намагнічуючим струмом і основним магнітним потоком?

42. Поясніть поняття кута магнітних втрат і методику визначення його величини.

43. Які магнітні характеристики є найбільш важливими для магнітно-м'яких матеріалів?

44. Назвати найбільш поширені та відомі магнітно-м'які низькочастотні матеріали.

45. Чим відрізняється електротехнічна сталь від звичайної (конструкційної) сталі?

46. Назвати основні складові пермалою. Що таке аморфні сплави і які переваги вони мають над пермалоем?

47. Назвати основні складові альсиферу, технологію його отримання та область використання.

48. В яких діапазонах частот використовуються низькочастотні і високочастотні магнітно-м'які матеріали?

49. В чому полягає основна особливість магнітно-м'яких високочастотних матеріалів?

50. Назвати основну відмінність магнітодіелектриків від звичайних діелектриків.

51. Назвати основні складові феритів, технологію їх отримання та область використання.

52. Які магнітні характеристики є найбільш важливими для магнітно-твердих матеріалів?

53. Поясніть криву розмагнічування магнітно-твердих матеріалів.

54. Що таке щільність енергії магнітного поля в робочому просторі і чим вона важлива для магнітно-твердих матеріалів?

55. Яку послідовність значень коерцитивної сили та залишкової магнітної індукції можуть мати магнітно-тверді матеріали?

56. Чому неможливо використовувати магнітно-тверді матеріали в змінному магнітному полі?

57. Яким чином можна створити змінне магнітне поле за допомогою постійного магніту?

58. Які переваги мають металопорошкові магніти над литими з магнітно-твердих сплавів?

59. Назвіть основні складові магнітно-твердих феритів, технологію їх отримання та область застосування.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Півняк Г.Г. Електричні машини: Навчальний посібник [Текст] / Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. – Д.: Національний гірничий університет, 2003 – 327 с.

2. Oleksii B. Ivanov, Fedir P. Shkrabets, Jan Zawilak. Electrical generators driven by renewable energy systems. - Poland, Wroclaw, Wroclaw University of Technology, 2011.

3. Шкрабець Ф.П. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник [Текст] / Ф.П. Шкрабець, Д.В. Циценков, Ю.В. Куваєв, О.Б. Іванов, В.І. Панченко, А.А. Колб; Дніпропетровськ: –Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2004 – 515 с.

4. Шкрабець Ф.П. Збірник задач з електротехніки та основ електроніки [Текст] / Шкрабець Ф.П., Циценков Д.В. – Д.: Національний гірничий університет, 2006 – 258 с.

5. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. - 7-е изд., перераб. и доп. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. - 304 с.

6. Колесов С.М., Колесов І.С. Електроматеріалознавство: Підручник. – К.: «Видавництво Дельта», 2008. – 516 с.

7. Колесов С.Н., Колесов І.С. Электротехнические и конструкционные материалы: Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей вузов. – К.: Транспорт Украины, 2002.– 384 с.

8. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах / Под ред. Ю.В.Корицкого, В.В.Пасынкова, Б.М.Тареева - М.: Энергоатомиздат, 1986 - 368 с. ; 1987 - 464 с. ; 1988 - 728 с.

9. Електротехнічні матеріали: навч. посіб. / А.С. Головченко, Д.В. Циценков, А.А. Колб, А.В. Ніколенко; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро: НТУ "ДП", 2021. – 184 с.



10. Електроматеріалознавство: Підруч. / Л.В. Журавльова, В.М. Бондар. – К.: Грамота, 2006.-312 с.
11. Проєктування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Циценков, О.Б Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д.: НТУ«ДП», 2020. – 408 с.
12. Бовсуновський А.П. Електротехнічні матеріали: Корот. довідник – К.: НУХТ, 2012. – 36 с.
13. Матеріалознавство: Підручник / Є.Г. Афтандіянц, О.В. Зазимко, К.Г. Лопатько. - Херсон: Олді-плюс, К.: Видавництво Ліра-К, 2013. - 612 с.
14. Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 188 с.
15. Полянський, П. М. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів [Електронний ресурс] : конспект лекцій / П. М. Полянський. — Електрон. текст. дані. – Миколаїв : МНАУ, 2014. – 111 с. <http://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/3290>
16. Матеріалознавство: підруч. / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, Т.С. Климова, І.Г. Черниш. – К.: НАУ, 2012. – 492 с
17. Попович В. Технології конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Навчальний посібник / В. Попович, В. Голубець. – Суми: Університетська книга, 2012. – Книга II. – 260 с.
18. Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали. Навчальний посібник / Куцова В.З., Носко О.А., Ковзель М.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. – 163 с.
19. Романова Н.В. Загальна та неорганічна хімія [Текст] / Н.В. Романова. – К., Ірпінь : Перун, 2002. – 480 с.
20. Хімія: Навч. посібник / П.О. Єгоров, В.Д. Мешко та ін. – Д.: Х46 Національний гірничий університет, 2014. – 263 с.
21. Неорганічна хімія. Підручник / Панасенко О.І., Голуб А.М., Андрійко О.О. Магнолія 2006, – 2019, 462с.

# ДОДАТКИ

## Додаток 1

### ТАБЛИЦЯ ПЕРЕВОДІВ ТВЕРДОСТІ

Твердість за Роквеллом			Твердість за Вікіресом HV	Твердість за Брінелем HB	Твердість за Шором, HS
Шкала А, HRA	Шкала В, HRB	Шкала С, HRC			
85,6	-	68	940	-	97
85	-	67	900	-	95
84,5	-	66	865	-	92
83,9	-	65	832	-	91
83,4	-	64	800	-	88
82,8	-	63	772	-	87
82,3	-	62	746	-	85
81,8	-	61	720	-	83
81,2	-	60	697	-	81
80,7	-	59	674	-	80
80,1	-	58	653	615	78
79,6	-	57	633	595	76
79	-	56	613	577	75
78,5	-	55	595	560	74
78	-	54	577	543	72
77,4	-	53	560	525	71
76,8	-	52	544	512	69
76,3	-	51	528	496	68
75,9	-	50	513	481	67
75,2	-	49	498	469	66
74,7	-	48	484	451	64
74,1	-	47	471	442	63
73,6	-	46	458	432	62
73,1	-	45	446	421	60
72,5	-	44	434	409	58
72	-	43	423	400	57
71,5	-	42	412	390	56
70,9	-	41	402	381	55
70,4	-	40	392	371	54
69,9	-	39	382	362	52
69,4	-	38	372	353	51
68,9	-	37	363	344	50
68,4	109	36	354	336	49

## Закінчення додатку 1

Твердість за Роквеллом			Твердість за Вікіресом HV	Твердість за Брінелем HB	Твердість за Шором, HS
Шкала А, HRA	Шкала В, HRB	Шкала С, HRC			
67,9	108,5	35	345	327	48
67,4	108	34	336	319	47
66,8	107,5	33	327	311	46
66,3	107	32	318	301	44
65,8	106	31	310	294	43
65,3	105,5	30	302	286	42
64,7	104,5	29	294	279	41
64,3	104	28	286	271	41
63,8	103	27	279	264	40
62,3	102,5	26	272	258	38
62,8	101,5	25	266	253	38
62,4	101	24	260	247	37
62	100	23	254	243	36
51,5	99	22	248	237	35
61	98,5	21	243	231	35
60,5	97,8	20	238	226	34
-	69,7	18	230	219	33
-	95,5	16	222	212	32
-	93,9	14	213	203	31
-	92,3	12	204	194	29
-	90,7	10	196	187	28
-	89,5	8	188	179	27
-	87,1	6	180	171	26
-	85,5	4	173	165	25
-	83,5	2	166	158	24
-	81,7	0	160	152	24

## Додаток 2

# ВЛАСТИВОСТІ ДІЕЛЕКТРИКІВ

### ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІЕЛЕКТРИКІВ

**Відносна діелектрична проникність** ( $\varepsilon$ ) – безрозмірна величина, що показує скільки разів сила взаємодії між зарядами в однорідному діелектричному середовищі менша ніж у вакуумі.

**Тангенс кута діелектричних втрат** ( $tg\delta$ ) – безрозмірна величина, що характеризує втрати енергії у діелектрику, які спричиняють його розігрів у перемінному електричному полі.

**Питомий об'ємний електричний опір діелектрика** ( $\rho_v$ ) характеризує електричний опір діелектрика одиничної площі і довжини постійному струму.

**Питома об'ємна електрична провідність** ( $\gamma_v$ ) – величина, обернена до питомого об'ємного електричного опору  $\gamma_v = 1/\rho_v$ .

**Питомий поверхневий електричний опір діелектрика** ( $\rho_s$ ) характеризує електричний опір поверхні твердого діелектрика у формі квадрата припротіканні постійного електричного струму між двома його протилежними сторонами.

**Питома поверхнева електрична провідність** ( $\gamma_s$ ) – величина, обернена до питомого поверхневого електричного опору  $\gamma_s = 1/\rho_s$ .

**Температурний коефіцієнт питомого електричного опору** ( $\alpha_\rho$ ) характеризує залежність питомого електричного опору матеріалу від температури.

**Напруженість пробою (електрична міцність) діелектрика** ( $E_{пр}$ ) характеризує його здатність витримувати електричну напругу і визначається як відношення напруги пробою до товщини діелектрика.

**Границя міцності** ( $\sigma_B$ ) характеризує статичну міцність матеріалу. Визначається при різних видах деформування зразків (розтяг, стиснення, згинання і скручування).

**Відносне видовження і звуження** – відносні величини, що характеризують пластичні властивості матеріалу.

**Пластична (холодна) текучість** – здатність матеріалу пластично деформуватись при тривалій дії статичних навантажень.

**В'язкість руйнування** характеризує динамічну міцність матеріалу, тобто здатність протистояти силі, прикладеній за короткий час (удар).

**Твердість** – здатність матеріалу протистояти механічному проникненню в його поверхню іншого, більш твердого тіла (індентора).

**Кінематична в'язкість** характеризує опір переміщенню одних шарів рідини(газу) щодо інших.

**Теплоємність ( $C$ )** – характеристика матеріалу, яка визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення його температури на один градус.

**Питома теплоємність ( $c_m$ )** визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення температури одного кілограму матеріалу на один градус.

**Теплопровідність ( $\lambda$ )** – властивість матеріалу проводити тепло. Характеризується коефіцієнтом теплопровідності.

**Теплове розширення матеріалів** – це їх здатність збільшувати свій об'єм при нагріванні. Характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення ( $\alpha$ ).

**Температура плавлення ( $t_{пл}$ )** – це температура, при якій тверде тіло переходить у рідкий стан.

**Температура розм'якшення** – це температура, при якій агрегатний стан твердої речовини починає змінюватись. Температура розм'якшення визначається методами «Кільце і шар» або «Кільце і стрижень».

**Теплостійкість** – це здатність тіла з даного матеріалу зберігати форму і розміри при підвищенні температури. Оцінюється за методами Мартенса і Віка і вимірюється у град.

**Нагрівостійкість** – це здатність діелектриків і виробів з них витримувати тривалий час, що вимірюється у год., вплив високої температури без погіршення їх властивостей.

**Холодостійкість** – здатність діелектрика працювати без погіршення експлуатаційних властивостей при низьких температурах. Вимірюється у град.

**Стійкість до термоударів** визначається перепадом температури нагріву і охолодження зразків (зразки охолоджують у воді нормальної температури), при якому на поверхні зразків з'являються помітні тріщини. Вимірюється у град.

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

**Температура спалаху ( $t_{сп}$ )** – це температура рідини, при нагріванні до якої суміш її випарів з повітрям спалахує при піднесенні відкритого полум'я.

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

**Температурний індекс (ТІ)** – це температура, при якій термін придатності матеріалу складає не менше 20 тис. годин.

Таблиця Д2.1

### Класи нагрівостійкості діелектриків

Класи нагрівостійкості	Максимальна допустима температура, °С	ТІ, °С	Діелектрики, що відповідають даному класу нагрівостійкості
У	90	90	Волокнисті діелектрики с целюлози, бавовни, шовку
А	105	105	Просочені рідкими діелектриками волокнисті Матеріали с целюлози, бавовни, натурального, синтетичного чи штучного шовку
Е	120	120	Синтетичні органічні матеріали (волокна, смоли, компаунди, плівки)
В	130	130	Матеріали на основі слюди, асбеста і скловолокна з органічними зв'язуючими
F	155	155	Матеріали на основі слюди, асбеста і скловолокна з синтетичними зв'язуючими
Н	180	180	Матеріали на основі слюди, асбеста і скловолокна з кремнійорганічними зв'язуючими
С	>180	180	Слюда, керамічні матеріали, скло, фторо-пласт

## Фізичні і електричні характеристики рідких діелектриків

Марка	Кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$	$t_{\text{сп}}, \text{°C}$	$E_{\text{пр}}, \text{МВ/м}$ (при частоті струму 50 Гц)	$\text{tg}\delta$	Застосування
<b>Трансформаторні масла</b>					
ТК	$9,6 \cdot 10^6$	135	25...50	0,025	Заливання високовольтних трансформаторів
Т-750	$8 \cdot 10^6$	135	25...50	0,005	
Т-1500	$8 \cdot 10^6$	135	25...50	0,005	
ПТ	$9 \cdot 10^6$	135	25...50	0,005	
<b>Конденсаторні масла</b>					
МСН	$40 \cdot 10^6$	136	–	–	Просочування конденсаторного паперу
СН	$30 \cdot 10^6$	160	–	–	
<b>Кабельні масла</b>					
МН-4	$37 \cdot 10^6$	135	180	–	Просочування паперової ізоляції кабелів, заповнення кабелів
С-220	$80 \cdot 10^6$	180	200	–	
КМ-25	$17 \cdot 10^6$	220	160	–	
<b>Синтетичні масла на кремнійорганічній основі</b>					
ПСМ-10	$10 \cdot 10^6$	172	–	–	Теплоносії, амортизаторні і гідравлічні пристрої. Просочування і заливання трансформаторів.
ПСМ-20	$20 \cdot 10^6$	200	–	–	
132-12Д	$110 \cdot 10^6$	150	–	–	
133-79	$25 \cdot 10^6$	200	–	–	
161-45	$720 \cdot 10^6$	340	–	–	
<b>Синтетичні масла на основі хлорованих вуглеводнів</b>					
ТХД	$126 \cdot 10^6$	–	20	–	Просочування конденсаторів. Просочування і заливання трансформаторів.
Совтол-10	$650 \cdot 10^6$	–	20	–	
Гексол	$4 \cdot 10^6$	–	24	–	

Таблиця Д2.3

## Електричні характеристики рідин при температурі 20°С

Рідина	Тип структури	$\rho_v, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$\epsilon$
Бензол	неполярна	$10^{11} \dots 10^{12}$	2,2
Трансформаторне масло	неполярна	$10^{10} \dots 10^{13}$	2,3
Бензин	неполярна	$10^{10} \dots 10^{13}$	2,0
Совол	полярна	$10^8 \dots 10^{10}$	4,5
Касторове масло	полярна	$10^8 \dots 10^{10}$	4,6
Ацетон	сильнополярна	$10^4 \dots 10^5$	22,0
Етиловий спирт	сильнополярна	$10^4 \dots 10^5$	33,0
Дистильована вода	сильнополярна	$10^3 \dots 10^4$	81,0

Таблиця Д2.4

**Фізико-хімічні і електричні характеристики газів**

Газ	Хімічна формула	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c_m$ , КДж/(кг·К)	Густина, кг/м <sup>3</sup>	$\varepsilon$	$E_{пр}$ , МВ/м	Застосування
Повітря	-	0,0257	1,01	1,29	1,00059	3	А
Водень	$H_2$	0,175	14,5	0,09	1,00027	1,8	Б
Азот	$N_2$	0,0269	1,06	1,25	1,00058	3	В
Елегаз	$SF_6$	0,0146	0,652	6,39	1,00191	7,8	Г
Аргон	$Ar$	0,0163	0,52	1,78	1,00056	-	Д
Неон	$Ne$	0,0455	1,03	0,90	-	-	Д
Криптон	$Kr$	0,0087	0,25	3,47	-	-	Д
Ксенон	$Xe$	0,005	0,16	5,58	-	-	Д
Гелій	$He$	0,1423	5,27	0,18	1,00007	-	Є
Фреон	$CCl_2F_2$	0,0105	0,993	1,49	1,0006	7,4	Е

*Примітка:* А – лінії електропередач, відкриті провідники; Б – охолодження турбогенераторів; В – конденсатори, кабелі; Г – вимикачі високої напруги, кабелі, конденсатори; Д – газотрони, тиратрони, розрядники, газорозрядні лампи; Є – дугогасіння, криотехніка; Е – холодильна техніка.

**СМОЛИ**

**Смоли** – це складні суміші органічних речовин, головним чином високомолекулярних, різного ступеню полімеризації. При низьких температурах смоли є аморфними, склоподібними і крихкими речовинами. При нагріванні смоли розм'якшуються, стають пластичними, а потім – рідкими. Розрізняють смоли природного походження і синтетичні.

Таблиця Д2.5

**Фізичні і електричні характеристики природних смол**

Назва	Густина, кг/м <sup>3</sup>	$t_p$ , °С	$\rho_v$ , Ом·м	Розчинник	Застосування
Каніфоль	1080	54...68	$10^{17} \dots 10^{18}$	Спирт, бензин, скипидар, ацетон	Складова лаків, компаундів і флюсів
Копал	1060	75...170	$10^{17} \dots 10^{18}$	Спирт, ефір	Складова лаків
Шелак	1020	50...80	$10^{17} \dots 10^{18}$	Спирт, ацетон	Клеючі лаки
Бурштин	1070	175...200	$<10^{21}$	Важкорозчинний	Виготовлення ізоляторів



**Фізичні і електричні характеристики синтетичних смол**

Назва	Густина, кг/м <sup>3</sup>	$t_{\text{сп}}$ , °C	$\rho_v$ , Ом·м	Розчинник	Застосування
Гліфталева 1350	1325	–	$10^{11} \dots 10^{12}$	Суміш етилового спирту і бензола	Виготовлення міканітів
Крезольно- формаль- дегідна	1275	–	$10^9 \dots 10^{10}$	Етиловий спирт	Лакування ізоляційних стрічок
Кремній- органічна	1675	–	$10^{12} \dots 10^{14}$	Суміш бензола, толуола і ацетона	Виготовлення міканітів
Поліамідна	1140	–	$10^{11} \dots 10^{12}$	Феноли, оцтова кислота	Ізоляційні плівки і нитки
Поліефірна	–	–	–	Ацетон	Слюдяна ізоляція
Фенол- формальде- гідна	1275	–	$10^{10} \dots 10^{12}$	Етиловий спирт, ацетон, ефіри	Гаряче пресування
Епоксидно- діанові: ЕД-22	–	150	–	Важкорозчинна	Заливальні компаунди, клеї, зв'язуюче для склопластиків
ЕД-20	–	150	–	Важкорозчинна	
ЕД-16	–	–	–	Важкорозчинна	
ЕД-14	–	–	–	Важкорозчинна	
ЕД-10	–	60	–	Важкорозчинна	
ЕД-8	–	65	–	Важкорозчинна	

**СИНТЕТИЧНІ ПОЛІМЕРИ**

Синтетичні полімери за своєю хімічною природою є високомолекулярними сполуками, тобто речовинами, молекули яких утворюються в результаті полімеризації і представляють собою циклічну сукупність великої кількості мономерів, що мають однакову будову груп атомів.

Таблиця Д2.7

**Механічні і фізичні характеристики полімерів**

Назва	Густина, кг/м <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	KCV, КДж/м <sup>2</sup>	Теплостій- кість за Мартенсом, °С	Холодно- стійкість, °С
Полістирол	1050	35...50	6...20	80	-60
Поліетилен низької густини	920	10...14	не руйнується	60	-70
Поліетилен високої густини	960	22...24	не руйнується	65	-60
Поліпропілен	910	30...35	70...80	160	-20
Поліформальдегід	1100	70	90...100	100	-45
Поліуретан	1210	50...60	50...60	60	-35
Поликапролактам (капрон)	1140	50...80	150...170	55	-25
Поліметилмета- крилат (органічне скло)	1190	60...70	10...18	70	-60
Полівінілхлорид	1340	18...25	не руйнується	70	-50
Вініпласт	1400	40...50	90...120	70	-15
Поліетилентере- талат (лавсан)	1340	20...30	15...30	-	-55
Фторопласт-3	2140	30...40	16...20	75	-185
Фторопласт-4	2200	35...40	120...150	250	-195
Ескапон	990	45...60	10...20	150	-60
Ебоніт	1200	30...50	4...15	60	-50

Таблиця Д2.8

**Електричні характеристики полімерів**

Назва	$\rho_v$ , Ом·м	$\epsilon$	$tg\delta$	$E_{пр}$ , кВ/мм	Застосування
Полістирол	$10^{11} \dots 10^{12}$	2,4...2,7	$(2 \dots 4) \cdot 10^{-4}$	25...30	Плівки, ізолятори
Поліетилен низької густини	$10^{13} \dots 10^{15}$	2,3	$(2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	40...42	Гнучка ізоляція проводів і кабелів
Поліетилен високої густини	$10^{13} \dots 10^{16}$	2,4	$5 \cdot 10^{-4}$	40...42	Каркаси, катушки, плівки
Поліпропілен	$10^{13} \dots 10^{15}$	2,1	$(2 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	30...35	Каркаси, катушки, плівки, плати
Поліформальдегід	$10^{12} \dots 10^{13}$	3,7	$(3 \dots 5) \cdot 10^{-4}$	24	Каркаси, катушки, плівки, плати
Поліуретан	$10^{12} \dots 10^{13}$	4,6	$1,2 \cdot 10^{-2}$	20...25	Гнучка ізоляція проводів і кабелів
Поликапролактам (капрон)	$10^{11} \dots 10^{12}$	4,0	$(1,5 \dots 4) \cdot 10^{-2}$	16...20	Ізоляція на низькі напруги

Закінчення таблиці Д2.8

Назва	$\rho_v$ , Ом·м	$\varepsilon$	$tg\delta$	$E_{пр}$ , кВ/мм	Застосування
Поліметилметакрилат (органічне скло)	$10^{10} \dots 10^{12}$	3,6	$6 \cdot 10^{-2}$	15...18	Конструкційні елементи і ізолятори
Полівінілхлорид	$10^{10} \dots 10^{12}$	4,7	$(3 \dots 8) \cdot 10^{-2}$	15...20	Гнучка ізоляція проводів, шланги, стрічки
Вініпласт	$10^{10} \dots 10^{12}$	3,5...4,0	$(1 \dots 5) \cdot 10^{-2}$	20	Ударо- і хімічно стійкі ізолятори
Поліетилентереталат (лавсан)	$10^{12} \dots 10^{13}$	3,5	$(2 \dots 6) \cdot 10^{-3}$	30	Плівки і литі конструкційні елементи
Фторопласт-3	$10^{14} \dots 10^{15}$	2,5...3,0	$(1 \dots 1,5) \cdot 10^{-2}$	15...20	Плівки і пресовані вироби
Фторопласт-4	$10^{16} \dots 10^{18}$	2,0	$(1 \dots 3) \cdot 10^{-4}$	27...40	
Ескапон	$10^{13} \dots 10^{14}$	2,8...3,0	$(5 \dots 8) \cdot 10^{-4}$	30...35	Ізоляція в електроприладах
Етилен	$10^{12} \dots 10^{14}$	3,0...3,5	$(0,5 \dots 1) \cdot 10^{-2}$	15...20	

*Примітка:* характеристики отримані при частоті електричного поля 50 Гц

## ШАРУВАТІ ПЛАСТИКИ

**Шаруваті пластики** – це композитні матеріали, у яких наповнювачем є папір або тканина, а зв'язуючим – термореактивна смола (фенолформальдегідна, крезолформальдегідна, епоксидна, кремнійорганічна, тощо).

Таблиця Д2.9

### Властивості шаруватих пластиків

Тип	Теплостійкість за Мартенсом °С	$\rho_v$ , Ом·м	$E_{пр}$ , МВ/м	$tg\delta$
<b>Гетинакс</b>				
I	150	$10^8$	20	–
II	150	$10^8$	20	–
III	150	–	–	–
VI	–	$10^8$	26	0,06
VII	–	$10^9$	33	0,045
VII	–	$10^{10}$	30	0,035

Закінчення таблиці Д2.9

Тип	Теплостійкість за Мартенсом °С	$\rho_v$ , Ом·м	$E_{пр}$ , МВ/м	$tg\delta$
<b>Текстоліт</b>				
А	135	$10^8$	8	–
Б	135	$10^8$	6	–
Г	135	$10^8$	8	–
ВЧ	–	$10^8$	8	0,07
ЛТ	–	$10^{11}$	28	–
<b>Склотекстоліт</b>				
СТ	185	$5 \cdot 10^8$	9	–
СТ-Б	185	$5 \cdot 10^8$	9	–
СТ-І	185	$5 \cdot 10^8$	9	–
СТ-ІІ	–	$10^{10}$	13	–
СТЕФ	185	$10^{11}$	20	0,03
СТК	250	$10^{10}$	12	–
СТВК	250	$10^{10}$	12	0,07

## ЕЛЕКТРОІЗОЛЯЦІЙНІ ЛАКИ

**Електроізоляційні лаки** – є електроізоляційними матеріалами, що твердіють. Вони являють собою колоїдні розчини смол, бітумів, олій, що висихають, і тому подібних речовин, що утворюють так звану лакову основу, у летючих розчинниках. Електроізоляційні лаки розділяють за застосуванням на просочувальні, покривні і клеючі лаки.

Таблиця Д2.10

### Властивості масляно-бітумних лаків

Марка	Час висихання (при t°С), год.	Нагрівостійкість при 150°С, год.	$E_{пр}$ при 20°С, МВ/м	Тип
БТ-95	16 (20°С)	15	70	Клеючий
БТ-99	3 (20°С)	1	56	Покривний
БТ-963	–	48	50	Просочувальний
БТ-980	10 (110°С)	–	60	Просочувальний
БТ-988	3 (110°С)	–	55	Просочувальний

Таблиця Д2.11

**Властивості масляно-алкідних (глифталевих) лаків**

Марка	Час висихання (при t°C), год.	Нагрівостійкість при 150°C, год.	$\rho_v$ , Ом·м	$E_{пр}$ при 20°C, МВ/м	Тип
ГФ-95	2 (105°C)	48	$10^{12}$	70	Просочувальний
ГФ-957	3 (20°C)	-	-	30	Клеючий
ГФ-937	3 (105°C)	48	-	70	Клеючий
ГФ-956	2 (105°C)	20	-	60	Клеючий
ГФ-985	0,3 (210°C)	-	-	40	Просочувальний

Таблиця Д2.12

**Властивості поліефірних лаків**

Марка	Час висихання (при t°C), год.	Нагрівостійкість при 150°C, год.	$\rho_v$ , Ом·м	$E_{пр}$ при 20°C, МВ/м	Тип
ПЕ-969	2 (105°C)	30	-	60	Просочуванняоб-моток електричних машин, ТІ 155
ПЕ-933	2 (150°C)	-	$10^{12}$	80	
ПЕ-935	2 (150°C)	-	$10^{12}$	70	
ПЕ-936	1 (160°C)	-	$10^{11}$	70	

Таблиця Д2.13

**Властивості поліефірно-епоксидних лаків**

Марка	Час висихання (при 20°C), год.	$\rho_v$ , Ом·м	$E_{пр}$ при 20°C, МВ/м	Тип
ЕП-934	150	$10^{13}$	70	Просочувальні і покривні, ТІ 155
ЕП-9125	150	-	60	
СЕНП-526	150	-	-	
ЕПМ-63	150	-	-	
АС-9115	20	$10^{12}$	20	
БІД-9127	-	$10^{12}$	25	

Таблиця Д.14

### Властивості кремній-органічних лаків

Марка	Час Висихання (при 20°C), год.	Нагрівостійкість при 150°C, год.	$\rho_v$ (при 20°C), Ом·м	$E_{пр}$ при 20°C, МВ/м	Тип
КО-991	1	20	$10^{12}$	65	Клеючий
КО-915	1,5	75	-	70	Просочувальний
КО-917	1,5	180	-	60	Просочувальний
КО-921	3	75	$10^{12}$	75	Просочувальний, покривний
КО-946	1	300	$10^{13} \dots 10^{14}$	75	Покривний

### КОМПАУНДИ

**Компаунди** – є механічною сумішшю різних речовин, наприклад смол, бітумів, восків, олій і ін. Особливістю компаундів є відсутністю у їхньому складі розчинника. Перед використанням для зменшення в'язкості компаунд нагрівають до температури розм'якшення. При нормальній температурі компаунд затвердіває. Компаунди бувають просочувальними і заливними.

Таблиця Д2.15

### Електричні характеристики компаундів

Марка	$\rho_v$ , Ом·м	$E_{пр}$ при температурі 20°C, МВ/м	$\epsilon$	$tg\delta$	Застосування
К-30	$10^9$	27	6	0,03	Заливання деталей
К-31	$10^{12}$	27	5	0,075	Заливання деталей
КТ-102	$10^{10}$	20	-	0,03	Демпфіруюче покриття
КТ-115	$10^{12}$	20	-	-	Просочування, заливання і склеювання
К-153	$10^{11}$	15	-	0,05	Просочування, заливання і склеювання
К-168	$10^{10}$	-	-	0,1	Просочування, склеювання і герметизація
ЕПСК	$10^{12}$	20	-	0,01	Просочування
110	$10^{13}$	25	-	0,01	Просочування
К-18	$10^{11}$	15	3	0,02	Герметизація
К-43	-	50	-	0,05	Просочування

## ВОЛОКНИСТІ ДІЕЛЕКТРИКИ

**Волокнисті діелектрики** – це матеріали, що утворюються з часток подовженої форми (волокон). До них відносять електротехнічний папір і картон, фібру, текстиль (нитки, стрічки, тканини). Розрізняють волокнисті матеріали рослинного походження (дерево, бавовняне волокно, папір і ін.), що складаються в основному з целюлози), тваринного походження (шовк), штучні волокна, одержувані шляхом хімічної переробки природного волокнистої сировини, і синтетичні волокна, що виготовляються з синтетичних полімерів.

Таблиця Д2.16

### Електричні характеристики конденсаторного паперу

Марка	Густина, т/м <sup>3</sup>	Кількість токопровідних включень на 1 м <sup>2</sup> , не більше	$E_{пр}$ , МВ/м	$tg\delta$ , при 100°C
КОН-1	0,97...1,03	120	36	0,26
		7	31	
КОН-2	1,15...1,24	1800	60	0,32
		15	23	
СКОН-1	0,97...1,03	60	38	0,20
		3	31	
СКОН-2	1,10...1,24	1000	68	0,24
		10	27	
СКОН-3	1,26...1,34	750	50	0,32
		20	28	
МКОН-08	0,75...0,85	40	32	0,16
		4	24	
МКОН-1	0,97...1,03	100	57	0,20
		3	21	
МКОН-2	1,15...1,24	300	50	0,28
		5	23	
МКОН-3	1,26...1,34	400	52	0,32
		50	35	

Таблиця Д2.17.

### Властивості електроізоляційного картону

Марка	Густина, т/м <sup>3</sup>	$E_{пр}$ , МВ/м	$\sigma_v$ , МПа (у поздовжньому напрямі)	$\sigma_v$ , МПа (у поперечному напрямі)
ЕВС	1,25	12	127	34
ЕВП	1,25	12	127	34
ЕВТ	1,15	13	118	31
ЕВ	1,15	11	98	25
ЕВА	1,2	11	118	34

Таблиця Д2.18

**Фізичні і механічні властивості твердих ізоляційних матеріалів**

Назва	Густина, т/м <sup>3</sup>	$\sigma_B$ , МПа	КСУ, КДж/м <sup>2</sup>	$E \cdot 10^{-4}$ , МПа	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	$c_m \cdot 10^2$ , Дж/кг·К	$\lambda$ , Вт/м·К
Електротехнічний фарфор	2,45...2,7	30...60	1,3...2,5	6...10	3...8	8...9	1...3
Мікалекс	2,6...3,0	30...70	2...5	-	8	-	-
Стеатит	2,8	45	2,2...2,5	6...8	5...9	8...9	1...3
Кордієрит	-	25	1,8	9	0,5...2	8...12	1,5...2,5
Цельзіан	-	25	2,0	-	3...5	8...10	1,5...2,5
Пористий алюмосікат магнія	2,1...2,2	-	0,8...1,4	4	3...5	7,5...9	1...2
Корунд	3,5...3,9	-	3,8...4,0	20...30	4,5...7	8,5...10,5	10...30

Таблиця Д2.19

**Електричні характеристики лако- і склотканин**

Марка	$\rho_v$ , Ом·м	$E_{пр}$ , МВ/м	Застосування
<b>Лакотканини</b>			
ЛХМ-105	-	38	Ізоляція на повітрі
ЛХМС-105	-	42	Ізоляція на повітрі
ЛХММ-105	-	43	Ізоляція у трансформаторному маслі
ЛХБ-105	-	42	Ізоляція у гарячому трансформаторному маслі
ЛШМ-105	-	56	Ізоляція на повітрі, стійка до короткочасного підвищення температури
ЛШМС-105	-	10	Ізоляція на повітрі, стійка до короткочасного підвищення температури
ЛКМ-105	-	50	Ізоляція на повітрі, еластична
ЛКМС-105	-	60	Ізоляція на повітрі та у трансформаторному маслі
<b>Склотканини</b>			
ЛСМ-105/120	10 <sup>11</sup>	-	Ізоляція на повітрі
ЛСММ-105/120	10 <sup>11</sup>	-	Ізоляція у гарячому трансформаторному маслі
ЛСЛ-105/120	10 <sup>12</sup>	-	Ізоляція на повітрі
ЛСЕ-105/130	10 <sup>12</sup>	-	Ізоляція на повітрі
ЛСБ-120/130	10 <sup>12</sup>	-	Ізоляція на повітрі при підвищеній вологості
ДСП-130/150	10 <sup>10</sup>	-	Ізоляція на повітрі
ЛСК-155/180	10 <sup>12</sup>	-	Ізоляція на повітрі при підвищеній вологості (тропічні умови)
ЛСКР-180	10 <sup>12</sup>	-	Ізоляція на повітрі при підвищеній вологості і температурі
ЛСКЛ-155	10 <sup>12</sup>	-	Ізоляція на повітрі
ЛСУ-155	-	54	Ізоляція електричних машин



Таблиця Д20.

**Електричні властивості твердих ізоляційних матеріалів**

Назва	Стійкість до термоударів, °С	$\rho_v$ , Ом·м	$\rho_s$ , Ом	$E_{пр}$ , МВ/м	$\varepsilon$	$tg\delta$
Скло	-	-	-	100...300	-	0,002...0,125
Кераміка	-	-	-	10...30	-	-
Пориста кераміка	-	-	-	3...5	-	-
Слюда	-	-	-	100...200	-	-
Мусковіт	-	$10^{12} \dots 10^{16}$	-	-	6...8	0,015
Флогопіт	-	$10^{11} \dots 10^{12}$	-	-	5...7	0,05
Електро-технічний фарфор	150...160	$10^{11} \dots 10^{13}$	$10^{10}$	20...30	5...7,5	0,025
Мікалекс	-	$10^{10} \dots 10^{12}$	-	10...20	6...8,5	0,003...0,01
Стеатит	80...100	$10^{13}$	$10^{10}$	20	5...7	0,005...0,025
Кордієрит	250	$10^8$	$10^{10}$	10	4...6	0,025
Цельзіан	200	$10^{14}$	$10^{12}$	20	-	0,01
Пористий алюмосілікат магнія	150...350	$10^9 \dots 10^{10}$	-	-	-	-
Корунд	140...180	$10^{14}$	-	10...17	7...10	$(2 \dots 10) \cdot 10^{-4}$

**Примітка:** характеристики отримані при частоті електричного поля 50 Гц

## Додаток 3

### ВЛАСТИВОСТІ ПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

#### ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОВІДНИКІВ

**Питомий електричний опір ( $\rho$ )** характеризує електричний опір провідника при протіканні через нього постійного струму.

**Питома електрична провідність ( $\gamma$ )** – величина, обернена до питомого електричного опору,  $\gamma = 1/\rho$ .

**Температурний коефіцієнт питомого електричного опору ( $\alpha_\rho$ )** характеризує залежність питомого електричного опору матеріалу від температури.

**Теплоємність ( $C$ )** – це характеристика матеріалу, яка визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення його температури на один градус. Вимірюється у Дж/К.

**Питома теплоємність ( $c_m$ )** визначає кількість теплоти, необхідну для підвищення температури одного кілограму матеріалу на один градус.

**Теплопровідність** – це властивість матеріалу проводити тепло. Характеризується коефіцієнтом теплопровідності ( $\lambda$ ).

**Теплове розширення матеріалів** – це їх здатність збільшувати свій об'єм при нагріванні. Характеризується температурним коефіцієнтом лінійного розширення ( $\alpha$ ).

**Температура плавлення ( $t_{пл}$ )** – це температура, при якій тверде тіло переходить у рідкий стан.

**Температура надпровідного переходу ( $T_{нп}$ )** – це температура, при якій матеріал стає надпровідником.

**Жаростійкість** – здатність металу тривалий час протистояти окисленню при високих температурах.

Таблиця Д3.1

## Фізичні і механічні властивості металів

Метал	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$t_{пл}$ , °С	$c_m$ , Дж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	Густина, г/м <sup>3</sup>
Срібло	100...200	48	961	234	415	19,5	10,5
Мідь	220...240	60	1083	385	390	16,8	8,94
Золото	100...140	30...50	1063	126	293	14,2	19,3
Алюміній	50...80	30...45	657	922	209	24	2,7
Берилій	200...550	0,2...2	1284	200	167	13	1,83
Магній	120...200	8...12	651	1040	167	26	1,74
Натрій	–	–	97,7	1260	125	70	0,97
Вольфрам	110...415	–	3380	218	168	4,4	19,8
Молибден	310...570	2...55	2620	264	151	5,1	10,2
Цинк	–	–	420	390	111	31	7,14
Кобальт	260...500	5...50	1490	435	79	12	8,71
Нікель	400...600	35...50	1455	444	95	13	8,9
Кадмій	100	44	321	230	93	30	8,65
Індій	2,3	–	156	243	25	25	7,28
Залізо	330	33	1535	452	73	11	7,87
Платина	150	30...35	1773	134	71	9	21,4
Паладій	185...200	25...40	1554	243	72	12	12,2
Олово	10...40	40	232	226	65	23	7,31
Хром	–	–	1857	–	94	–	7,19
Тантал	190...230	36...38	2970	142	54	6,5	16,6
Ніобій	350	50	2415	272	50	7,2	8,6
Торій	120	36	1850	113	–	11	11,5
Свинець	12...13	55	327	130	35	29	11,4
Реній	110...225	2...25	3180	138	71	4,7	20,5
Цирконій	250...270	20...25	1860	276	17	5,4	6,4
Титан	250...270	55...70	1680	577	15	8	4,5
Галій	20...40	–	29,7	385	–	183	5,91
Ртуть	–	–	–38,9	138	10	61	13,55

Таблиця Д3.2

## Електричні властивості металів

Метал	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_\rho \cdot 10^{-3}$ , град <sup>-1</sup>	$W$ , еВ	Електродний потенціал, В
Срібло	0,016	4,0	4,4	0,799
Мідь	0,017	4,3	4,3	0,337...0,521
Золото	0,024	3,8	4,8	1,5...1,7
Алюміній	0,028	4,2	4,3	–1,66
Берилій	0,04	6,0	3,9	–1,69
Магній	0,045	4,2	3,6	–2,37

Закінчення таблиці ДЗ.2

Метал	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha\rho \cdot 10^{-3}$ , град <sup>-1</sup>	$W$ , еВ	Електродний потенціал, В
Натрій	0,046	5,0	2,3	-2,71
Вольфрам	0,055	4,6	4,5	0,11...0,68
Молібден	0,057	4,6	4,2	-0,2
Цинк	0,059	4,0	4,4	-0,763
Кобальт	0,062	6,0	-	0
Нікель (Ni)	0,073	6,5	5,0	-0,25
Кадмій	0,076	4,2	4,0	-0,403
Індій	0,09	4,7	-	-0,34
Залізо	0,098	6,0	4,5	-0,04...-0,44
Платина	0,105	3,9	5,8	1,20
Паладій	0,110	3,8	4,8	0
Олово	0,120	4,4	4,4	-0,136
Хром	0,128	-	-	-0,74
Тантал	0,135	3,8	4,1	0
Ніобій	0,152	3,95	4,0	0
Торій	0,186	2,3	3,3	-
Свинець	0,207	3,7	-	-0,126...0,80
Реній	0,210	3,2	4,8	-0,30
Цирконій	0,410	4,5	3,8	0
Титан	0,420	4,4	4,1	-1,63
Галій	0,56	-	-	0
Ртуть	0,958	0,9	4,5	0,854

Таблиця ДЗ.3

**Класифікація, нагрівостійкість і конструктивні дані  
основних типів мідних емальованих проводів**

Марка проводу	Клас нагріво- стійко- сті ізо- ляції	Тип емалевої ізоляції	Номінальні розміри струмопро- відної жили, мм	Двостороння товщина ізоляції, мм
ПЕЛ	А	Емаль на масляно-смоляній основі	0,063...2,50	0,010-0,065
ПЕВ-1	А	Високоміцна емаль на полівінілацети- ловій основі	0,063...0,05 0,063...2,50	0,01...0,02 0,20...0,085
ПЕВ-2	А	Високоміцна емаль на полівінілацети- ловій основі зі стовщеною ізоляцією	0,063...2,50	0,025...0,090

## Закінчення таблиці ДЗ.3

Марка проводу	Клас нагрівостійкості ізоляції	Тип емалевої ізоляції	Номінальні розміри струмопровідної жили, мм	Двостороння товщина ізоляції, мм
ПЕМ-1	А	Високоміцна емаль на полівінілацетиловій (полівінілформалевій) основі	0,063...2,50	0,02...0,08
ПЕМ-2	А	Високоміцна емаль на полівінілацетиловій (полівінілформалевій) основі зі стовщеною ізоляцією	0,063...2,50	0,025...0,085
ПЕВД і ПЕВДБ	А	Полівінілацеталева емаль із додатковим термопластичним шаром на основі відповідно полівінілацетату або полівінілбутираля	0,063...1,00	0,033...0,085
ПЕЛР-1	А	Високоміцна емаль на поліаміднорезольній основі	0,1...2,50	0,02...0,08
ПЕЛР-2	А	Високоміцна емаль на поліаміднорезольній основі зі стовщеною ізоляцією	0,1-2,50	0,025...0,09
ПЕВТЛ-1	Е	Високоміцна емаль на поліуретановій основі	0,063...1,60	0,015...0,07
ПЕВТЛ-2	Е	Високоміцна емаль на поліуретановій основі зі стовщеною ізоляцією	0,063...1,60	0,02...0,08
ПЕВТЛК	Е	Подвійна емаль на основі поліуретанових і поліамідних смол	0,063...0,35	0,03...0/05
ПЕТВ-943	В	Високоміцна емаль на поліефірній основі (лак ПЕ-943)	0,063...2,50	0,025...0,09
ПЕТВ-939	В	Високоміцна емаль на поліефірній основі (лак ПЕ-939)	0,063...2,50	0,025...0,09
ПЕТВД	В	Високоміцна емаль на поліефірній основі, з додатковим шаром термопластичної смоли	0,063...0,365	0,037...0,065
ПЕТ-155А	Ф	Високоміцна емаль на поліефіроїмідній основі	0,063...2,50	0,025...0,09
ПЕТ-імід	До 200° С	Високоміцна емаль на полімідній основі (нікельований мідний дріт)	0,10...1,32	0,025...0,06
ПЕТ-імід	Те ж	Високоміцна емаль на полімідній основі на голому мідному дроті	0,10...1,32	0,025...0,06

Таблиця Д3.4

## Неізольовані проводи для повітряних ліній електропередач

Діаметр проводу, мм	Номинальна площа поперечного перерізу, мм <sup>2</sup>	Електричний опір 1 км проводу (постійний струм, 20°C), Ом	Розривне зусилля, Н	Маса 1 км проводу без змащення, кг	Кількість проводів, шт. / діаметр проводу, мм	
					алюмінієва частина	сталева частина
<b>Провід марки А (алюмінієві жили)</b>						
3,57	10	2,8631	1950	27,4	7/1,3	–
5,1	16	1,8007	3021	43,0	7/1,7	–
7,5	35	0,8347	5913	94,0	7/2,5	–
10,7	70	0,4131	11288	189,0	7/3,55	–
16,37	160	0,1798	26400	439,8	(19/3,27)*2	–
25,6	400	0,0740	63420	1072,0	(37/3,66)*3	–
35,60	750	0,0386	119584	2062,0	(61/3,95)*4	–
<b>Провід марки АС (сталевобалюмінієві жили)</b>						
5,6	16/2,7	1,7818	6220	64,9	6/1,85	1/1,9
8,4	35/6,2	0,7774	13524	148,0	6/2,8	1/2,8
9,6	50/8,0	0,5951	17112	195,0	6/3,2	1/3,2
10,97	63/10,5	0,4553	21630	254,0	6/3,66	1/3,66
15,4	70/72	0,4194	96826	755,0	18/2,2	19/2,2
21,6	240/32	0,1182	75050	921,0	24/3,6	7/2,4
24,0	300/39	0,0958	90574	1132,0	24/4,0	7/2,65
27,5	400/51	0,0733	120481	1490,0	54/3,05	7/3,05

Таблиця Д3.5

## Технічні дані та область застосування деяких марок проводів

Марка	Кількість жил	Переріз жил, мм <sup>2</sup>	Область застосування
АПР	1	2,5...120	Для відкритого прокладання на роликах, ізоляторах, в коробках і на лотках
ПР	1	0,75...120	
АПВ	1	2,5...120	Те ж, а також для прокладання в трубах (відкрито і приховано) і в каналах будівельних конструкцій
ПВ	1	0,5...95	
АПРТО ПРТО	2; 3	2,5...120	Для прокладання в сталевих та ізоляційних трубах
	4; 7	2,5...10	
	10; 14	2,5	
	2; 3	1...120	
	4; 7	2,5...10	
АПРВ ПРВ	1; 2	2,5...16	Для прокладання на лотках, в трубах і коробках, в каналах будівельних конструкцій
	1; 2	1-10	
ПРГ	1	0,75...120	Для рухомої електропроводки
ПРВ	1; 2	1-10	Для рухомої електропроводки

Закінчення таблиці ДЗ.5

Марка	Кількість жил	Переріз жил, мм <sup>2</sup>	Область застосування
АЛПВ	2; 3	2,5...6	Для відкритого прокладання по стінах і перекриттях
ППВ	2; 3	0,75...4	
АППВС	1; 2	2,5...6	Для безтрубового прихованого прокладання
ППВС	2; 3	0,75...4	
АРТ	2	2,5...4	Для тросового прокладання у середині приміщень
	3	4...6	
	4	4...35	
АВТ	2; 3	2,5...4	Для зовнішнього прокладання
АВТС	4	2,5...16	

Таблиця ДЗ.6

**Технічні дані та область застосування кабелів з паперовою просоченою ізоляцією напругою до 35 кВ**

Марка	Кількість жил	Переріз жил кабелів, мм <sup>2</sup> , з номінальною напругою, кВ			
		до 1	6	10	35
ААБ, ЛЛБГ	3	6...240	10...240	16...240	—
	1	10...800	—	—	—
	4	10...185	—	—	—
АСБ, СБ	1	240–800	—	—	—
	2	6...150	—	—	—
	4	10...185	—	—	—
	3	6...240	10...240	16...240	—
ААГ, АГ	1	10...800	—	—	120...300
	4	10...185	—	—	—
	3	6...240	10...240	16...240	—
ААШВ	1	10...800	—	—	120 - 300
	4	10...185	—	—	—
	3	6...240	10...240	16...240	—
АО А Б, ОАБ АОСБ	3	—	—	—	120...150
АСГ, СГ	1	10...800	—	—	120...300
	2	6...150	—	—	—
	4	10...185	—	—	—
	3	6...240	10...240	16...240	—
АСП, СП	1	50...800	—	—	—
	2	25...150	—	—	—
	4	16...185	—	—	—
	3	25...240	16...240	16...240	—
АСПГ, СПГ	1	50...500	—	—	—
	2	25...120	—	—	—
	4	16...120	—	—	—
	3	185...240	—	—	—

## ВЛАСТИВОСТІ НАДПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

**Надпровідність** – явище різкого зменшення практично до нуля питомого електричного опору матеріалів при температурах близьких до абсолютного нуля. Температура, при якій матеріал переходить в надпровідний стан називається температурою надпровідного переходу ( $T_{\text{нп}}$ ). Матеріал, що переходить в надпровідний стан стає надпровідником. Срібло, мідь, золото, платина і деякі інші метали у надпровідний стан не переходять. При перевищенні деяких значень **критичної магнітної індукції** ( $B_{\text{кр}}$ ), яка характеризує магнітне поле на поверхні надпровідника, надпровідність зникає.

Таблиця Д3.7

### Температура переходу металів і сплавів у надпровідний стан

Метали і сплави	$T_{\text{нп}}, \text{К}$	$B_{\text{кр}}, \text{Тл}$	Метали і сплави	$T_{\text{нп}}, \text{К}$	$B_{\text{кр}}, \text{Тл}$
<b>Чисті метали</b>			<b>Сплави</b>		
Іридій	0,14	0,002	44%Nb+56%Ti	8,7	12,0
Титан	0,4	–	50%Nb+50%Zr	9,5	11,0
Молібден	1,0	–	Хімічні сполуки		
Алюміній	1,2	0,010	$V_3Ga$	14,0	50,0
Індій	3,4	0,030	$Nb_3Sn$	18,2	22,0
Олово	3,7	0,031	$Nb_3Ge$	39	–
Ртуть	4,2	0,046	$MgB_2$	77	–
Тантал	4,5	0,083	$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$	135	–
Ванадій	5,3	0,130			
Свинець	7,2	0,080			
Ніобій	9,5	0,195			

## ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ ВИСОКОГО ОПОРУ

Таблиця Д3.8

### Склад і механічні властивості залізо-хромо-нікелевих сплавів

Марка	Склад, %*				$\sigma_B, \text{МПа}$			$\delta, \%$
	Cr	Al	Ni	Mn	20°C	800°C	1000°C	
Фехрالی								
X13Ю4	12...15	3,5...5,5	0,6	0,7	700	-	-	10...20
X15Ю5	13...15	3,5...5,5	0,6	0,7	-	-	-	10...20
1X17Ю5	16...19	4,0...6,0	0,6	0,7	700	-	-	10...20
0X17Ю5	16...19	4,0...6,0	0,6	0,7	700	-	-	10...20



Закінчення таблиці ДЗ.8

Марка	Склад, %*				$\sigma_B$ , МПа			$\delta$ , %
	Cr	Al	Ni	Mn	20°C	800°C	1000°C	
<b>Хромалі</b>								
X23Ю5	22...25	4,5...5,5	0,6	0,7	-	-	-	-
0X23Ю5Т	22...25	4,5...5,5	0,6	0,7	660	120	17	14
1X25Ю5	23...27	4,5...6,5	0,6	0,7	660	120	17	14
0X25Ю5	23...27	4,5...6,5	0,6	0,7	660	120	17	15
0X27Ю5А	25...28	4,5...6,5	0,6	0,7	660	120	17	15
0X27Ю5Т	25...28	4,5...6,5	0,6	0,7	675	89	13	12

\* Інше – Fe

Таблиця ДЗ.9

**Фізичні властивості залізо-хромо-нікелевих сплавів**

Марка	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_\rho \cdot 10^{-5}$ , град <sup>-1</sup>	Оптимальна робоча температура, °С	Максимальна робоча температура, °С	$R(1000^\circ\text{C}) / R(20^\circ\text{C})$
<b>Фехралі</b>					
X13Ю4	1,26	15	750	–	–
X15Ю5	1,18...1,34	–	900	1000	1,112
1X17Ю5	1,30	6	850	–	–
0X17Ю5	1,30	6	950	–	–
<b>Хромалі</b>					
X23Ю5	1,40	6,5	1100	1200	–
0X23Ю5Т	1,29...1,45	–	1150	1200	1,033
1X25Ю5	1,40	5	1150	1200	–
0X27Ю5Т	1,37...1,47	5	1250	1300	0,998

Таблиця ДЗ.10

**Склад і механічні властивості хромо-нікелевих сплавів**

Марка	Склад, %*			$\sigma_B$ , МПа			$\delta$ , %
	Cr	Ni	Mn	20°C	800°C	1000°C	
<b>Фероніхром</b>							
X15Н60	15...18	55...61	1,5	660	170	60	22
X15Н60Н	15...18	55...61	1,5	660	170	60	22
<b>Ніхром</b>							
X20Н80	20...23	75...78	1,5	670	210	73	20
X20Н80Н	20...23	75...78	1,5	670	210	73	20

Примітка: Інше – Fe.

Таблиця ДЗ.11

**Фізичні і електричні властивості хромо-нікелевих сплавів**

Марка	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_{\rho} \cdot 10^{-5}$ , град <sup>-1</sup>	Оптимальна робоча тем- пература, °С	Максимальна робоча температура, °С	R(1000°С) / R(20°С)
<b>Фероніхром</b>					
X15H60	1,1...1,2	10...20	950	1000	1,139
X15H60H	1,1...1,2	10...20	1000	1100	1,138
<b>Ніхром</b>					
X20H80	1,0...1,1	10...20	1050	1100	1,078
X20H80H	1,0...1,1	10...20	1150	1200	1,076

Таблиця ДЗ.12

**Склад і властивості радіотехнічних сплавів**

Сплав	Склад, %			$\rho$ , мкОм·м	$\alpha_{\rho} \cdot 10^{-5}$ , град <sup>-1</sup>	Термо-ЕРС в парі з Си, мкВ/град	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\delta$ , %
	Си	Mn	Ni					
Манганін	85	12	3	0,42...0,48	0,6...5	1...2	450...600	15...30
Константан	55	-	45	0,48...0,52	0,5...2,5	44...55	400...500	20...40

**ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІМЕТАЛІВ**

**Електродний потенціал** – різниця електричних потенціалів між електродомта електролітом. Вимірюється у В.

**Контактна різниця потенціалів** – це різниця потенціалів, що виникає при контактуванні двох різних провідникових матеріалів, які перебувають при однаковій температурі.

**Термічна електрорушійна сила (термо-ЕРС)** – (ефект Зеебека) – явищевиникнення ЕРС у замкнутому електричному ланцюзі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників, контакти між якими знаходяться при різних температурах.

**Питомий згин термобіметалу** характеризує його чутливість до зміни температури і визначається відносним згином вільного кінця пластинки термобіметалу довжиною 100 мм і товщиною 1 мм при нагріванні на 1°С. Вимірюється у град.

**Коефіцієнт чутливості термобіметалу ( $\Delta\alpha$ )** також характеризує його чутливість до зміни температури і визначається різницею температурних коефіцієнтів лінійного розширення активного і пасивного шарів термобіметалу. Вимірюється у град<sup>-1</sup>.

Таблиця ДЗ.13

## Склад і властивості термобіметалів

Марка	Сплави шарів		$\rho$ , мкОм·м	Питомий згин, °С	$\Delta\alpha \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	Межа відхилення питомого згину, %
	активний	пасивний				
ТБ2013	75ГНД	36Н	1,08...1,18	0,20	30...36	±10
ТБ1613	75ГНД	45НХ	1,18...1,27	0,16	23...28	±12
ТБ1523	20НГ	36Н	0,77...0,82	0,15	21...28	±12
ТБ1423	24НХ	36Н	0,77...0,84	0,14	20...24	±12
ТБ1323	19НХ	36Н	0,76...0,83	0,13	18,5...22,5	±12
ТБ1353	Л62	36Н	0,14...0,20	0,13	19,5...25	±15
ТБ1254	Л90	36Н	0,09...0,14	0,12	19...24	±15
ТБ1243*	24НХ	36Н	0,38...0,43	0,12	18...22	±15
ТБ1253**	24НХ	36Н	0,15...0,18	0,12	18...22	±15
ТБ1132	24НХ	42Н	0,68...0,74	0,11	16...19	±12
ТБ1032	19НХ	42Н	0,67...0,73	0,105	16,5...18,5	±12
ТБ0921	28НХТЮ	45НТЮ	0,87...0,97	0,09	12...16	±15
ТБ0953	НПЗ	36Н	0,15...0,20	0,09	12...16	±15
ТБ0831	24НХ	50Н	0,55...0,60	0,075	10...13	±12

\* Термобіметал має проміжний шар із сплаву НП2.

\*\* Термобіметал має проміжний шар із сплаву М1.

## СПЛАВИ ДЛЯ ТЕРМОПАР

Явище термо-ЕРС використовується для вимірювання температури за допомогою термопари. Для виготовлення термопар застосовуються мідь, платина і спеціальні сплави. Найбільшу термо-ЕРС за інших рівних умов має термопара хромель-копель (0,6 мВ на 10°С). Національні стандарти в галузі електротехніки узгоджуються з міждержавними стандартами, які розробляються Міжнародною електротехнічною комісією (МЕК)

Таблиця ДЗ.14

## Хімічний склад термоелектродів термопар

Тип термопари	Хімічний склад позитивного термоелектрода	Хімічний склад негативного термоелектрода
ТПП13 (R)	87%Pt, 13%Rh	Pt
ТПП10 (S)	90%Pt, 10%Rh	Pt
ТПР (B)	70%Pt, 30%Rh	94%Pt, 6%Rh
ТЖК (J)	Fe	55%Cu, 45%Ni

## Закінчення таблиці ДЗ.14

Тип термопар	Хімічний склад позитивного термоелектрода	Хімічний склад негативного термоелектрода
ТМК (Т)	Cu	55%Cu, 45%Ni
ТМК (М)	Cu	56%Cu, 44%Ni
ТХА (К)	90,5%Ni, 9,5%Cr	94,5%Ni, 5,5%Al
ТХК (L)	90,5%Ni, 9,5%Cr	56%Cu, 44%Ni
ТХК (Е)	90,5%Ni, 9,5%Cr	55%Cu, 45%Ni
ТВР (А)	95%W, 5%Re	80%W, 20%Re

Таблиця ДЗ.15

### Типи термопар і їх робочі характеристики

Термопара	Тип термопар за класифікацією МЕК	Тип термопар за державним стандартом	Робочий температурний діапазон, °C	Температура короткочасного використання, °C
Платинородій-платина	R	ТПП13	0...1300	-50...1600
	S	ТПП10	0...1300	-50...1600
Платинородій-платинородій	B	ТПР	300...1600	0...1820
Залізо-константан	J	ТЖК	-200...700	800
Мідь-константан	T	ТМК	-200...400	-250...400
Хромель-алюмель	K	ТХА	-200...1000	1300
Хромель-константан	E	ТХК	-200...700	900
Хромель-копель	L	ТХК	-200...600	-
Мідь-копель	M	ТМК	-200...100	-
Вольфрам-реній-1	A-1	ТВР	0...2200	0...2500
Вольфрам-реній-2	A-2		0...1800	0...2500
	A-3		0...1800	0...2500

## ВЛАСТИВОСТІ ПРИПОЇВ

**Припої** – спеціальні сплави, що застосовуються для лудіння і паяння. Пайка здійснюється метою одержання електричного контакту з малим перехідним опором, а також з метою створення механічно міцного (за необхідності – герметичного) шва.

Таблиця ДЗ.16

## Олов'яно-свинцеві припої

Марка	Склад, % *		$\rho$ , мкОм·м	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	$t_{пл}$ , °С	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	Застосування
	Sn	Sb							
ПОС90	90	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	210	49	40	15	А
ПОС61	61	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	191	43	46	14	А
ПОС40	40	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	238	38	52	13	Б
ПОС30	30	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	266	30	45	13	Б
ПОС18	18	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	277	30	45	13	Б
ПОС10	10	0,15...2,5	0,13...0,19	25...27	299	32	44	13	В

\* Інше – Pb.

**Примітка:** А – паяння посуду, медичинської апаратури; Б – паяння міді, латуні, срібла, заліза, оцинкованого заліза; В – лудіння і паяння міді, латуні, контактних поверхонь приладів, реле.

Таблиця ДЗ.17

## Легкоплавкі припої

Припій	Склад	$t_{пл}$ , °С	Застосування
Сплав Вуда	12,5%Sn, 25%Pb, 50%Bі, 12,5%Сd	68,5	А
Сплав Ньютона	19%Sn, 31%Pb, 50%Bі	94	Б
Сплав Розе (ПОСВ-50)	25%Sn, 25%Pb, 50%Bі	95	В

**Примітка:** А – паяння при низьких температурах (токсичний); Б – паяння при невисоких температурах; В – паяння при невисоких температурах, плавкі електричні запобіжники.

Таблиця ДЗ.18

## Алюмінієві припої

Марка	Склад	$t_{пл}$ , °С	Температура паяння, °С	Застосування
В62	51%Al, 25%Zn, 20%Cu, 3,5%Si, 1,5%Mn	490...500	505...510	А
Германієвий-1	65%Al, 4,5%Si, 31%Ge	460...480	530...550	Б
Германієвий-1	67%Al, 5,5%Si, 28%Ge	440...460	–	Б
34А	66%Al, 28%Cu, 6%Si	525	530...550	В
П425А	20%Al, 15%Cu, 65%Zn	480	–	В
П550А	67%Al, 27%Cu, 6%Si	525	–	Г
П124	53%Al, 40%Cu, 7%Si	530	540...580	Г
П575А	80%Al, 20%Zn	575	–	Г
П590А	89%Al, 10%Cu	590	–	Г
Евтектичний силумін	88%Al, 12%Si	577	–	В, Г

**Примітка:** А – паяння скляних виробів з алюмінієвою підкладкою; Б – паяння металізованої кераміки, отримання паяних швів з високою вакуумною щільністю; В – паяння алюмінію і сплавів АМц і АМг; Г – паяння алюмінію і сплавів АМг і дуралюмінію.

Таблиця Д3.19

## Мідно-цинкові припої

Марка	Склад	$\rho$ , мкОм·м	Щільність, т/м <sup>3</sup>	$t_{пл}$ , °С	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	$\sigma_v$ , МПа	$\delta$ , %	$HV$	Застосу- вання
ПМЦ-36	36%Cu–Zn	0,103	7,7	825	22	-	-	-	А
ПМЦ-48	48%Cu–Zn	0,045	8,2	865	21	205	3	130	Б
ПМЦ-54	54%Cu–Zn	0,040	8,3	880	21	345	20	128	В

**Примітка:** А – паяння латуні з вмістом міді до 68%; Б – паяння мідних сплавів з вмістом міді більше ніж 68%; В – паяння міді, томпака, бронзи і сталі.

Таблиця Д3.20

## Срібні припої

Марка	Склад	$\rho$ , мкОм·м	Густина, т/м <sup>3</sup>	$t_{пл}$ , °С	Застосу- вання
<b>М'які припої</b>					
ПСр010-90	10%Ag, 90%Sn	0,129	7,6	280	Е
ПСр0Су8	8%Ag, 7,5%Sb, 94,5%Sn	0,197	7,4	250	А
ПСрМ05	5%Ag, 1%Sb, 2%Cu, 92%Sn	0,153	7,4	240	Д
ПСр3Кд	3%Ag, 1%Zn, 96%Cd	0,08	8,7	242	И
ПСр3	3%Ag, 97%Pb	0,204	11,4	315	И
ПСр2,5	2,5%Ag, 5,5%Sb, 92%Cd	0,214	11,0	300	А
ПСр2	2%Ag, 30%Sn, 5%Sb, 63%Cd	0,167	9,5	238	Е, И, З
ПСр2-58	2%Ag, 58%Sn, 0,5%Sb, 39,5%Cd	0,141	8,5	183	А, Ж
ПСр1,5	1,5%Ag, 15%Sn, 83,5%Cd	0,191	10,4	280	Е, Є
ПСр1	1%Ag, 35%Sn, 1%Sb, 63%Pb	0,26	9,4	235	Є
<b>Тверді припої</b>					
ПСр72	72%Ag, 28%Cu	0,021	10	779	А, Б, В
ПСр71	71%Ag, 1%Cd, 1%P, 27%Cu	0,043	9,8	795	А, Б
ПСр70	70%Ag, 26%Cu, 4%Zn	0,041	9,8	770	Г
ПСр65	65%Ag, 20%Cu, 15%Zn	0,086	9,45	722	З
ПСр40	40%Ag, 16%Cu, 17%Zn, 27%Cd	0,07	9,25	610	Г
ПСр50	50%Ag, 50%Cu	0,025	9,3	860	А, Г
ПСр50Кд	50%Ag, 34%Cd, 16%Cu	0,078	9,25	640	Д
ПСр45	45%Ag, 30%Cu, 25%Zn	0,1	9,1	730	А, З
ПСр25	25%Ag, 40%Cu, 35%Zn	0,077	8,7	775	А, В, З
ПСр25Ф	25%Ag, 40%Cu, 5%P, 30%Sn	0,186	8,3	725	А, В
ПСр15	15%Ag, 5%Fe, 80%Cu	0,207	8,5	810	А, З
ПСр12М	12%Ag, 52%Cu, 36%Zn	0,074	8,3	830	А
ПСр10	10%Ag, 53%Cu, 37%Zn	0,071	8,4	850	А

**Примітка:** А – паяння і лудіння міді, латуні, бронзи, нікеля; Б – паяння залізонікелевих сплавів шз сталлю; В – паяння сталі з міддю, нікелем, міднонікелевими сплавами; Г – паяння титану і титанових сплавів; Д – паяння міді і мідних сплавів з жароміцними і корозієстійкими сталями; Е – паяння і лудіння міді, міднонікелевих сплавів з керамікою; Є – паяння і лудіння срібних деталей; Ж – паяння і лудіння кольорових металів і сплавів; З – паяння і лудіння ювелірних виробів; И – паяння міді і нікеля зі склом, емаллю і керамікою.

# ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ВУГІЛЛЯ

Таблиця ДЗ.21

## Фізико-механічні й колекторні характеристики щіток електричних машин

Марка щітки	Найменування групи марок щіток	Номинальна щільність струму, ( $\cdot 10^4 \text{ A/m}^2$ )	Припустима окружна швидкість, м/с	Питоме натискання, кПа	Питомий електричний опір, мкОм·м	Твердість, $10^3 \text{ Па}$	Перехідне спадання напруги на парі щіток, В	Коефіцієнт тертя, не більше	Зношування за 20 год., мм, не більше	Область застосування
Г3	Вугільно-графітні	12	60	20...25	14 ± 6	13 ± 6	1 ± 0,4	0,3	0,5	Генератори й двигуни з полегшеними умовами комутації й колекторні машини змінного струму
Г21		5	30	15...100	300 ± 150	40 ± 20	4,6 ± 1,4	0,25	—	
Г33		5,5	36	29...54	300 ± 150	40 ± 23	4,7 ± 1,3	0,25	—	
Г33М		10	35	12...22	≈ 1600	40 ± 20	—	—	—	
Г34		15	25	<34	< 220	35 ± 21	2,2 ± 0,8	0,27	0,30	
611М	Графітні	12	40	20...25	—	—	2,0	—	—	Генератори й двигуни з полегшеними умовами комутації й контактні кільки
6110М		15	90	12...22	15 ± 7	1,2 ± 0,5	2,0	0,3	0,4	
ЕГ2А	Електро-графітовані	12	50	20...25	20 ± 8	15 ± 7	1,4 ± 0,5	0,23	—	Генератори й двигуни із середніми й утрудненими умовами комутації й контактні кільки
ЕГ2АФ		15	90	15...21	24 ± 11	14 ± 8	1,6 ± 0,5	0,23	—	
ЕГ4		12	60	15...20	11 ± 5	4 ± 2	1,4 ± 0,6	0,25	0,6	
ЕГ8		11	45	20...40	43 ± 7	22 ± 13	1,4 ± 0,4	0,25	0,4	
ЕГ14		12	45	20...40	29 ± 9	19 ± 11	1,6 ± 0,5	0,25	0,4	
ЕГ17		—	—	—	12 ± 3	12 ± 3	18 ± 7	—	—	
ЕГ61А		13	60	—	54 ± 18	45 ± 23	2,5 ± 0,7	0,15	0,3	
ЕГ62		10	50	29...49	45 ± 25	—	2,1 ± 0,9	0,17	0,4	
ЕГ71		12	45	20...25	27 ± 8	10 ± 4	1,6 ± 0,5	0,3	0,4	
ЕГ74		15	50	17...25	55 ± 20	33 ± 17	1,8 ± 0,6	0,22	0,4	
ЕГ74АФ		15	60	15...21	29 ± 9	35 ± 15	1,5 ± 0,5	0,22	0,4	
ЕГ74ДО		12	60	17...27	55 ± 20	—	1,9 ± 0,6	0,22	—	
ЕГ75		13	60	34...49	50 ± 15	—	2,35 ± 0,85	0,17	0,3	

Закінчення таблиці ДЗ.21

Марка щітки	Найменування групи марок щіток	Номинальна щільність струму, ( $\cdot 10^4$ А/м <sup>2</sup> )	Припустима окружна швидкість, м/с	Питоме натискання, кПа	Питомий електричний опір, мКОм·м	Твердість, 10 <sup>7</sup> Па	Перехідне Складання напруги на парі щіток, В	Коефіцієнт тертя, не більше	Зношування за 20 год., мм, не більше	Переважна область застосування
EG84	Електрографітованые	17	50	23...39	50 ± 20	–	2,5 ± 1,0	0,19	0,4	Генератори й двигуни із середніми й утрудненими умовами комутації й контактні кільця
EG 84-1		17	55	23...50	60 ± 20	–	2,7 ± 1,0	0,17	0,35	
EG85		15	50	17...35	55 ± 20	34 ± 16	2,1 ± 0,5	0,2	0,4	
EG86		12	45	–	27,5 ± 17,5	21 ± 14	1,75 ± 0,75	0,28	–	
EG141		17	60	20...30	35 ± 15	20 ± 10	1,6 ± 0,5	0,20	0,35	
MI	Металлографітні	25	33	15...20	3,5 ± 1,5	16 ± 8	1,4 ± 0,4	0,25	0,18	Нізьковольтні генератори й контактні кільця
MI1J		–	–	–	4 ± 2	16 ± 8	1,5 ± 0,5	0,22	0,18	
M6		24	35	15...20	3,5 ± 2,5	17,5 ± 7,5	1,5 ± 0,5	0,2	0,35	
M20		15	45	15...20	8 ± 5	16 ± 8	1,4 ± 0,4	0,26	0,2	
MI		30	35	18, 23	< 0,12	9 ± 5	< 0,3	0,2	0,8	
MI4		24	30	20...25	< 1,3	16 ± 6	< 1,6	0,2	0,3	
MI4C		–	–	–	1,7 ± 1,3	–	1,1 ± 0,5	0,2	0,3	
MIС01		–	–	–	< 0,8	13 ± 7	< 3,5	0,25	0,60	
MIС0A		–	–	–	0,2 ± 0,1	29 ± 15	0,3 ± 0,2	0,24	0,60	
MIС01A		–	–	–	< 0,8	13 ± 7	< 0,5	0,25	0,60	
MIС5	24	35	20...25	8,5 ± 6,5	13 ± 7	1,3 ± 0,6	0,24	0,4		
MIС9A	–	–	–	< 10	25 ± 13	< 2,0	0,25	0,4		
MIС20	–	–	–	< 0,4	15 ± 10	0,65 ± 0,35	0,25	0,6		
MIС51	–	–	–	7,5 ± 5,5	13 ± 7	1,85 ± 0,65	0,22	0,35		

**Примітка** для металлографітних щіток наведене зношування за 50 годин.



Таблиця Д3.22

**Властивості графіту і піролітичного вуглецю**

Матеріал	$\rho$ , мкОм·м	$\alpha\rho\cdot 10^{-3}$ , град <sup>-1</sup>	Густина, т/м <sup>3</sup>	$\alpha\cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>
Полікристалічний графіт	8	-1	2,26	7,5
Монокристалічний графіт: вздовж базових площин	0,4	-0,9	2...24	6,6
поперек базових площин	100	-40	2...24	2,6
Піролітичний вуглець	10...50	-0,2	2,1	6,5...7,0

Таблиця Д3.23

**Властивості вугільних електродів**

Тип лектродів	$\rho$ , мкОм·м	Густина, т/м <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа (при розтягненні)	$\sigma_c$ , МПа (при стисканні)
Вугільні	50	1,5	700...1100	2300...4100
Графітовані	15	2,0	600...700	200...500

**ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
НАПІВПРОВІДНИКІВ**

**Заборонена зона** – діапазон значень енергії, які електрон не може мати у ідеальному кристалі. Вимірюється у еВ.

**Ширина забороненої зони ( $W$ )** визначається різницею енергій між дном зони провідності й верхом валентної зони, в якій відсутні дозволені енергетичні рівні для електрона.

**Робота виходу електронів** – найменша кількість енергії, яку необхідно надати електрону для того, щоб вивести його з твердого тіла у вакуум. Робота виходу є характеристикою речовини. Вимірюється у еВ.

**Рухливість носіїв зарядів (електронів і дірок)** – коефіцієнт пропорційності між середньою швидкістю руху носіїв зарядів і напруженістю зовнішнього електричного поля. Чисельно дорівнює швидкості носіїв зарядів при напруженості електричного поля 1 В/м і вимірюється у м<sup>2</sup>/(В·с).

**Власна концентрація основних носіїв зарядів** – кількість основних носіїв зарядів (електронів або дірок) у одиниці об'єму напівпровідника в

умовах термодинамічної рівноваги. Вимірюється у  $1/\text{м}^3$ .

**Постійна ґратки** – величина, що характеризує відстань між атомами кристалічної ґратки. Для кристалів, які не мають кубічної симетрії, постійна ґратки для різних осей відрізняється.

**Показник переломлення середовища (речовини)** – величина, що визначається відношенням фазових швидкостей світла (електромагнітних хвиль) у вакуумі і в даному середовищі.

## ВЛАСТИВОСТІ ПРОСТИХ НАПІВПРОВІДНИКІВ

Таблиця Д3.24

### Фізичні і електричні простих напівпровідників

Елемент	Густина, $\text{т}/\text{м}^3$	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , град $^{-1}$	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$t_{\text{пл}}$ , °С	$\rho$ , Ом·м	$\varepsilon$
Бор	2,34	–	27,4	2300	–	–
Кремній	2,328	–0,77...4,8	84...149	1415	2000*	12,5
Германій	5,323	6,0	60	938	0,47*	16
Фосфор	1,82	–	–	44	–	–
Арсен	5,73	–	–	817	–	–
Сірка	2,07	–	–	113	–	–
Селен	4,79	50	4	217	$1 \dots 10^{11}$	–
Телур	6,24	–	–	450	$29 \cdot 10^{-4}$	–
Йод	4,93	–	0,45	–160	–	–

\* Характеристики отримані при температурі 20 °С

Таблиця Д3.25

### Фізичні властивості простих напівпровідників

Елемент	Атомна маса	$W$ , еВ	Робота виходу електронів, еВ	Рухливість електронів, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Рухливість дірок, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$	Власна концентрація основних носіїв зарядів, $\text{м}^{-3}$
Бор	10,81	1,10	–	–	–	–
Кремній	28,086	1,08	4,3	0,135	0,048	$1,4 \cdot 10^{16}$
Германій	72,61	0,67	4,8	0,39	0,19	$2,33 \cdot 10^{19}$
Фосфор	30,97	1,50	–	–	–	–
Арсен	74,92	1,20	–	–	–	–
Сірка	32,07	2,50	–	–	–	–
Селен	78,96	1,70	–	–	$0,2 \cdot 10^{-4}$	–
Телур	127,6	0,36	–	0,17	0,12	$9,3 \cdot 10^{21}$
Йод	126,904	1,25	–	–	–	–

## ВЛАСТИВОСТІ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СПОЛУК

Таблиця ДЗ.26

### Властивості напівпровідникових хімічних сполук типу $A^{III}B^V$

Хімічна сполука	Густина, т/м <sup>3</sup>	Показник переломлення	$\alpha \cdot 10^{-6}$ , град <sup>-1</sup>	$W$ , еВ	Рухливість електронів, м <sup>2</sup> /(В·с)	Рухливість дірок, м <sup>2</sup> /(В·с)	Застосування
<b>Фосфіди</b>							
AlP	2,4	-	-	-	0,008	0,003	А
GaP	4,1	3,4	4,8	2,25	0,019	0,012	
InP	4,8	3,3	4,5	1,29	0,50	0,015	
<b>Арсеніди</b>							
AlAs	3,6	-	3,5	-	0,03	-	Б
GaAs	5,4	3,2	5,4	1,43	0,95	0,045	
InAs	5,7	3,2	4,8	0,36	3,30	0,050	
<b>Антимоніди</b>							
AlSb	4,3	3,3	4,2	-	0,02	0,055	В
GaSb	5,7	3,7	6,2	0,67	0,40	0,140	
InSb	5,8	4,1	5,0	0,17	10,00	0,100	

**Примітка:** А – різнокольорові світлодіоди; Б – фотоелементи, дозиметри рентгеновського випромінювання, тунельні діоди, лазери; В – чутливі фотоелементи, датчик ЕРС Холла, оптичні фільтри, термоелектричні генератори

Таблиця ДЗ.27

### Властивості напівпровідникових хімічних сполук типу $A^{II}B^{VI}$

Хімічна сполука	Густина, т/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м·К	$t_{пл}$ , °С	$W$ , еВ	Рухливість електронів, м <sup>2</sup> /(В·с)	Рухливість дірок, м <sup>2</sup> /(В·с)	Застосування
<b>Сульфіди</b>							
ZnS	3,98...4,09	-	1850	3,6	-	-	А
HgS	7,79...8,09	-	820	1,8	0,002...0,005	-	Б
CdS	4,82	-	1750	2,4	0,024	0,005	Б
<b>Селеніди</b>							
ZnSe	-	-	1525	2,7	0,07	-	В
CdSe	5,81	-	1258	1,80	0,058...0,08	0,005	В
HgSe	8,26	5,6	800	0,07...0,60	1,00...1,85	-	Г
<b>Телуріди</b>							
ZnTe	-	-	1239	2,2...2,25	-	-	Г
CdTe	5,86	8,5	1098	1,60	0,076...5,7	0,006	Д
HgTe	8,42	6,0	670	0,02...0,25	1,50...7	-	Є

**Примітка:** А – синтез люмінофорів для кольорових кінескопів, рентгеновських трубок, світних табло; Б – фоторезистори, люмінофори; В – фоторезистори, термоелементи, електролюмінісентні прилади, лазери; Г – фоторезистори, термоелементи, випромінюючі прилади; Д – чутливі елементи гамма-випромінювання, світлодіоди, сонячні батареї; Є – чутливі елементи випромінювання і датчка ЕРС Холла

**Властивості напівпровідникових сполук**

Хімічна сполука	Густина, т/м <sup>3</sup>	$\lambda$ , Вт/м·К	$t_{пл}$ , °С	$W$ , еВ	Рухливість електронів, м <sup>2</sup> /(В·с)	Рухливість дірок, м <sup>2</sup> /(В·с)	Застосування
<b>Сульфід</b>							
PbS	3,98...4,09	–	1850	3,6	–	–	А
Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	7,79...8,09	–	820	1,8	0,002...0,005	–	Б
<b>Селенід</b>							
PbSe	8,15	1,7	1076	0,25	0,12	0,100	Б
Bi <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	7,40	2,5	706	0,28	0,10	–	Б
<b>Телурід</b>							
PbTe	8,16	1,7	917	0,30	0,18	0,090	В
Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	–	1,1	585	0,15	0,12	0,050	В
<b>Оксиди</b>							
Cu <sub>2</sub> O	5,90	6,1	1230	0,34	0	0,005	Г
ZnO	5,60	–	–	3,20	0,05	0	Д
TiO <sub>2</sub>	4,20	–	1640	2,90	0,001	–	Д

*Примітка:* А – фоторезистори, люмінофори; Б – фоторезистори, термоелементи, лазери; В – фоторезистори, термоелементи, випромінюючі прилади; Г – випрямлячі, фотоелементи; Д – терморезистори

## Додаток 4

# ВЛАСТИВОСТІ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

### ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Абсолютна магнітна проникність** – фізична величина, що характеризує зв'язок між магнітною індукцією і напруженістю магнітного поля у середовищі. Вимірюється у Тл·м/А.

**Початкова магнітна проникність** ( $\mu_{п}$ ) – безрозмірна величина, що характеризує її значення при дуже слабких полях (близько 0,1 А/м).

**Максимальна магнітна проникність** ( $\mu_{max}$ ) – безрозмірна величина, що показує найбільше значення магнітної проникності для даного матеріалу. В сильних полях в області насичення значення магнітної проникності наближається до одиниці.

**Коерцитивна (затримуюча) сила** ( $H_C$ ) – це напруженість магнітного поля, необхідна для повного ромагнічування феромагнетика.

**Максимальна величина індукції** магнітного поля для даного матеріалу ( $B_{max}$ ) – досягається при його намагнічуванні до насичення.

**Залишкова індукція** ( $B_r$ ) – значення магнітної індукції при нульовій напруженості магнітного поля у процесі розмагнічування зразка, намагніченого до насичення.

**Гранична частота електромагнітного поля** ( $f_{гр}$ ) – частота, після перевищення якої починається стрімке зростання діелектричних втрат фериту.

**Максимальна магнітна енергія** ( $W_{max}$ ) – є властивістю феромагнетика, що характеризує найбільше значення магнітної енергії, яку здатен створити даний феромагнетик при певних умовах.

**Магнітні втрати** – втрати енергії у феромагнетика при його перемагнічуванні.

**Точка (температура) Кюрі** ( $\vartheta$ ) – температура, при якій феромагнетик втрачає магнітні властивості і стає парамагнетиком.

## ВЛАСТИВОСТІ МАГНІТОМ'ЯКИХ МАТЕРІАЛІВ

Таблиця Д4.1

### Склад і магнітні властивості різновидів заліза

Тип заліза	Домішки, %		Магнітні властивості		
	C	O <sub>2</sub>	$\mu_p$	$\mu_{max} \cdot 10^3$	$H_c$ , А/м
Технічно чисте залізо	0,020	0,060	250	7	64,0
Електролітичне залізо	0,020	0,010	600	15	28,0
Електролітичне залізо, переплавлене у вакуумі	0,010	–	–	61	7,2
Карбонільне залізо	0,005	0,005	3300	21	6,4
Залізо, відпалене у водні	0,005	0,003	6000	200	3,2
Монокристал заліза, відпалений у водні	–	–	–	1430	0,8

Таблиця Д4.2

### Магнітні властивості електротехнічної сталі

Марка	Товщина листа, мм	Питомі магнітні втрати, Вт/кг		Магнітна індукція (Тл) при напруженості магнітного поля (А/м)			
		$p_{1.0/50}$	$p_{1.5/50}$	100	2500	5000	30000
2013	0,5	2,5	5,6	–	1,65	1,75	2,05
2112	0,5	2,6	6,0	–	1,6	1,68	2,02
2212	0,5	2,2	5,0	–	1,6	1,68	2,0
2312	0,5	1,75	4,0	–	1,56	1,66	1,96
2412	0,5	1,3	3,1	–	1,5	1,6	1,95
3411	0,5	1,1	2,45	–	1,75	–	–
3414	0,5	0,7	1,5	1,6	1,88	–	–
3415	0,35	0,46	1,03	1,61	1,9	–	–

\* Перша цифра означає індукцію магнітного поля (Тл), друга – частоту (Гц)

Таблиця Д4.3

### Магнітні і електричні властивості пермалойів

Марка	$\mu_p \cdot 10^3$	$\mu_{max} \cdot 10^3$	$H_c$ , А/м	$B_{max}$ , Тл	$\rho$ , мкОм·м
Нелеговані, низьконікелєві					
45Н	1,7...3	16...35	32...10	1,5	0,45
50Н					
Нелеговані, низьконікелєві					
50НХС	1,5...3,2	15...30	20...8	1,0	0,90

Закінчення таблиці Д4.3

Марка	$\mu_n \cdot 10^3$	$\mu_{max} \cdot 10^3$	$H_c$ , А/м	$B_{max}$ , Тл	$\rho$ , мкОм·м
Леговані, низьконікелеві					
79НМ	16...35	50...220	5,2...1,0	0,65	0,55
80НХС					
76НХД					
79НМ-У					
Леговані, високонікелеві					
79%Ni–5%Mo– 15%Fe–0,5%Mn	100	до 1500	0,3	0,8	0,60

Таблиця Д4.4

### Магнітні і електричні властивості феритів

Марка	$\mu_n \cdot 10^3$	$\mu_{max} \cdot 10^3$	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл	$f_{гр}$ , МГц	$\vartheta$ , °С	$\rho$ , Ом·м	Густина, т/м <sup>3</sup>
2000НМ	15	35	0,24	0,11	0,1	110	0,001	-
6000НМ	4,8...8	10	8	0,11	0,5	130	0,1	5,0
1000НМ	0,8...1,2	1,8	28	0,11	5	200	0,5	4,5
600НН	0,5...0,8	1,5	40	0,12	5	110	100	4,8
2000НМ1	1,7...2,5	3,5	25	0,12	1,5	110	5	5,0
700 НМ1	0,55...0,85	1,8	25	0,05	8	200	4	4,8
100ВЧ	0,08...0,12	0,28	300	0,15	80	200	10 <sup>5</sup>	4,8
20ВЧ2	0,016...0,024	0,045	1000	0,10	300	400	10 <sup>6</sup>	4,7
300НН	0,28...0,35	0,6	80	0,13	20	450	10 <sup>6</sup>	4,8
9ВЧ	0,009...0,013	0,03	1500	0,06	600	120	10 <sup>7</sup>	4,4
200ВЧ	0,18...0,22	0,36	70	0,11	-	360	10 <sup>3</sup>	4,7
50ВЧ3	0,045...0,065	0,2	100	0,14	-	480	10 <sup>4</sup>	4,6

### ВЛАСТИВОСТІ МАГНІТОТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Таблиця Д4.5

#### Склад і властивості мартенситних сталей для постійних магнітів

Марка сталі	Склад, %*					$H_c$ , КА/м	$B_r$ , Тл
	$C$	$C_r$	$W$	$C_o$	$M_o$		
ЕХ	0,95...1,10	1,3...1,6	-	-	-	4,6	0,90
ЕХ3	0,90...1,10	2,8...3,6	-	-	-	4,8	0,95
Е7В6	0,68...0,78	0,3...0,5	5,2...6,2	-	-	5,0	1,0
ЕХ5К5	0,90...1,05	5,5...6,5	-	5,5...6,5	-	8,0	0,85
ЕХ9К15М	0,90...1,05	8,0...10,0	-	13,5...16,5	1,2...1,7	13,6	0,80

\* Інше – Fe.

Таблиця Д4.5

**Магнітні властивості сплавів для постійних магнітів**

Марка	$H_c$ , кА/м	$B_r$ , Тл	$W_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>	Тип кристалічної структури
ЮНД4	40	0,50	3,6	Рівновісна
ЮНД8	44	0,60	5,1	
ЮНТС	58	0,43	4,0	
ЮНДК15	48	0,75	6,0	
ЮНДК18	55	0,90	9,7	
ЮНДК18С	44	1,10	14,0	
ЮН13ДК24С	36	1,30	18,0	
ЮН13ДК24	40	1,25	18,0	
ЮН14ДК24	48	1,20	18,0	
ЮН15ДК24	52	1,15	18,0	
ЮН14ДК24Т2	60	1,10	15,0	
ЮН13ДК25А	44	1,40	28,0	Стовпчата
ЮН14ДК25А	52	1,35	28,0	
ЮН13ДК25БА	48	1,40	28,0	
ЮН14ДК25БА	58	1,30	28,0	
ЮН15ДК25БА	62	1,25	28,0	
ЮНДК31Т3БА	92	1,15	32,0	
ЮНДК34Т5	92	0,75	14,0	Рівновісна
ЮНДК35Т5Б	96	0,75	16,0	
ЮНДК35Т5	110	0,75	18,0	
ЮНДК35Т5БА	110	1,02	36,0	Стовпчата
ЮНДК35Т5АА	115	1,05	40,0	Монокристалічна
ЮНДК38Т7	135	0,75	18,0	Рівновісна
ЮНДК40Т8	145	0,70	18,0	Рівновісна
ЮНДК40Т8АА	145	0,90	32,0	Монокристалічна

Таблиця Д4.6

**Магнітні властивості феритів барія і кобальта**

Марка магніту	$H_c$ , кА/м	$B_r$ , Тл	$W_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>
Барієві ізотропні			
1БИ	128	0,19	3,2
1БИ1	128	0,19	3,2
1БИ2	136	0,20	3,4
1БИП	128	0,19	2,8
1БИС	128	0,21	3,6



Закінчення таблиці Д4.6

Марка магніту	$H_c$ , кА/м	$B_r$ , Тл	$W_{max}$ , кДж/м <sup>3</sup>
Барієві анізотропні			
1БАР	128	0,245	4,0
2БА1	200	0,3	7,4
2,3БА	212	0,33	9,2
2,4БА	224	0,33	9,6
2,8БА	217	0,36	11,2
3,1БА	168	0,38	12,4
3БА1	208	0,37	12,0
3БА2	240	0,35	10,4
Кобальтові анізотропні			
1,5КА	128	0,24	5,6
2КА	128	0,28	7,2

## КРИВІ НАМАГНІЧУВАННЯ СТАЛЕЙ

Таблиця Д4.7

### СТАЛЬ 2013

#### Основна крива намагнічування

$B$ , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	$H$ , А/м									
0,4	56	56	57	58	59	60	60	61	61	62
0,5	63	63	64	65	66	67	67	68	68	69
0,6	70	70	71	72	73	74	74	75	76	77
0,7	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87
0,8	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97
0,9	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108
1,0	110	111	113	114	115	117	118	120	121	123
1,1	125	126	127	128	129	132	133	134	136	138
1,2	141	146	152	158	164	170	176	182	188	194
1,3	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290
1,4	300	320	350	380	410	430	460	500	540	580
1,5	620	670	780	890	1 000	1 130	1 240	1 350	1 460	1 580
1,6	1 700	1 860	2 020	2 180	2 340	2 500	2 700	2 800	3 000	3 200
1,7	3 400	3 700	4 000	4 300	4 700	5 000	5 400	5 800	6 200	6 600
1,8	7 000	7 500	8 000	8 500	9 200	10 000	10 600	11 200	11 800	12 400
1,9	13 000	13 600	14 200	14 800	15 600	16 500	17 300	18 100	18 900	19 800
2,0	20 700	22 600	24 400	26 300	28 100	30 000	36 000	42 000	48 000	54 000
2,1	60 000	67 000	74 000	81 000	88 000	95 000	102 000	109 000	116 000	123 000
2,2	130 000	138 000	146 000	154 000	162 000	170 000	178 000	186 000	194 000	202 000
2,3	210 000	218 000	226 000	234 000	242 000	250 000	258 000	266 000	274 000	282 000
2,4	290 000	298 000	306 000	314 000	322 000	330 000	338 000	346 000	354 000	362 000

Таблиця Д4.8

**СТАЛЬ 2211, 2212, 2214, 2312, 2411**  
**Основна крива намагнічування**

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	68	69	70	71	72	73	73	74	75	75
0,5	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
0,6	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
0,7	96	99	103	108	113	118	122	126	131	135
0,8	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185
0,9	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
1,0	240	246	252	258	264	270	276	282	288	294
1,1	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
1,2	400	410	420	430	440	460	470	480	500	520
1,3	550	580	610	650	690	730	780	830	880	940
1,4	1 000	1 060	1 120	1 180	1 240	1 300	1 360	1 420	1 480	1 540
1,5	1 600	1 750	1 900	2 050	2 200	2 350	2 500	2 700	2 900	3 100
1,6	3 400	3 600	3 800	4 100	4 400	4 700	5 300	5 900	6 500	7 100
1,7	7 700	8 200	8 900	9 400	10 000	10 600	11 100	11 700	12 200	12 800
1,8	13 400	14 000	14 600	15 200	15 800	16 400	17 000	17 600	18 200	18 800
1,9	19 400	20 000	21 800	23 700	25 700	27 800	30 000	32 200	34 400	36 600
2,0	38 800	41 000	43 200	45 400	47 600	49 800	52 000	54 500	57 500	60 500
2,1	65 500	72 500	80 000	88 000	96 000	104 000	112 000	120 000	128 000	136 000
2,2	144 000	152 000	160 000	168 000	176 000	184 000	192 000	200 000	208 000	216 000
2,3	224 000	232 000	240 000	248 000	256 000	264 000	272 000	280 000	288 000	296 000
2,4	304 000	312 000	320 000	328 000	336 000	344 000	352 000	360 000	368 000	376 000

Таблиця Д4.9

**СТАЛЬ 2412**  
**Основна крива намагнічування**

B, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,4	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
0,5	77	78	79	80	81	83	84	86	87	89
0,6	90	92	94	96	97	99	101	103	105	107
0,7	109	111	113	115	117	119	122	124	127	130
0,8	133	135	138	141	144	147	150	154	158	162
0,9	166	170	174	179	184	187	194	199	205	211
1,0	217	223	230	237	244	252	260	269	277	286
1,1	295	304	314	324	334	344	355	366	377	388
1,2	399	411	423	435	447	460	473	486	500	540
1,3	585	630	680	735	795	860	930	1 000	1 070	1 150
1,4	1 230	1 320	1 420	1 520	1 630	1 750	1 870	2 010	2 160	2 320
1,5	2 500	2 680	2 870	3 080	3 300	3 540	3 800	4 090	4 380	4 700
1,6	5 000	5 380	5 760	6 200	6 650	7 120	7 650	8 200	8 800	9 400
1,7	10 000	10 500	11 000	11 500	12 000	12 500	13 100	13 700	14 300	14 900
1,8	15 600	16 200	16 800	17 500	18 300	19 100	20 000	20 900	21 900	22 900
1,9	23 900	25 000	26 200	27 400	28 700	30 000	32 000	36 000	42 000	50 000
2,0	59 000	68 000	77 000	86 000	95 000	104 000	113 000	122 000	131 000	140 000
2,1	149 000	158 000	167 000	176 000	185 000	194 000	203 000	212 000	221 000	230 000

Таблиця Д4.10

**СТАЛЬ 3411, 3412, 3413**  
**Крива намагнічування для полюсів**

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
1,0	170	170	180	185	190	190	200	200	210	210
1,1	220	220	230	235	240	240	250	260	260	270
1,2	280	290	300	310	320	320	330	340	350	360
1,3	370	380	400	410	420	430	450	460	470	480
1,4	500	520	540	560	580	600	620	640	660	630
1,5	700	730	760	790	820	850	880	910	940	970
1,6	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400	1 500	1 600	1 700	1 800	1 900
1,7	2 000	2 100	2 200	2 300	2 400	2 500	2 800	3 100	3 400	3 700
1,8	4 000	4 300	4 600	5 000	5 400	5 900	6 500	7 100	7 800	8 500
1,9	9 200	10 000	11 200	13 000	15 500	19 000	22 500	26 000	30 000	35 000
2,0	40 000	45 000	50 000	55 000	60 000	–	–	–	–	–

Таблиця Д4.11

**СТАЛЬ Ст3**  
**Листова сталь (Ст3) товщиною 1...2 мм**

В, Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H, А/м									
0,1	100	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,2	140	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,3	180	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,4	210	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	250	–	–	–	–	275	–	–	–	–
0,6	295	–	–	–	–	320	–	–	–	–
0,7	345	–	–	–	–	375	–	–	–	–
0,8	405	–	–	–	–	440	–	–	–	–
0,9	480	490	495	505	510	520	530	540	550	560
1,0	570	582	595	607	615	630	642	655	665	680
1,1	690	703	720	731	748	760	775	790	808	825
1,2	845	860	880	900	920	940	960	992	1 015	1 045
1,3	1 080	1 112	1 145	1 175	1 220	1 260	1 300	1 350	1 393	1 450
1,4	1 490	1 530	1 595	1 645	1 700	1 750	1 835	1 920	2 010	2 110
1,5	2 270	2 450	2 560	2 710	2 880	3 050	3 200	3 400	3 650	3 750
1,6	4 000	4 250	4 500	4 750	5 000	5 250	5 580	5 950	6 230	6 600
1,7	7 050	7 530	7 950	8 400	8 850	9 320	9 800	10 300	10 800	11 400
1,8	11 900	12 400	13 000	13 500	14 100	14 800	15 600	16 200	17 000	17 800
1,9	18 800	19 700	20 700	21 500	22 600	23 500	24 500	25 600	26 500	27 500
2,0	29 000	30 200	31 500	32 800	34 200	36 100	38 000	–	–	–

Таблиця Д4.12

**Лита сталь, товсті листи (Ст3), кування**

В, Гл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/м</i>									
0,0	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72
0,1	80	88	96	104	112	120	128	136	144	152
0,2	160	168	176	184	192	200	208	216	224	232
0,3	240	248	250	264	272	280	288	296	304	312
0,4	320	328	336	344	352	360	368	376	384	392
0,5	400	404	417	426	434	443	452	461	470	479
0,6	488	497	506	516	525	535	544	554	564	574
0,7	584	593	603	613	623	632	642	652	662	672
0,8	682	693	703	724	734	745	755	766	776	787
0,9	798	810	823	835	848	850	873	885	898	911
1,0	924	938	953	969	986	1 004	1 022	1 039	1 056	1 073
1,1	1 090	1 108	1 127	1 147	1 167	1 187	1 207	1 227	1 248	1 269
1,2	1 290	1 315	1 340	1 370	1 400	1 430	1 460	1 490	1 520	1 555
1,3	1 590	1 630	1 670	1 720	1 760	1 810	1 860	1 920	1 970	2 030
1,4	2 090	2 160	2 230	2 300	2 370	2 440	2 530	2 620	2 710	2 800
1,5	2 890	2 990	3 100	3 210	3 320	3 430	3 560	3 700	3 830	3 960
1,6	4 100	4 250	4 400	4 550	4 700	4 870	5 000	5 150	5 300	5 500

# ДОДАТОК 5

## ПЕРІОДИЧНА СИСТЕМА ЕЛЕМЕНТІВ Д.І. МЕНДЕЛІЄВА

		Атомний номер		Символ		Назва		Відносна атомна маса		Валентні електрони		III A	IV A	V A	VI A	VII A	VIII A	
I A	II A	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B	VIII B	IX B	X B	XI B	II B	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B
<b>1</b>	<b>1 H</b> Гідроген 1.0079 1s <sup>1</sup>																	<b>2 He</b> Гелій 4.0026 1s <sup>2</sup>
<b>2</b>	<b>3 Li</b> Літій 6.941 2s <sup>1</sup>																	<b>10 Ne</b> Неон 20.18 2s <sup>2</sup> 2p <sup>6</sup>
<b>3</b>	<b>11 Na</b> Натрій 22.990 3s <sup>1</sup>																	<b>18 Ar</b> Аргон 39.948 3s <sup>2</sup> 3p <sup>6</sup>
<b>4</b>	<b>19 K</b> Калій 39.098 4s <sup>1</sup>																	<b>36 Kr</b> Криптон 79.904 4s <sup>2</sup> 4p <sup>6</sup>
<b>5</b>	<b>37 Rb</b> Рубідій 85.468 5s <sup>1</sup>																	<b>54 Xe</b> Ксенон 131.29 5s <sup>2</sup> 5p <sup>6</sup>
<b>6</b>	<b>55 Cs</b> Цезій 132.91 6s <sup>1</sup>																	<b>86 Rn</b> Радон 222.02 6s <sup>2</sup> 6p <sup>6</sup>
<b>7</b>	<b>87 Fr</b> Францій 223.02 7s <sup>1</sup>																	<b>118 Uuo</b> Ununoctium [293]

<b>Лантаноїди</b>	<b>58 Ce</b> Церій 140.12 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>59 Pr</b> Празеодим 140.91 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>60 Nd</b> Неодим 144.24 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>61 Pm</b> Прометій 146.92 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>62 Sm</b> Самарій 150.36 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>63 Eu</b> Європій 151.96 4f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>64 Gd</b> Гадоліній 157.25 4f <sup>7</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>65 Tb</b> Тербій 158.93 Хв <sup>4</sup> f <sup>6</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>66 Dy</b> Диспрозій 162.50 4f <sup>9</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>67 Ho</b> Гольмій 164.93 4f <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>68 Er</b> Ербій 167.26 4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>69 Tm</b> Тулій 168.93 4f <sup>11</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>70 Yb</b> Йттербій 173.04 4f <sup>14</sup> 6s <sup>2</sup>	<b>71 Lu</b> Лютецій 174.97 4f <sup>14</sup> 5d <sup>1</sup> 6s <sup>2</sup>
<b>Актиноїди</b>	<b>90 Th</b> Торій 232.04 6d <sup>2</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>91 Pa</b> Протактиній 231.04 5f <sup>6</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>92 U</b> Уран 238.03 5f <sup>6</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>93 Np</b> Нептуній 237.05 5f <sup>6</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>94 Pu</b> Плутоній 244.06 5f <sup>6</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>95 Am</b> Америцій 243.06 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>96 Cm</b> Кюріцій 247.07 5f <sup>6</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>97 Bk</b> Берклій 247.07 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>98 Cf</b> Каліфорній 251.08 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>99 Es</b> Ейнштейній 252.08 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>100 Fm</b> Фермій 257.10 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>101 Md</b> Менделєєвій 258.10 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>102 No</b> Нобелій 259.10 5f <sup>7</sup> 7s <sup>2</sup>	<b>103 Lr</b> Лоуренсій 262.11 5f <sup>14</sup> 6d <sup>1</sup> 7s <sup>2</sup>

**Назви найбільш поширених елементів і простих речовин,  
що не збігаються**

Символ елемента	Назви елементів	Назви простих речовин
<b>Ag</b>	Аргентум	Срібло
<b>As</b>	Арсен	Миш'як
<b>Au</b>	Аурум	Золото
<b>H</b>	Гідроген	Водень
<b>C</b>	Карбон	Вуглець
<b>Cu</b>	Купрум	Мідь
<b>Mn</b>	Манган	Марганець
<b>Hg</b>	Меркурій	Ртуть
<b>N</b>	Нітроген	Азот
<b>O</b>	Оксиген	Кисень
<b>Pb</b>	Плюмбум	Свинець
<b>Sn</b>	Станум	Олово
<b>Sb</b>	Стибій	Сурма
<b>S</b>	Сульфур	Сірка
<b>Fe</b>	Ферум	Залізо
<b>F</b>	Флюор	Фтор

## Додаток 6

### Одиниці Міжнародної системи (ГОСТ 8.417 – 81)

Найменування величини	Найменування одиниці виміру	Скорочене позначення одиниці	
		Українське	Міжнародне
<b><i>Основні одиниці</i></b>			
Довжина	метр	м	m
Маса	кілограм	кг	kg
Час	секунда	с	s
Електричний струм	ампер	А	A
Термодинамічна температура	кельвін	К	K
Кількість речовини	моль	моль	mol
Сила світла	кандела	кд	cd
<b><i>Додаткові одиниці</i></b>			
Плоский кут	радіан	рад	rad
Тілесний кут	стерадіан	ср	sr
<b><i>Похідні одиниці</i></b>			
<i>1. Одиниці простору і часу</i>			
Площа	квадратний метр	м <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
Об'єм, місткість	кубічний метр	м <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
Швидкість	метр за секунду	м/с	m/s
Кутова швидкість	радіан за секунду	рад/с	rad/s
Прискорення	метр за секунду в квадраті	м/с <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
Кутове прискорення	радіан за секунду в квадраті	рад/с <sup>2</sup>	rad/s <sup>2</sup>
Частота	герц	Гц	Hz
<i>2. Механічні одиниці</i>			
Щільність	кілограм на кубічний метр	кг/м <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
Сила, вага	ньютон	Н	N
Тиск, механічна напруга	паскаль	Па	Pa

Найменування величини	Найменування одиниці виміру	Скорочене позначення одиниці	
		Українське	Міжнародне
Момент	ньютон-метр	Н·м	N·m
Момент інерції	кілограм-метр у квадраті	кг·м <sup>2</sup>	kg·m <sup>2</sup>
<i>3. Електричні й магнітні одиниці</i>			
Енергія, робота	джоуль	Дж	J
Потужність	ват	Вт	W
Кількість електрики (електричний заряд)	кулон	Кл	C
Електрична напруга, різниця електричних потенціалів, електрорушійна сила	вольт	В	V
Електрична ємність	фарад	Ф	F
Електричний опір	ом	Ом	W
Електрична провідність	сіменс	См	S
Напруженість електричного поля	вольт на метр	В/м	V/m
Магнітний потік	вебер	Вб	Wb
Магнітна індукція	тесла	Тл	T
Напруженість магнітного поля	ампер на метр	А/м	A/m
Магніторушійна сила	ампер	А	A
Індуктивність, взаємна індуктивність	генрі	Гн	H
Потужність електричного кола:			
Активна	ват	Вт	W
Реактивна	вар	вар	var
Повна	вольт-ампер	В·А	V·A
<i>4. Світлові одиниці</i>			
Світловий потік	люмен	лм	lm
Освітленість	люкс	лк	lx
Яскравість	кандела на квадратний метр	кд/м <sup>2</sup>	cd/m <sup>2</sup>



Найменування величини	Найменування одиниці ви- міру	Скорочене позначення одиниці	
		Українське	Міжнародне
<i>5. Одиниці теплових величин</i>			
Кількість теплоти, термодинамічний потенціал, ентальпія	джоуль	Дж	J
Питома кількість теплоти	джоуль на кілограм	Дж/кг	J/kg
Теплоємність системи, ентропія	джоуль на кельвін	Дж/К	J/K
Питома теплоємність, питома ентропія	джоуль на кілограм-кельвін	Дж/(кг·К)	J/(kg·K)
Тепловий потік	ват	Вт	W
Поверхнева щільність теплового потоку	ват на квадратний метр	Вт/м <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
Теплопровідність	ват на метр-кельвін	Вт/(м·К)	W/(m·K)
Температурний градієнт	кельвін на метр	К/м	K/m

## Додаток 7

### Літерні позначення найбільш вживаних в електротехніці величин (ДСТУ ІЕС 60027-1:2017, ДСТУ ІЕС 60027-2:2017)

Найменування величини	Позначення	
	головне	запасне
Енергія електромагнітна	$W$	–
Ємність електрична	$C$	–
Заряд електричний	$Q$	–
Зсув фаз між напругою і струмом	$\varphi$	–
Індуктивність взаємна	$M$	$L_{mn}$
Індуктивність власна	$L$	–
Індукція магнітна	$B$	–
Ковзання	$s$	–
Коефіцієнт загасання	$\delta$	–
Коефіцієнт магнітного розсіювання	$\sigma$	–
Коефіцієнт потужності при синусоїдальних напрузі й струмі	$\cos \varphi$	–
Коефіцієнт трансформації	$k$	$n$
Коефіцієнт трансформації трансформатора напруги (ТН)	$K$	$K_U$
Коефіцієнт трансформації трансформатора струму (ТТ)	$K$	$K_I$
Напруга електрична	$U$	–
Напруженість електричного поля	$E$	–
Напруженість магнітного поля	$H$	–
Опір електричний, опір постійному струму, опір активний	$R$	$r$
Опір електричний повний	$Z$	–
Опір електричний питомий	$\rho$	–
Опір електричний реактивний	$X$	$x$
Опір магнітний	$R_m$	$r_m$
Період коливачь електричної чи магнітної величини	$T$	–
Потік магнітний	$\Phi$	–
Потокозчеплення	$\Psi$	–
Потужність кола постійного струму, потужність активна	$P$	–
Потужність повна	$S$	$P_S$
Потужність реактивна	$Q$	$P_Q$
Провідність електрична магнітна	$G$	$g$
Провідність електрична повна	$Y$	–
Провідність магнітна	$\Lambda$	–

Найменування величини	Позначення	
	голове	запасне
Провідність реактивна	$B$	$b$
Сила коерцитивна	$H_c$	–
Сила електрорушійна (ЕРС)	$E$	–
Сила магніторушійна (МРС) уздовж замкнутого контуру	$F$	$F_m$
Стала часу електричного кола	$\tau$	$T$
Стала електрична	$\epsilon_0$	–
Стала магнітна	$\mu_0$	–
Струм	$I$	–
Частота коливань електричної чи магнітної величини	$f$	$\gamma$
Частота коливань кутова електричної чи магнітної величини	$\omega$	$\Omega$
Число витків	$N$	$w$
Число пар полюсів	$p$	–
Число фаз багатофазної системи	$m$	–
Щільність струму	$J$	–

**Примітки:**

1. Запасні позначення застосовуються, коли основні використовувати нераціонально, наприклад, якщо можуть виникнути непорозуміння внаслідок позначення однієї і тією самою буквою різних величин.

2. Миттєві значення ЕРС, електричної напруги, потенціалу, струму, щільності струму, електричного заряду, потужності, електромагнітної енергії варто позначати відповідними малими літерами.

Для амплітудних значень величин, що є синусоїдальними функціями часу, застосовується нижній індекс  $m$  (наприклад,  $I_m$ ).

## Додаток 8

### Грецька абетка та її українська вимова

Позначення		Вимова	Позначення		Вимова	Позначення		Вимова
Α	α	<a href="#">Альфа</a>	Ι	ι	<a href="#">Йота</a>	Ρ	ρ	<a href="#">Ро</a>
Β	β	<a href="#">Бета</a>	Κ	κ	<a href="#">Каппа</a>	Σ	σ ζ	<a href="#">Сигма</a>
Γ	γ	<a href="#">Гамма</a>	Λ	λ	<a href="#">Лямбда</a>	Τ	τ	<a href="#">Тау</a>
Δ	δ	<a href="#">Дельта</a>	Μ	μ	<a href="#">Мю</a>	Υ	υ	<a href="#">Іпсилон</a>
Ε	ε	<a href="#">Епсилон</a>	Ν	ν	<a href="#">Ню</a>	Φ	φ	<a href="#">Фі</a>
Ζ	ζ	<a href="#">Дзета</a>	Ξ	ξ	<a href="#">Ксі</a>	Χ	χ	<a href="#">Хі</a>
Η	η	<a href="#">Ета</a>	Ο	ο	<a href="#">Омікрон</a>	Ψ	ψ	<a href="#">Псі</a>
Θ	θ	<a href="#">Тета</a>	Π	π	<a href="#">Пі</a>	Ω	ω	<a href="#">Омега</a>

## Додаток 9

### Латинська абетка та її українська вимова

Позначення		Вимова	Позначення		Вимова	Позначення		Вимова
A	a	<a href="#">А</a>	J	j	<a href="#">Йот</a>	S	s	<a href="#">Ес</a>
B	b	<a href="#">Бе</a>	K	k	<a href="#">Ка</a>	T	t	<a href="#">Те</a>
C	c	<a href="#">Це</a>	L	l	<a href="#">Ель</a>	U	u	<a href="#">У</a>
D	d	<a href="#">Де</a>	M	m	<a href="#">Ем</a>	V	v	<a href="#">Ве</a>
E	e	<a href="#">Е</a>	N	n	<a href="#">Ен</a>	W	w	<a href="#">Дубль ве</a>
F	f	<a href="#">Еф</a>	O	o	<a href="#">О</a>	X	x	<a href="#">Ікс</a>
G	g	<a href="#">Же</a>	P	p	<a href="#">Пе</a>	Y	y	<a href="#">Ігрек</a>
H	h	<a href="#">Аш</a>	Q	q	<a href="#">Цу</a>	Z	z	<a href="#">Зет</a>
I	i	<a href="#">І</a>	R	r	<a href="#">Ер</a>			

## Додаток 10

### Множники і префікси для утворення десяткових кратних і часткових одиниць

Мно- жник	Наймену- вання префіксу	Позначення префіксу		Множ- ник	Наймену- вання префіксу	Позначення префіксу	
		українське	міжнато- дне			україн- ське	міжнато- дне
10 <sup>12</sup>	тера-	Т	Т	10 <sup>-1</sup>	деци-	д	d
10 <sup>9</sup>	гіга-	Г	G	10 <sup>-2</sup>	санти-	с	c
10 <sup>6</sup>	мега-	М	M	10 <sup>-3</sup>	мілі-	м	m
10 <sup>3</sup>	кіло-	к	k	10 <sup>-6</sup>	мікро-	мк	mk
10 <sup>2</sup>	гекто-	г	h	10 <sup>-9</sup>	нано-	н	n
10 <sup>1</sup>	дека-	да	d	10 <sup>-12</sup>	піко-	п	p

Навчальне видання

**Бобров** Олексій Володимирович  
**Козечко** Вікторія анатоліївна  
**Ципленков** Дмитро Володимирович  
**Овчаренко** Аліна Олександрівна

**КОНСТРУКЦІЙНІ  
ТА  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ МАТЕРІАЛИ**

Навчальний посібник

Редактор Л.О. Чуїшева

Підписано до друку 00.00.0000. Формат 30 × 42/4.

Папір офсетний. Ум. друк. арк. 17.

Обл.-вид. арк. 17. Тираж 70 прим. Зам. \_\_\_\_.

Підготовлено до друку та видруковано  
у Національному технічному університеті "Дніпровська політехніка".  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842.  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.

ISBN 978-966-981-825-6



9 789669 818256