

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Афанасьєва О.В.

ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ
ТЕХНІКИ
Частина друга

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів спеціалізації «Оптотехніка»

РЕКОМЕНДОВАНО
Вченою радою університету.
Протокол № 13 від 28.12.2018

Харків 2019

УДК 621.002.3(075.8)

Афанасьєва О.В. Функціональні матеріали оптоелектронної техніки. Частина друга. Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 172 с.

У навчальному посібнику викладено закономірності формування структури матеріалів при кристалізації та пластичній деформації; показано взаємозв'язок комплексу фізико-механічних властивостей матеріалів зі структурою; обґрунтовано забезпечення міцності, надійності та довговічності деталей завдяки раціональному вибору матеріалів з урахуванням умов експлуатації. З позицій експлуатаційних вимог розглянуті особливості властивостей, обробки та застосування діелектричних, провідникових, напівпровідникових і магнітних матеріалах. Наводиться класифікація матеріалів і описуються їх електричні, фізико-хімічні та механічні властивості. В посібник включені відомості про нові матеріали: аморфні сплави, наноматеріали, нелінійні і активні діелектрики, розширені відомості про якість матеріалів. Окремий розділ присвячено матеріалам з особливими оптичними властивостями, технології їх одержання та використанню в сучасній оптоелектроніці.

Зміст навчального посібника відповідає програмі та курсу лекцій з дисциплін «Проектування та технологія виробництва оптоелектронного та лазерного обладнання», «Лазерні інформаційні технології», може використовуватися при вивченні дисциплін «Матеріалознавство та конструкційні матеріали» та «Оптичні інформаційні системи».

Рекомендовано студентам денної та заочної форм навчання за спеціалізацією «Оптотехніка».

Іл.. 46. Табл.. 27. Бібліогр. наймен. 53

Рецензенти:

Н.О. Лалазарова, канд. техн. наук, доцент, доц. кафедри Технології металів та матеріалознавства ХНАДТУ

І. М. Бондаренко, д-р ф.-м. наук, професор, зав. кафедри МЕЕПІ ХНУРЕ

ЗМІСТ

ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ В ОПТОЕЛЕКТРОНІЦІ.....	5
I. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ОПТИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	
.....	7
1. НЕОРГАНІЧНЕ СКЛО.....	7
1.1. Загальна характеристика і класифікація неорганічного скла	
.....	7
1.2. Загальні властивості скла.	8
2. ОПТИЧНЕ СКЛО	11
2.1 Номенклатура оптичного скла	11
2.2 Оптичне кварцове скло.....	13
2.3 Система нормованих параметрів оптичного скла.....	14
2.4. Органічне скло (плексиглас)	21
3. ВИРОБНИЦТВО ОПТИЧНОГО СКЛА.....	22
3.1 Основні складові технологічного процесу одержання скла й скловиробів.....	22
3.2 Підготовка сировинних матеріалів.....	22
3.3 Приготування шихти	25
3.4 Варіння скла	26
3.5 Вироблення й відпал оптичного скла.....	31
3.6 Виробництво кварцового оптичного скла.....	33
3.7 Дефекти оптичного скла і його контроль.....	34
3.8 Одержання ситалів	35
4. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА.....	39
4.1 Особливості застосування оптоволоконних технологій.....	39
4.2 Матеріали для виготовлення оптичного волокна.....	41
4.3 Процес виготовлення заготовки для оптоволокна.....	44
4.4 Технологія нарощування оптичного волокна.....	49
4.5 Технологія витяжки оптичного волокна із заготовок.....	51
5. ОПТИЧНІ КРИСТАЛИ І КЕРАМІКА.....	54
5.1 Кристали для активних елементів лазерів.....	54
5.2 Кристали пасивної оптики.....	60
5.3 Нелінійні кристали.....	64
5.4 Фотонні кристали.....	69
5.5 Оптична кераміка.....	72
6. ОПТИЧНІ ПОКРИТТЯ.....	75

6.1 Види й призначення покриттів.....	75
6.2 Нанесення покриттів у вакуумі.....	79
6.3 Нанесення покриттів хімічним способом.....	83
7. З'ЄДНАННЯ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ І З'ЄДНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ.....	86
7.1 Методи з'єднання оптичних деталей.....	86
7.2 Види оптичних клеїв	89
II. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	95
8. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ.....	95
8.1. Класифікація матеріалів за магнітними властивостями	95
8.2. Основні характеристики магнітних властивостей матеріалів.....	99
8.3. Магнітно-м'які матеріали	103
8.4. Магнітно-тверді матеріали	113
8.5 Тонкі магнітні плівки.....	116
9. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	119
9.1. Класифікація матеріалів за електричними властивостями	119
9.2. Зонна теорія твердих тіл	120
9.3 Електричні властивості діелектриків	122
9.4. Активні діелектрики	126
9.5. Електричні властивості провідників	132
9.6. Електричні властивості напівпровідників	136
10. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ПРУЖНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	141
10.1 Основні вимоги до пружних матеріалів.....	141
10.2 Матеріали для пружних елементів приладобудування.....	142
11. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ТЕПЛОВИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	147
11.1. Сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення.	147
11.2 Сплави із заданим температурним коефіцієнтом модуля пружності	153
Глосарій фахових термінів	158
ЛІТЕРАТУРА	167
ДОДАТОК А.....	170

ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ В ОПТОЕЛЕКТРОНІЦІ

Основними факторами, що визначають розвиток сучасної оптоелектронної техніки, є розробка нових матеріалів із заданими властивостями, досконаліх високопродуктивних технологій їх виробництва і обробки, підготовка кадрів вищої кваліфікації.

У сучасній оптоелектроніці використовується величезна кількість матеріалів, як простих, так і складних, композиційних, комбінованих. Можна сказати, що прогрес оптоелектроніки зобов'язаний розвитку матеріалознавства. Поява нових матеріалів з новими оптичними характеристиками дозволяє створювати оптоелектронні вироби з новими властивостями, новими принципами. Зростають вимоги до структурної досконалості матеріалів, їх якості, технологічності, розвиваються і удосконалюються технології виробництва матеріалів і виробів.

У наш час нові функціональні матеріали рідко з'являються випадково, у результаті вдалого досвіду. Необхідно попереднє глибоке вивчення фізичних, механічних і хімічних характеристик речовин, які могли б бути використані як технічні матеріали.

Кінець ХХ століття характеризувався переходом до застосування матеріалів у метастабільному стані, збільшилася питома вага обробки поверхні стали, використання в якості теплового джерела концентрованого потоку енергії: найбільший розвиток отримали лазерні, вакуумні, іонні та інші процеси.

Збільшення в ХХІ столітті частки пластмас, кераміки та композитів супроводжується створенням якісно нових видів матеріалів, які значно перевищують за властивостями багато металеві. Зменшення частки металевих матеріалів супроводжується також якісним їх зміною: практично всі нові матеріали мають високі, понад- або ультрависокі властивості. У новому сторіччі будуть продовжувати розвиватися на хорошому рівні лазерна, плазмова, високочастотна, індукційна, електронна термічна обробка.

В галузі інженерії поверхні інтенсивний розвиток на початку ХХІ століття отримують комбіновані процеси, які різко підвищують експлуатаційні властивості поверхні. До них насамперед потрібно віднести поєднання класичних дифузійних процесів насичення поверхні з нанесенням на них покриттів товщиною 3...5мкм методом хімічного та фізичного осадження та парової фази.

Швидкий ріст оптотехніки в усім світі й у всіх її галузях супроводжується безперервним збільшенням номенклатури застосовуваних матеріалів, удосконалюванням технології їхнього виготовлення й використанням нових видів сировини.

Для розвитку нової техніки, мікроелектроніки, радіотехніки, нанотехніки, лазерної й оптоелектронної техніки, автоматики потрібна велика кількість різноманітних речовин, яких немає в природі: полімери і напівпровідники, надчисті і надтверді, жаростійкі, феромагнітні та інші матеріали. Сучасне матеріалознавство вирішує ці завдання й допомагає створювати нові методи обробки матеріалів, у зв'язку із чим різко підвищилася його роль в одержанні нових матеріалів. У наш час нові функціональні матеріали рідко з'являються випадково, у результаті вдалого досвіду. Необхідно попереднє глибоке вивчення фізичних, механічних і хімічних характеристик речовин, які могли б бути використані як функціональні матеріали.

У навчальному посібнику зроблена спроба узагальнення сучасного досвіду створення матеріалів різного призначення. Розглянуто особливості одержання, структура, її дефекти і властивості основних оптичних матеріалів. Стисло розглянуті питання виготовлення оптичних деталей, методів контролю якості оптичних матеріалів.

Зміст навчального посібника відповідає програмі та курсу лекцій з дисциплін «Проектування та технологія виробництва оптоелектронного та лазерного обладнання», «Лазерні інформаційні технології», може використовуватися при вивченні дисциплін «Матеріалознавство та конструкційні матеріали» та «Оптичні інформаційні системи». При написанні навчального посібника враховано, що студенти прослухали розділи геометричній оптики, оптичних вимірювань, матеріалознавства.

В кінці кожної глави наводяться питання і завдання для самоконтролю засвоєння знань. Є бібліографічний список навчальної та науково-технічної літератури.

I МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ОПТИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Матеріалами з особливими оптичними властивостями або оптичними називаються матеріали, що пропускають електромагнітне випромінювання в ультрафіолетових, видимих і інфрачервоній частинах спектра. До оптичних матеріалів відносяться неорганічне скло, органічне скло та оптичні кристали.

1. НЕОРГАНІЧНЕ СКЛО

1.1 Загальна характеристика і класифікація неорганічного скла

Скло являє собою тверду аморфну речовину, що утворюється за сплавненні склоутворюючих оксидів і безоксидних з'єднань. Структурною основою силікатних стекол, зокрема, найбільш простих за складом кварцових стекол, є тетраедри SiO_4 , в центрі яких розташовані іони Si^{4+} , а в вершинах іони кисню O^{2-} (рис. 1.1).

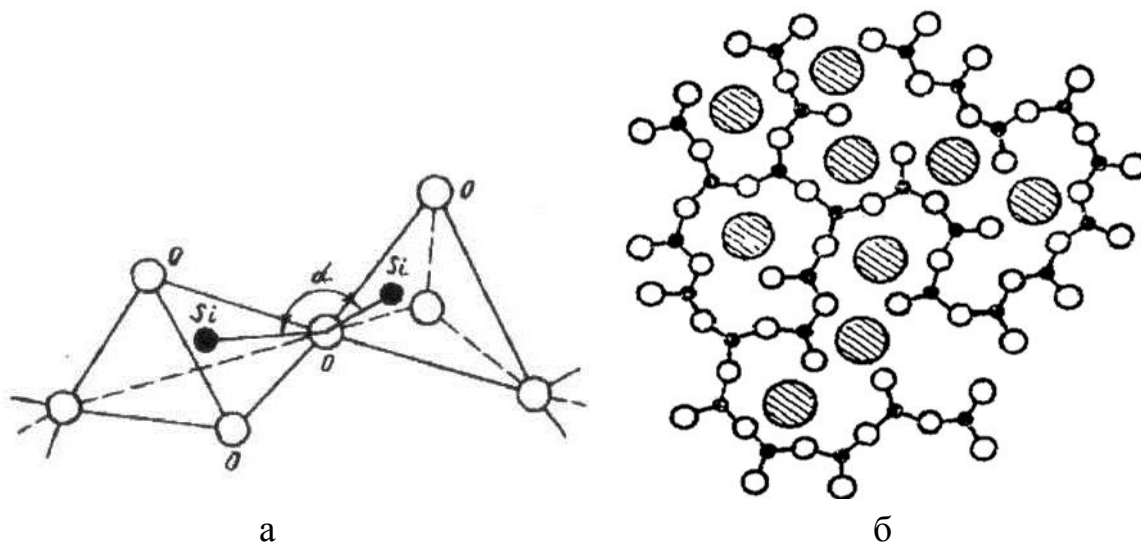


Рисунок 1. 1. – Схематичне зображення структури силікатних стекол: а – тетраедри SiO_4 у склі, б – тривимірна сітка скла, побудована з кремній-кисневих тетраедрів, α – кут між тетраедрами, ⊙ – іон натрію

Ці тетраедри, з'єднуючись один з одним через кисневі іони, утворюють суцільну тривимірну сітку. При цьому кут $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ в силікатних стеклах коливається в межах $120 \dots 180^\circ$, що порушує сувору періодичність в розташуванні тетраедрів. Тому в стеклах, як в аморфних тілах, існує ближній порядок, але відсутній дальній порядок. Введення в силікатні стекла лужних

оксидів (модифікуючих оксидів) Li_2O , Na_2O і K_2O порушує кремній-кисневий каркас. Лужні катіони розривають ланцюжки $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$ (рис.1.1, б), що призводить до ослаблення каркаса і його розрихлення.

Скляні вироби одержують у результаті розплавлення здрібнених речовин певного хімічного складу з наступною переробкою розплавленої скломаси. Для цього використовують склоутворюючі, модифікуючі і проміжні оксиди. *Склоутворюючими* є оксиди SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , GeO_2 і деякі безкисневі з'єднання селену, телуру, миш'яку. За видом склоутворюючих оксидів стекла називають відповідно силікатними, боратними, фосфатними, германатними. Основну частину стекол, що застосовуються в оптоелектронних засобах, складають силікатні скла. *Модифікуючими* є оксиди Na , K , Li , Ca , Mg , Zn , Ba та інші, які надають виробам різні фізико-хімічні властивості. Для отримання певних властивостей в силікатні стекла вводять проміжні оксиди типу MeO або Me_2O_3 (CaO , BaO , PbO , Al_2O_3 і ін). Вбудовуючись в структурну сітку стекла ці оксиди, підвищують діелектричні властивості, не знижуючи технологічних властивостей.

За вмістом модифікаторів стекла бувають лужними (містять оксиди Na_2O , K_2O); безлужними; кварцовими.

По призначенню всі стекла підрозділяють на технічні (оптичні, світлотехнічні, електротехнічні, лабораторні, приладові, трубні та ін.); будівельні (віконні, вітринні, армовані, склоблоки); побутові (склотара, посудні, побутові дзеркала та ін.).

Технічні стекла в більшості відносяться до алюмоборосилікатної групи й відрізняються розмаїтістю вхідних оксидів. Стекла випускаються промисловістю у вигляді готових виробів, заготовок або окремих деталей.

1.2 Загальні властивості скла

При нагріванні скло плавиться в деякому температурному інтервалі, що залежить від складу (рис. 1.2). Для промислових силікатних стекол температура стеклування $t_c=425\dots600^\circ\text{C}$, температура розм'якшення t_p лежить у межах $600\dots800^\circ\text{C}$. В інтервалі температур між t_c і t_p скла перебувають у високов'язкому пластичному стані. При температурі вище t_p ($1000\dots1100^\circ\text{C}$) проводяться всі технологічні процеси переробки скломаси у виробі. Властивості скла, як і всіх аморфних тіл, ізотропні. Густина скла коливається від 2,2 до $6,5 \text{ г/см}^3$ (для скла з оксидами свинцю або барію вона може досягати $8,0 \text{ г/см}^3$).

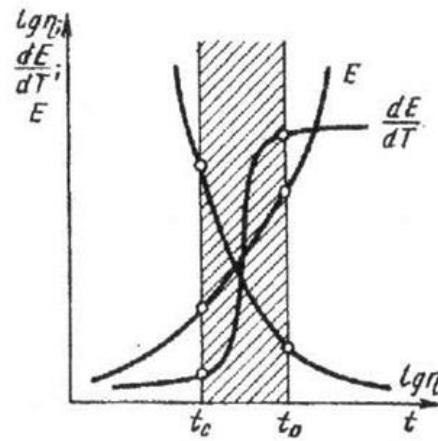


Рисунок 1.2. – Залежність властивостей скла від температури: η – в'язкість; E – питомий об'єм і теплоємність; dE/dT – теплоємність і температурний коефіцієнт лінійного розширення; t_c – температура стеклування; t_p – температура розм'якшення

Механічні властивості скла залежать від хімічного складу і термічної обробки й характеризуються високим опором стисканню (500...2000 МПа), низькою границею міцності при розтягуванні (30...90 МПа) і згині (50...150 МПа). Модуль пружності високий (455...500 МПа), коефіцієнт Пуассона 0,184...0,26. Твердість скла, як і інших неорганічних матеріалів, часто визначається наближеним методом за мінералогічною шкалою Мооса й дорівнює 5 ... 7 одиницям (за 10 одиниць прийнята твердість алмаза, за одиницю – твердість тальку). Ударна в'язкість скла низька (1,5...2,5 кДж/м²), воно крихке. Більше високі механічні характеристики мають стекла безлужного складу та кварцові. Міцність скла залежить від декількох складових: способу вироблення й обробки поверхонь і торців, однорідності, ступеня відпалу або гартування, стану поверхні листа і його розмірів.

Хімічна стійкість стекол залежить від хімічного складу, температури й тиски. Оксиди, що збільшують хімічну стійкість: Si_2 , Zr_2 , Ti_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO , ZnO . Оксиди, що зменшують хімічну стійкість: LiO_2 , Na_2O , K_2O , BaO , PbO . Стекло розчиняється під впливом HF , H_3PO_4 , розчинів лугів, карбонатів, кислот. З підвищенням температури й збільшенням тиску хімічна стійкість скла зменшується.

Електропровідність скла різко зростає з підвищенням температури й зі збільшенням змісту іонів Li , Na , K , Pb .

Найважливішими специфічними властивостями стекол є їхні *оптичні властивості*: світлопрозорість, відбиття, розсіювання, поглинання та переломлення світла. Звичайне незабарвлене листове скло пропускає до 90%,

відбиває приблизно 8% і поглинає близько 1% видимого і частково інфрачервоного світла; ультрафіолетове випромінювання поглинається майже повністю. Кварцове скло є прозорим для ультрафіолетового випромінювання. Коефіцієнт переломлення стекол становить 1,47...1,96; коефіцієнт розсіювання (дисперсії) перебуває в інтервалі 20...71. Стекло з більшим вмістом PbO поглинає рентгенівське випромінювання.

Термостійкість скла залежить від його складу та методів переробки. Так скла, що містять окисли Al і Fe, краще проводять тепло, а ті, що містять окиси Ba й Pb – гірше. Термостійкість скла характеризує його довговічність в умовах різних змін температури. Вона визначається різницею температур, що скло може витримати без руйнування при його різкому охолодженні у крижаній воді. Механічна міцність і теплостійкість скла можуть бути підвищені шляхом гартування та термічного зміцнення. Загартування полягає в нагріванні скла до температури вище t_c і наступному швидкому й рівномірному охолодженні в потоці повітря або в маслі. При цьому опір статичним навантаженням збільшується в 3...6 разів, ударна в'язкість в 5...7 разів. При гартуванні підвищується також термостійкість скла.

Термохімічне зміцнення засноване на глибокій зміні структури скла й властивостей його поверхні. Стекло піддається гартуванню в підігрітих кремнійорганічних рідинах, у результаті чого на поверхні матеріалу утворюються полімерні плівки; цим створюється додаткове, у порівнянні з результатом звичайного гартування, зміцнення. Підвищення міцності й термостійкості можна домогтися травленням загартованого скла плавиковою кислотою, у результаті чого віддаляються поверхневі дефекти, що знижують його якість.

Контрольні запитання та завдання

1. Які матеріали називають оптичними?
2. Якими термічними властивостями характеризується скло?
3. Якими механічними властивостями характеризується скло?
4. Якими хімічними властивостями характеризується оптичне скло?
5. Якими основними оптичними властивостями характеризується оптичне скло?
6. Дайте характеристику складу та будови неорганічного скла.
7. Чим пояснюється застосування скла у якості оптичного матеріалу?

2. ОПТИЧНЕ СКЛО

Оптичне скло суттєво відрізняється від інших видів технічного скла.

Першою відмітною ознакою оптичного скла від будь-якого технічного скла є висока однорідність, що досягається спеціальними прийомами механічного перемішування скломаси під час варіння і особливих режимів термічної обробки готового скла — тонким оптичним відпалом.

Другою відмітною ознакою оптичного скла вважається його висока прозорість. Оптичним склом високої якості зараз прийнято називати скло, що має інтегральний коефіцієнт світлопоглинання менш 0,4 % на 1 см. Для ряду систем і таке скло не є цілком задовільним, для них застосовуються стекла з коефіцієнтом світло поглинання 0,2...0,1 % і менш на 1 см. Світлопрозорі стекла потрібні для волоконно-оптичних ліній далекого зв'язку. В робочому діапазоні довжин хвиль у червоній і ближній інфрачервоній частинах спектра поглинання такого скла повинне бути близько 0,002 % на 1 см.

Нарешті, до третьої відмітної ознаки оптичних стекол відноситься великий інтервал значень показників заломлення світла, що лежить для різних марок у межах від 1,44 до 2,35, і суворе відтворюваність показників заломлення, характерних для кожної марки незалежно від часу й місця виготовлення скла. Наявність великої кількості стекол з різними й строго відтвореними оптичними постійними є тією основою, що дозволяє розраховувати та конструювати оптичні системи будь-якого призначення і забезпечувати їх крупносерійне виробництво.

2.1 Номенклатура оптичного скла

В основу класифікації оптичного скла покладені значення показника заломлення n_e , середньої дисперсії $n_{F'}-n_{C'}$ і коефіцієнта середньої дисперсії v_e , який іноді ще називається числом Аббе:

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}, \quad (2.1)$$

де n_e — показник заломлення для зеленого кольору, довжина хвилі 546,07 нм (лінія випромінювання е спектра ртуті);

$n_{F'}$ — показник заломлення для довжини хвилі 479,99 нм (лінія випромінювання F' спектра кадмію);

$n_{C'}$ — показник заломлення для довжини хвилі 643,85 нм (лінія випромінювання C' спектра кадмію);

Оптичне скло, що застосовується в оптичних приладах та інструментах, поділяється на *крони*, які характеризуються малим показником заломлення, і *флінти* – з високим вмістом оксиду свинцю й більшими значеннями показника заломлення. Важкі флінти не пропускають рентгенівське й видиме випромінювання. Світлорозсіююче скло містить фтор.

Назви типів оптичного скла відповідають їхньому основному хімічному складу (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Типи та умовні позначення оптичного скла

Тип скла	Умовне позначення	Тип скла	Умовне позначення
Легкий крон	ЛК	Кронфлінт	КФ
Фосфатний крон	ФК	Баритовий флінт	БФ
Важкий фосфатний крон	ТФК	Важкий баритовий флінт	ВБФ
Крон	К	Легкий флінт	ЛФ
Баритовий крон	БК	Флінт	Ф
Важкий крон	ВК	Важкий флінт	ВФ
Надважкий крон	НВК	Надважкий флінт	НВФ
Особливий крон	ОК	Особливий флінт	ОФ

За хімічним складом основну групу серед оптичного скла становить силікатне скло, в якого вміст масових часток склоутворюючого діоксида кремнію знаходиться в межах 30...80 %. У склі кронового типу іншими компонентами є оксиди калію, натрію, бору, алюмінію, барію, кальцію. До складу легких кронів включається фтористий калій.

Основою скла типу флінтів і важких флінтів є потрійна система з оксидів кремнію, свинцю й калію; деякі марки флінтів містять діоксид титану. Баритові крони, баритові й особливі флінти й кронфлінти в деяких випадках містять оксид цинку й оксид сурми. На силікатній основі не можна одержати скло з показником заломлення вище ніж 2...2,05 через порівняно низький показник заломлення кремнезему. Подальше підвищення показників заломлення скла можливе при переході до більш високозаломлюючої склоутворюючої речовини, якою є діоксид телуру. Показник заломлення телурітного скла доходить до 2,17...2,23 при коефіцієнті дисперсії 19...17. Таке скло застосовуються для виготовлення диспергуючих призм спектральних

приладів, негативних елементів короткофокусних ахроматичних лінз, призм для рефрактометрів.

Широко застосовується скло, у якого основною склаутворюючою речовиною разом із кремнеземом є борний ангідрид. Так, основою всіх важких кронів є оксиди бору, кремнію, алюмінію й барію. Додавання до борного ангідриду більших кількостей оксидів рідкісноземельних елементів – лантану, танталу, ніобію, ітрію, цирконію – дозволяє одержувати скло типів НВК і ВБФ, що поєднують у собі великий показник заломлення (1,66...1,88) з високим коефіцієнтом дисперсії (57...35). На сьогодні можливості вдосконалювання боролантанового скла практично вичерпані повністю. Це пов'язане з тим, що показник заломлення склаутворюючого борного ангідриду досить низький (1,464), тому, незважаючи на малий зміст борного ангідриду в лантановому склі, розраховувати на одержання в них особливо високих показників заломлення не можна. Останніми роками велика увага звернена на розробку нового скла, у якого основним склаутворювачем є діоксид германію, що має показник заломлення 1,6092 і коефіцієнт дисперсії 41,9. Германієво-лантанове скло має показник заломлення 1,83...1,90 при коефіцієнті дисперсії 43...37.

2.2 Оптичне кварцове скло

За оптичними властивостями кварцове скло є звичайним кроном з показником заломлення 1,4584 і коефіцієнтом дисперсії 67,83. Воно складається переважно з діоксида кремнію з незначними домішками інших сполук. Кварцове оптичне скло (ДСТУ 15130-86) призначене для виробів, що працюють при проходженні світла в одному напрямку. Через малий коефіцієнт розширення ($5,5 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) термооптичні властивості кварцового скла погані, але дуже висока термостійкість. Кварцове скло має високу механічну міцність у широкому інтервалі температур; воно негігроскопічне, стійке до впливу води й кислот, крім плавикової та фосфорної. Тільки під час спільного впливу високого тиску і температури кварцове скло можна розчинити у воді. При опроміненні щільним потоком швидких нейтронів кварцове скло збільшує показник заломлення n_e до 1,4763. При нагріванні скла до 800°C його початкові властивості відновлюються. Кварцове скло – один із кращих матеріалів для виготовлення великогабаритних астрономічних дзеркал. Характеристика типів кварцового скла приведена в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Характеристика кварцового скла

Позначення марки стекла	Характеристика
КУ-1	Скло кварцове оптичне, прозоре в ультрафіолетовій і видимій областях спектра, без смуг поглинання в інтервалі довжин хвиль 170 ... 250 нм, з смугами поглинання в інтервалах довжин хвиль 2100 ... 2300 нм і 2600 ... 2800 нм, не люмінісцує, радіаційно і оптично стійке
КУ-2	Скло кварцове оптичне, прозоре в ультрафіолетовій і видимій областях спектра, зі слабкою смугою поглинання в інтервалі довжин хвиль 170 ... 250 нм, з смугою поглинання в інтервалі 2600 ... 2800 нм
КВ	Скло кварцове оптичне, прозоре в ультрафіолетовій і видимій областях спектра, зі слабкою смугою поглинання в інтервалі довжин хвиль 170 ... 250 нм, з смугою поглинання в інтервалі 2600 ... 2800 нм.
КІ	Скло кварцове оптичне, прозоре у видимій та інфрачервоній областях спектра, без смуги поглинання в інтервалі довжин хвиль 2600 ... 2800 нм
КУВІ	Скло кварцове оптичне, прозоре в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях спектра, зі слабкими смугами поглинання в інтервалах довжин хвиль 17... 250 нм і 320 ... 350 нм, з смугою поглинання в інтервалі 2600 ... 2800 нм, не люмінісцує, радіаційно-оптично стійке (вимоги для скла марки КУВІ введені в дію з 01.01.89)

Легування кварцового скла діоксидом титану дало можливість одержати матеріал із практично нульовим коефіцієнтом термічного розширення. Максимальний коефіцієнт розширення дорівнює $0,4 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. На стадії досвідченого виробництва таке кварцове скло має марку КЛР, випускається в заготовках діаметром до 200 мм за ТУ 17-74.

2.3 Система нормованих параметрів оптичного скла

Оптичне безбарвне скло нормується за такими параметрами:

- 1) показник заломлення;
- 2) середня дисперсія;
- 3) однорідність партії заготовок за показником заломлення;
- 4) однорідність партії заготовок за середньою дисперсією;
- 5) оптична однорідність;

- б) подвійна променезаломлюваність,
- 7) радіаційно-оптична стійкість (для скла серії 100);
- 8) показник послаблення;
- 9) бессвільність;
- 10) бульбашковість.

Як основний показник заломлення скла раніше використовувався показник заломлення в жовтій частині спектра (тобто для ліній D або d випромінювання спектра натрію). Це пов'язане з високою чутливістю людського ока в жовтій частині спектра, а також з тією історичною обставиною, що спочатку в оптотехніці переважна більшість приладів була розрахована для роботи з оком спостерігача. Проте лінія D (довжина хвилі 589,3 нм) не дуже зручна, оскільки являє собою слабо розщеплений дублет. Лінія e також розташована поблизу максимуму чутливості ока людини, але більш прийнятна для виміру. Таким чином, основним показником заломлення в цей час є n_e . За відхиленням показника заломлення встановлено п'ять категорій (табл. 2.3).

Таблиця 2.3. Категорії скла по відхиленню показника заломлення

Категорія скла	Припустиме відхилення $\cdot 10^4$	Категорія скла	Припустиме відхилення $\cdot 10^4$
1	± 2	4	± 10
2	± 3	5	± 20
3	± 5		

В якості середньої дисперсії прийнята величина $n_{F'} - n_{C'}$, де $n_{F'}$ і $n_{C'}$ – показники заломлення для довжин хвиль, рівних 479,99 нм і 643,85 нм (лінії випромінювання F' і C' спектра кадмію відповідно); або за колишньою класифікацією $n_f - n_c$, де n_f – показник заломлення для синього кольору, довжина хвилі 486,1 нм (лінія випромінювання f спектра водню); n_c – показник заломлення для червоного кольору, довжина хвилі 656,3 нм (лінія випромінювання c спектра водню). Таким чином, коефіцієнт середньої дисперсії за новою версією виражається формулою (2.1), а за колишньою версією формулою (13.2):

$$v_D = \frac{n_D - 1}{n_f - n_c}, \quad (2.2)$$

За відхиленням середньої дисперсії встановлено також п'ять категорій (табл. 2.4).

Таблиця 2.4. Категорії скла по відхиленню показника заломлення

Категорія скла	Припустиме відхилення $\cdot 10^4$	Категорія скла	Припустиме відхилення $\cdot 10^4$
1	± 2	4	± 10
2	± 3	5	± 20
3	± 5		

Під *однорідністю партії* за показником заломлення й дисперсії розуміється однаковість їх значень у всіх заготовок партії. За однорідністю партій заготовок за показником заломлення n_e встановлено чотири класи, за однорідністю партій заготовок по середній дисперсії – два класи (табл. 2.5).

Таблиця 2.5. Класи скла по однорідності партій заготовок

Клас скла	Найбільша різниця в партії заготовок	
	за показником заломлення	за середньою дисперсією
A	$0,5 \cdot 10^{-4}$	
Ac	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
B	$2 \cdot 10^{-4}$	
B	В межах відхилень для заданої категорії по табл. 13.3	В межах відхилень для заданої категорії по табл. 13.4

Найпростіше високі класи однорідності одержують під час комплектації партії зі скла одного варіння. Однак ряд нових стекол з цінними оптичними характеристиками не може бути зварений у посудині такого об'єму, який дозволив би скомплектувати велику партію заготовок. Тому встановлюється, що будь-який клас однорідності можна вимагати при замовленні партії скла масою не більше 120 кг.

Оптичну однорідність найбільш просто уявити собі як абсолютну сталість показника заломлення в будь-якій точці об'єму скла. Однорідність – основна властивість оптичного скла, що відрізняє його від скла будь-якого іншого призначення. Однак навіть в оптичному склі однорідність порушується звилинами, напруженнями й структурною неоднорідністю. Тому необхідно визначити той ступінь однорідності, який забезпечить приладу потрібну оптичну якість. Однорідність можна охарактеризувати, вимірюючи різницю показників заломлення в різних точках. Але виконати такі виміри можна лише за допомогою складної інтерферометричної методики, що непридатна для масового контролю. Тому використовують непрямі методи, що оцінюють

однорідність скла. Для заготовок діаметром до 250 мм встановлено п'ять категорій оптичної однорідності, які визначають за зміною роздільної здатності коліматорної установки під час введення у паралельний пучок променів контрольованої заготовки. Відношення кута дозволу установки зі зразком до кута дозволу установки без зразка $\epsilon:\epsilon_0$ визначає оптичну однорідність скла (табл. 2.6).

Таблиця 2.6. Категорії скла за оптичною однорідністю

Категорія скла	Припустиме відхилення $\epsilon:\epsilon_0$	Категорія скла	Припустиме відхилення $\epsilon:\epsilon_0$
1 и 2	1,0	4	1,2
3	1,1	5	1,5

Відмінність 1-ї категорії від 2-й полягає в тому, що при максимально високих вимогах до оптичної однорідності перевіряють якість дифракційного зображення точкової мири, яке повинно мати вигляд круглої плями з кільцями без розривів і хвостів.

Для заготовок діаметром понад 250 мм також встановлено п'ять категорій оптичної однорідності. Кожна категорія характеризується трьома коефіцієнтами, які враховують: неоднорідність показника заломлення, що виникла в процесі відпалу, несиметричність неоднорідності показника заломлення щодо оптичної осі, що виникає також в процесі відпалу, і неоднорідність скломаси.

При охолодженні скла нижче температур відпалу в ньому з'являються механічні напруження через перепади температури між внутрішніми і зовнішніми частинами заготовки. Значення напружень залежить від швидкості охолодження, розмірів заготовки й деякою мірою від термічних і механічних властивостей скла.

Механічно напружений стан скла викликає в ньому відповідну *подвійну променезаломлюваність*. Зв'язок між подвійною променезаломлюваністю, вираженою у зміні показника заломлення Δn , і механічними напруженнями $\Delta\sigma$ встановлюється за допомогою оптичного коефіцієнта напруження (ОКН) B :

$$\Delta n = B\Delta\sigma = \frac{\delta}{S}, \quad (2.3)$$

де δ – різниця ходу, що виникає при проходженні поляризованого світла через напружений зразок, нм; S – товщина зразка, см.

Більшість скла має позитивне значення ОКН (якщо напруги при розтяганні, як прийнято в теорії пружності, вважати з позитивним знаком) у границях (2...3,5) 10^{-12} Па.

Вимірювання подвійної променезаломлюваності ведеться в напрямку найбільшого розміру заготовки, у більшості іноземних фірм – у робочому напрямку заготовки. Встановлено п'ять категорій подвійної променезаломлюваності. Як видно з табл. 132, при цьому враховується значення ОКН.

Таблиця 2.7. Категорії скла за подвійним променезаломленням

Категорія скла	Подвійне променезаломлювання, (нм/см), не більше, для $B \cdot 10^{12}$ Па		
	До 2	2...2,8	більше 2
1	1,5	2	3
2	4	6	8
3	7	10	13
4	10	15	20
5	35	50	65

Повна відсутність напружень у великих заготовках також може викликати небажані ефекти, оскільки у цьому випадку значно проявляється вплив власної маси й будь-яких зовнішніх навантажень, наприклад, при закріпленні деталі.

Світлопоглинання оптичного скла раніше визначалося через так званий коефіцієнт світлопоглинання K_a , тобто через виражене у відсотках відношення потоку білого світла (випромінювання газоповної лампи, близьке до випромінювання стандартного джерела світла A), поглинутого склом товщиною 1 см, до світлового потоку на початку шляху. Насправді в цьому випадку крім витрат на поглинання враховуються витрати на розсіювання світла, тому сумарну величину вірніше й точніше називати коефіцієнтом ослаблення. Неточність, що допускається, пояснюється тим, що втрати на розсіювання перебувають у діапазоні 0,002...0,080 на 1 см і ними можна було знехтувати. Зараз у зв'язку з все більш широким використанням надпрозорого скла зі світлопоглинанням 0,1% і менше, втрати на світлорозсіювання часто стають порівнянними із втратами на світлопоглинання.

Вітчизняне скло характеризується за значеннями показника світлорозсіювання σ' (% , см^{-1}) для довжини хвилі 546 нм (σ' – величина,

зворотна довжині шляху світла в склі, на якій світловий потік, що увійшов, за рахунок розсіювання зменшується в e разів, де e – основа натурального логарифма).

Світлопоглинання скла нерівномірне за спектром: поглинання в ультрафіолетовій і синій частинах спектра у багато разів більше, ніж у жовтій і червоній. Це може призвести до викривлення правильної передачі кольору в складних багатолінзових кіно- і телеоб'єктивах. Тому зараз вказують довжини хвиль, при яких коефіцієнти пропускання в товщині скла 10 мм дорівнюють 0,50 і 0,90. Для значень показника ослаблення встановлено вісім категорій (табл. 2.8).

Таблиця 2.8. Категорії скла за показником ослаблення світла

Категорія ослаблення	$\epsilon_A \cdot 10^4, \text{см}^{-1}$	Категорія ослаблення	$\epsilon_A \cdot 10^4, \text{см}^{-1}$
1	2...4	5	26...35
2	5...9	6	36...45
3	10...17	7	46...65
4	18...25	8	66...130

Звилюною в оптичному склі прийнято називати скловидні прозорі вклучення, які відрізняються показником заломлення від оточуючого їх скла. Ця різниця в показнику заломлення є наслідком іншого хімічного складу звилини порівняно з навколишньою масою скла. У склі можуть зустрічатися як одиночні звилини, так і потоки звилин. Одиночна звилина мало впливає на якість зображення, тому що оптичні прилади зазвичай працюють у широких пучках і одиночна звилина відхиляє від розрахункового напрямку незначну частину світлового потоку. Потоки звилин за своєю оптичною дією близькі до плавної хімічної неоднорідності в склі. Вони можуть суттєво знизити роздільну здатність оптичної системи й навіть викликати появу астигматичної аберації. Встановлено дві категорії та два класи бесвильності (табл. 2.9).

У зв'язку зі складністю фізико-хімічних процесів, що відбуваються в розплавленій скломасі на різних стадіях технологічного процесу, у затверділому склі, як правило, залишається певна кількість газових вклучень – бульбашок.

Таблиця 2.9. Категорії і класи безбарвного оптичного скла за бессвільністю

Категорія бессвільності	Характеристика бессвільності	Клас бессвільності	Кількість напрямків перегляду
1	Не допускаються звили, які виявляються під час перегляду на установках, градуйованих за контрольованим зразком порівняння 1-ої категорії (ГОСТ 3521-69) або за зразком порівняння для ІК області	А	Два взаємно перпендикулярних
2	Не допускаються звили, які виявляються під час перегляду на установках, градуйованих за контрольованим зразком порівняння 2-ої категорії або за зразком порівняння для ІК-області	Б	Один

Прийнято *бульбашковість* оптичного скла характеризувати двома параметрами: діаметром найбільшої бульбашки в заготовці скла й сумарною кількістю усіх бульбашок в 1 кг сировинного скла. До бульбашок прирівнюються й непрозорі включення – кам'янисті включення, окремі кристали тощо. Встановлено 11 категорій бульбашковості (табл. 2.10). Контроль категорій бульбашковості для заготовок розміром до 50 мм ведеться вибірково (10 % від партії), заготовки більшого розміру зазнають суцільного контролю.

Таблиця 2.10 Категорії і класи бульбашковості оптичного скла

Категорія бульбашковості	Діаметр найбільшої бульбашки в заготівці, мм	Клас бульбашковості	Середнє число бульбашок, не більше
1	0,002	А	3
1a	0,05	Б	10
2	0,1	В	30
3	0,2	Г	100
4	0,3	Д	300
5	0,5	Є	1000
6	0,7		
7	1,0		
8	2,0		
9	3,0		
10	5,0		

2.4 Органічне скло (плексиглас)

Органічне скло (табл.13.11) являє собою аморфний полімер метилового ефіру метакрилової кислоти; має високу прозорість для видимих і ультрафіолетових променів; добре формується, обробляється, склеюється; відрізняється масло-, бензо- і водостійкістю.

Таблиця 2.11 Оптичні властивості органічного скла

Марка скла	Показник заломлення n_e при температурі °С			Коефіцієнт пропускання τ для товщини 3 мм, %	Світлорозсіювання, сб/фот
	20	45	60		
СОЛ	1,492	1,488	1,486	92	$0,40 \cdot 10^{-3}$
СТ-1	1,489	1,486	1,484	93	$0,25 \cdot 10^{-3}$

Випускається прозоре безбарвне, прозоре кольорове та непрозоре оргскло, а також пластифіковане оргскло марки СОЛ і неластифіковане марки СТ-1.

Контрольні запитання та завдання

1. Якими основними оптичними властивостями характеризується оптичне скло?

2. Якими термічними властивостями характеризується скло?
3. Якими механічними властивостями характеризується скло?
4. Якими хімічними властивостями характеризується оптичне скло?
5. Дайте характеристику марок оптичного безбарвного скла.
6. Дайте характеристику нормованих параметрів оптичного скла.
7. Дайте характеристику кварцового скла.
8. Визначте коефіцієнт пропускання світлофільтра (скла), якщо товщина скла 1,8 мм, показник поглинання скла для світла певної довжини хвилі дорівнює 0,38, а втрати на відбиття складають 0,005.

3. ВИРОБНИЦТВО ОПТИЧНОГО СКЛА

3.1 Основні складові технологічного процесу одержання скла й скловиробів

Технологія одержання скла складається із двох виробничих циклів.

Цикл технології *скломаси* включає операції:

а) підготовка сировинних матеріалів; б) змішування їх у певних співвідношеннях, відповідно до заданого хімічного складу скла в однорідну шихту; в) варіння шихти в скловарних печах для одержання однорідної рідкої скломаси.

Цикл *технології одержання скляних виробів* складається з таких операцій:

а) доведення скломаси до температури (і в'язкості), визначеної умовами формування з неї різноманітних скляних виробів; б) формування виробів; в) поступове охолодження виробів до кімнатної температури з метою ліквідації напружень, що виникають у процесі формування; г) термічна, механічна або хімічна (окремо або у певній комбінації) обробка відформованих виробів для додання їм заданих властивостей.

3.2 Підготовка сировинних матеріалів

Властивості скла визначаються складом шихти, тобто суміші сировинних матеріалів, взятих у заданому ваговому співвідношенні.

Сировинні матеріали для виробництва скла й скловиробів умовно поділяють на дві групи: основні й допоміжні.

Основні матеріали містять оксиди, що утворюють основу скла та визначають його властивості. Допоміжні матеріали являють собою речовини, які вводяться для зміни характеристик скла і прискорення процесу скловаріння (барвники, знебарвлювачі, глушители, окиснювачі й відновники, прискорювачі варіння). Якість сировинних матеріалів (хімічний і гранулометричний склад, домішки тощо) регламентуються відповідними державними стандартами й технічними умовами, які періодично переглядаються й уточнюються.

Кремнезем (діоксид кремнію, SiO_2) є основним склотвірним матеріалом, що входять до складу скла в кількості 20...80%. Кремнезем визначає оптичні властивості скла, підвищує його твердість і хімічну стійкість. Основним матеріалом для введення в скло SiO_2 є кварцовий пісок. Якість пісків оцінюють за їхнім хімічним і зерновим складом. Під час виробництва виробів з різних стекол висувуються різні вимоги до хімічного складу сировини, що містить кремній. Основні з них наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вимоги до вмісту SiO_2 і Fe_2O_3 у матеріалах, що містять кремній, для різних стекол

Вид скла	Вміст, %	
	SiO_2 , не менше	Fe_2O_3 , не більше
Оптичне	99,8	0,01
Свинцевий криштал	99,8	0,01...0,015
Поліроване і технічне	99,5	0,03...0,07
Віконне	95,0	0,05...0,15
Тарне	95,0	0,05...0,25

Під час варіння скла важливо враховувати розміри зерен піску, особливо кількісне співвідношення зерен за розмірами. Для прискорення процесу варіння застосовують пісок із зернами гострокутної форми, оскільки в цьому випадку збільшується реакційна поверхня порівняно із зернами сферичної форми.

Оксид алюмінію Al_2O_3 входить до складу деяких стекол у кількості до 5%. Він знижує температурний коефіцієнт лінійного розширення, підвищує хімічну стійкість, поліпшує механічну й термічну міцність. У виробництві скла для введення Al_2O_3 зазвичай застосовують багатокомпонентні матеріали, що містять глинозем.

Оксид барію є склоутворюючим матеріалом, що входить до складу баритових і важких кронів, баритових флінтів у кількості 10...45%. У меншій кількості ВаО вміститься в стеклах інших марок. При введенні невеликих кількостей ВаО прискорюється варіння, поліпшуються технологічні характеристики, особливо під час механізованого формування. ВаО підвищує показник заломлення і густину скла.

Оксид бору B_2O_3 є склоутворюючим матеріалом, що входить до складу кронів, баритових і важких кронів у кількості 3...15%. Введення до складу скла оксиду бору значно полегшує варіння й провітління скла, знижує температуру варіння, поліпшує фізико-хімічні властивості скла, наприклад, термічну й хімічну стійкість.

Оксид натрію Na_2O є основним склоутворюючим матеріалом, що входить до складу більшості марок стекол у кількості 5...15%. Основними матеріалами для введення в скло оксиду натрію є карбонат натрію (сода), сульфат натрію і нітрат натрію (селітра). Карбонат натрію містить 58,5 % Na_2O і 41,5% CO_2 , температура його плавлення $854^\circ C$. Технічний карбонат натрію для виробництва скла має містити не менше 95% Na_2CO_3 і не більше 1% $NaCl$. Частковим замінником карбонату натрію може бути сульфат натрію, який зазвичай застосовують у виробництві скляної тари.

Оксид калію, введений у кількості 3...10% в оптичне скло замість оксиду натрію, поліпшує його оптичні й технологічні характеристики, хімічну стійкість, кольорові характеристики. Сировиною для введення K_2O є поташ (карбонат калію) і селітра (нітрат калію). Для підвищення якості скла необхідно, щоб вміст у поташі барвних домішок і сульфату калію був мінімальним. Нітрат калію (селітру) застосовують як окислювач для введення від 1 до 6% K_2O .

Оксид кальцію, прискорюючи реакції силікатоутворення, полегшує варіння й посвітління скла, поліпшує технологічні характеристики й підвищує його хімічну стійкість. Оксид кальцію вводиться зазвичай з карбонатом кальцію $CaCO_3$, що містять 56% CaO й 44% CO_2 . З мінералогічних різновидів карбонату кальцію на скляних заводах застосовують вапняк, крейду, мармур і вапняний шпат.

Оксид свинцю є основним компонентом кронфлінтів, баритових і легких флінтів, флінтів, важких і особливо важких флінтів і визначає їхні високі оптичні властивості. Кількість PbO в цих стеклах становить 10...70%, менша кількість – у стеклах інших марок.

До *допоміжних сировинних матеріалів* належать освітлювачі, знебарвлювачі, барвники, заглушувачі, а також відновники (вуглецеві речовини).

Барвники надають склу необхідний колір. Як барвники застосовують сполуки кобальту, нікелю, заліза, хрому, марганцю, селен, міді, урану, кадмію, сірку, хлорне золото тощо.

Як *освітлювачі*, що сприяють видаленню зі скла міхурів, застосовують у невеликих кількостях сульфати натрію й амонію, хлористий натрій, сполуки миш'яку в комбінації із селітрою, плавиківий шпат. Деякі із цих речовин водночас є знебарвлювачами. Хімічна дія знебарвлювачів зводиться до окиснення в склі сполук заліза.

Стекла, що розсіюють світло, тобто білі, мало прозорі стекла називаються глухими або заглушеними. Як *заглушувачі* застосовуються різні фтористі сполуки, фосфати, сполуки сурми, олова тощо. Для заглушування зазвичай застосовують фториди й фосфати. Заглушування може бути також досягнуте застосуванням сполук стекел, схильних до фазового поділу (ліквації).

Окиснювачі й відновники застосовують під час варіння скла для створення окисних або відбудовних умов. Під час варіння свинцевих оптичних стекел і свинцевого кришталю необхідно створити окисні умови для запобігання відновлення оксидів свинцю. Як окиснювачі застосовують нітрати (NaNO_3 , KNO_3), оксиди миш'яку, марганцю, церію й ін. Як відновники використовують вуглецевмісні речовини (ошурки, вугілля, мазут), сполуки олова, виннокам'яну сіль.

Серед *прискорювачів* варіння скла особливе місце займають фториди, які сприяють появі рідкої фази при більш низьких температурах і збільшують швидкість процесу силікатоутворення. Фториди знижують температуру завершення реакцій силікатоутворення на $100\text{--}200^\circ\text{C}$. Вважається, що добавка $0,5\text{--}1\%\text{F}$ прискорює процеси гомогенізації й посвітління скла на $15\text{--}18\%$. Як прискорювач варіння зазвичай застосовують кремнефторид натрію Na_2SiF_6 . Однак фториди руйнують вогнетривкий матеріал печей. При вмісті понад $1,5\%$ вони підсилюють кристалізацію скломаси і, внаслідок сильної летючості, разом з димовими газами надходять у навколишнє середовище. Отже, застосування фторидів вимагає правильної оцінки економічних факторів і факторів охорони навколишнього середовища.

3.3 Приготування шихти

Більшість сировинних матеріалів, що надходять на скляні заводи, піддають попередній обробці. Види їх обробки залежать від стану матеріалів, що надходять

на завод. Пісок, наприклад, збагачують (видаляють з нього залістисті домішки), сушать, просівають; доломіт і вапняк дроблять і розмелюють тощо. Для правильного приготування шихти необхідно застосовувати збагачені й підготовлені матеріали; точно відважувати сировинні матеріали за розрахованою сполукою шихти; ретельно перемішувати сировинні матеріали до повної однорідності; подавати й завантажувати шихту, крім можливості її розшарування.

Основна вимога до шихти – високий ступінь однорідності. Однорідна шихта полегшує процес скловаріння й виключає ряд пороків і дефектів у готовому склі й скловиробах. Для забезпечення однорідності шихти велике значення мають її вологість і зерновий склад сировинних матеріалів. Зерна сировинних матеріалів повинні мати певний розмір, оскільки від цього залежить можливе розшарування шихти й рівномірність розчинення під час варіння. При однаковому розмірі зерен компонентів шихта розшарується тим більше, чим крупніше зерна. Невелика кількість води (3...5%) позитивно впливає на однорідність шихти. Воду подають безпосередньо в змішувач або воложать пісок при його зважуванні.

Компоненти шихти зважуються з високою точністю й завантажуються для перемішування в змішувальний барабан. Усі пристрої для зберігання, зважування й перемішування компонентів шихти мають бути виготовлені з матеріалів, які не містять заліза, хрому й інших шкідливих для скла матеріалів.

3.4 Варіння скла

Варіння скла – найбільш складний і відповідальний етап у виробництві скла. Від її успішного проведення багато в чому залежить продуктивність заводу в цілому і якість виробів, що випускаються. Скло варять в окисному, відновному або нейтральному газовому середовищі. Окисне середовище характеризується надлишковою кількістю кисню в печі; відновне – надлишком окису вуглецю; при нейтральному середовищі немає надлишку ані кисню, ані вуглецю.

Для виготовлення виробів зі скла з різними заданими властивостями використовуються скловарні печі різних типів, що відрізняються за конструкцією, продуктивністю і режимом роботи. Для варіння скла застосовують скловарні печі періодичної й безперервної дії.

За конструкцією робочої камери скловарні печі поділяються на горшкові й ванні. *Горшкові печі* – періодичної дії, їх застосовують для варіння високоякісних оптичних, світлотехнічних, художніх і спеціальних стекол.

Ванні печі бувають безперервної й періодичної дії. Ванні печі безперервної дії мають ряд переваг перед горшковими й ванними печами періодичної дії: вони більш економічні, продуктивні й зручні в обслуговуванні.

За способом обігріву скловарні печі поділяють на полум'яні, електричні й газоелектричні (комбінований газовий і електричний обігрів).

Варять оптичне скло в полум'яних горшкових печах періодичної дії або в ванних печах безперервної дії. Скло деяких марок з підвищеними вимогами по однорідності і бульбашковості, що мають схильність до роз'їдання стінок керамічних судин в розплавленому стані з огляду на хімічну активність компонентів, варять в платинових тиглях в печах з індукційним нагріванням.

Вибір печі і методу варіння визначається перш за все обсягом виробництва і вимогами до показників якості скла. Скло найбільш поширених марок К8, ТК14, ТФ5, потрібні у великих обсягах, доцільно варити в ванних печах безперервної дії, так як при цьому значно полегшується механізація і автоматизація процесів перетворення скломаси безпосередньо в заготовки оптичних деталей. Незважаючи на ряд відмінностей, варіння скла в горшкових і в ванних печах має одну і ту ж фізико-хімічну і технологічну основу і може бути розглянуто на прикладі технологічного процесу варіння в одnogоршковій печі періодичної дії (рис. 3.1).

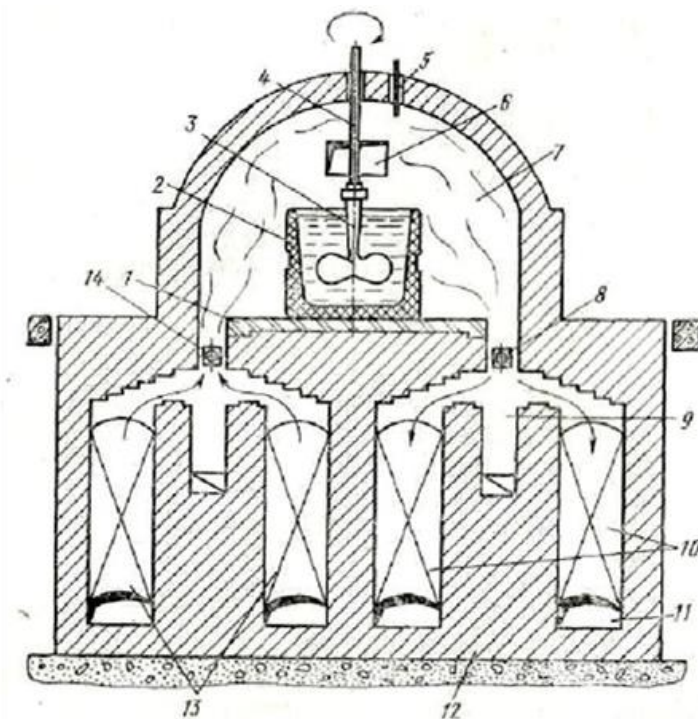


Рисунок 3.1. – Одnogоршкова скловарна піч

Піч регенеративна з нижнім полум'ям, складається з підстави 12, складеної з вогнетривкої цегли, двох пар регенераторів 10 і 13 і робочої камери

7. Пол 1 робочої камери викладений вогнетривкими плитами. На задній стінці робочої камери є вікно 6 для засипки шихти, взяття проб і спостереження за ходом процесу варіння; передня стінка має отвір для вставки і вивезення стекловареного горщика 2. Робоча камера обігривається полум'ям від згорання природного газу, що подається по черзі через дві пари пальників 8 і 14. Температура в робочій камері печі досягає 1550...1570°C, контроль температури здійснюється термопарою 5.

Регенератор – пристрій для утилізації теплоти відхідних газів, конструктивно являє собою камеру або кілька камер з безліччю каналів, утворених ґратчастої кладкою вогнетривкої цегли. Повітря надходить в попередньо розігріту ліву пару регенераторів, нагрівається до температури 900°C і змішується з газом, що надходять від пальників 14. Утвориться газоповітряна суміш згорає в робочій камері печі. Полум'я омиває горщик з боків і зверху, гарячі продукти згорання йдуть через пальниковий канал правої пари регенераторів 10, обігривають їх і відводяться через вихід димоходу 11 в димову трубу. Димоповітряний клапан періодично через певний час перемикають, в результаті чого напрямок подачі повітря в піч і видалення гарячих газів через регенератори змінюються. Одночасно подача газу перекидається з лівої пари пальників 14 на праву 8, що змінює напрямок полум'я в печі. Для запобігання засмітнення каналів регенераторів відходами скломаси піч обладнана вертикальними каналами-колодязями 9, через які відходи періоді-но видаляються. На металевій обв'язки печі зверху встановлюють скломешальну машину; на кінець штанги 4 машини при варінні скла надягають керамічну мішалку 3.

Після нагрівання горщика до необхідної температури в нього засипають бій скла (відходи) відповідної марки, потім у декілька прийомів шихту. Кожне наступне засипання роблять після розплавлювання матеріалу попередньої порції. Після розплавлювання всієї маси в горщик опускають мішалку й продовжують варіння при перемішуванні. Температура й тривалість варіння залежать від сполуки шихти. Флінтові марки стекло варять при температурі 1200...1220°C протягом 12...14 годин, а кронові марки скла – при температурі близько 1500°C протягом 40...50 годин.

Варіння скла, або скловаріння, умовно поділяють на п'ять стадій: силікатоутворення, склоутворення, просвітління, гомогенізацію і студку. Умовно тому, що всі ці стадії взаємозалежні: протікають водночас в одній ванні – басейні скловарної печі.

Стадія силікатування характеризується тим, що до її кінця в шихті закінчуються реакції між компонентами у твердому стані та утворюються складні силікатні сполуки. Шихта перетворюється в пінистий непрозорий розплав, пронизаний більшою кількістю пухирців газу й частками шихти, яка не прореагувала. Протікає ця стадія при температурі 800...900°C. Компоненти шихти при проходженні цієї стадії зазнають ряд перетворень: волога випаровується; гідрати, солі, переокси розкладаються і втрачають летучі сполуки; кремнезем змінює свою кристалічну будову.

Стадія склоутворення характеризується тим, що до її кінця всі хімічні реакції в розплаві закінчуються. Внаслідок взаємодії між гідратами, карбонатами, сульфатами утворюються складні силікати; зерна кварцу остаточно розчиняються і переходять у розплав; скло маса стає відносно однорідною й прозорою, без непроварених часток шихти. Однак у скло масі залишається багато міхурів. При силікатуванні не всі зерна кварцу встигають прореагувати і перейти в розплав, внаслідок чого в скло масі залишаються непроварені частки шихти. На стадії склоутворення всі зерна кварцу розплавляються і виходить рідкий розплав. Досягають цього підвищенням температури. Внаслідок підйому температури збільшується рухливість атомів і молекул складових скло маси, що веде до розчинення кремнезему й силікатів. Завдяки цьому вирівнюється концентрація розчинів силікатів на різних ділянках, що сприяє досягненню відносно однорідної скло маси. Усі ці перетворення супроводжуються виділенням великої кількості газоподібних продуктів. Через високу в'язкість розплаву при склоутворенні газоподібні продукти не встигають випаровуватися, тому скло маса буває насичена більшою кількістю міхурів. Швидкість протікання процесу склоутворення в 8...9 разів нижче швидкості силікатування.

Стадія *просвітління* характеризується тим, що до її кінця скло маса вивільняється від видимих газових включень, і тим, що встановлюється рівновага між скло масою (рідкою фазою) і газами, розчиненими в скло масі (газовою фазою). Із усіх стадій скловаріння стадія просвітління і пов'язана з нею стадія гомогенізації є найбільш відповідальними й складними. Від того, наскільки повно й інтенсивно пройшли ці стадії, багато в чому залежить якість скло маси.

Стадія *гомогенізації* (усереднення) характеризується тим, що до її кінця скло маса звільняється від звивин і стає однорідною. Гомогенізація протікає переважно за рахунок інтенсивного руху речовин, що складають скло масу. Чим вище температура варіння і, як наслідок, нижче в'язкість скла, тем швидше пересуваються частки і, навпаки, при знижених температурах

пересування часток уповільнюється. Тому під час гомогенізації температура скломаси відіграє вирішальну роль. Значно прискорює гомогенізацію виділення міхурів. Піднімаючись, вони розтягують приграничні плівки різнорідного скла в найтонші нитки із сильно розвиненою питомою поверхнею й у такий спосіб полегшують взаємне переміщення скломаси сусідніх ділянок. Таким чином, процес гомогенізації скла тісно переплітається з посвітлінням.

У процесі варіння скла періодично беруть проби й визначають кількість і розміри бульбашок, показник заломлення й середню дисперсію. За наявності підвищеної бульбашковості продовжують варіння скла під час його перемішування. У випадку відхилення від необхідного значення показника заломлення або середньої дисперсії додають бій скла з потрібними оптичними властивостями. Аналіз скла проводиться в оптичній лабораторії.

Після завершення процесів посвітління й гомогенізації скломаса за своєю якістю повністю придатна для одержання з неї виробів, однак висока температура й низька в'язкість її не дозволяють здійснювати формування. Тому перед формуванням скломасу дещо охолоджують.

Стадія *охолодження* характеризується тим, що температура скломаси знижується для створення в'язкості, що дозволяє формувати зі скломаси вироби. Температуру скломаси знижують плавно й поступово. При різкому охолодженні скломаси може порушитися рівновага між рідкою й газовою фазами, що може привести до нового утворення газоподібних включень (повторних бульбашок і мошки – дрібних бульбашок). На стадії ж охолодження при зниженій температурі і підвищеній в'язкості скломаси звільняти її від газових включень важко. Щоб уникнути появи дефектів скла на стадії охолодження, слід чітко дотримуватися встановленого технологічного режиму, який полягає в безперервному і поступовому зниженні температури й дотриманні заданого характеру й тиску газової атмосфери печі.

Варіння скла у платиновому тиглі (рис. 3.2) має ряд відмінностей. Тигель 4 об'ємом 50...70 л встановлено на керамічному піддоні 11 в каркасі 7 печі. Простір між тиглем і індуктором 5 теплоізольовують високоглиноземним матеріалом 6 і закривають керамічним кільцем 9 з конічним отвором під роз'ємну кришку 8. Індуктор виготовлений з мідних трубок, усередині яких циркулює вода для охолодження, і закріплений на ізоляційних прокладках до стійок каркаса печі. При подачі на індуктор 5 напруги високої частоти в тиглі 4 індукуються вихрові струми, що розігрівають його до температури 1400...1450°C. Шихта отримує тепло від стінок тигля. На дні тигля є отвір з

патрубком 3 для випуску звареного скла. Технологічний процес варіння скла в платиновому тиглі аналогічний процесу варіння в керамічних горщиках.

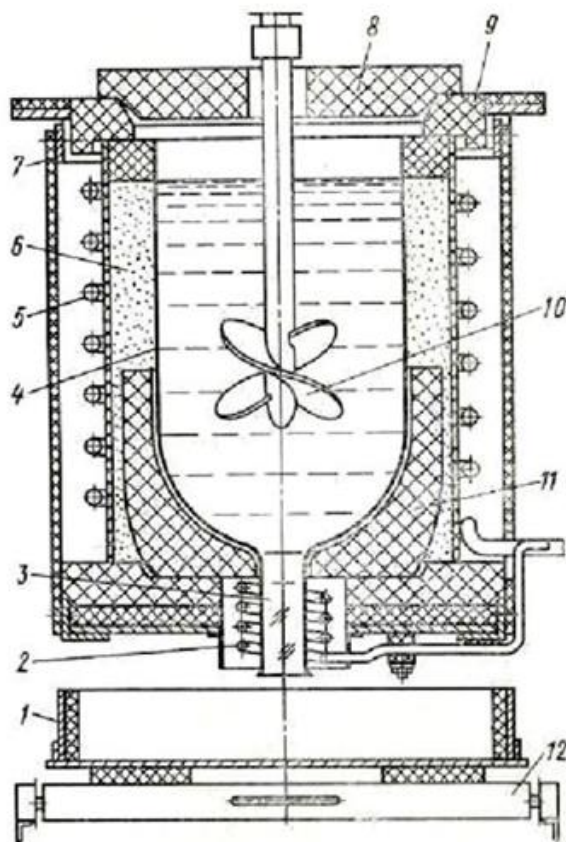


Рисунок 3.2. – Установка для варіння скла в платиновому тиглі

При вимкненому індукторі 2 скло в патрубку охолоджується і є як би пробкою, що перешкоджає виливання розплаву з тигля. Після засипки всієї шихти і бою закривають кришку 8 і розплавляють скломасу. Розмішують скломасу платинородієвий мішалкою 10 до утворення однорідного безбульбашкового розплаву. Для відливу скла включають індуктор 2, виплавляють неякісне скло з патрубка в окрему ємність і підводять під струміль скла візок 12 з попередньо розігрітою формою 1. Після відпливу форму зі склом поміщають в піч відпалу.

3.5 Вироблення й відпал оптичного скла

Зварене скло прохолоджують із пічню до температури 1000°C, після чого горщик вивозять із печі. Скло відливають у блок, в лист або студять у горщику.

Під час відливання в блок розплавлене скло з горщика плавно виливають у металеві або шамотні форми. Блоки потім прохолоджують у печі. Під час відливання в лист скло виливають на ливарний стіл, обмежуючи рейками необхідної висоти. Потім здійснюють прокатку скла до товщини 15...45 мм.

Під час обробки скла методом студки горщик зі склом оточують кожухом для створення умов, що сприяють уповільненому охолодженню, з метою зниження напружень у склі. Після охолодження кожух видаляють і розбивають горщик і скло. Безформні шматки, що утворювалися, кладуть у форми й поміщають у піч, де скло розм'якшується й під власною вагою заповнює форми.

Сировинне скло в подальшому обробляють залежно від його форми й розмірів. Блоки розколюють на шматки заданих розмірів і розрізають алмазною пилюкою на пластини або відправляють на молірування.

Молірування – технологія формування промислових і художніх криволінійних виробів з нагрітого скла. Скло при температурі 600...700°C стає відносно текучим і повільно деформується під дією власної ваги, приймаючи форму опорної поверхні (форми, матриці). При цьому заготовка зберігає цілісність і гладкість власної поверхні. На рис. 3.3 показані етапи цього процесу.

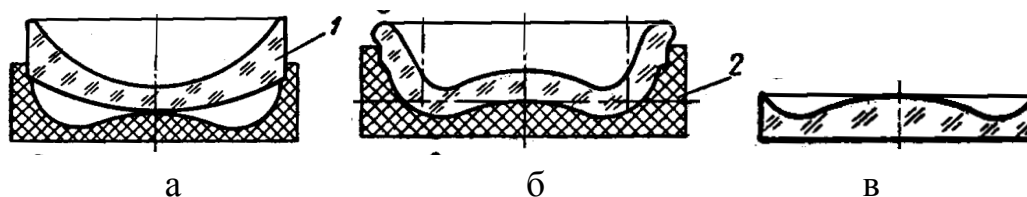


Рисунок 3.3. – Схема процесу молірування

Опукло-вигнутий меніск 1 з полірованою ввігнутою сферичною поверхнею й шліфованою опуклою сферичною поверхнею центрують у формі (рис. 3.3, а). Молірування проводиться в полірувальній тунельній печі, у верхній частині якої розміщуються керамічні електронагрівачі, а в нижній – металева опорна поверхня, на яку горизонтально встановлюється форма 2 зі склом. Внаслідок розм'якшення опукла поверхня заготовки деформується й заповнює форму. При цьому зовнішня, полірована, поверхня заготовки одержує вигляд, обумовлений параметрами заготовки й робочою частиною форми (рис. 3.3, б). У пресовій зоні печі скло нагрівається до розім'якшення, а потім переміщується на прес, де склу надають задану товщину або необхідну форму. Отримані заготовки піддають попередньому відпалу шляхом повільного охолодження в зоні відпалу. Після охолодження проводять механічну обробку, результат якої показаний на рис. 3.3, в.

Пластини, отримані пресуванням або розпилюванням, шліфують із однієї або двох поверхонь для одержання плоских поверхонь і необхідної товщини. Після обробки, контролю й сортування за товщиною пластини вручну або на спеціальній машині розрізають на заготовки. Заготовки поміщають у піч і після розім'якшення надають їм округлу форму й пересувають у прес-форму. Пресування здійснюється на пневматичних пресах. На прес-формах гравірується марка скла, радіус кривизни, що залишаються на поверхні пресовок у вигляді опуклих знаків.

Усі види заготовок піддають відпалу – нагріванню до 400...500°C, витримці при цій температурі з подальшим повільним охолодженням. Відпал застосовують для зняття внутрішніх напружень (подвійної променезаломлюваності), підвищення оптичної однорідності й незначної зміни показника заломлення й середньої дисперсії. Режим відпалу визначається розмірами заготовок, маркою скла й вимогами до скла за подвійною променезаломлюваністю, оптичною однорідністю. Тривалість відпалу становить від декількох днів для невеликих заготовок до декількох тижнів для великих заготовок з високими оптичними властивостями. Відпал проводиться в електричних печах з автоматично регульованим режимом.

3.6 Виробництво кварцового оптичного скла

Виробництво оптичного кварцового скла принципово відрізняється від виробництва інших видів оптичного скла. Це єдине промислове скло найпростішого хімічного складу, що містить тільки один компонент – кремнезем. Висока його тугоплавкість і висока в'язкість у розплавленому стані (при 1723°C в'язкість становить $1 \cdot 10^6$ Па) не дозволяють застосовувати до кварцового скла технологію звичайних оптичних стекол. Кварцове скло одержують шляхом розплавлювання крупки природного або синтетичного кварцу в електричних печах або в киснево-водневому полум'ї. Останнім десятиліттям набув широкого промислового застосування спосіб наплавлення кварцового скла через газову фазу. Вихідною сировиною в цьому випадку є дешева хімічна сполука – тетрахлорид кремнію, який легко випаровується й гідролізується, утворюючи аморфний кремнезем і соляну кислоту. Конденсований кремнезем сплавляється в скло в киснево-водневому полум'ї (останнім часом для цього використовуються й плазмотрони, які мають таку перевагу, що скло, наплавлене в плазмі, містить менше гідроксильних груп і

більш прозоре в інфрачервоній частині спектра). Готова продукція має форму заготовок (блоків) циліндричної форми.

Особливості технології оптичного кварцового скла виявляються також у тому, що крім нормування за оптичною однорідністю, подвійною променезаломлюваністю, бессвільністю і бульбашковістю, ГОСТ 15130-79 передбачає нормування показників якості, характерних тільки для кварцового скла – дрібнозернистої неоднорідності (рябі) і включень. Дрібнозерниста неоднорідність є наслідком неоднакового ступеня впливу високої температури, газової атмосфери й інших фізико-хімічних факторів під час наплавлення на центральну й периферійну частини кожної крупинки, з яких складається вихідна шихта. Внаслідок цього показник заломлення периферійної зони відрізняється від центральної, що можна спостерігати у вигляді тіньової або дифракційної картини. Скло з тетрахлориду кремнію вільно від рябі, але його оптична однорідність не вище третьої категорії. Із цього скла можливе одержання заготовок не тільки для лінзової, але й для призмної оптики.

3.7 Дефекти оптичного скла і його контроль

До недоліків оптичного скла належать бульбашки, камені, мошка, димки, свілі та натяжіння.

Бульбашки утворюються в процесі варіння скла через виділення газів складовими частинами шихти, що вступають у реакцію. Вони практично немінучі під час виготовлення скла. Бульбашки викликають світлорозсіювання й деяку втрату яскравості зображення, оскільки промені світла, заломлюючись на поверхнях бульбашок під значно більшими кутами, ніж на іншій площі лінзи, майже повністю поглинаються внутрішніми поверхнями камери й оправы об'єктива. До бульбашок належать також і камені.

Камені являють собою дрібні непрозорі частки, що відділились від горщика під час варіння скла, або частки шихти, що не розплавилися. Невелика кількість і малі розміри каменів, якщо вони не перебувають у фокальній площині або поблизу її, на якість зображення не впливають, оскільки затримують лише незначну частину світла, що проходить крізь скло. Бульбашки і камені легко виявляються під час перегляду скла на фоні чорного екрана при бічному освітленні.

Звилини – витягнуті склоподібні включення, які мають склад, відмінний від навколишнього скла. Звилини спостерігаються в масі скла у вигляді прозорих смужок або ниток внаслідок неоднакового показника заломлення маси скла. Звилини сильно спотворюють зображення, що дається приладом. Звилини виявляють способом тіньової проекції. Скло, що перевіряється після попереднього полірування двох протилежних сторін, встановлюють між джерелом світла й екраном. Наявні в склі звилини зображуються на екрані у вигляді темних прямих або хвилястих ліній. Даний метод може також застосовуватися й для безформних шматків скла. Для контролю їх поміщають у скляну кювету, заповнену імерсійною рідиною, що відповідає за показником заломлення скла, яке перевіряється.

Мошка являє собою велике скупчення в масі скла дрібних бульбашок, що займають значну частину його об'єму. Мошка викликає розсіювання великої кількості світла, що проходить крізь скло.

Димки мають вигляд павутини або легкого хвилястого серпанку в середовищі скла. Вони утворюються переважно від спікання складок, які з'являються в процесі пресування, а також під час спікання раніше не виявлених тріщин.

Натяжіння походять від неоднорідності скла, що викликане нерівномірним охолодженням під час його виготовлення або від надмірного тиску на скло при закріпленні його в оправках. У звичайних умовах вони непомітні на око, тому виявляються перевіркою стекол за допомогою спеціального приладу – полярискоскопа.

Контроль скла на скловарних заводах здійснюється за всіма показниками якості: вимірюють показники заломлення n_e , n^d , n_F' , n_c ; визначають оптичну однорідність, подвійну променезаломлюваність, беззвіленість, бульбашковість тощо. Залежно від результатів випробувань скла надають категорію й клас відповідного показника якості. Кожна партія заготовок супроводжується паспортом, що характеризують скло за всіма показниками, передбаченими державними стандартами.

3.8 Одержання ситалів

Ситали – це особливий клас склокерамічних матеріалів, що мають мікрокристалічну структуру з кристалами розміром не більше 1...2 мкм, які рівномірно розподілені по всьому об'єму склоподібної речовини. Оптична щільність кристалів і склоподібної маси збігаються або близькі між собою, що

виключає світлорозсіювання на границях розділу фаз «скло – кристал». Ситали мають підвищену в порівнянні зі склом термостійкість, механічну міцність і твердість. Основні характеристики ситалів такі: густина 2300...2600 кг/м³; $\sigma_B=160...280$ МПа, опір тиску 1000...2000 МПа, міцність при згині – 70...350 МПа, модуль пружності $E=84...141$ ГПа. Міцність ситалів залежить від температури. Твердість їх близька до твердості загартованої сталі (HV – 7000–10500 МПа). Вони досить зносостійкі ($f_{тр}=0,07...0,19$). Електричні властивості високі: $\rho=10^{12}...10^{14}$ Ом·м; $\epsilon=5,5...8$; $tg\beta=(3...18)\cdot 10^{-4}$; $E_{пр}=40...60$ МВ/м.

Колір ситалів залежить від їхнього хімічного складу й методу кристалізації. Ситали можуть бути прозорими матеріалами, а також пофарбованими в жовтий, опаловий та інші кольори. Головна особливість ситалів – комбінація високої твердості й механічної міцності з відмінними електроізоляційними властивостями, високою температурою розм'якшення, високою термічною й хімічною стійкістю. Властивості ситалів ізотропні. У них цілком відсутня в'язка пористість. Усадка матеріалу під час його переробки незначна. Велика абразивна стійкість робить їх малочутливими до поверхневих дефектів. Термічна стійкість ситалів забезпечується дуже невеликими, а іноді й негативними (від $-7\cdot 10^{-7}$ до $+3\cdot 10^{-7}$) коефіцієнтами термічного розширення. За теплопровідністю ситали внаслідок підвищеної щільності перевершують скло.

Структура ситалів являє собою суміш дуже дрібних (0,01...1 мкм), безладно орієнтованих кристалів (60...95%) і залишкового скла (5...40 %). Вихідне скло за хімічним складом відрізняється від залишкового скла, у якому накопичуються іони, що не входять до складу кристалів. Така структура створюється в скляних виробках після подвійного відпалу (перший потрібний для формування центрів кристалізації, другий – для вирощування кристалів на готових центрах). Для утворення кристалів у стекла вводять Li_2O , TiO_2 , Al_2O_3 та інші сполуки.

В оптично прозорих ситалах розмір кристалів не перевищує довжини півхвилі видимого світла. Тому оптичне кварцове скло може бути замінене прозорими ситалами, які мають перед ним ту перевагу, що через малі коефіцієнти теплового розширення вони нечутливі до теплових ударів. Прозорість пов'язана з розміром кристалів, меншим довжини півхвилі видимого світла, і близькістю показників їх заломлення до аналогічних показників склоподібної фази.

Одержують ситали й вироби з них переважно з використанням скляної й керамічної технології, іноді хімічним способом. Найбільш поширена так звана *скляна технологія*, що включає варіння скла із шихти, формування виробів (пресування, прокатка, відцентрове лиття) й термічну обробку. Остання стадія забезпечує кристалізацію скла внаслідок введення в скляну масу спеціальних ініціаторів – каталітичних домішок (оксидів Ti, Cr, Ni, Fe, фторидів, сульфідів, металів платинової групи), а також внаслідок схильності стекол до ліквідації, що сприяє утворенню поверхні розподілу фаз, що й наближає хімічний склад мікрообластей до складу майбутніх кристалів. Термічну обробку здійснюють зазвичай за двоступінчастим режимом; температура першого ступеня знаходиться в області температури розм'якшення скла й відповідає максимальній швидкості зародження центрів кристалізації, при температурі другої стадії відбувається виділення кристалів провідної фази, що визначає основні властивості ситалів.

За *керамічною (порошковою) технологією* одержання ситалів з розплаву скла спочатку одержують гранулят, який подрібнюють і сушать, після чого в нього додають термопластичне зв'язуюче і з маси, що утворюється, пресуванням або шлікерним виливанням одержують вироби. Потім їх спікають при високій температурі з одночасною кристалізацією. Порівняно з керамікою аналогічного складу, спечені ситали характеризуються більш низькими температурами випалу й розширеним інтервалом спікання. Порошкова технологія дозволяє одержувати із ситалів термічно стійкі вироби складної конфігурації й малих розмірів.

За *хімічним способом* ситали одержують переважно за зольно-гелевою технологією, в основі якої лежить низькотемпературний синтез (за допомогою реакцій гідролізу й конденсації) металоорганічних сполук елементів, що складають скло, при температурі нижче температури плавлення скляної шихти. Цей метод дозволяє одержувати ситали на основі сполук, не схильних до склоутворення, що забезпечує одержання стекол високої чистоти й однорідності, різко поліпшує властивості ситалів, синтезованих на їхній основі.

Ситали поділяються на термоситали, фотоситали й шлакоситали. Термоситали одержують за описаною вище скляною технологією. Вони широко використовуються в авіації, машинобудуванні, хімічній промисловості, атомній енергетиці тощо. Термоситали застосовуються в приладобудуванні для виготовлення низькочастотних конденсаторів великої ємності, п'єзоелементів, настановних елементів та ін. Розроблені

напівпровідникові, феромагнітні, сегнетоелектричні ситали з різними комбінаціями електричних властивостей. Фотоситали зазвичай одержують на основі стекол системи $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ зі світлочутливими домішками (сполуками Au, Ag, Cu), які під дією УФ-опромінення і подальшої теплової обробки скла сприяють його виборчій кристалізації. Фотоситали знаходять застосування в мікроелектроніці, ракетній і космічній техніці, оптиці, лазерній техніці та астрономічних приладах, у поліграфії як світлочутливі матеріали (наприклад, для виготовлення оптичних друкованих плат, як світлофільтри). Введення до складу таких ситалів активаторів люмінесценції і спеціальних домішок дозволяє застосовувати їх у сонячних батареях. До складу шлакоситалів разом із кварцевим піском входять доменні шлаки, що дозволяє утилізувати відходи й знижує вартість ситалів. Шлакоситали застосовуються в переважно у будівництві.

Оптично прозорі та радіопрозорі ситали одержують на основі стекол системи $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (сподумено-евкриптитові сполуки); ініціатором кристалізації є TiO_2 .

Оптичні ситали застосовують в оптико-механічній промисловості для виготовлення астрономічних дзеркал, телескопів. У оптичній промисловості застосовуються ситали: CO115M, CO156, CO21.

CO115M – термостійкий ситал з малим коефіцієнтом лінійного теплового розширення. Застосовують його для виготовлення оптичних деталей, в яких не допускається зміна форми поверхні зі зміною температури: астрономічних дзеркал, оптичних деталей гіроскопів, підставок інтерферометрів.

CO156 – ситал з малим коефіцієнтом лінійного теплового розширення. Відрізняється підвищеною прозорістю у видимій області спектра і кращою однорідністю. Застосовують для виготовлення пробних стекол і деталей вимірювальної техніки.

CO21 – ситал з малим коефіцієнтом лінійного теплового розширення в межах $0 \dots +350^\circ\text{C}$. Має максимальну термостійкість (до $+700^\circ\text{C}$) і максимальну відносну твердість за зішліфовуванням. Застосовують для виготовлення деталей приладів лазерних гіроскопів і приладів, що працюють в космосі.

Контрольні запитання та завдання

1. Дайте характеристику технологічного процесу виробництва оптичного скла.

2. Охарактеризуйте основні сировинні матеріали.
3. Охарактеризуйте допоміжні сировинні матеріали.
4. Як готується шихта?
5. Охарактеризуйте процес варіння скла.
6. Дайте характеристику методів одержання заготовок з оптичного скла.
7. Для чого і як застосовується відпал?
8. В чому полягають особливості процесу виробництва кварцового оптичного скла?
9. Як контролюють оптичне скло?
10. Дайте характеристику дефектів оптичного скла.
11. Які властивості мають ситали, чим вони відрізняються від скла?
12. Яким чином виготовляють і застосовують оптичні ситали?

4. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ОПТИЧНОГО ВОЛОКНА

4.1 Особливості застосування оптоволоконних технологій

В основі оптоволоконних технологій знаходиться принцип використання світла як основного джерела передачі інформації. Відправник перетворює інформацію у світлову хвилю, а адресат, отримуючи останню, в свою чергу інтерпретує світло як інформацію.

В оптоволоконних технологіях використовується хвильова теорія світла, тобто світло розглядається як електромагнітна хвиля певної довжини. Для її транспортування використовуються ізольовані оптично прозорі середовища. В однорідному середовищі електромагнітна хвиля поширюється прямолінійно, однак на межі зміни щільності середовища її напрямок і якісний склад змінюються.

Світловод (хвилевід оптичний) – закритий пристрій для направленої передачі світла. У відкритому просторі передача світла можлива тільки в межах прямої видимості й обмежується розбіжністю випромінювання, поглинанням і розсіюванням його в атмосфері. Перехід до світловодів

дозволяє значно зменшити втрати світлової енергії під час її передачі на великі відстані, а також передавати світлову енергію по криволінійних трасах.

Найбільш перспективний і широко застосовуваний нині тип світловодів – гнучкий діелектричний волоконний світловод з низькими оптичними втратами, що дозволяє передавати світло на великі відстані (рис. 4.1).

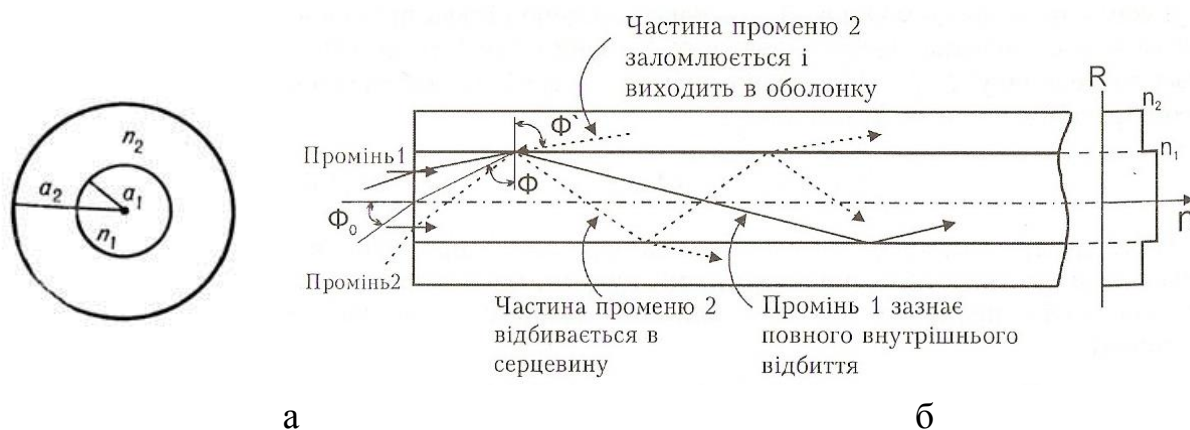


Рисунок 4.1 – Поперечний переріз волоконного світловода (а) і поширення світла у світловоді (б)

У найпростішому варіанті він являє собою тонку нитку з оптично прозорого матеріалу, сердцевина якої радіусу a_1 має показник заломлення n_1 , а оболонка з радіусом a_2 має показник заломлення $n_2 < n_1$ (рис. 4.1, а). Відповідно до законів геометричної оптики, промені, що входять у сердцевину під досить малими кутами до осі світловода, зазнають *повного внутрішнього віддзеркалення* на поверхні розділу сердцевини і оболонки й розповсюджуються тільки по сердцевині (рис. 4.1, б).

Деякі властивості оптичного волокна як світловода безпосередньо залежать від діаметра сердцевини. За цим параметром оптоволокно поділяється на дві категорії: багатомодове й одномодове, де мода – це одна з можливих траєкторій, за якою може поширюватися світло в оптоволокні.

Діаметр сердцевини одномодових волокон складає від 7 до 9 мкм. Завдяки малому діаметру досягається передача по волокну лише однієї моди електромагнітного випромінювання, за рахунок чого виключається вплив дисперсійних спотворень. Зараз практично всі вироблені волокна є одномодовими.

Багатомодові волокна відрізняються від одномодових діаметром сердцевини, що становить 50 мкм в європейському стандарті і 62,5 мкм в північноамериканському та японському стандартах. Через великий діаметр

серцевини по багатомодовому волокну поширюється декілька мод випромінювання – кожна під своїм кутом, через що імпульс світла відчуває дисперсійні спотворення.

Багатомодові волокна поділяються на ступінчасті та градієнтні. В ступінчастих волокнах показник заломлення від оболонки до серцевини змінюється стрибкоподібно. У градієнтних волокнах ця зміна відбувається інакше – показник заломлення серцевини плавно зростає від краю до центра. Це призводить до явища рефракції в серцевині, завдяки чому знижується вплив дисперсії на спотворення оптичного імпульсу. Профіль показника заломлення градієнтного волокна може бути параболічним, трикутним, ламаним тощо.

Першим етапом в процесі виготовлення світловодів є визначення відповідних за низкою параметрів матеріалів, з яких у подальшому буде виготовлений світловод. Для будь-яких типів світловодів необхідні матеріали високого ступеня однорідності з максимально гладкою поверхнею розділу серцевини й оболонки. Матеріал оболонки має добре прилипати до серцевини волокна. Ці дві вимоги запобігатимуть надмірній втраті світла при розсіюванні і при виході світла за межі волокна.

Другим етапом виробництва оптоволокон є визначення методу виготовлення світловода з вибраних матеріалів. Оптичне волокно виготовляється в ході декількох технологічних операцій. Спочатку виготовляють заготовки для виробництва оптичного волокна. Вони являють собою скляні стержні, що складаються зі скла серцевини і скла оболонки. Далі з цих заготовок, при сильному нагріванні одного кінця, проводиться витяжка у волоконний світловод, при цьому водночас наноситься первинне буферне покриття, що є його захисною оболонкою.

4.2 Матеріали для виготовлення оптичного волокна

Оптичні волокна за видом застосовуваного матеріалу можна поділити на волокна з неорганічного та органічного скла.

Скляні волокна мають як скляне ядро, так і скляну оптичну оболонку. Порівняно з іншими матеріалами, скло має ту перевагу, що його показник заломлення можна значно змінювати за допомогою легування скла на стадії виплавки. Довжина шляху світла у світловоді більша, ніж в оптичних приладах, отже, для виготовлення оптичного волокна необхідне скло високої прозорості без краплень сторонніх матеріалів і бульбашок повітря.

Висока прозорість скла не завжди сумісна з високим показником заломлення: в останньому випадку скло носить жовтуватий відтінок. У видимій області спектра, а саме цей діапазон оптичного випромінювання розглядається при переносі зображення світловодом, скляне волокно довжиною 2 метри пропускає близько 50% світла, що падає на торець джгута або близько 80% світла, яке пройшло у світловод. Різниця цих величин обумовлена екрануванням частини перерізу джгута ізолюючими оболонками волокон і відбиттям світла від торця джгута. Остання проблема може бути вирішена нанесенням на вхідний торець джгута просвітлюючої плівки, аналогічної тій, що використовують при просвітлінні оптики. Перша ж проблема вирішується шляхом зменшення товщини зовнішньої оболонки окремого волокна (на товщину поширюється напівхвильове обмеження).

Скло, що використовується в даному типі волокон, складається з надчистого надпрозорого діоксиду кремнію (SiO_2) чи плавленого кварцу. На відміну від звичайного скла, яке складається з суміші різних компонентів, кварцове скло складається тільки з оксиду кремнію, а кількість домішок інших хімічних елементів надзвичайно мала. Це приводить до того, що кварцове скло характеризується широким спектром пропускання, малим поглинанням світла, високою оптичною гомогенністю (однорідністю), стійкістю до іонізуючих випромінювань і лазерного випромінювання високої інтенсивності, низьким коефіцієнтом термічного розширення, високою робочою температурою (більше 1200°C при $350\dots 400^\circ\text{C}$ для звичайного скла). У скло додають домішки, щоб отримати необхідний показник заломлення. Германій і фосфор, наприклад, збільшують показник заломлення, а бор і фтор, навпаки, зменшують його. Крім того, у склі присутні інші домішки, не видалені в процесі очищення. Вони також впливають на властивості волокна, збільшуючи загасання, обумовлене розсіюванням і поглинанням світла.

Крім кварцового скла, для волоконних світловодів використовують також інші прозорі у видимій та інфрачервоній областях спектра матеріали: багатокомпонентне кисневе скло, безкисневе скло, полімери й кристали. Однак волоконне скло на основі кварцового скла характеризується мінімальними оптичними втратами та найвищою механічною міцністю, тому воно знайшло найширше застосування.

Незважаючи на те, що досягнуто значного прогресу у виробництві оптичних волокон високої міцності з неорганічного скла, їх невелике відносне подовження при розриві обмежує діаметр волокна, виходячи з практичних вимог

до радіусу вигину. Крім того, поверхню світловода зі скла необхідно захищати від впливу зовнішнього середовища за допомогою полімерного покриття.

Скляні волокна з полімерною оптичною оболонкою мають скляне ядро і полімерну оптичну оболонку. Їх характеристики, хоча і не настільки добрі, як у повністю скляного волокна, але є цілком прийнятними.

Полімерні волокна мають полімерне ядро і полімерну оптичну оболонку. Порівняно з іншими видами волокон, полімерні мають обмежені можливості з точки зору затухання та смуги пропускання. Однак низька собівартість і простота використання роблять їх привабливими там, де вимоги до величин загасання і смуги пропускання не такі високі.

Полімерні оптичні волокна призначені переважно для роботи у видимій області спектра. За межами видимої області, в ультрафіолетовій і ближній інфрачервоній зоні світлопропускання використовуваних полімерів спадає, і ефективність їх застосування знижується.

Полімерні оптичні волокна мають виняткову гнучкість при відносно великих діаметрах і здатність витримувати без руйнування багаторазовий вигин. Так, радіус вигину полімерного оптичного волокна діаметром 0,75 мм визначається оптичними, а не механічними властивостями. При діаметрі 1,5 мм мінімально допустимий радіус вигину цих матеріалів дорівнює 8 мм. Крім того, вони мають малу щільність, добру механічну міцність, радіаційну стійкість, технологічність. З існуючих типів оптичних волокон найбільше відносно подовження мають полімерні волокна. Зокрема, волокна з метилметакрилату можуть витримувати оборотні деформації, рівні 13%. У більш крихких полімерів, таких, як поліефір, пружна деформація становить 6%. Шляхом попередньої орієнтації молекул полімеру можна подавити зростання мікротріщин і збільшити еластичність.

Показник заломлення полімерних волокон змінюється від 1,32 для матеріалів на основі акрилатів зі значними добавками фтору до 1,6 для деяких фенольних смол. Великий апертурний кут (близько 60°) полегшує процес узгодження полімерних оптичних волокон при їхньому з'єднанні, що знижує вимоги до точності виготовлення елементів з'єднувача. Оптичні з'єднувачі для полімерних оптичних волокон виготовляють з термопластичних матеріалів методом лиття під тиском, що знижує їх вартість. Високі оптичні втрати і температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР), низька абразивна міцність, схильність до швидкого старіння, малий коефіцієнт широкосмуговості звужують область їх застосування. Переважно вони використовуються в системах зв'язку та освітлення, у локальних волоконно-

оптичних систем зв'язку на ділянках довжиною до 3 км, а також для внутрішньооб'єктового зв'язку, в автомобілебудуванні, медицині, для виготовлення датчиків, інформаційних табло і панелей, побутових електроприладів тощо. Вартість кабелів на їх основі на 70...90% дешевше, ніж кабелів на основі кварцових волокон.

4.3 Процес виготовлення заготовки для оптоволокна

Перший етап технології оптичного волокна – отримання заготовки, яка являє собою скляний стержень довжиною близько метра і діаметром близько 10...20 мм. Одним з найбільш поширених є метод *хімічного осадження з газової фази* – способом, який вперше був використаний у 1970 році американською фірмою Corning Inc. При цьому методі осадження скла може відбуватися на зовнішній поверхні стержня, що обертається (OVD method, Outside Vapor Deposition), на торцевій поверхні стержня із кварцового скла (VAD method, Vapor Axial Deposition) або на внутрішній поверхні опірної трубки, що обертається, з кварцового скла (IVD method, Inside Vapor Deposition). При цих методах осадження скла відбувається за рахунок реакції розкладання сильно летучих високочистих сполук у киснево-водневому або плазмовому полум'ї.

Зараз широко застосовується метод, який носить назву «*модифікований метод хімічного осадження з газової фази*» (MCVD). Під час використання методу MCVD відбувається осадження надчистого двоокису кремнію (під час виготовлення серцевини завжди додаються певні домішки) на внутрішній стороні скляної трубки, а потім – усадка трубки, викликана підвищенням температури (за допомогою полум'я газу або струмів надвисокої частоти). Внаслідок цього трубка стискується і перетворюється на суцільний скляний стержень діаметром 30...40 мм і довжиною близько 1000 мм. Таким чином, цей скляний стержень отримує остаточний профіль, який матиме і готове волокно.

Процес осадження заснований на високотемпературному окисленні речовин, що використовуються як домішки. Він займає, в залежності від розміру заготовки, від чотирьох до восьми годин, протягом яких відбувається осадження і того скла, яке стане оболонкою волокна, і того, яке перетвориться на світлопровідну серцевину. Процес осадження однаковий і для одномодових, і для багатомодових волокон.

Першими операціями під час виробництва є контроль і відбір опорних кварцових труб, які під час витяжки трансформуються в оболонку волоконного світловода. Типові розміри опорних труб такі: зовнішній діаметр

20...25 мм, внутрішній діаметр 16...20 мм, довжина близько 1 м. Опорна труба з надчистого високоякісного кремнезему (двоокису кремнію, синтетичного кварцу) промивається в кислотній ванні, а потім затискається в пристрої, що нагадує токарний верстат (рис. 4.2).

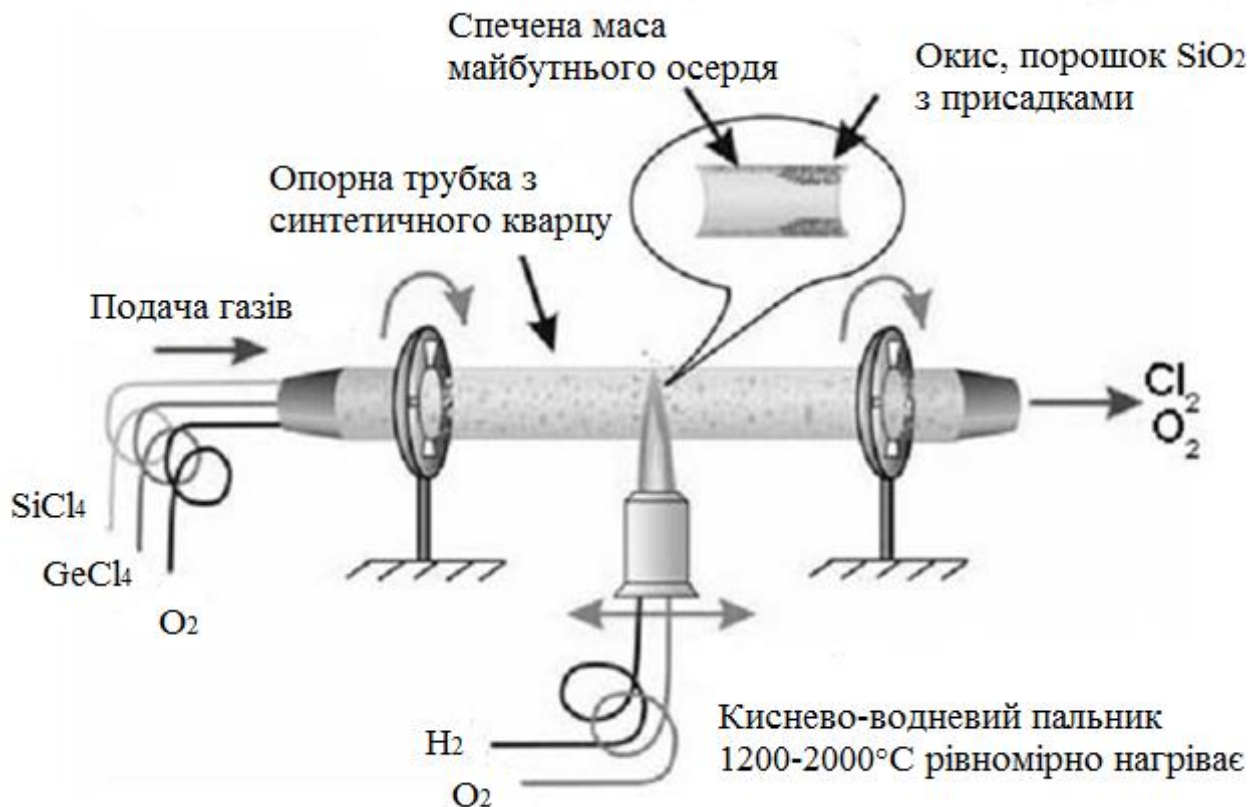


Рисунок 4.2 – Виробництво оптичного волокна методом MCVD

У ньому трубка може обертатися навколо своєї центральної осі зі швидкістю близько 60 об/хв. Киснево-водневий газовий пальник рухається зі швидкістю 20 см/хв уздовж трубки назад і вперед, сильно й рівномірно нагріваючи трубку. Вхідний кінець трубки через газонепроникну сполучну муфту, що обертається, приєднаний до комплексного пристрою подачі газів. У цей пристрій входять змішувач газів і автоматизовані регулятори масової витрати. Вкрай важливо, щоб цей пристрій був абсолютно герметичним. Це потрібно і для того, щоб запобігти потраплянню всередину забруднюючих речовин, і для того, щоб забезпечити точне дозування газів. З резервуарів надходять хімічні реактиви, які шляхом нагрівання переводяться з рідкої фази в газоподібну і подаються в трубку. Туди ж подається кисень. З іншого (вихідного) кінця трубки видаляється надмірний матеріал.

На початку процесу проводиться полірування труби в полум'ї пальника при температурі близько 1600°C, при якій оплавляються існуючі мікротріщини.

Гази, типу чотирихлористого кремнію SiCl_4 і чотирихлористого германію GeCl_4 вводяться разом з киснем. При цьому внаслідок реакції виходять частки кварцу і діоксиду германію, а пари хлору випаровуються. Умови протікання реакції вибрані так, щоб забезпечити реакцію в газовій фазі по всьому об'єму реактора (труби), на відміну від більш ранніх методів, де реакція відбувалася тільки на частині поверхні заготовки. У гарячій зоні напроти пальника синтезується оксид кремнію. Утворюються частинки оксидів, які дрейфують з гарячої області в більш холодну та осідають на стінці. Цей процес називається термофорезом, він добре описується і пояснюється кінетичною теорією. Важливо, що осадження відбувається не в місці нагріву полум'ям, а перед ним – там, куди полум'я ще не дійшло. На поверхні трубки утворюється пористий шар окису, і, рухаючись далі, пальник його проплаває – остекловує. Так виходить шар чистого скла. При подальших проходах крізь трубку пропускають ще і германій у вигляді хлориду. Таким чином легують матеріал світловода, створюючи в ньому градієнт коефіцієнта заломлення. При цьому, наскільки це технічно можливо, запобігає потраплянню в систему забруднюючих речовин. Особливо це стосується забруднюючих речовин, що містять водень, який утворює у волокні сполуки, які викликають збільшення загасання.

Після того як осадження завершується, починається наступний важливий етап процесу виготовлення – усадка трубки. Цей етап складається з декількох кроків. Щоб забезпечити усадку, температуру піднімають (за допомогою киснево-водневого пальника або струмами надвисокої частоти) до $1500\text{...}2000^\circ\text{C}$. При такій температурі трубка плавиться і сплющується просто під дією сил поверхневого натягу, утворюючи суцільний стержень – заготовку. Цей крок є вирішальним для забезпечення остаточних геометричних параметрів заготовки. Усадка відбувається тоді, коли киснево-водневий пальник або струми надвисокої частоти впливають на трубку по всій її довжині. Усадка забезпечується в'язким внутрішнім перебігом, що викликається поверхневим натягом, яке зростає в міру того, як скло стає більш гарячим і менш в'язким.

Після того, як необхідна кількість шарів осаджена, подачу хлоридів вимикають, а температуру полум'я збільшують, внаслідок чого трубка стискається і перетворюється на суцільний скляний стержень.

Перевагами методу є простота обладнання, можливість управління показником заломлення світла волокна й можливість виготовлення волокон з малою величиною затухання.

Недоліками методу є обмеження за складом (має використовуватися тільки заготовка із кварцевого скла) і розмірами заготовки (розмір стержня заготовки обмежений розмірами установки й трубки кварцевого скла). Стержень, що виробляється за такою технологією, не може мати великий діаметр або довжину, відповідно волокно не може бути дуже довгим: в середньому 3...5 км, і лише в окремих випадках 20...40 км.

Метод зовнішнього осадження (OVD-метод), яким користується фірма «Корнінг», називають ще зовнішнім осадженням (на відміну від першого – внутрішнього): скло осідає на вогнетривкий стержень прямо з полум'я пальника, куди подаються хлориди вихідних речовин (рис. 4.3).

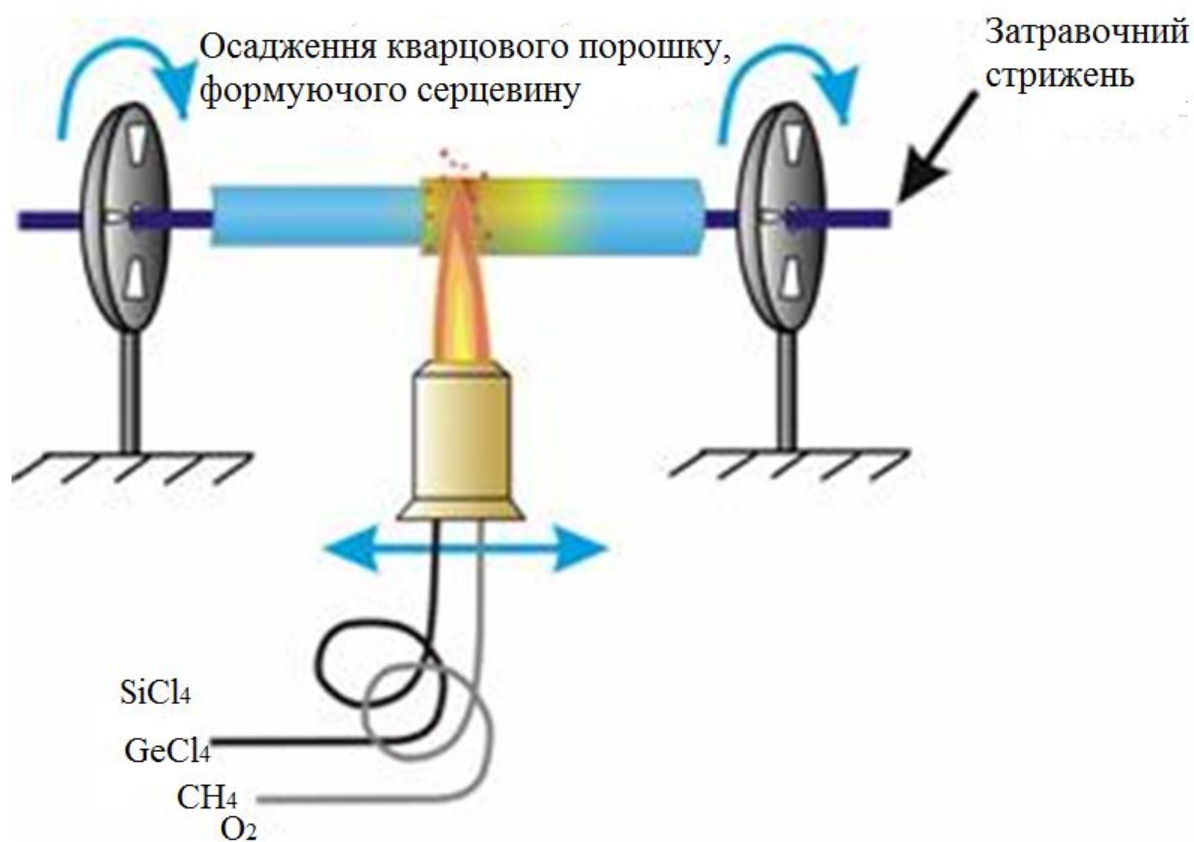


Рисунок 4.3 – Виробництво оптичного волокна методом OVD

Процес виготовлення методом OVD поділяється на три етапи.

Етап перший – осадження. На цьому етапі відбувається осадження порошкоподібного двоокису кремнію, часто званого білою сажею (з домішками або без них) на тонкому стержні. Гарячий потік часток порошкоподібного двоокису кремнію рухається над поверхнею стержня, при цьому деякі частинки осідають на стержні. А сам стержень в цей час обертається і водночас рухається в осьовому напрямку, проходячи через

пальник. Деякі з частинок опиняться при цьому в спеченому стані. Коли відбудеться осадження такої кількості скла, якої буде достатньо для утворення і серцевини, і оболонки, процес зупиниться, а вихідний стержень буде акуратно витягнутий з заготовки.

Другий етап – процес спікання. Спочатку пориста заготовка нагрівається в середовищі газоподібного хлору для видалення води, потім температуру нагрівання підвищують до 1400...1800°C. При цьому частинки білої сажі спікаються в суцільний скляний стержень без бульбашок повітря – заготовку.

Третій етап – витягування волокна. Заготівка (суцільна або порожниста) нагрівається до температури 1800...2300°C, при якій з неї можна витягати волокно.

Таким чином, процес OVD складається з шести основних кроків: очищення сировини, подача реакційних речовин у зону нагрівання, хімічні реакції та утворення частинок, осадження частинок на підложці (вихідний стержень або вже осаджена заготовка), дегідратація і спікання.

Перевагами цього методу є висока продуктивність, можливість застосування методу для штучних волокон і отримання волокна великої довжини, наприклад, 50...100 км.

Недоліками методу є високі вимоги до чистоти вихідних матеріалів і виробничої зони, а також можливість появи тріщин при знятті сировинного матеріалу з заготовки, особливо при відмінності коефіцієнтів теплового розширення у ядра та оболонки.

Осадження стержня на торцевій поверхні або VAD-метод (axial vapor deposition). Заготовка зростає з затравки, розташованої на певній відстані вище полум'я пальника, що має складну шарувату структуру. У середину полум'я подають суміш хлоридів германію та кремнію, потім шар буферного газу, потім тільки хлорид кремнію для чистого скла, потім знову буферний газ, і, врешті-решт, на краю пальника, кисень з воднем – те, що є горючою сумішшю. Речовина осідає на щойно створену в цьому ж процесі поверхню. Проте відстань до цієї поверхні має бути строго фіксованою, і заготовка постійно відсувається від полум'я пальника. Таким методом можна створювати заготовки, яких вистачає на декілька тисяч кілометрів волокна, а в принципі процес може бути безперервний – в міру виготовлення заготовки з неї ж можна витягати волокно.

Перевага цього методу полягає в тому, що заготовка для оптоволокна може бути зроблена безперервною. Продуктивність наплавлення досить висока, приблизно від 1 до 3 г/хв, в деяких випадках до 6 г/хв. Даним методом

виготовляють волокно з малими оптичними втратами. Недоліками методу є труднощі в отриманні заданого профілю показника заломлення і у виготовленні волокна з широкою смугою пропускання.

4.4 Технологія нарощування оптичного волокна

Під час виробництва волокон методом MCVD або PCVD, особливо одномодових, вкрай нераціональним є використання повнорозмірної трубки, тобто трубки, з якої проводиться повна заготовка для оптичного волокна. Всі процеси одержання заготовок шляхом осадження з газової фази є сьогодні двоетапними.

На першому етапі виробляються сердечник і частина оболонки, потрібна для забезпечення оптичних властивостей виготовленого волокна (заготовка сердечника). Із заготовки сердечника, залежно від її розміру, може бути отримано декілька стержнів, на які потім нарощується оболонка. Потім заготовка з накладеною оболонкою витягується в волокно. Розрізняють декілька різних способів виготовлення такої оболонки: жакетування, плазменний, золь-гельний, метод плавлення кварцевого порошку.

Спосіб жакетування являє собою обжимання кремнеземної трубки навколо заготовки осердя; це найпопулярніший процес для виготовлення оболонки сердечників, отриманих способами MCVD і PCVD. Його застосування обмежує висока вартість зовнішніх трубок. Метод зовнішнього парофазного осадження (OVD) оболонки являє собою процес гідролізу в полум'ї, що полягає в осадженні частинок дрібнодисперсного порошку двоокису кремнію SiO_2 на стержні серцевини і спікання порошку для отримання суцільної скляної заготовки. Це найпоширеніший метод накладення оболонки. Продуктивність процесу переважно визначається швидкістю осадження, ефективністю осадження та досяжним розміром заготовки (довжина і діаметр). Останнім часом швидкість осадження постійно підвищується за рахунок удосконалення обладнання і в даний час складає 54 г/хв для заготовок масою до 30 кг і близько 50 г/хв для заготовок масою до 60 кг.

Вдосконалений *плазмовий метод хімічного парофазного осадження* (APVD) являє собою запатентований компанією Draka процес, що полягає в осадженні природного кварцевого піску на стержень серцевини оптичного волокна за допомогою плазмового пальника і нарощування скла шар за шаром. Технологія удосконалювалася з метою збільшення діаметра заготовки та скорочення забруднення домішками, що містяться в природному кварці.

Золь-гель процес (сіль-гель) – це процес отримання матеріалів з певними хімічними та фізико-механічними властивостями. В основі цієї технології лежить низькотемпературний синтез (за допомогою реакцій гідролізу й конденсації) металоорганічних сполук елементів, складових скла, при температурі нижче температури плавлення скляної шихти. На першій стадії золь-гель процесу формується хімічний склад продукту, який одержують у вигляді високодисперсного колоїдного розчину – золю. Збільшення концентрації дисперсної фази призводить до появи коагуляційних контактів між частинками і початку структурування – гелеутворення (друга стадія золь-гель процесу). Недоліком методу є невисока міцність зчеплення оболонки з сердечником.

Більшість виробників сердечників волокна, що користуються процесами OVD і VAD, отримують оболонку волокна за допомогою методу SCT або *методу плавлення кварцового порошку* (рис. 4.4).

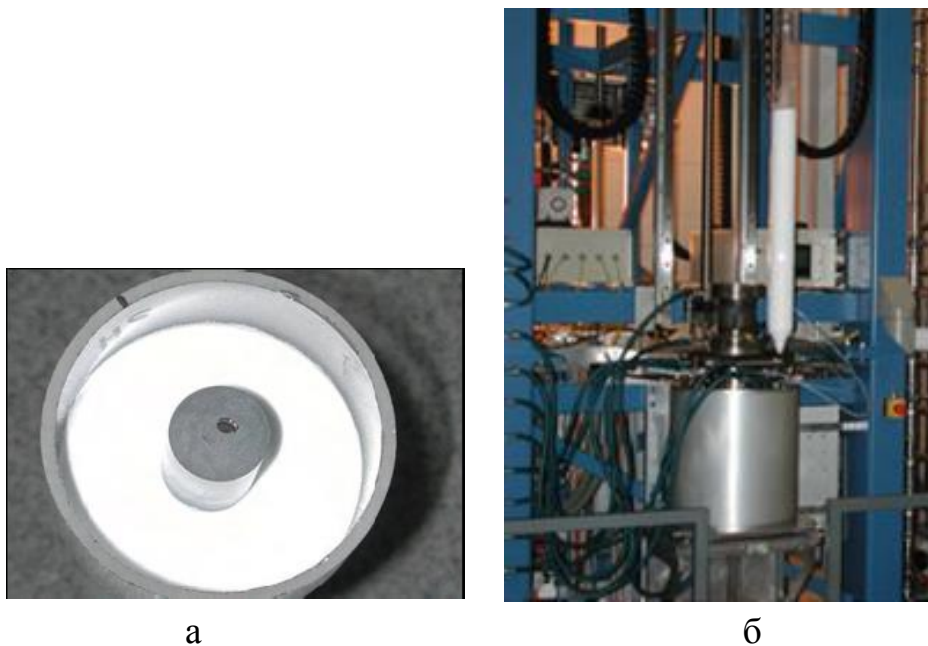


Рисунок 4.4 – Виготовлення оболонки за методом SCT:

а – заготовка у трубі, б – вертикальний верстат для витягування заготовки

Цей процес полягає в тому, що кварцовий пісок плавиться навколо заготовки сердцевини при пічному нагріванні. Серцевину волокна поміщають у товстостінну трубу і засипають кварцовим піском (рис. 4.4, а).

Потім пісок плавиться і перетворюється у скло або безпосередньо в процесі витяжки, або на розташованому окремо вертикальному верстаті (рис. 4.4, б). Останній варіант дозволяє використовувати більш дешеві труби для оболонок, які можуть бути відшліфовані до процесу витяжки.

4.5 Технологія витяжки оптичного волокна із заготовок

Готова стержнева заготовка (незалежно від способу її виготовлення) витягується в волокно. Це відбувається в спеціальній витяжній вежі висотою близько 12 м (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Витягування оптичного волокна

Для витягування волокна заготовка закріплюється вертикально в патроні витяжної установки.

Положення патрона у вертикальному напрямку регулюється з використанням подавального механізму. Нижній кінець заготовки нагрівають до температури 2000°C з допомогою нагрівального елемента, так що можна витягати волокно вниз із заготовки, що плавиться. Для того щоб діаметр волоконного світловода залишався постійним і потрібної величини, необхідно забезпечити можливість точного регулювання швидкості витяжки (зазвичай 300

м/хв) і подавального механізму за допомогою системи автоматичного управління.

Під час витягування геометричні співвідношення діаметрів серцевини і оболонки залишаються незмінними, хоча діаметр світловода менше діаметра заготовки в 300...500 разів. Таким чином, під час витяжки профіль показника заломлення залишається незмінним. Остаточний діаметр волокна перевіряється вимірювальним приладом з лазерним управлінням. Цей прилад знаходиться відразу ж під піччю. Отримані значення передаються в систему контролю, яка і регулює швидкість витяжної шпильової лебідки, що знаходиться в нижній частині вежі. Збільшення діаметра волокна приводить до збільшення швидкості витягування, і навпаки. Зазвичай діаметр волокна становить 125 ± 2 мкм, а швидкість витягування – 3...10 м/с. Волокно охолоджується навколишнім повітрям.

Безпосередньо після контролю діаметра на волокно наноситься первинне захисне покриття. Таке полімерне покриття зазвичай має двошарову структуру. Полімер покликаний захистити волокно від механічних впливів і від навколишнього середовища, насамперед від водню й води. Справа в тому, що вода прискорює утворення тріщин, а водень, дифундує вглиб волокна, підвищує коефіцієнт загасання. Це покриття полімеризується під впливом тепла або ультрафіолетового випромінювання. Проте по-справжньому можуть захистити скло тільки два покриття: металеве і вуглецеве. Багато фірм-виробників зараз починають покривати склоподібним вуглецем кожне волокно окремо. Для досягнення повного захисту найкраще поміщати вже готовий кабель у герметичну металеву оболонку, але це реалізується на практиці тільки в найбільш дорогих кабелях для трансокеанських ліній.

Після зміцнення покриття світловод проходить за системою роликів, у якій він піддається впливу розтягуючого зусилля, яке може регулюватися з великою точністю. Світловод повинен витримувати це навантаження до того, як він буде намотаний на циліндричний барабан. Розраховані певні стандартні зусилля, за яких волокно не повинно рватися. Існують серйозні проблеми з визначенням механічної міцності оптичного волокна. Справа в тому, що ті дефекти, наприклад, тріщини, які до випробування не привели б до псування волокна, могли розвинутися при тестуванні, і при подальшому застосуванні навіть меншого навантаження волокно може порватися. Прогнозувати зростання тріщин дуже непросто, оскільки це залежить від середовища, в якому знаходиться волокно, і від механічних навантажень (зокрема, вигинів). Багато досліджень показують, що прямі випробування стійкості властивостей і

надійності волокна провести важко. Як, приміром, оцінити зміни прозорості, якщо характерний період таких змін становить близько десяти років? Щоб вирішити цю проблему, світловоди витримують при підвищеній температурі, прискорюючи старіння.

На цьому етапі перевіряється міцність на розтяг всього волокна, перевіряється, чи немає у волокні будь-яких тріщин або яких-небудь інших ушкоджень. Така перевірка називається контрольним випробуванням, яке полягає в тому, що волокно протягом приблизно однієї секунди піддається впливу певного розтягуючого зусилля. Якщо у волокні є які-небудь тріщини, то воно обірветься. Після контрольного випробування волокно, яке його пройшло, відправляється в лабораторію, де піддається іншим, дуже серйозним випробуванням. З однієї заготовки зазвичай отримують 50...150 км волокна.

Контрольні запитання та завдання

1. В чому полягають особливості застосування оптоволоконних технологій?
2. Яку будову має оптичне волокно? З яких матеріалів виготовляють оптичне волокно?
3. Дайте характеристику методів виготовлення заготовки оптичного волокна.
4. Охарактеризуйте модифікований метод одержання волокна шляхом хімічного осадження з газової фази.
5. Охарактеризуйте методи одержання волокна.
6. Дайте характеристику методів нарощування оптичного волокна.
7. Охарактеризуйте метод нарощування оптичного волокна шляхом плавлення кварцового піску.
8. Дайте характеристику методів витяжки оптичного волокна із заготовок.

5. ОПТИЧНІ КРИСТАЛИ І КЕРАМІКА

Оптичні кристали – матеріали кристалічної будови, які застосовуються для виготовлення оптичних деталей.

Характерною особливістю оптичних кристалів є їхнє вибіркове пропускання в ультрафіолетовій і інфрачервоній областях спектра, а також значна величина коефіцієнта дисперсії при малому показнику заломлення (для фтористих сполук).

Оптичні кристали мають разом з тим і недоліки, які ускладнюють їхнє застосування. До них відносяться: оптична й механічна анізотропія, наявність шкідливих включень; гігроскопічність і розчинність у воді деяких кристалів; дорожняча й обмежені розміри монокристалів; мала твердість ряду кристалів; отруйність деяких кристалів.

5.1 Кристали для активних елементів лазерів

В якості робочого тіла твердотільних лазерів застосовують тверді речовини, такі як кристали і стекла.

Рубін, сапфір, лейкосапфір і корунд є різновидами кристалічного оксиду алюмінію, які відрізняються за кольором. Ці дорогі кристали одержують штучним шляхом. Кристалічний оксид алюмінію має високу механічну міцність і твердість, термічну й хімічну стійкість. Ці кристали застосовують для виготовлення оптичних деталей, які працюють в інфрачервоній області спектра, і різних деталей спеціального призначення. В якості активного середовища найчастіше застосовують стрижні з рожевого рубіна – оксиду алюмінію Al_2O_3 з домішкою іонів хрому Cr^{3+} (до 0,05%), що додає рубіну червонуватого забарвлення. Рубін генерує випромінювання у видимій області спектра ($\lambda=694,3$ нм).

Ітрій-алюмінієвий гранат ($Y_3Al_5O_{12}$, YAG) – оптичний матеріал, придатний для використання в УФ та ІЧ оптиці. Вироби з YAG можна застосовувати в якості оптичних елементів в широкій області спектра від 250...5000 нм. Механічні і хімічні властивості YAG близькі до сапфіра, однак YAG не подвійного променезаломлення і його обробка дещо простіше, ніж обробка сапфіра. YAG не має ліній поглинання в області 2...3мкм, де зазвичай стекла мають тенденцію високого поглинання через сильні зв'язки молекул води. Завдяки високим показникам міцності, межі руйнування, показника

заломлення та теплопровідності YAG може бути використаний при високих температурах і в надпотужних лазерах.

Кристали ітрій-алюмінієвого гранату одержують в основному за методом Чохральського.

У сучасній лазерній техніці широко використовуються гранати, леговані іонами неодиму (Nd^{3+}), ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Nd}^{3+}$, YAG:Nd), що мають унікальне поєднання фізико-хімічних і спектрально-люмінесцентних властивостей і відпрацьованої технології виробництва цього кристала. Властивості деяких гранатів наведені у табл. 5.1.

Таблиця 5.1. Фізичні та оптичні властивості кристалів YAG

	YAG	YAG:Nd	YAG:Er	YAG:Yb
Область пропускання, мкм	0,21...5,3			
Довжина хвилі випромінювання λ , мкм	1,064	1,064	2,94	1,03
Показник заломлення для λ	1,82	1,82	1,79	1,82
Концентрація лігатури, %	-	0,5...1,2	1...50	5...30
Густина, г/см^3	4,56	4,46	5,35	4,56
Твердість за Моссом	~ 8,5			
Кристалічна структура	Кубічна			
Постійна решітки, Å	12,01	12,01	12,0	12,01
Температура плавлення, °C	1940	1950	1970	1970
Теплопровідність, $\text{Вт}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	0,14	0,14	0,12	0,14
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, К^{-1}	$7,8\cdot 10^{-6}$	$7,6\cdot 10^{-6}$ <111> $8,2\cdot 10^{-6}$ <100>	$7,6\cdot 10^{-6}$ <111> $8,2\cdot 10^{-6}$ <100>	$7,6\cdot 10^{-6}$ <111>
Границя пружності, МПа	280	280	280	280

YAG:Nd-лазери – один з найпоширеніших типів лазерів високої потужності. Зазвичай працює в імпульсному режимі (частки наносекунд). Нерідко використовується в поєднанні з подвоювачем частоти. Відомі конструкції з квазінепереривним режимом випромінювання.

Ітрій-алюмінієвий гранат, легований ербієм (Er: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ або YAG:Er) – лазерний кристал, який має переваги при використанні на довжині хвилі 2,94 мкм. YAG:Er має високу оптичну якість, високий ККД, гарну

теплопровідність, стабільні хімічні і механічні властивості. YAG:Er накачується в широкій області 600...800 нм. Всі ці властивості роблять YAG:Er чудовим матеріалом для стоматологічних та інших медичних лазерів.

Ітрій-алюмінієвий гранат, легований ітербієм ($\text{Yb:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ або YAG:Yb) є одним з багатообіцяючих лазерних активних матеріалів і зручнішим для діодного накачування в порівнянні з традиційними гранатами, легованими Nd. Він може генерувати на довжині хвилі 1,03 мкм при накачуванні 940 нм. Основні переваги YAG:Yb широка смуга поглинання, високі ефективність і емісія. Лазерний матеріал YAG:Yb широко використовується в промислових лазерах для різання і зварювання металів. Цей кристал також застосовується в електроніці, оптиці і в лазерних технологіях.

Сьогодні поряд з кристалами YAG:Nd в твердотільних лазерах використовуються: ванадати ітрію $\text{YVO}_4:\text{Nd}$ ($\lambda=1,064$ мкм) або гадолінію $\text{GdVO}_4:\text{Nd}$, лантан-скандієвий борат $\text{LaScB}:\text{Nd}$, гадоліній-галієвий гранат $\text{GGG}:\text{Nd}$. Вони найбільш часто використовуються для накачування титан-сапфірових лазерів, використовуючи ефект подвоєння частоти в нелінійній оптиці. Легування тулієм дозволяє значно збільшити ширину смуги поглинання. Алюмо-ітрієві гранати з легуванням тулієм (YAG:Tm) випромінюють з $\lambda=2$ мкм та застосовуються у лазерних радарях.

Лазерні активні елементи YLF (Yttrium Lithium Fluoride) виготовляються з кристала *ітрій-літієвого фториду* YLiF_4 . Зазвичай термін YLF-лазер використовується для лазерів на YLF-кристалі, легованому неодимом ($\text{Nd}^{3+}:\text{YLF}$) у кількості 1%, хоча існують кристали YLF, леговані іншими рідкоземельними елементами, наприклад, ітербієм (Yb), ербієм (Er), тулієм (Tm), гольмієм (Ho) або празеодимом (Pr). Завдяки подібному розміру, іони ітрію в кристалі YLF можуть бути замінені лазерно-активними рідкоземельними іонами, не викликаючи сильного спотворення структури кристалічної решітки. Кристалічна решітка YLF-кристала тетрагональної сингонії, кристалографічні осі ($a = b \neq c$) ортогональні; ($a = 5,26 \text{ \AA}$; $c = 10,94 \text{ \AA}$).

У YLF кристала є сильне природне двоприменезаломлення, яке усуває термічно викликані деполяризаційні втрати. Крім того, посилення і випромінювані довжини хвиль Nd: YLF кристала поляризаційно залежні, є сильніша лінія на 1,047 мкм для π -поляризації (вектор E, паралельний осі c), і більш слабка 1,053 мкм для σ -поляризації (вектор E, перпендикулярний осі c). Довжина хвилі 1,053 мкм відповідає максимуму контуру посилення фосфатного лазерного скла, що містить іони неодиму, тому Nd: YLF лазери на довжині хвилі 1,053 мкм використовуються як генератор, що задає або

передпідсилювач для подальшого каскаду підсилювачів на фосфатному склі з неодимом.

Титан-сапфірові кристали мають форму короткого (2...10 мм) стрижня (диска) з монокристала сапфіра – корунду Al_2O_3 з домішкою іонів Ti^{3+} . Концентрація домішки вибирається з умови поглинання приблизно 90% випромінювання накачування. Широка смуга посилення дозволяє здійснювати перебудову довжини хвилі лазерного генератора ($\lambda=0,65...1,1\mu m$) або генерацію надкоротких імпульсів.

Кристали *олександриту*, леговані хромом ($BeAl_2O_4: Cr^{3+}$) у кількості 0,05...0,3%, дозволяє генерувати випромінювання з $\lambda=0,7...0,82\mu m$. За своїми оптичними і механічними характеристикам олександритовий лазер схожий на рубіновий. Твердість, міцність, хімічна стійкість, а також висока теплопровідність (дві третини від величини теплопровідності рубіна, що вдвічі більше, ніж YAG) дозволяють накачувати олександритовий стрижень на високі потужності без теплового руйнування. Теплова межа руйнування олександриту становить 60% від аналогічної величини у рубіна, що в п'ять разів вище, ніж у YAG.

Кристалічний *алмаз* (C) за сукупністю властивостей є одним з кращих матеріалів електронного приладобудування. Він має виняткову теплопровідність (в 5 разів перевищує теплопровідність міді). Висока радіаційна стійкість алмазу використовується в ядерній техніці при розробці приладів для контролю параметрів жорстких випромінювань. Його хімічна стійкість є основою для вирішення низки космічних і спеціальних завдань.

Атоми карбону в структурі алмазу (рис.5.1) з'єднані міцним ковалентним зв'язком з чотирма сусідніми атомами, розміщеними у вершинах тетраедра, з малою міжатомною відстанню (0,154 нм), що обумовлює специфічну його властивість – унікальну твердість.

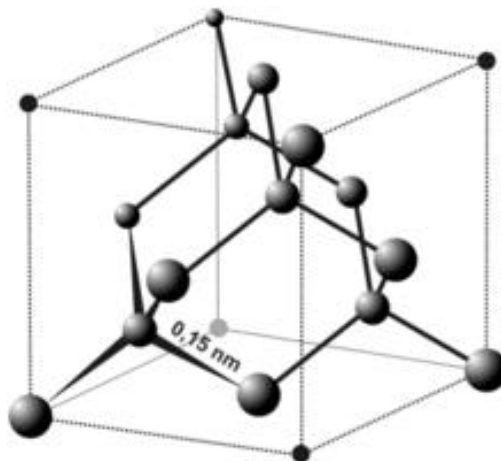


Рисунок 5.1. – Елементарна комірка алмазу

Показник заломлення алмазу $n_e=2,417\dots 2,419$, а коефіцієнт дисперсії $v_e=56,72$. Кристали алмазу оптично ізотропні, подвійне променезаломлення в них відсутнє. Однією з важливих властивостей алмазів є люмінесценція. Під дією сонячного світла і особливо катодних, ультрафіолетових і рентгенівських променів алмази починають люмінесціювати – світитися різними кольорами. Під дією катодного і рентгенівського випромінювання світяться всі різновиди алмазів, а під дією ультрафіолетового – тільки деякі.

Азот є головною домішкою, яка чинить великий вплив на фізичні властивості алмазу. Азот ізоморфно входить в структуру алмазу і утворює самостійно або в сукупності зі структурними дефектами (вакансіями, дислокаціями) центри, відповідальні за забарвлення, люмінесценцію, поглинання в ультрафіолетовій, оптичній, інфрачервоній і мікрохвильовій областях, характер розсіювання рентгенівських променів і ін.

Перша класифікація алмазів, в основу якої покладено вміст в ньому азоту, була запропонована в кінці 30-х рр. і уточнена в кінці 50-х рр. Кристали алмаза, непрозорі до ультрафіолетового випромінювання, називаються алмазом I типу (їх приблизно 98%); всі інші відносяться до типу II. Вміст азоту в переважній більшості кристалів алмазу, що відносяться до типу I, становить близько 0,25%. Рідше зустрічаються безазотні алмази, що відносяться до типу II, в яких домішка азоту не перевищує 0,001%. Алмази I і II типів поділяються на підгрупи:

- тип Ia, для якого концентрація пов'язаного або міжвузельного азоту становить 4000...4500 ppm;
- тип Ib, в якому азот (500 ppm) знаходиться у вигляді міжвузельних дефектів і поодиноких атоми заміщення;
- тип IIa з дуже низьким вмістом азоту;
- тип IIb, що має провідність p-типу.

Алмази підгрупи Ia прозорі до довжин хвиль $\lambda \sim 320-330$ мкм, Ib – в області $\lambda > 500-550$ мкм і мають максимум поглинання при $\lambda = 270$ мкм. Алмази II типу діляться на такі підгрупи: IIa (безазотні алмази) і IIb (алмази, що містять домішки, відповідальні за напівпровідникові властивості, зокрема B). Виділяють також алмази типу III, до якого відносять алмази, які поглинають випромінювання в області $\lambda \sim 225\dots 240$ мкм. Алмази I і III типів характеризує поглинання ІЧ-випромінювання в області $\lambda \sim 1\dots 11$ мкм.

Природний алмаз вже затребуваний електронікою. На основі алмазу типу IIa розроблені детектори іонізуючих випромінювань. Для повного використання унікальних властивостей алмазу в перспективних виробках

мікроелектроніки необхідна розробка технології синтезу структурно-досконалих алмазних плівок. У зв'язку з цим на перший план виходить проблема вибору підкладки при гетероепітаксії алмазу. Одним з можливих шляхів вирішення цієї проблеми є формування буферного шару на основі фулеренів.

Найбільш перспективним є використання алмазу при створенні квантового комп'ютеру з декількох кубітів на центрах забарвлення алмазу.

Квантовий комп'ютер – обчислювальний пристрій, який використовує явища квантової суперпозиції і квантової заплутаності для передачі і обробки даних. Квантовий комп'ютер (на відміну від звичайного) оперує не бітами (здатними приймати значення або 0, або 1), а кубітами, що мають значення одночасно і 0, і 1. В результаті можна обробляти всі можливі стани одночасно, досягаючи гігантського переваги над звичайними комп'ютерами в ряді алгоритмів.

Одна з технологій квантових комп'ютерів застосовує твердотільні квантові точки на напівпровідниках. В якості логічних кубітів використовуються або зарядові стани (перебування або відсутність електрона в певній точці) або напрямок електронного та/або ядерного спину в даній квантовій точці, а напівпровідником – алмаз. Вибір алмазів обумовлений двома їх найважливішими плюсами – кубіти на їх основі досить легко виготовляти і отримувати, і вони здатні працювати при кімнатній температурі.

Основою обчислювального модуля служить дефект кристалічної будови – міжвузельний атом або вакансія. Як відомо, ці дефекти виникають при кристалізації речовини і рівномірно розподілені в її об'ємі. Кількість вакансій можна збільшити за допомогою електронних пучків або пучків будь-яких високоенергійних часток, але така обробка дає однорідну концентрацію вакансій по всьому об'єму зразка. За допомогою фемтосекундного лазера, навпаки, можна домогтися аналогічного, але локального ефекту – створити певну конфігурацію з маленьких кластерів вакансій.

Потім ці вакансії можуть зв'язатися з домішковими атомами азоту, присутніми зазвичай в об'ємі алмаза в значних концентраціях, і утворити так званий NV-центр (nitrogen-vacancy center), центр забарвлення (рис.5.2). Відповідно N – азот, а V – вакансія. У цього центру забарвлення є вісь. Проекція спину електрона на цю вісь зберігається і може служити кубітом. Цей спін є сумарним спіном всіх електронів, задіяних в цій системі. Відповідно цей спін і може використовуватися в якості квантової пам'яті.

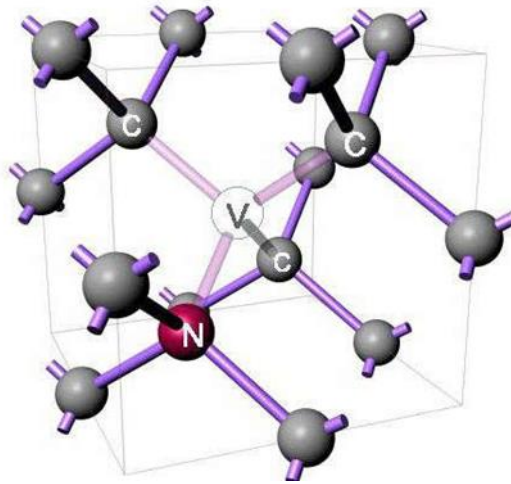


Рисунок 5.2. – Схема NV-центру у алмазі

При опроміненні видимим світлом NV-центри починають характерно флуоресціювати, а застосування зовнішнього НВЧ-поля здатне ще й міняти інтенсивність цієї флуоресценції. Збуджений атом кодує одиницю, незбуджений кодує нуль, зміна станів – логічна операція, необхідна для роботи комп'ютера.

Є розробки, присвячені спробі поліпшити роботу кубітів і зробити їх придатними для обміну інформацією один з одним за допомогою імпульсів світла, замінивши атом азот всередині «дефектів» на атом кремнію. Подібна заміна допомогла «заплутати» два кубіта між собою всередині одного алмазу і змусити їх взаємодіяти з фотонами лазерних спалахів, за допомогою яких фізики записували і зчитували дані.

Поки що ця система працює тільки при дуже низьких температурах (4К) і живе вкрай недовго (50 нс), проте вчені обіцяють багато разів поліпшити ці показники, замінивши, наприклад, «звичайний» кремній на важкий кремній-29, що дозволить створювати ширші квантові мережі з кубітів.

5.2 Кристали пасивної оптики

Для виготовлення оптичних деталей використовують прозорі кристали з незвичайними для стекел оптичними властивостями: аномальними значеннями показника заломлення і дисперсії, прозорістю в УФ та ІЧ областях спектру випромінювання світла, подвійним променезаломленням і поляризаційною здатністю.

В оптичному приладобудуванні застосовують як природні кристали: ісландський шпат, кварц, флюорит, так і синтетичні кристали, вирощені штучно.

Найпоширенішими й характерними оптичними кристалами є: германій полікристалічний, ісландський шпат, кварц, хлористий натрій, фтористий літій, йодисто-бромистий талій та ін.

Германій полікристалічний являє собою щільний непрозорий матеріал, що має досить високу міцність і хімічну стійкість. Германій застосовують для виготовлення оптичних деталей, які працюють в інфрачервоній області спектра: захисних стекол, фільтрів, об'єктивів.

Ісландський шпат або *кальцит* є монокристалом природного походження. Він являє собою прозорі безбарвні або жовтуваті кристали у вигляді косокутних паралелепіпедів. Ісландський шпат добре розколюється по площинах спайності, розташованих вздовж природних граней. Це м'який, крихкий і термічно нестійкий матеріал (температура розкладання 890⁰С), який легко утворює тріщини.

Ісландський шпат має яскраво виражену подвійну променезаломлюваність і використовується для виготовлення поляризаційних призм Ніколя й ін.

Кварц кристалічний буває природного або штучного походження. Синтетичний кристалічний кварц вирощується в автоклавах методом гідротермального синтезу на заздалегідь приготовлених і спеціальним образом орієнтованих пластинах. Кристалічний кварц є анізотропним одноосьовим кристалом із тригональною структурою. Кристалічна структура має каркасний тип і побудована із кремній-кисневих тетраедрів, розташованих гвинтоподібно (із правим або лівим ходом гвинта) щодо головної осі кристала.

Залежно від цього розрізняють праві й ліві структурно-морфологічні форми кристалів кварцу. Відсутність площин і центра симетрії спричиняє наявність у кристалічного кварцу п'єзоелектричних і піроелектричних властивостей.

Матеріал має виражену подвійну променезаломлюваність і високу об'ємну однорідність показника заломлення. Діапазон оптичної прозорості кристалічного кварцу досить широкий і визначається смугою довжин хвиль 0,15...4 мкм.

Кристалічний кварц широко застосовується в радіотехніці, електроніці, оптоелектроніці і приладобудуванні, використовується для створення

високоточних і відповідальних оптичних компонентів для лазерної, поляризаційної й спектральної оптики завдяки таким відмітним властивостям:

- 1) високій оптичній однорідності й внутрішній кристалографічній досконалості;
- 2) високій твердості, що сама по собі забезпечує гарну оброблюваність матеріалу й зносостійкість робочих поверхонь у процесі експлуатації;
- 3) високій хімічній стійкості до впливу навколишнього середовища;
- 4) нерозчинністю у воді й інших розчинниках;
- 5) низькому коефіцієнту теплового розширення;
- 6) гарним діелектричним характеристикам, у тому числі, у широких частотному й температурному діапазонах і в сильних електричних полях;
- 7) широкому діапазону оптичного пропускання;
- 8) стійкості до дії потужного лазерного (у тому числі УФ) випромінювання.

Кристалічний кварц найкращої оптичної категорії. Кварц даної категорії використовується для виробництва силової лазерної оптики, а також для точної поляризаційної оптики як, наприклад, фазові пластинки. Для таких виробів найбільш важливими параметрами є однорідність показника заломлення, мінімальна бульбашковість, високе пропускання в УФ області спектра, радіаційна й УФ-стійкість, а також поляризаційна однорідність.

Кристалічний кварц стандартної оптичної категорії. Кварц даної категорії використовується для менш критичних виробів, таких як оптичні фільтри, вікна, призми, лінзи. Звичайно такий матеріал сортується по величині поглинання на довжині хвилі 3,585 мкм (або за значенням добротності Q).

Лейкосапфір Al_2O_3 (корунд) – дуже твердий термостійкий синтетичний кристал, $n_0 = 1,7681$, $n_e = 1,7599$. Його густина 3,98 г/см³, температура плавлення 2030°C. Область прозорості 0,17...6 мкм. З лейкосапфіра виготовляють захисні стекла і обтічники приладів УФ та ІЧ діапазону, що працюють у важких умовах експлуатації.

Іонні кристали, такі, як флористий натрій, фтористий літій, йодисто-бромистий талій і інші іонні кристали мають кубічну решітку й тому ізотропні. Їхні оптичні властивості наведені в табл. 5.2.

Хлористий натрій являє собою прозорі безбарвні кристали кубічної форми природного походження, називаними кам'яною сіллю, або штучно вирощеними в особливих умовах. Це м'який, гігроскопічний, добре розчинний у воді матеріал. У виробничих умовах заготовлі й деталі із хлористого натрію зберігають у запаяних поліетиленових пакетах із силікагелем. Придатний для

області спектра з довжиною хвилі 0,25...15 мкм. Практично використовуваний інтервал дисперсії в інфрачервоній області спектра рівняється 8,5...15 мкм. Застосовується в основному для виготовлення спектральних призм, які працюють інфрачервоної області спектра.

Таблиця 5.2 Характеристика оптичних іонних кристалів

Найменування кристала	Показник заломлення n_e $\lambda = 589,3$ нм	Коефіцієнт дисперсії ν	Густина, г/см ³	Діапазон прозорості, мкм
Хлористий натрій NaCl	1,54432	42,7	2,17	0,25...15
Хлористий калій KCl	1,49038	43,9	1,98	0,33...21
Фтористий літій LiF	1,3920	9,3	2,64	0,18...6
Фтористий натрій NaF	1,3250	85,3	2,81	0,18...10
Фтористий кальцій (флюорит або плавиковий шпат) Ca ₂ F	1,4338	5,3	3,18	0,18...10
Бромистий калій KBr	1,5599	33,5	2,76	0,21...27
Йодисто- бромистий талій (КРС-5) TlBr і TlI	2,6316	-	7,4	24...40
Алюмокалієві галуни KAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	1,45620	58,5	1,75	0,4...11

Хлористий калій – дуже м'який, досить однорідний і порівняно дешевий кристал, гігроскопічний і добре розчинний у воді. Практично використовуваний інтервал пропускання 0,33...21 мкм. Застосовується для конденсорних лінз ультрафіолетових мікроскопів, призм і віконцець спектральних приладів для інфрачервоної області спектра.

Фтористий літій є синтетичним прозорим безбарвним монокристалом. Блоки фтористого літію добре розколюються по трьох взаємно перпендикулярних площинах спайності. Фтористий літій має недостатню механічну міцність і термічно нестійкий. Вартість кристалів висока. В умовах підвищеної вологості поліровані поверхні покриваються нальотом. Застосовується для ахроматичних і апохроматичних систем, призм і віконць в ультрафіолетовій і інфрачервоній спектроскопії. Границі пропускання 0,18...6 мкм. Практично використовуваний інтервал дисперсії в інфрачервоній області спектра рівняється 1...5 мкм.

Фтористий натрій – досить твердою, однорідний, дорогою кристал, негігроскопічний і малорозчинним у воді. Застосовується для виготовлення призм і віконць в ультрафіолетовій і інфрачервоній спектроскопії. Границі пропускання 0,18...10 мкм.

Фтористий кальцій або *флюорит* є прозорим безбарвним монокристалом, вирощеним штучним шляхом. Вартість кристалів висока. Застосовується для виготовлення призм і віконць в інфрачервоній спектроскопії. Границі пропускання 0,21...27 мкм. Практично використовуваний інтервал дисперсії в інфрачервоній області 15...27 мкм.

Бромистий калій – дуже м'який, досить однорідний і порівняно дешевий кристал, гігроскопічний і добре розчинний у воді. Застосовується для виготовлення призм і віконць в інфрачервоних спектрометрах. Границі пропускання 0,2...12 мкм. Практично використовуваний інтервал дисперсії 0,4...11 мкм.

Йодисто-бромистий талій або КРС-5 – синтетичний кристал темного оранжево-червоного кольору. Дуже м'який, дорогою, практично нерозчинний у воді матеріал. Отруйний. Застосовується для виготовлення оптичних деталей, які працюють в інфрачервоній області спектра. Границі пропускання 0,5...40 мкм. Практично використовуваний інтервал дисперсії 24...40 мкм.

Алюмокалиєві галуни – м'які, однорідні, дешеві кристали, добре розчинюються у воді, гігроскопічні. Застосовується в основному як лінзи для апохроматичних об'єктивів мікроскопів, призначених для видимої області спектра.

5.3 Нелінійні кристали

Нелінійні оптичні матеріали – матеріальні середовища, в яких поляризація середовища (або її діелектрична сприйнятливність), що наводиться

зовнішнім оптичним випромінюванням високої інтенсивності, є нелінійною функцією напруженості електричного поля падаючої хвилі. Нелінійна поляризація середовища і нелінійні сприйнятливості призводять до виникнення нелінійних оптичних ефектів, характерним проявом яких є збагачення спектрального (частотного і кутового) складу випромінювання, що пройшло через таке середовище.

Причинами нелінійності середовища можуть бути різні фізичні механізми взаємодії потужного (лазерного) випромінювання з речовиною. Це може бути деформація зовнішніх електронних оболонок атомів під дією зовнішнього поля, ангармонізм електронного або електронно-коливального переходу для атомів і молекул, непараболічність енергетичних зон для напівпровідників, зміна щільності середовища за рахунок електрострикції або нагріву та ін. При взаємодії лазерного випромінювання з нелійними оптичними матеріалами найбільш часто виникають такі явища, як генерація вищих оптичних гармонік, параметричне посилення і генерація світла, оптичне «випрямлення» світла, вимушене розсіювання світла, само модуляція імпульсів і самовплив світлових пучків, багатофотонне поглинання світла, що виникає в початково прозорому середовищі. Практично всі ці явища використовуються в прикладних і наукових цілях.

Ефекти параметричної взаємодії, що описуються квадратичною по полю нелінійною сприйнятливістю нелінійних оптичних матеріалів, застосовуються для генерації гармонік лазерного випромінювання і для створення джерел когерентного випромінювання з перебудовуваною довжиною хвилі. Наприклад, в надпотужних лазерних установках, призначених для керованого термоядерного синтезу (КТС), використовуються нелінійно-оптичні кристали для перетворення вихідної хвилі до 2-ї або 3-ю гармоніки, частоти яких лежать в видимому діапазоні або УФ-діапазоні, оскільки в цьому діапазоні істотно простіше здійснити нагрів дейтерій-тритієвої мішені для запуску реакції. Нелінійна сприйнятливість 3-го порядку відповідальна за процеси вимушеного розсіювання світла, самовпливу і багатофотонного поглинання.

Нелінійні оптичні кристали використовуються для перетворення частоти лазерів, зокрема: генерація другої гармоніки (ГДГ, подвоєння частоти світла); генерація різницевої частоти (генерація світла з частотою, що дорівнює різниці частот двох інших світлових хвиль); параметричне посилення світла (посилення вхідного світлового пучка в присутності більш високочастотного випромінювання накачування); параметрична осциляція. Одним з найбільш часто використовуваних процесів зі зміною частот є

генерація другої гармоніки або подвоєння частоти світла. Властивості деяких нелінійних кристалів наведені у табл. 5.3.

Таблиця 5.3 Характеристика оптичних нелінійних кристалів

Кристал	Дігідро-фосфат калію	Титаніл-фосфат калію	Триборат літію	Борат барію
Позначення	KDP	KTP	LBO	BBO
Хімічна формула	KH_2PO_4	KTiOPO_4	LiB_3O_5	BaB_2O_4
Діапазон прозорості, нм	160...2000	350...4400	160...2800	189...3500
Оптична однорідність Δn , см^{-1}	10^{-5}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-6}
Густина, г/см^3	2,332	3,02	2,46	3,85
Теплопровідність, $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	13 паралельно с	1,2 перпендикулярно с 1,6 паралельно с	1,2 перпендикулярно с 1,6 паралельно с
Коефіцієнт лінійного розширення, К^{-1}	$2,5 \cdot 10^{-5}$		а - $4 \cdot 10^{-6}$ с - $36 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
Поглинання, $\%/ \text{см}$		0,1 (для 1064нм)	<0,1 (для 1064 та 532нм)	<0,1 (для 1064нм)
Електро-провідність. См/см		$3,5 \cdot 10^{-5}$ паралельно осі с, 220°C, 1кГц		

Основними характеристиками нелінійних оптичних кристалів, що забезпечуються виробником, є область прозорості $\Delta\lambda$; показник заломлення n ; кут синхронізму (кут, що визначає такий напрямок в кристалі, в якому показники заломлення двох хвиль з різними частотами і взаємного перпендикулярними площинами поляризації співпадають) $\theta_{\text{синх}}$; лазерна стійкість (зміна контрастності під дією світла); лазерна міцність (порогова енергія, яку витримує оптичний елемент до появи руйнувань).

Крім того, для нелінійних кристалів існують такі вимоги: високе подвійне променезаломлення для забезпечення умов фазового синхронізму; висока оптична якість, яка зумовлена інтерференційною природою квадратично-лінійних ефектів; стійкість поверхні і об'єму зразка до лазерного випромінювання; стійкість і збереженість властивостей матеріалу в зовнішньому середовищі.

У першому лазерному експерименті, що продемонстрував нелінійний відгук матеріального середовища, в якості нелінійних оптичних матеріалів використовувався кристалічний кварц. В експерименті спостерігалася генерація 2-й гармоніки рубінового лазера, обумовлена квадратичною нелінійною сприйнятливістю середовища. Ефективність перетворення в цьому експерименті була дуже низькою (близько 10^{-12}), тому що кристалічний кварц, хоча і має квадратичну нелінійність, не має фазового (хвильового) синхронізму для цього процесу. Згодом були виявлені інші кристалічні матеріали, що володіють фазовим синхронізмом, тобто певним напрямком, в якому ефект генерації гармоніки накопичувався по довжині нелінійних оптичних матеріалів.

Найбільш відомим і широко розповсюдженим нелінійним оптичним матеріалом є кристал *дігідрофосфату калію KDP* (KH_2PO_4). Це негативний кристал з подвійним променезаломленням, прозорий в діапазоні довжин хвиль 0,16...2 мкм. Величина його нелінійності майже така ж, як у кристалічного кварцу, але внаслідок наявності фазового синхронізму ефективність перетворення близька до одиниці. Цей кристал вирощується з водного розчину при температурі, близької до кімнатної, і з нього можуть бути виготовлені унікальні перетворювачі частоти з апертурою до 500×500 мм при товщині 10...15мм. Саме такі елементи перетворення застосовуються в надпотужних лазерних комплексах для КТС.

Нелінійні кристали *титаніл-фосфату калію KTP* найбільш часто використовуються для генерації другої гармоніки (подвоєння частоти) неодимових лазерів. Нелінійні кристали титаніл-фосфату калію широко застосовуються в лазерній техніці комерційного та військового призначення, в лабораторіях, в медичних системах, в далекомірах, в лазерних локаторах, оптичного зв'язку та промислових системах.

Одними з нових нелінійних оптичних матеріалів є кристали групи боратов, наприклад, *триборат літію LBO* (LiB_3O_5). Цей кристал прозорий у видимому діапазоні і ближньому ІЧ-діапазоні, має вдвічі більшу величиною нелінійності, ніж KDP, і в стільки ж разів більшою стійкістю до лазерного

випромінювання (променевоїюмічністю). Кристал трібората літію вирощується з розплаву при температурі близько 1000°C , і його максимальний розмір становить близько 100 мм в діаметрі. Кристали LBO широко використовуються для генерації 2-ий і 3-ій гармоніки в кристалах Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:YVO₄ і в титан-сапфірових лазерах, в оптичних параметричних осциляторах (OPOs) і оптичних параметричних підсилювачах (OPAs).

Борат барію BBO застосовується в лазерних джерелах з перебудовою частоти, таких як титан-сапфірові лазери, лазерах на барвниках. Так само широко застосовується для отримання 2-ої, 3-ої, 4-ої гармонік.

Ніобат літію LiNbO₃ має ромбоєдричну кристалічну решітку з $a = 0,547$ нм, $\alpha = 53,72^{\circ}$. Кристали оптично прозорі в області довжин хвиль 0,4...5,0 мкм; показник заломлення звичайного променю 2,29, незвичайного – 2,20 (для довжини хвилі 0,63 мкм). Є сегнетоелектриком з температурою Кюрі $\sim 1210^{\circ}\text{C}$ і величиною спонтанної поляризації 50...80 мкКл/см² при 300К. Має високі нелінійно-оптичні характеристики, тому використовується в лазерах для генерації другої гармоніки. Крім того, LiNbO₃ використовується в якості перетворювачів енергії та звукопроводів (лінії затримки, смугові фільтри), елементів в електрооптичних пристроях (модулятори, дефлектори та ін.), піроелектричних приймачах випромінювання і ін.

За останні кілька років були синтезовані і досить докладно досліджені сегнетоелектричні монокристали ніобатів і танталатів лужноземельних металів, що володіють високими електрооптичними, п'єзоелектричними, піроелектричними і нелінійними властивостями. Фізичні властивості цих кристалів обумовлюють можливості їх широкого застосування в приладах для модуляції, відхилення і перетворення частоти лазерного випромінювання, а також в параметричних генераторах світла. Кристали цього класу сполук мають нелінійні і електрооптичні коефіцієнти, які набагато перевищують коефіцієнти інших кристалів. Досить сказати, що на кристалах ніобату барію-натрію досягнуто 100% -ве перетворення випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 1,06$ мкм в випромінювання з $\lambda = 0,53$ мкм, а кристали твердого розчину ніобату барію-стронцію мають величину півхвильової напруги 80 В, що в 40 разів менше, ніж у ніобату літію і танталата літію, і в 100 разів менше, ніж у широко застосовуваних кристалів гідрофосфату калію.

Нелінійними оптичними матеріалами з нелінійністю 3-го порядку є практично все прозорі оптичні матеріали. У нелінійній оптиці цю нелінійність прийнято характеризувати нелінійної добавкою n_2 до показника заломлення n середовища. При цьому показник заломлення

$$n = n_0 + n_2 I, \quad (5.1)$$

де n_0 – лінійний показник заломлення середовища,

I – інтенсивність світлової хвилі.

Величина n_0 для всіх матеріалів, прозорих в оптичному і ближньому ІЧ-діапазонах, змінюється від ~ 1 (гази при атмосферному тиску) до ~ 5 (телур), а нелінійна добавка n_2 змінюється на 12 порядків.

Для дослідження процесів вимушеного комбінаційного розсіювання світла застосовують такі нелінійні оптичні матеріали, як нітробензол, водень, кристали нітратів і молібдатів. Використання нелінійних оптичних матеріалів дозволяє розширити число джерел когерентного оптичного випромінювання, створити джерела світла з перебудовується частотою, а також перетворити когерентний світло в світло з суто квантовими (некласичними) властивостями.

Як нелінійні оптичні матеріали можуть бути також використані метаматеріали, окремим випадком яких є фотонні кристали.

5.4 Фотонні кристали

Фотонні кристали (ФК) – це структури, які характеризуються періодичною зміною діелектричної проникності в просторі. Оптичні властивості ФК сильно відрізняються від оптичних властивостей суцільних середовищ. Поширення випромінювання всередині фотонного кристала завдяки періодичності середовища стає схожим на рух електрона всередині звичайного кристала під дією періодичного потенціалу. В результаті електромагнітні хвилі в фотонних кристалах мають зонний спектр і координатну залежність, аналогічну квазіімпульсу електронів в звичайних кристалах. При певних умовах в зонній структурі ФК утворюються щілини, аналогічно забороненим електронним зонам в природних кристалах. Залежно від конкретних властивостей (матеріалу елементів, їх розміру та періоду решітки) в спектрі ФК можуть утворюватися як повністю заборонені по частоті зони, для яких поширення випромінювання неможливо незалежно від його поляризації і напрямку, так і частково заборонені (стоп-зони), в яких поширення можливо лише в виділених напрямках.

На основі фотонних кристалів створюються і розробляються оптичні фільтри, хвилеводи (зокрема, в волоконно-оптичних лініях зв'язку), пристрої, що дозволяють здійснювати управління тепловим випромінюванням, на основі фотонних кристалів були запропоновані конструкції лазерів зі зниженим порогом накачування.

Фотонні кристали діляться на три типи: одновимірні, двовимірні і тривимірні. Одновимірними (рис. 5.3) є фотонні кристали з шарами, що чергуються, зробленими з різних матеріалів.

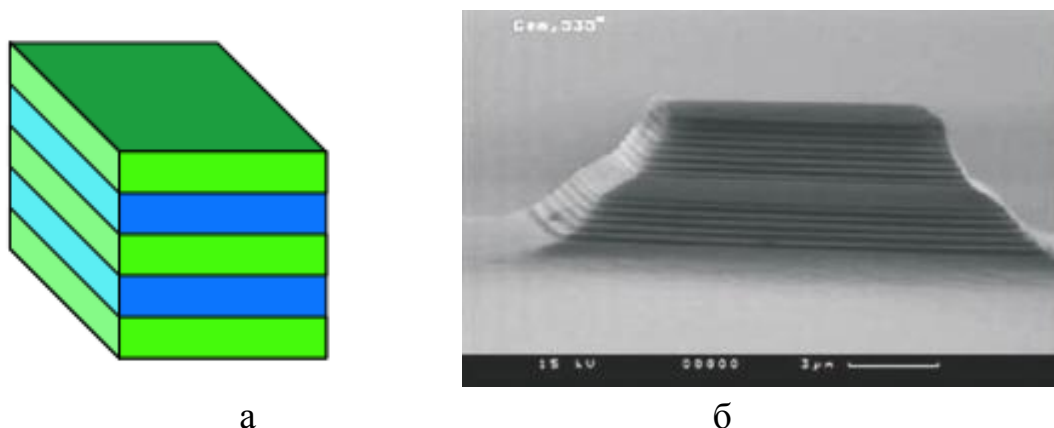


Рисунок 5.3. – Одновимірні фотонні кристали: а – модель, б – електронний знімок одновимірного ФК, використовуваного в лазері як бреггівське багатошарове дзеркало

Двовимірні (рис.5.4) ФК можуть мати більш різноманітні геометрії. До них, наприклад, можна віднести масиви нескінченних по довжині циліндрів (їх поперечний розмір багато менше поздовжнього) або періодичні системи циліндричних отворів.

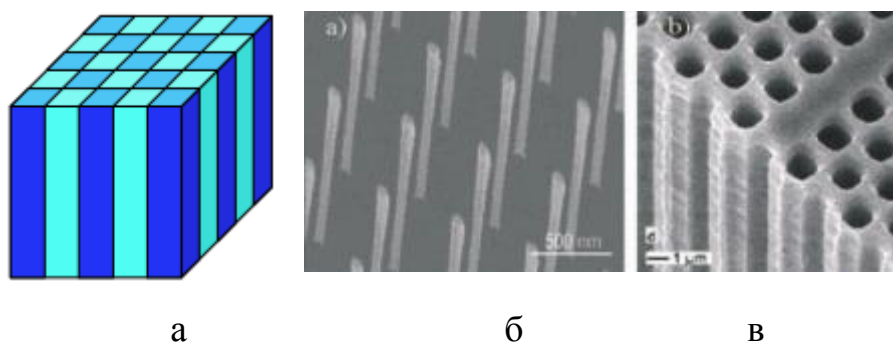


Рисунок 5.4. – Двовимірні фотонні кристали: модель (а) і електронні знімки двовимірного прямого (б) і зворотного (в) ФК з трикутною решіткою

Структури тривимірних ФК (рис. 5.5) вельми різноманітні. Найбільш поширеними в цій категорії є штучні опали – впорядковані системи сферичних розсіювачів. Розрізняють два основних типи опалів: прямі і зворотні (inverse) опали. Перехід від прямого опалу до зворотного опалу здійснюється заміною всіх сферичних елементів порожнинами (як правило, повітряними), в той час як простір між цими порожнинами заповнюється будь-яким матеріалом.

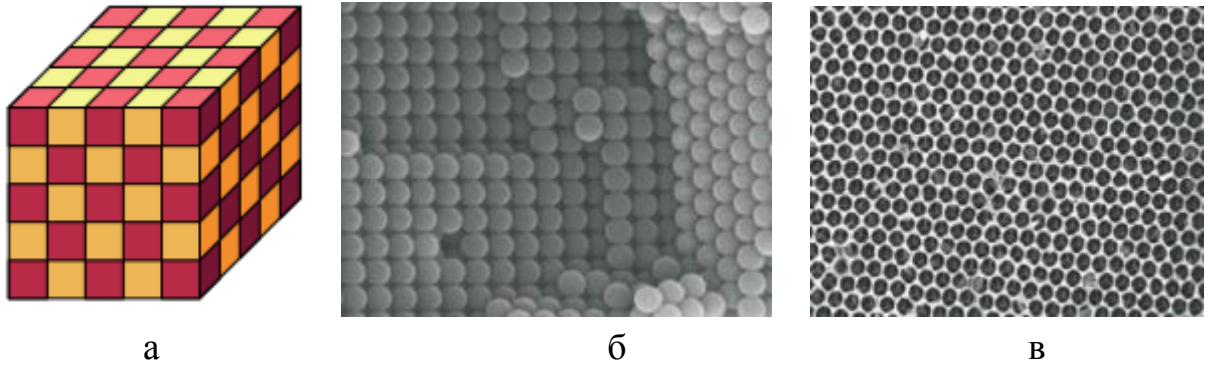


Рисунок 5.5. – Тривимірні фотонні кристали: модель (а) і фотографії, одержані за допомогою скануючої електронної мікроскопії: внутрішня поверхня ФК з кубічною решіткою на основі самоорганізованих сферичних мікрочастинок полістиролу (б) і поверхня кварцового інверсного опала (в)

Ще одним типом тривимірних ФК є структури типу «стіс» (logpiles), утворені схрещеними, як правило, під прямим кутом прямокутними паралелепіпедами (рис. 5.6).

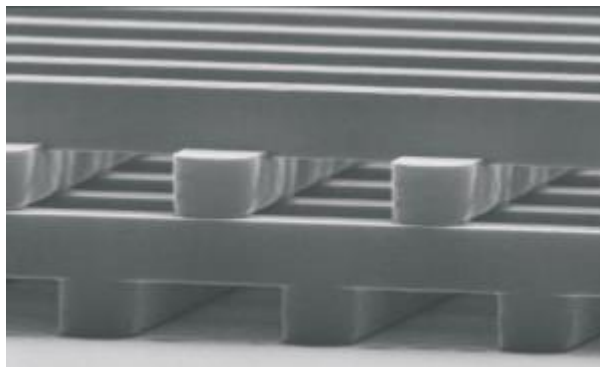


Рисунок 5.6. –Будова фотонного кристалу з металевих паралелепіпедів

Застосування фотонних кристалів на практиці істотно обмежується відсутністю універсальних і простих методів їх виготовлення. У наш час реалізовано декілька підходів до створення ФК. Нижче описані основні підходи.

Першим з них є так званий *метод самоорганізації або самозбирання*. При самозбиранні фотонного кристала використовуються колоїдні частинки (найпоширенішими є монодисперсні кремнієві або полістиролові частки), які знаходяться в рідині і в міру випаровування рідини осідають в об'ємі. В процесі їх «осадження» один на одного вони формують тривимірний ФК і впорядковуються, в залежності від умов, в кубічну гранецентровану або

гексагональну кристалічну решітку. Цей метод досить повільний, формування ФК може зайняти кілька тижнів. Також до його недоліків можна віднести погано контрольований відсоток появи дефектів в процесі осадження.

Одним з різновидів методу самозбирання є так званий сотовий метод. Цей метод передбачає фільтрування рідини, в якій знаходяться частинки, через малі пори, і дозволяє формувати ФК зі швидкістю, яка визначається швидкістю течії рідини через ці пори. У порівнянні зі звичайним методом осадження вказаний спосіб є набагато швидшим, однак і кількість дефектів при його використанні є вища.

До переваг описаних методів можна віднести той факт, що вони дозволяють формувати зразки ФК великих розмірів (площею до кількох квадратних сантиметрів).

Другим найбільш популярним методом виготовлення фотонних кристалів є *метод травлення*, який як правило, застосовується для виготовлення двовимірних ФК. Цей метод заснований на застосуванні маски з фоторезисту (яка визначає, наприклад, масив півсфер), сформованої на поверхні діелектрика або металу і задає геометрію області травлення. Ця маска може бути отримана за допомогою стандартного методу фотолітографії, за яким безпосередньо іде хімічне травлення поверхні зразка з фоторезистом. При цьому, відповідно, в областях знаходження фоторезиста, відбувається травлення поверхні фоторезисту, а в областях без фоторезисту – травлення діелектрика або металу. Процес триває до тих пір, поки не буде досягнуто встановленої глибини травлення, після чого фоторезист змивається.

Недоліком вказаного методу є використання процесу фотолітографії, найкраще просторове вирішення якої визначається критерієм Релея. Тому цей метод підходить для створення ФК із забороненою зоною, що лежить, як правило, в ближній інфрачервоній області спектра. Найчастіше, для досягнення потрібного розділення використовується комбінація методу фотолітографії з літографією за допомогою електронного пучка. Даний метод є дорогим, але високоточним. У цьому методі фоторезист, який змінює свої властивості під дією пучка електронів, опромінюється в певних місцях для формування просторової маски. Після опромінення частина фоторезиста змивається, а частина, що залишилася, використовується як маска для травлення в подальшому технологічному циклі. Максимальна роздільна здатність цього методу становить близько 10 нм.

Голографічні методи створення фотонних кристалів базуються на застосуванні принципів голографії для формування періодичного зміни

коефіцієнта заломлення в просторових напрямках. Для цього використовується інтерференція двох або більше когерентних хвиль, яка створює періодичне розподіл інтенсивності електричного поля. Інтерференція двох хвиль дозволяє створювати одномірні фотонні кристали, трьох і більше променів – двомірні і тривимірні фотонні кристали.

Створюють фотонні кристали на основі металів, напівпровідників, в першу чергу GaAs, рідких кристалів і полімерів.

5.5 Оптична кераміка

Оптична кераміка – полікристалічний матеріал, прозорий в ІЧ області спектра. Оптична кераміка ізотропна за оптичними і механічними властивостями, в ній відсутні площини спайності і тріщини, вона термостійка і нерозчинна у воді. Позначають оптичну кераміку КО і порядковим номером, що визначає її хімічний склад. Фізико-хімічні властивості оптичної кераміки приведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Фізико-хімічні властивості оптичної кераміки

Марка	Хімічний склад	Густина ρ , г/см ³	Показник заломлення n (для $\lambda=2\text{мкм}$)	Область прозорості, мкм	Лінійний коефіцієнт теплового розширення, $\alpha_t 10^6, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
КО1	MgF ₂	3,171	1,372	1...7	11,3
КО2	ZnS	4,09	2,2631	1...14	6,9
КО4	ZnSe	5,25	2,4472	0,5...21	7,7
КО5	MgO	3,578	1,7089	0,4...8	11
КО6	CdTe	5,85	2,711	0,9...29	5,5

Виготовляють оптичну кераміку методом гарячого пресування хімічно чистих кристалічних порошків з розмірами зерен 0,1...10мкм. Пресування здійснюють в вакуумі при високому тиску (100...300МПа) і температурі, рівній 0,5...0,8 температури плавлення вихідної речовини. Під час пресування відбувається спікання зерен і одночасно процес рекристалізації – зростання зерен зі збільшенням їх первинних розмірів в 3...5 разів. В результаті

отримують високоміцний матеріал щільністю понад 99,9% щільності вихідного монокристала.

Однією з основних характеристик оптичної кераміки є прозорість. Спектральні характеристики пропускання $\tau = f(\lambda)$ ряду марок оптичних керамік товщиною 1 см наведені на рис. 5.7. Під границею прозорості розуміють довжину хвилі, при якій коефіцієнт пропускання зразка товщиною 2 мм дорівнює 50%.

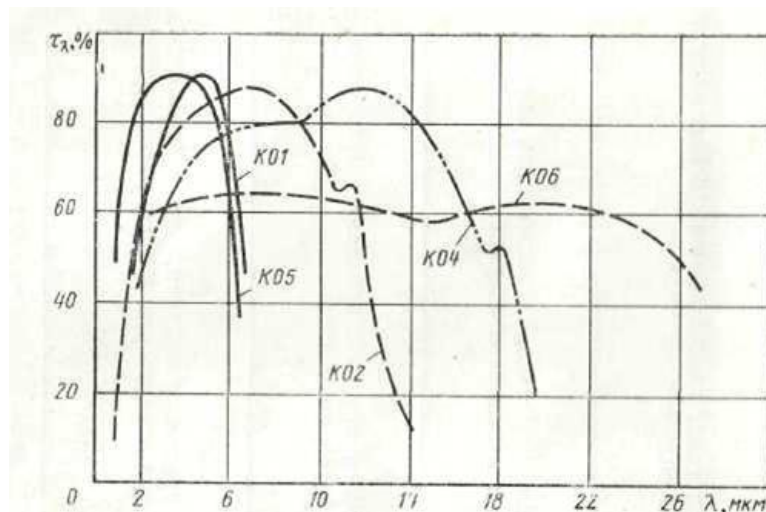


Рисунок 5.7. – Спектральні характеристики пропускання $\tau = f(\lambda)$ оптичних керамік товщиною 10 мм

Деталі з оптичної кераміки добре шліфуються і поліруються звичайними методами обробки оптичних деталей, однак наявність полікристалічної структури впливає на чистоту оброблюваної поверхні.

Оптична кераміка є основним конструкційним матеріалом для виготовлення оптичних деталей приладів, що працюють в ІК діапазоні в умовах великих перепадів тиску і температури. Так, оптичну кераміку КО1 можна застосовувати при температурі до 900°C.

Контрольні запитання та завдання

1. Які кристали застосовуються у сучасній оптиці?
2. В чому полягають особливості оптичних іонних кристалів?
3. Якими методами одержують кристали для активних елементів?
4. Які характеристики є основними для нелінійних кристалів?
5. Лазерна установка на базі Nd:YAG-лазера працює в режимі генерації третьої гармоніки. Виберіть матеріали для фокусуєчих лінз і вікон системи спостереження.
6. Охарактеризуйте застосування оптичної кераміки в лазерній техніці.

6. ОПТИЧНІ ПОКРИТТЯ

6.1 Види й призначення покриттів

На заломлюючі і відбиваючі поверхні оптичних деталей наносять покриття – тонкі плівки різних речовин: металів, оксидів металів, діелектриків, кремнійорганічних сполук тощо. Це дозволяє змінювати оптичні характеристики деталей, надавати їм нових фізичних властивостей. Залежно від призначення та фізичних властивостей покриття розділяються на дзеркальні (зовнішні й задні), світлороздільні, просвітлюючі та інші, менш розповсюджені. Умовне позначення видів покриттів на креслениках оптичних деталей наведено у додатку А.

Дзеркальні покриття одержують нанесенням непрозорих тонких плівок металу або діелектрику на передню або задню поверхню оптичної деталі, що є в цьому випадку підложкою дзеркала. Ці покриття характеризуються коефіцієнтом відбиття, вираженим у відсотках.

Дзеркальні зовнішні покриття виготовляють нанесенням на поверхню деталі шару алюмінію. Рідше застосовують інші метали: срібло, нікель, паладій, родій, золото, хром. Покриття наносять під вакуумним ковпаком шляхом випаровування або катодного розпилення відповідного металу. Дзеркальні задні покриття застосовують для забезпечення деталям внутрішнього відбиття променів будь-яких напрямків. Покриття наносять тими самими способами, що й зовнішні. Коефіцієнт відбиття металевих дзеркальних покриттів становить 85...94%, багат шарові діелектричні покриття забезпечують коефіцієнт відбиття до 99%.

Світлороздільні покриття виконують нанесенням прозорого тонкого шару металу або діелектрику на оптичну поверхню. Вони характеризуються співвідношенням коефіцієнтів відбиття і пропускання при відомому світлопоглинанні. Світлороздільні покриття одержують шляхом нанесення на поверхню деталі шару металу або неметалічного матеріалу. Співвідношення коефіцієнтів відбиття і пропускання обумовлюється в креслениках і залежить від матеріалу покриття і, головне, від товщини його шару. Покриття наноситься у вакуумних установках способом випаровування, катодного розпилення металів або випаровування неметалічних матеріалів. Найбільше поширення одержали покриття з алюмінію, срібла, нікелю, хрому, сірчистого цинку, фтористого магнію.

Просвітлюючі покриття застосовують для зменшення коефіцієнта відбиття від заломлюючих поверхонь деталей з 4...8% до 0,5...2%. Ці покриття, що характеризуються коефіцієнтом залишкового відбиття, наносять під вакуумним ковпаком шляхом випаровування фтористого магнію (фізичне просвітління) або випаровуванням з деталей, що обертаються з високою швидкістю, кремінного і титанового ефірів (хімічне просвітління). Колір плівок, що просвітлюють, для білого світла фіолетовий. Просвітлюючі покриття є найпоширенішими і характеризуються коефіцієнтом залишкового відбиття.

Фільтруючі нейтральні покриття змінної щільності та інтерференційні покриття одержують нанесенням на поверхню оптичної деталі тонких плівок металів, найчастіше платини, або діелектриків. Фільтруючі покриття мають постійний або змінний коефіцієнт пропускання й характеризуються довжиною хвилі λ пропускання або відбиття, коефіцієнтом пропускання або відбиття на певній довжині хвилі, шириною спектрального інтервалу на половині максимуму пропускання.

Захисні покриття – прозорі покриття, що наносять на поверхні деталей для підвищення їх хімічної стійкості. Захисні покриття наносять травленням деталей у кислотах з подальшою обробкою в розплавленому парафіні, воску або випаровуванням на них у вакуумі оксиду кремнію.

Струмопровідні покриття наносять випаровуванням двохлористого олова при високій температурі. Ці покриття призначені для електрообігрівання поверхонь оптичних деталей з метою запобігання від запотівання та зледеніння.

Інтерференційні покриття призначені для одержання на оптичних деталях коефіцієнтів відбиття або пропускання в чітко обмеженій спектральній ділянці. Ці покриття наносять послідовним випаровуванням двох різних матеріалів у вакуумі або з розчинів. Кількість шарів (від 5 до 29) і склад матеріалів, що наносяться, задаються вимогами до інтерференційного покриття. Товщина кожного шару повинна мати задану величину, яка визначається видом покриття і вимогами до нього.

Умовне позначення покриття складається зі скороченого позначення матеріалу (табл. 6.1) й способу нанесення (табл. 6.2) першого покриття, матеріалу й способу нанесення другого покриття тощо. Наприклад, з позначення «просвітл. 44P43P» впливає, що на деталь наноситься просвітління із двох шарів: титанового ефіру та кремінного ефіру, спосіб нанесення – з розчину.

Таблиця 6.1.– Умовні позначення матеріалів для нанесення оптичних покриттів

Назва матеріалу	Умовне позначення	Спосіб нанесення
Алюміній	1	И, К
Амоній фосфорнокислий	21	Е
Вінілтрихлорсілан і оцтокісла ртуть	70	Р
Вольфрам шестихлористий	34	Р
Діметилдихлорсілан і інші силіконові рідини	66	Г, Р
Діоксид кремнію	41	ИЭ
Діоксид гафнію	90	ИЭ
Золото	2	И, К
Калія хромат и біхромат	22	Р
Кислота нітратна	61	Т
Кислота соляна	62	Т
Кислота оцтова	63	Т
Кремній	12	К
Кремнію монооксид	31	И
Кріоліт	23	И
Лак бакелітовий з наповнювачем	72	П
Лак бутиральнобакелітовий з наповнювачем	75	П
Лак вінілітовий безбарвний	73	П
Магній фтористий	24	И
Мідь	3	Е, И
Нікель	4	И
Палладій	5	Е, И, К
Парафін	84	Н
Платина	6	К
Срібло	8	И
Срібло азотнокисле	25	Р
Сурма трьохсірчана	27	И
Олово двухлористе	26	И
Тантал	14	К
Титан	15	И, К
Хром	9	И
Цинк сірчаний	29	И
Церію діоксид	94	Р
Ефір етиловий ортокремнієвої кислоти (ефір кремнієвий)	43	Р, Рс
Ефір титановий	44	Р
Ефіри етилові ортокременевої і ортитанової кислот (суміш)	45	Р

Нанесення покриттів здійснюється декількома способами: випаром розчинів, випаром у вакуумі, електролізом, нанесенням пензлем тощо.

Таблиця 6.2. Умовне позначення способів нанесення покриттів

Спосіб нанесення	Умовне позначення
З розчину	Р
Випаровуванням у вакуумі	И
Випаровуванням за допомогою електронного нагріву	ИЭ
Травленням	Т
Катодним розпиленням	К
Пензлем, пульверизатором або центрифугуванням	П
Електролізом	Е
Нанесенням розплаву	Н
Обробкою в парах або газах	Г

Багатошарові покриття, які складаються із шарів, що чергуються, можна позначити скорочено за такими формулами:

$$\text{для парної кількості шарів} - (a,b)\frac{n}{2} \quad (6.1)$$

$$\text{для непарної кількості шарів} - [(a,b)]\frac{n-1}{2} \cdot a \quad (6.2)$$

де a і b – шари, що чергуються;

n – кількість шарів.

Приклад позначення багатошарового світлороздільного покриття: «поляриз. (90ИЭ.41ИЭ)·5.90ИЭ» – поляризаційне покриття в одинадцять шарів, що складається із шарів, які чергуються, двоокису гафнію (90) і двоокису кремнію (41), нанесених випаром за допомогою електронного нагрівання.

Під час позначення покриття іноді вказують умови термообробки. Температуру прогріву слід зображувати такими способами: у вигляді індексу біля літери, якщо покриття наноситься на попередньо нагріту деталь (просвітл. 24И₃₀₀); у вигляді цифри перед скороченими найменуваннями покриття із крапкою між ними, якщо покриття наноситься на попередньо прогріту й охолоджену деталь (просвітл. 300.44Р.43Р) або у вигляді цифри після умовної позначки покриття із крапкою між ними під час подальшої термообробки шарів покриття (45Р.44Р.43Р.300).

Крім спектральних параметрів, велике значення для оптичних покриттів мають експлуатаційні характеристики. Вони визначають здатність покриттів протистояти впливам навколишнього середовища в процесі експлуатації. До них належать механічна, хімічна й термічна міцність, вологостійкість, а також стійкість до цілого ряду спеціальних впливів, таких як, наприклад, променеве навантаження.

Технологія виготовлення покриттів включає декілька операцій з підготовки оптичних деталей, герметизації, власне нанесення покриттів, контролю їх характеристик. Найпоширенішими є вакуумні та хімічні методи нанесення покриттів. До вакуумних належать конденсаційні методи, які використовують термічне випаровування і катодне розпилення плівкоутворюючих матеріалів. До основних хімічних методів належать метод травлення, утворення оксидних плівок з розчинів гідролізуючих сполук, осадження органічних полімерних плівок з розчинів в органічних розчинниках. Хімічні методи порівняно з вакуумними не вимагають дорогого устаткування і є більш економічними при одержанні найпростіших видів покриттів.

6.2 Нанесення покриттів у вакуумі

Процес одержання плівок і покриттів методом випаровування та конденсації у вакуумі складається з двох етапів: випаровування речовини у вакуумі та подальшої конденсації пару на підложку. Випаровування різних матеріалів у вакуумі, у тому числі й металів, відбувається при нагріванні до температури плавлення і випаровування (сублімації) або при розпиленні (методи катодного і магнетронного розпилення). Метали можна нагрівати резистивним методом (випарники прямого та непрямого нагрівання), електронним променем, електричною дугою, струмами високої частоти. Відповідно до цього методи нанесення покриттів у вакуумі поділяються на термічне (вакуумне) випаровування і іонно-плазмове напилення (різновиди: катодне напилення і власне іонно-плазмове). Способи нагрівання, що визначають конструкції відповідного внутрішньокамерного обладнання промислових вакуумних установок, детально описані в інструкції з експлуатації установок.

Метод *термічного випаровування* у вакуумі полягає у випаровуванні металу або сплаву у вакуумі та конденсації його пари на поверхні підложки (оптичної деталі). Металевий або скляний ковпак розташований на опорній плиті. Між ними знаходиться прокладка, яка забезпечує підтримку вакууму

після відкачки підковпачного простору. Підложка, на яку проводиться напилення, закріплена на тримачі. Якість і міцність плівок більшою мірою залежать від чистоти підложки, тому поверхня підложки попередньо полірується і ретельно очищується. До тримача примикає нагрівач (напилення проводиться при нагріванні підложки). Випарник містить у собі нагрівач і джерело речовини, що напилюється. Поворотна заслінка перекидає потік від випарника до підложки: напилення триває протягом часу, коли заслінка відкрита. Нагрівач зазвичай являє собою нитку або спіраль із тугоплавкого металу (вольфрам, молібден тощо), через яку пропускається досить великий струм. Замість ниток розжарення останнім часом використовують нагрівання за допомогою електронного променю або променю лазера.

Через випарник пропускають електричний струм, нагріваючи його до тієї температури, при якій вихідний матеріал починає плавитися. Пари від розплавленого металу у вигляді атомарного пучка, поширюючись від випарника, потрапляють на підложку і осаджуються на її поверхні, утворюючи шар у вигляді тонкої плівки (вакуумного конденсату).

Уся система розміщується у вакуумній камері, де створюється досить високий вакуум. Вакуум має бути таким, щоб атоми металу не зустрічалися з молекулами залишкового газу під час свого руху до підложки, тобто їхні траєкторії повинні бути прямолінійними. Ця умова виконується, якщо в камері створюється тиск порядку $(5...7) \cdot 10^{-4}$ Па. У цьому випадку відстань від випарника до підложки досить мала порівняно із середньою довжиною вільного пробігу молекул газу і більша частина атомів металу досягатиме підложки. Такий вакуум легко одержати у звичайній лабораторній вакуумній установці. При осадженні пару на підложку відбувається перехід атомів металу з парової фази в конденсований стан.

Для одержання якісної плівки температура має знаходитися в деяких оптимальних межах (200...400°C). Швидкість росту плівок знаходиться у межах від десятих часток до десятків нанометрів за секунду.

Багатошарові вакуумні покриття наносять послідовним випаром відповідних матеріалів шляхом перемикання випарників.

Метод *катодного напилення* дозволяє переводити в газову фазу і осаджувати на підложку тугоплавкі матеріали (тантал, вольфрам, молібден), а також діелектрики (кремній і оксид алюмінію). Схема катодного напилення подана на рис. 6.1. Тут більшість компонентів ті самі, що й для термічного напилювання. Однак відсутній випарник: його місце займає катод К, що виконує водночас і роль мішені, що розпилюється.

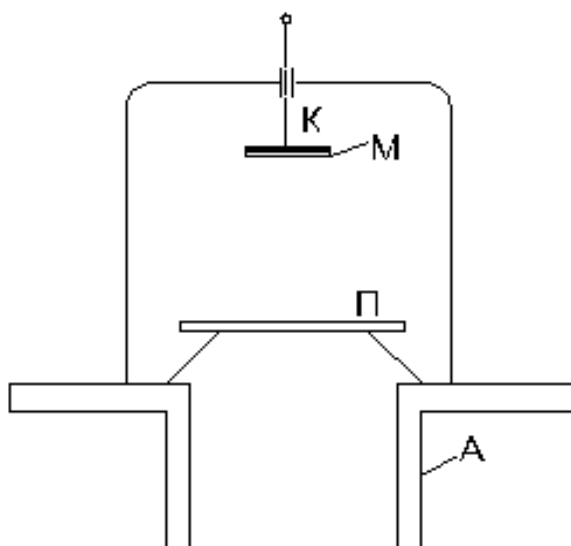


Рисунок 6.1. – Принципова схема катодного напилення

Роль анода виконує підложка П разом із тримачем. У підколпачному просторі за допомогою вакуумного насоса створюється тиск $10^{-5} \dots 10^{-3}$ Па. Потім в нього через штуцер вводять деяку кількість очищеного нейтрального газу (аргон), так що створюється тиск $10^{-2} \dots 10^{-1}$ Па. При подачі високої напруги на катод (2...3 кВ) у просторі між електродами виникає аномальний тліючий розряд, що супроводжується утворенням квазінейтральної електронно-іонної плазми. Позитивні іони залишкового газу аргону прискорюються і бомбардують мішень М (катод), вибиваючи атоми катодного матеріалу із кристалічної решітки. Ці атоми з відносно високою енергією осаджуються на поверхню підложки. При цьому утворюється рівномірна плівка, склад якої визначається складом катода. Швидкість росту плівки становить 1...19 нм/с.

Даний метод забезпечує одержання покриттів більш високої якості порівняно з термічним випаровуванням.

Іонно-плазмове напилення. Головна його особливість порівняно з методом катодного напилення полягає в тому, що в проміжку між електродом-мішенню (з нанесеним на неї матеріалом, що напилюється) і підложкою діє незалежний газовий розряд. Тип розряду – несамостійний дуговий. Для цього типу розряду характерні наявність спеціального джерела електронів у вигляді розжарюваного катода, низькі робочі напруги (десятки вольт) і більша щільність електронно-іонної плазми. Підковпачний простір, як і при катодному напиленні, заповнено нейтральним газом. Принципових відмінностей між процесами катодного та іонно-плазмового напилення немає, різниця полягає лише в конструкції установок.

Кількість іонів, що утворюються в камері, залежить від струму електронів з катода, тиску газу в камері й напруги на аноді. В установці для напилення, схема якої наведена на рис. 6.2, джерелом електродів є розжарений катод К. При тиску газу в камері вище 10^{-1} Па середня довжина вільного пробігу електрона менше 1 см.

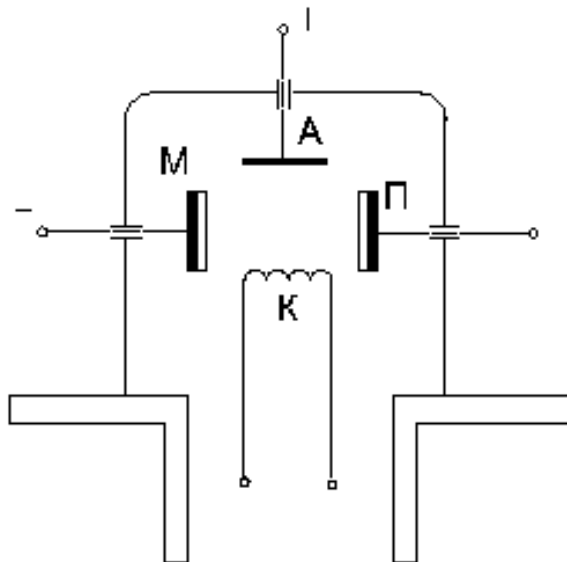


Рисунок 6.2. – Принципова схема іонно-плазмового напилення

Якщо відстань до анода значно більше цієї довжини, то на своєму шляху до анода електрон встигне набути велику кількість зіткнень із атомами газу. Для того, щоб ці зіткнення приводили до іонізацій, електрон повинен набути в електричному полі досить велику енергію. Тому на анод А установки подається звичайна напруга від 50 до 100 В. Катод електрично з'єднаний з підложкою П. Позитивні іони, що утворюються, спрямовуються на мішень М. Бомбардуючи мішень, іони вибивають із неї атоми, частина з яких потрапляє на підложку П і, конденсуючись, утворює плівку.

Істотною перевагою іонного напилювання є можливість одержання плівок строго стехіометричного складу зі сплавів і складних хімічних сполук, а також висока адгезія плівок з підложкою. Недоліком вважається відносно низька швидкість нанесення плівок, що лежить в інтервалі 5...300 нм/хв.

Нанесення покриттів на оптичні деталі здійснюється виконанням цілого ряду робіт: підготовки деталі, зарядки підковпачної арматури, власне нанесення покриття, захист покриття, контролю. Періодично ковпак і підковпачну арматуру піддають очищенню.

Попередня обробка деталей суттєво впливає на якість покриттів, тому ці види робіт проводяться в гумових рукавичках та із застосуванням різних пінцетів. Оброблювані деталі безпосередньо перед покриттям освіжають

протиранням ватяним тампоном, змоченим крокусною або полірітовою суспензією, знежирюють спиртом або спиртово-ефірною сумішшю, протирають знежиреною серветкою. Перед поміщенням під ковпак деталі очищують від пилу знежиреним м'яким пензлем.

Зарядку підковпачної арматури і нанесення покриттів проводять у чіткій відповідності до вимог конкретного технологічного процесу. По закінченні процесу напилення ковпак піднімають, вивантажують деталі й відправляють їх на наступні операції (оксидування, лакування, термічну обробку, вакуумні або хімічні покриття) або контроль.

Контроль покриттів здійснюють шляхом візуальної оцінки кольору покриття, виміром на приладах коефіцієнтів відбиття або світлопропускання. Визначають механічну міцність покриття протиранням серветкою або на спеціальному приладі. Вид контролю встановлюють для кожної групи покриттів, деталей.

Ковпак і всю підковпачну арматуру періодично очищають травленням у кислотах і лугах, розчинниками. Спосіб очищення залежить від матеріалу ковпака, арматури й виду покриття.

6.3 Нанесення покриттів хімічним способом

Найпоширенішими покриттями, що отримують хімічними способами, є: одношарове просвітління 43P, двошарове просвітління 44P.43P, захисні покриття 63T і 63T84H, хімічне сріблення 25P.3E72П.

Спосіб нанесення покриттів *відновленням речовини з розчинів* застосовують для сріблення світлорозділювачів і дзеркал. Він заснований на осадженні металевого срібла із солей. Плівкоутворювальною речовиною є азотнокисле срібло. Технологічний процес нанесення дзеркальних покриттів срібла складається з декількох операцій. Підготовка підложки полягає в обробці їх концентрованою азотною кислотою, протиранні розчином луку і промиванні дистильованою водою. Поверхню підложки обробляють розчином двохлористого олова, що сприяє прискоренню процесу сріблення й поліпшує якість покриття. Після промивання до початку процесу сріблення підложки зберігають у дистильованій воді. Ділянки деталей, що не підлягають срібленню, захищають шаром парафіну. Розчини готують заздалегідь і зберігають у темному і прохолодному місці. Розчин для сріблення являє собою суміш азотнокислого срібла, аміаку й луку; відновлюючий розчин – суміш цукру-рафінаду і розчину сірчаної кислоти. Розчини зберігають роздільно та змішують

у певній пропорції перед початком сріблення. На процес сріблення негативно впливають органічні домішки, сірчані сполуки, колоїдні речовини. Особливе значення має чистота води, яку двічі дистилують. Сріблення проводять у ванні, що погойдується, свіжоприготовленою й охолодженою сумішшю розчинів для сріблення та відновлення. Товщина покриття залежить від тривалості: процесу сріблення і його температурного режиму. Для утворення щільного непрозорого шару дзеркального покриття процес сріблення ведуть 10...15 хвилин із подальшим промиванням у дистильованій воді, повторюючи цей цикл у нових розчинах 3...4 рази. Срібло, що осіло на не підлягаючі срібленню поверхні, знімають ватяним тампоном, змоченим в азотній кислоті. Після промивання деталі сушать у струмені чистого сухого повітря. Потім поверхню срібла гальванічним способом покривають шаром міді і лакують бакелітовим лаком з наповнювачем з тальку, слюди або алюмінієвої пудри.

Спосіб нанесення покриттів *гідролізом спиртових розчинів* застосовують для одержання, просвітлюючих, світлороздільних, фільтруючих і поляризуючих покриттів оптичних деталей. Основними плівкоутворювальними речовинами є розчини етилових ефірів ортотитанової та ортокремнієвої кислот, їх сумішей і розчин азотнокислого торія.

Одношарове хімічне просвітління 43Р здійснюється шляхом нанесення на деталь, що обертається з високою швидкістю, невеликої кількості спиртового розчину ортокремнієвої кислоти (кремнієвого ефіру). Під дією центробіжних сил розчин рівномірно змочує поверхню деталі, а надлишок його розбризкується в сторони. Спирт при цьому випаровується, а із кремнієвого ефіру виділяється діоксид кремнію, що міцно закріплюється на поверхні деталі у вигляді тонкої плівки.

На товщину плівки значно впливають швидкість обертання деталі, концентрація розчину, температура і вологість повітря в приміщенні. Підбір умов нанесення покриттів виконують експериментально після вибору частоти обертання деталі залежно від діаметра або діагоналі деталі та концентрації розчину.

Надійне зчеплення плівки зі склом виходить тільки на деталях, відполірованих не більше, ніж за декілька днів до просвітління. Деталі, які довгостроково зберігаються на складі, підлягають освіженню – поліровці на полірувальнику або тампоном. Підготовка підложки полягає в очищенні поверхні та видаленні пилу білячим пензликом попередньо і після закріплення деталі в патроні верстата. Деталь закріплюють в оправленні й знежирюють спиртом або спиртово-ефірною сумішшю при невеликих швидкостях

обертання шпинделя верстата. Наявність дрібних порошин, слідів жирових речовин, залишків смоли та поліриту приводить до утворення неоднорідної за товщиною й неміцної плівки.

Міжопераційний контроль полягає в оцінюванні якості та інтерференційного забарвлення плівки, що відповідає необхідній оптичній товщині. Невдало нанесену плівку потрібно зняти відразу ж після її нанесення ватяним тампоном, змоченим у спирті. Сушіння плівки здійснюється у термостаті в такій послідовності: прогрів, витримка при певній температурі й остигання. Сушіння триває 2...3 години при температурі близько 120°C; режим сушіння задається технологічним процесом. Плівка із кремінного ефіру має високу механічну міцність і хімічну стійкість.

Двошарове просвітління 44P.43P виконують описаним вище способом, але послідовним нанесенням розчинів титанового, а потім кремнієвого ефірів.

Плівка кожного шару просвітлюючого покриття (для забезпечення високого коефіцієнта світлопропускання) повинна мати певну товщину. Товщина плівки залежить від довжини хвилі, для якої призначено просвітлююче покриття. Задана товщина плівки забезпечується підбором концентрації розчинів і частоти обертання шпинделя верстата. Товщина свіжонанесеної просвітлюючої плівки в процесі її сушіння зменшується приблизно на 20%. Водночас з товщиною плівки змінюється і її колір, характерний для кожної товщини плівки. Колір висушеної плівки одношарового або двошарового просвітлюючого покриття темно-жовтий для довжини хвилі 400 нм, пурпурний – для 520 нм, фіолетовий – для 560 нм, блідо-голубий – для 900 нм і блакитнувато-зелений – для довжини хвилі 1000 нм.

Контроль деталей здійснюється зазвичай візуально за кольором плівки порівнянням з еталонною деталлю або на приладі за коефіцієнтом відбиття. Визначається механічна міцність плівки, встановлюється наявність (або відсутність) і величина канта й точок.

Недоліком даного способу є низька продуктивність порівняно з вакуумним просвітлінням.

Захисне покриття 63Т наноситься шляхом *травлення* деталей у водяному розчині оцтової кислоти. На поверхні деталі утворюється тонка плівка з високою хімічною стійкістю. Плівка зменшує коефіцієнт відбиття до 2,5%. Додаткове кип'ятіння деталей у парафіні при температурі 230°C (покриття 84Н) з подальшим сушінням при температурі 230°C надає плівці гідрофобність – водовідштовхувальні властивості й значно підвищує стійкість деталей у вологому середовищі.

Контрольні запитання та завдання

1. Які види покриття застосовують для оптичних деталей і яке їх призначення?
2. Якими методами наносять покриття?
3. Як позначаються оптичні покриття у технологічній документації?
4. Дайте характеристику методів нанесення покриттів у вакуумі.
5. В чому полягає метод термічного випаровування у вакуумі?
6. Дайте характеристику методу катодного напилення.
7. Дайте характеристику іонно-плазмового методу нанесення покриттів.
8. В чому полягає підготовка деталей перед нанесенням покриттів?
9. Дайте характеристику хімічних методів нанесення покриттів.
10. Як здійснюється хімічне просвітлення?

7. З'ЄДНАННЯ ОПТИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ І З'ЄДНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

7.1 Методи з'єднання оптичних деталей

Елементи оптичних систем (об'єктиви, окуляри, обертаючі системи, ахроматичні клини, складні призми, дзеркальні відбивачі, світлофільтри, поляроїди, сітки тощо) з'єднують у моноблоки в процесі складання. Це дозволяє поліпшити технологічність конструкцій та експлуатаційні властивості оптичних систем.

В оптичному виробництві використовують такі *методи з'єднання*, як склеювання, спікання, оптичний контакт, зварювання й паяння. Кожен з цих способів має задовольняти таким вимогам: не змінювати оптичні характеристики з'єднаних деталей; забезпечувати достатню механічну, хімічну, термічну й оптичну міцність з'єднання.

Найпоширенішим методом з'єднання оптичних деталей між собою є їхнє *склеювання*.

Традиційно технологічний процес склеювання оптичних деталей включає такі головні операції: підготовку деталей до склеювання, підготовку

клею, нанесення клею, взаємне юстирування деталей, що склеюються, і фіксацію знайденого положення, видалення клею з бічних поверхонь, витримку склеєного з'єднання в заданих умовах, контроль.

З'єднання *спіканням* використовують для забезпечення великої стійкості деталей типу кювет до хімічних, термічних, механічних та інших впливів.

Зварювання деталей із кварцового скла виконують у полум'ї киснево-водневого пальника при температурі 2000°C. З'єднання деталей здійснюється при розм'якшенні матеріалу поверхонь до рідкої фази з подальшим остиганням. З фізико-хімічної точки зору з'єднання є однорідним, оскільки між атомами в поверхневих шарах зварюваних деталей з'являються такі самі ковалентні зв'язки, якими з'єднані атоми в об'ємі скла. Висока температура місцевого нагрівання може викликати кристалізацію поверхневого шару, що приводить до деформацій деталей.

З'єднання *паянням* виконується лазерним випромінюванням, сфокусованим у площину шва, що містить світлопоглинаючий припіп. Для цього вживають особливі технологічні лазерні установки з можливістю чітких переміщень променя уздовж стику.

У ряді випадків з метою більш чіткої взаємної орієнтації деталей, що з'єднуються, використовують *оптичний контакт*. Технологічні труднощі з'єднання деталей оптичним контактом обмежують його широке застосування. Поверхні деталей, що підлягають з'єднанню, полірують із високою точністю. Потім ретельно очищені й промиті поверхні стискаються для видалення між ними повітря. Критерієм якості з'єднання є відсутність світлових кольорів і плям у площині контакту, спостережуваних при бічному висвітленні. Для запобігання від мимовільного зняття деталей з контакту стику покривають лаком або герметиком. Попереднє нанесення на поверхні, що контактують, вузької плівки кремнезему з подальшим прогріванням при 250°C робить з'єднання нероз'ємним. Таке з'єднання називають *глибокий оптичний контакт* і суттєво розширює область впровадження оптичного контакту, замінюючи спікання й зварювання.

Під час склеювання можуть виникати такі дефекти: брудне склеювання; розклеювання шару, що клеїть, у вигляді точок, тріщин або малюнка; порушення центрування; одержання товщини, що не відповідає заданій. Причинами є порушення правил склеювання.

При контролі деталей після склеювання перевіряють чистоту поверхневого клеючого шару, контролюють діаметр або габаритні розміри й

товщину, центрування лінз, орієнтацію пластин або призм. У відповідальних лінз перевіряють фокусну відстань і якість зображення.

Спінання кювет. Деякі оптичні деталі вимагають особливо стійкого з'єднання, що забезпечує підвищену стійкість до хімічних, термічних або механічних впливів.

Характерними деталями з таким з'єднання є скляні кювети, застосовувані у фотометричних та інших приладах і розраховані на знаходження в них органічних сполук, кислотних і лужних розчинів. Такі деталі можна склеювати особливими з'єднаннями, але найкращі результати дає спінання легкоплавким склом.

Перед спіканням поверхні очищують і протирають органічними розчинниками, потім за допомогою скляної палички на поверхні, що спікатимуться, наносять пасту. Взаємна орієнтація знайденого положення здійснюється на особливих пристроях з жаростійкої сталі. Спінання проводиться в електричних печах при температурі 400...650°C. Під час спікання паста розплавляється й міцно спікає деталі, при цьому утворюється досить прозорий шар з легким молочним віддтінком.

Пасту виготовляють шляхом ретельного розтирання подрібненого скла із гліцерином. Вибір скла має вирішальне значення. Скло повинно бути легкоплавким і мати температурний коефіцієнт розширення, рівний або близький за значенням до температурного коефіцієнта розширення скла деталей, що спікаються.

Температура нагрівання, час і режим спікання та остигання печі залежать від марки скла, розмірів деталей і складу пасти. Температуру регулюють автоматичним терморегулятором.

Найпростіші *циліндричні* кювети виготовляють шляхом безпосереднього спікання в затискних пристроях дна і трубки кювети.

Прямокутні кювети заданої довжини з допуском декілька мікрметрів виготовляють у два прийоми. Спочатку передню, задню й бічні поверхні покривають пастою, затискають у пристрої, чистять, а потім спікають. Задана довжина забезпечується довжиною бічних стінок. Усі деталі кювети виготовляють із точністю, що забезпечує задану паралельність передньої та задньої стінок і довжину кювети. Після спікання основу каркаса вирівнюють шліфуванням і полірують. Потім каркас спікають із дном кювети.

Зараз *оптичні кювети* виготовляють на основі методу глибокого оптичного контакту. Такі кювети використовуються як елемент для формування плоскопаралельних шарів активного середовища в потужних

лазерах на основі барвників. Кювета складається із вхідного й вихідного вікна з отворами під штуцера для заповнення та відкачки робочої рідини (газу). Об'єм, заповнюваний рідиною або газом, формується за допомогою кільця необхідної товщини. З'єднання елементів кювети між собою з використанням технології глибокого оптичного контакту дозволяє добитися абсолютної герметичності, збільшити термін служби кювети, підвищити екологічну безпеку її використання.

Готові кювети маркують умовним знаком або величиною довжини кювети.

Дефектами виготовлення кювет можуть бути тріщини уздовж шва спікання. Вони утворюються при порушенні режиму спікання або неправильному співвідношенні температурних коефіцієнтів розширення скла, пасти й деталей кювети. Шов молочного кольору виходить при товстому шарі пасти або недостатньому (за температурою або тривалістю) спіканні. Порушення паралельності або орієнтації стінок кювети з'являється через неправильну установку її в пристрої або печі.

Кювети контролюють за чистотою поверхні, розмірами та якістю спеченого шару. Основний розмір, що визначає довжину ходу променя в кюветі, перевіряють набором кінцевих мір довжини. Якість спеченого шва визначають заливанням у кювету фарбувального розчину або агресивної рідини (кислота, луг). Спечений шар при цьому не повинен забарвлюватися або зазнавати руйнування. Методика контролю встановлюється залежно від вимог до кювет.

7.2 Види оптичних клеїв

Вибір марки клею, технології склеювання та додаткової термічної обробки визначається розмірами і матеріалом деталей, що склеюються, якістю поверхонь, що сполучаються, технічними вимогами до з'єднання, якостями клею. Клей для з'єднання оптичних деталей у блоки повинен мати максимальну прозорість, високу оптичну однорідність, близькість показника заломлення і спектральних характеристик клею та деталей, що з'єднуються. Стійкість до механічних впливів, пластичність і товщина шару клею впливають на механічну міцність клейового з'єднання блока деталей. При недостатній механічній міцності клейового з'єднання в процесі складання й установки блока деталей можуть виникнути під дією стискаючих зусиль оправи деформації деталей, часткове або повне руйнування клейового шару. Коефіцієнти температурного розширення, пластичність, товщина шару клею

характеризують морозостійкість клейового з'єднання. Морозостійкість клейового з'єднання оцінюють за здатністю з'єднаних деталей витримувати охолодження до заданих негативних температур без видимих руйнувань клеючого шару. Морозостійкість клейового з'єднання залежить також від форми, розмірів і властивостей деталей, що з'єднуються. Температура розм'якшення й товщина шару клею характеризують теплостійкість клейового з'єднання. Теплостійкість клейового з'єднання оцінюють за здатністю клею запобігати відносному зсуву з'єднаних деталей при заданих позитивних температурах. Низька теплостійкість викликає відносний зсув деталей, порушує їхню співвісність.

Для склеювання оптичних деталей, виготовлених з неорганічних і органічних стекол всіх марок, кристалів, ситалів, а також для склеювання оптичних деталей з металевими ГОСТ 14887-80 передбачає види оптичних клеїв, наведені і описані нижче.

Бальзам – клей, що отримується шляхом переробки смоли (живиці) ялицевих дерев, до складу якої входять скипидар, каніфоль, летючі ефірні масла. Бальзам може бути двох видів – звичайний і пластифікований. Пластифікатор (ляне або вазелінове масло) вводять для підвищення пластичності клею, а разом з тим стійкості з'єднання при низьких температурах (морозостійкості). При кімнатній температурі бальзам знаходиться в твердому стані. Властивості бальзаму характеризують твердістю. Теплостійкість бальзаму до $+50^{\circ}\text{C}$, морозостійкість звичайного бальзаму -10°C , бальзаму пластифікованого -60°C . Температура склеювання відповідно $+60^{\circ}$ і $+130^{\circ}\text{C}$.

За твердістю бальзам поділяється на групи: вельми твердий (ВТ), твердий (Т), середній (С), м'який (М), вельми м'який (ВМ). За цією ж ознакою групи розділені на марки.

Основні недоліки клею – вузький температурний інтервал, в якому можуть працювати з'єднані деталі, їх деформація, що виникає при склеюванні, порушення центрування при нерівномірному закріпленні в оправі.

Перевагою бальзаму є здатність витримувати велику кількість розплавлень без істотної зміни властивостей, можливість зменшення деформації склеєних компонента їх відпалом (нагрів до $50-60^{\circ}\text{C}$, охолодження зі швидкістю близько $0,5$ С/год). Поява синтетичних речовин, що клеять, які не мають недоліків, властивих бальзаму, обмежили його застосування з'єднанням лінз малих розмірів (мікрооптика).

Оптичні клеї, крім бальзаму (природний термопластичний матеріал), є синтетичними термоактивними матеріалами і являють собою в'язкі і прозорі розчини низько- або високомолекулярних речовин в органічних розчинниках без добавок або з добавками отверджувачів. Клеючий шар синтетичних клеїв пліснявими грибками не пошкоджується.

Бальзамін – продукт часткової полімеризації карбінолу. Він може знаходитися в рідкому, в'язкому і твердому станах. Рідкий бальзамін – напівфабрикат для приготування в'язкого, одержують перегонкою карбінолу в вакуумі. При цьому його звільняють від стабілізатора, а в виділену фракцію вводять ініціатор полімеризації (перекис бензоїлу) і частково полімеризують (до в'язкості 0,2...0,5Па·с). Твердий бальзамін утворюється після склеювання деталей, в процесі подальшої полімеризації в'язкого. Світло і тепло прискорюють цей процес. Бальзамін застосовують для з'єднання деталей, які стійкі до деформації, що виникає при склеюванні, і деталей, які відповідно до умов експлуатації повинні витримувати динамічне навантаження, вібрацію, тепловий удар, низькі і високі температури. З'єднання деталей нагрівання не вимагає, але для прискорення процесу полімеризації клею компоненти прогривають при 60...70°C. Повна полімеризація відбувається протягом доби при 25-30°C. Найбільша міцність з'єднання має місце при товщині шару клею 0,005...0,006мм. У твердому стані бальзамін не розчинний в бензині, гасі, маслах.

Неправильно склеєні деталі можна роз'єднати ударом по щву з'єднання при зниженій температурі (-10...20°C), охолодженням рідким повітрям або нагріванням до 200°C. Основні недоліки бальзаміну – оптична неоднорідність, мала еластичність, значна (до 14%) усадка.

Бальзамін-М відрізняється від розглянутого компонентами окислювально-відновної системи, які грають роль ініціатора і прискорювача полімеризації. Завдяки їх високій каталітичній активності процес полімеризації клею йде при температурі 18...26°C. Клей оптично однорідний; застосовують його для з'єднання деталей будь-якого розміру і відносини товщини до діаметру, деталей зі світлоділільними покриттями, світлофільтрів, поляроїдів. Склеюються деталі не нагрівають і після з'єднання термообробці не беруть піддають.

Клей акриловий – розчин низькомолекулярного сополімера метил- і бутілметакрілата в ксилолі. Застосовують для склеювання поляроїдів, деталей з силікатного скла, кальциту, галунів, світлофільтрів і клинів з желатиновими і полівініловими плівками, а також для з'єднання деталей зі скла з металами (крім олова, хрому, інвара, коvara). Склеювані деталі не нагрівають, тому їх деформація при висиханні клею незначна. Для підвищення механічної міцності

з'єднання шар висушують при 50...90°C до повного випаровування розчинника. Розклеювання компонента здійснюють зануренням в ацетон або ксилол, а також нагріванням до 120...150°C.

Клей К-400 являє собою композицію на основі епоксидно-кремнійорганічної смоли Т-111, низькомолекулярного поліаміду Л-20 і наповнювача – окису хрому або нітриду бору. Призначений для склеювання металів і неметалічних матеріалів, які працюють при температурі від -60 до +320°C. Границя міцності при зсуві при 20°C не менше 10 МПа; при 200°C – 2,5МПа; при 400°C – 2МПа. При кімнатній температурі стійкий до дії лугів, мінеральних олив, аміаку і відносно стійкий до соляної кислоти і пари сірчаної кислоти.

Склеювання відбувається при кімнатній температурі і тиску 0,2...0,3МПа протягом 48 год. Допускається зняття тиску через 24 години з моменту початку склеювання, міцність клейових з'єднань при цьому не знижується. Для прискорення процесу клейові з'єднання можна прогріти при 80°C протягом 4 год або при 100°C протягом 3 год.

Клей УФ-235м – розчин полімеру моновінілацетата в циклогексанолі, використовують для з'єднання деталей з матеріалів, прозорих з УФ-області спектра від 220 нм. Склеювані деталі повинні бути нагріті до 60°C, а клей до 90°C для видалення з нього бульбашок повітря. Компоненти розклеюють зануренням в етиловий спирт або нагріванням до 120°C.

Клей ОК-60 – розчин кремнійорганічної смоли в тетрахлоретані. Його застосовують для склеювання деталей з кристалів, прозорих у видимій та ІЧ-областях спектру (до 8 мкм). Компонент сушать при кімнатній температурі протягом 24 год, потім для видалення розчинника прогрівають 2 ч при 120°C. Розклеюють його зануренням в ацетон на 6...7 годин. Працювати з клеєм слід в витяжній шафі, тому що вдихання парів тетрахлоретану діє на організм наркотично. Допустима концентрація парів тетрахлоретану 0,02 мг/л.

Клей ОК-50 – розчин поліамінів, що виконують роль затверджувача, в рідкої модифікації діанової епоксидної смоли. Його застосовують для склеювання деталей, що працюють у вологому тропічному кліматі, що стикаються з морською водою, для з'єднання скла з металом (крім олова, хрому, ковару, інвару).

Висока адгезія клею до скла визначає високу механічну міцність з'єднання. Мала еластичність обмежує різницю коефіцієнтів термічного розширення матеріалів, що з'єднуються. Твердне клей при кімнатній температурі і деформації деталей не викликає. При достатній жорсткості їх конструкції, або ненормованій

величині деформації, склеєний компонент для прискорення процесу полімеризації клею і придбання їм вологоводостійкості прогрівають при 60°C протягом 3...5 годин.

Клей ОК-72Ф – розчин, який представляє собою суміш двох компонентів: епоксидної смоли ЕД-5, розчиненої в фенілгліцидному ефірі і вератоні, і певної фракції поліетиленполіаміну, модифікованої фенілгліцидним ефіром. Використовують для склеювання деталей з кристалів, зі скла з різними покриттями, деталей, що працюють в умовах вологого тропічного клімату, з'єднання скла з металом, для герметизації міжфасочного простору деталей, склеєних бальзамом і бальзаміном при подальшому закріпленні компонента в оправі. Твердне клей при кімнатній температурі і деформації деталей не викликає.

Клеї на основі епоксидних смол, зокрема ОК-50 і ОК-72Ф, при всіх їх позитивних якостях (тепло- і морозостійкість, висока механічна міцність, світлостійкість і ін.) мають істотний недолік. Гліцидні розчинники і затверджувачі амінного типу ще до полімеризації клею викликають подразнення шкіри. Тому при роботі з цими клеями необхідно суворе дотримання правил техніки безпеки (захист від дії парів, вентиляція на робочому місці, робота в гумових рукавичках і ін.).

Клей ММА – суміш двох розчинів епоксидної смоли в перегнаному мономері метилметакрилату. Один з них містить тріаллілціанурат і діметілапілін, інший – перекис бензоїлу. Тривалість робочого стану клею після змішування компонентів – близько 20 хв. Полімеризується при кімнатній температурі і деформації деталей не викликає. Клей не токсичний. Використовують його для з'єднання деталей зі скла діаметром до 900 мм, що працюють в різних кліматичних умовах. Різниця коефіцієнтів термічного розширення стекл, що з'єднуються, допустима до $0,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$.

Клей УФ-235м є розчином полімеру вінілацетату в циклогексанолі. Теплостійкість +50°C, морозостійкість до -60°C, усадка дуже велика – 40...50%. Температура склеювання 95°C Застосовується для склеювання деталей зі скла, кварцу, флюориту, фтористого літію і інших матеріалів, прозорих в УФ області спектра.

Сплав ТКС-1 – термопластичний клей, який використовується для з'єднання деталей з матеріалів, що мають коефіцієнти заломлення $n_e > 2$ (арсенід і антимонід індію, германій, кремній, стекла ІКС-24, ІКС-26, ІКС-30 та ін.), однакові коефіцієнтами термічного розширення і допускають нагрів до 170°C.

Сіталоцемент є склокристалічним матеріалом на основі стекол системи PbO - ZnO - B₂O₃ - SiO₂. Має дуже низький коефіцієнт теплового розширення $((4...10) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})$; застосовується для спаювання скла, герметизації оптичних вузлів, активних елементів лазерів, для з'єднання деталей оптичним контактом, у виробництві кінескопів.

Контрольні запитання та завдання

1. Дайте характеристику методів з'єднання оптичних деталей.
2. Що являє собою склеювання оптичних деталей?
3. Які речовини застосовуються для склеювання?
4. Як здійснюють спікання кювет?
5. Як здійснюють з'єднання деталей методом оптичного контакту?
6. Виберіть матеріал для склеювання лінз із скла КУ-1.
7. Охарактеризуйте процес виготовлення вікна Брюстера Ge-Ne-лазера.

II МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ФІЗИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

8. МАГНІТНІ МАТЕРІАЛИ

8.1 Класифікація матеріалів за магнітними властивостями

Усі речовини у магнітному полі намагнічуються. Намагнічування пов'язане з наявністю у атомів мікроскопічних магнітних моментів. Одною з основних магнітних характеристик, що оцінює здатність матеріалу до намагнічування є *відносна магнітна проникність* μ . Вона визначає, у скільки раз магнітна індукція у речовині більша за магнітну індукцію у вакуумі і може бути знайдена за формулою

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}, \quad (8.1)$$

де μ_0 – магнітна постійна, що дорівнює магнітній проникності вакууму,
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

H – напруженість магнітного поля, А/м;

$B_0 = \mu_0 H$ – магнітна індукція в вакуумі;

B – магнітна індукція у речовині.

За величиною відносної магнітної проникності усі матеріали поділяються на діамагнетики, парамагнетики, феромагнетики, ферімагнетики та антиферомагнетики (рис. 8.1).

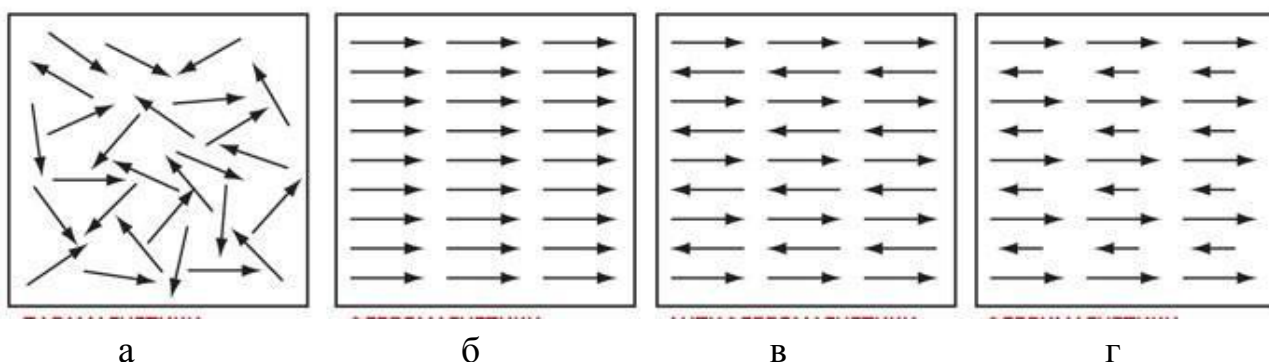


Рисунок 8.1. – Орієнтація магнітних моментів атомів різних речовин

Діамагнетики – речовини, в яких в проявляється діамагнітний ефект, що є результатом впливу зовнішнього магнітного поля на молекулярні струми. Магнітний момент, що виникає при цьому ефекті, спрямований назустріч зовнішньому полю і послаблює його, внаслідок чого $\mu < 1$. Діамагнетизм притаманний усім речовинам., Приклади діамагнетиків: всі речовини з

ковалентним хімічним зв'язком, лужно-галоїдні кристали, неорганічні стекла, мідь, срібло, золото, цинк, ртуть, галій та інші, водень, азот, вода та інші.

Парамагнетики намагнічуються в напрямку вектора магнітної індукції зовнішнього поля, $\mu > 1$. При відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти розподілені хаотично (рис. 8.1, а) і намагніченість речовини дорівнює нулю. Прикладами парамагнетиків є лужні і лужноземельні метали, солі заліза, кобальту, нікелю, рідкоземельних металів, кисень, окис азоту. Al, Na, Mg, Ta, W.

Сильні магнітні властивості мають феро- та ферімагнетики. Вони характеризуються високими значеннями магнітної проникності ($\mu \gg 1$), а також її нелінійною залежністю від напруженості поля та температури. Залізо, нікель, кобальт, гадоліній мають дуже високе значення μ (до 10^6), а їх здатність сильно намагнічуватися широко застосовується у техніці.

Феромагнетизм – результат обмінної взаємодії електронів недобудованих оболонок сусідніх атомів, що перекриваються при утворенні кристалу. Така взаємодія приводить до зміни енергетичного стану, який оцінюється обмінною енергією. Енергія обмінної взаємодії між атомами феромагнетиків має мінімальне значення у тому випадку, коли некомпенсовані магнітні моменти орієнтовані паралельно (рис. 8.1, б). Для деяких речовин (антиферомагнетиків) енергетично вигідним є антипаралельне розташування спінів сусідніх атомів (рис. 8.1, в). Ферімагнетики являють собою частковий випадок антиферомагнетиків. У цих речовин магнітні моменти сусідніх атомів орієнтовані назустріч один одному, але мають різну величину (рис. 8.1, г).

Приклад 1. При напруженості магнітного поля $A = 2 \cdot 10^4$ А/м індукція у речовині досягає 0,34 Тл. Знайти магнітну проникність цієї речовини. Чи може ця речовина бути діамагнетиком?

$$\text{Згідно із рівнянням (8.1), } \mu = \frac{0.34}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^4} = 1.327.$$

Виходячи з того, що $\mu \geq 1$, дана речовина є діамагнетиком.

За певних умов в кристалах можуть виникати сили, які називаються обмінними. Їх пояснення дається квантовою механікою. Ці сили змушують власні магнітні моменти електронів вибудовуватися паралельно один одному. В результаті виникають області спонтанного (мимовільного, тобто виникає за відсутності зовнішнього поля) намагнічування. Ці області називаються доменами.

Домен – це область кристалу розміром $10^{-6} \dots 10^{-4}$ м, де магнітні моменти атомів орієнтовані паралельно певному кристалографічному напрямку.

Причина розбиття феромагнетика на домени полягає в тому, що цей процес енергетично вигідний. Згідно з теорією Л.Д. Ландау і Е.М. Лифшица при паралельній орієнтації магнітних моментів електронів всього зразка, тобто коли феромагнітний зразок складається з одного домену, він створює в навколишньому просторі магнітне поле, що має певну енергію (рис. 8.2, а). На рис. 8.2, б зображені два домени з протилежним напрямком намагніченості. Зовнішнє магнітне поле тут зменшується зі збільшенням відстані швидше, ніж у попередньому випадку, і енергія, що міститься в полі, виявляється меншою. У випадку, показаному на рис. 8.2, в, магнітне поле практично існує тільки в безпосередній близькості від поверхні магнетика й енергія поля ще менша.

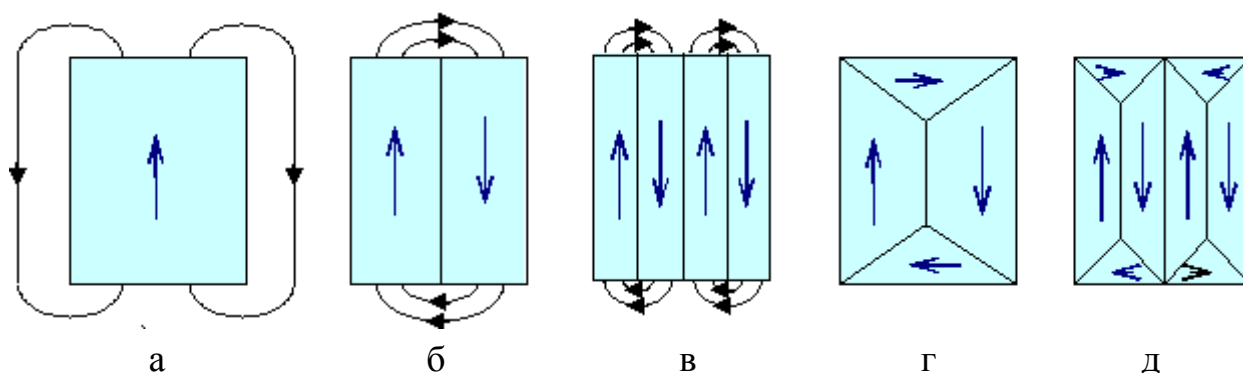


Рисунок 8.2. – Схема утворення магнітних доменів

На рис. 8.2, г зображений випадок, коли в зовнішньому просторі магнітного поля зовсім немає. Тут існують «замикаючі» домени у формі тригранних призм, бічні поверхні яких складають кут 45° з вектором намагніченості. У наслідок цього магнітний потік проходить винятково всередині феромагнетика, він замикається граничними доменами, чим і обумовлена їхня назва – замикаючі домени. Цей стан енергетично більш вигідний, ніж попередні стани, і тому феромагнетик, що знаходиться, наприклад, у стані а, буде прагнути перейти в стан г.

Нарешті, на рис. 8.2, д показана ціла сукупність доменів разом із замикаючими їх доменами, де також немає зовнішнього поля. Подібна форма доменів дійсно спостерігається на досліді. Таким чином, дроблення феромагнетика на домени приводить до зменшення магнітної енергії. Очевидно, дроблення припиняється, коли повна енергія досягає мінімального значення. Між доменами є перехідні шари (доменні стінки) шириною приблизно $10^{-8} \dots 10^{-7}$ м, усередині яких поступово повертаються магнітні моменти (рис. 8.3).

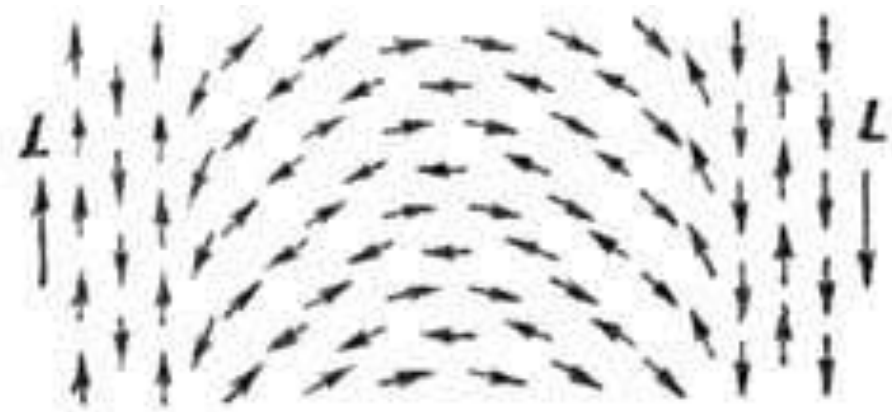


Рисунок 8.3. – Зміна орієнтації магнітних моментів атомів всередині доменної границі

Монокристали феромагнетиків характеризуються магнітною анізотропією, що проявляється у різній легкості намагнічування вздовж різних осей (рис. 8.4).

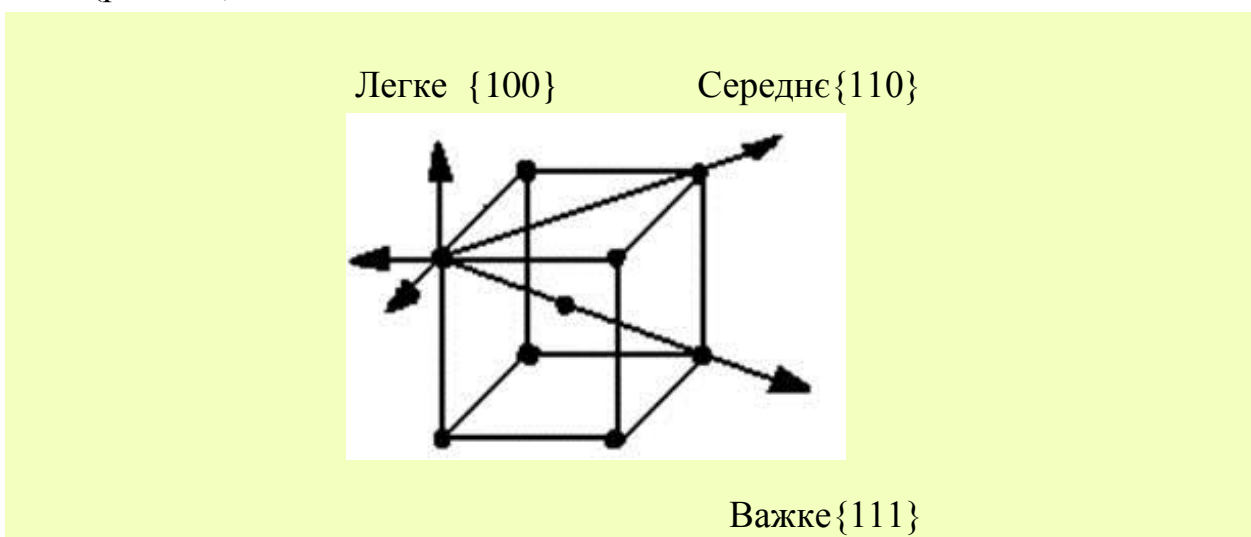


Рисунок 8.4. – Напрямки легкого, середнього й важкого намагнічування в монокристалі заліза

У тих випадках коли анізотропія магнітних властивостей проявляється у полікристалічних феромагнетиках, кажуть, що феромагнетик має магнітну текстуру. Одержання магнітної текстури має велике значення і використовується у техніці для створення у певному напрямку підвищених магнітних властивостей.

8.2 Основні характеристики магнітних властивостей матеріалів

При внесенні феромагнетика у зовнішнє магнітне поле відбувається його намагнічування, тобто орієнтація векторів намагніченості доменів у відповідності до напрямку зовнішнього поля (рис. 8.5). Внаслідок цього процесу зростає індукція B . Зростання індукції під дією зовнішнього поля обумовлено двома основними процесами: зсувом доменних границь і поворотом магнітних моментів доменів.

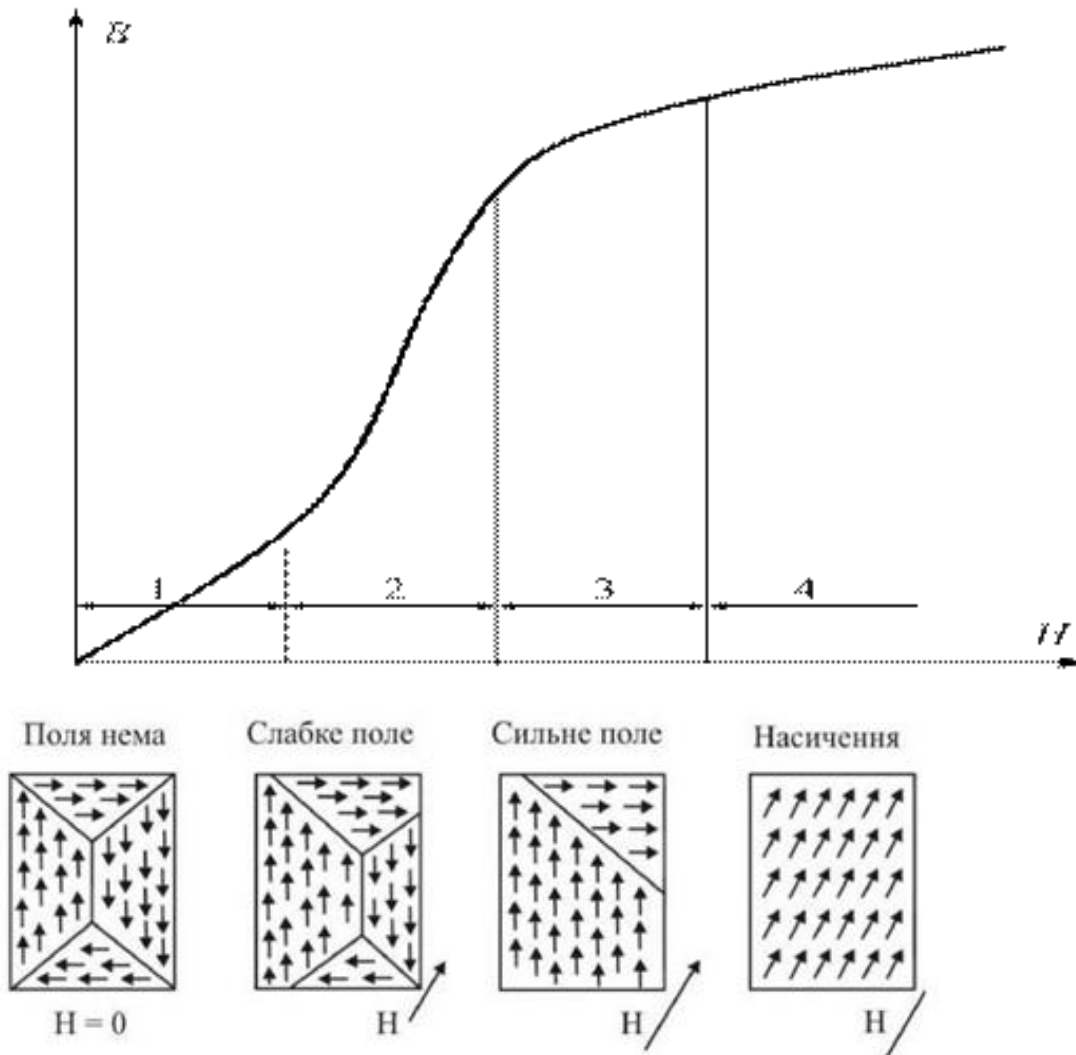


Рисунок 8.5. – Крива намагнічування феромагнетика і зміна доменної структури при намагнічуванні

Початковій ділянці кривої (область 1) відповідає оборотне (пружне) зміщення границь доменів. При цьому відбувається збільшення об'єму тих доменів, магнітні моменти яких утворюють найменший кут з напрямком зовнішнього поля і зменшення розмірів доменів з несприятливою орієнтацією вектора спонтанної намагніченості. Після зняття слабого поля границі

доменів повертаються в попереднє положення. В області більш сильних полів (область 2) зсув доменних границь має необоротний, стрибкоподібний характер. На ділянці не оборотного зсуву доменних границь крива намагнічування має найбільшу крутизну. При подальшому збільшенні напруженості магнітного поля зростає роль другого механізму намагнічування – механізму обертання, при якому магнітні моменти доменів з напрямку легкого намагнічування поступово повертаються в напрямку поля (область 3). Коли всі магнітні моменти доменів орієнтуються уздовж поля, настає технічне насичення намагніченості (область 4). Незначне зростання індукції на ділянці насичення зумовлено збільшенням намагніченості самого домену. Це явище одержало назву *парапроцесу* або істинного намагнічування.

Строго паралельне розташування спінових моментів у домені можливе тільки при температурах, близьких до абсолютного нуля. При підвищенні температури за рахунок теплової енергії впорядкованість у розташуванні спінів порушується. Зовнішнє поле повертає спіни до паралельної орієнтації. Цим досягається ефект збільшення намагніченості.

На відміну від істинного намагнічування, зростання індукції за рахунок зсуву доменних границь і обертання магнітних моментів називають *технічним намагнічуванням*.

Залежність $B = f(H)$ при зміні напруженості поля від $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$ і назад має вигляд замкненої кривої, що називається петлею гістерезису. Якщо намагнічування зростає при цьому проводилось до насичення, та така петля називається граничною (рис.8.6).

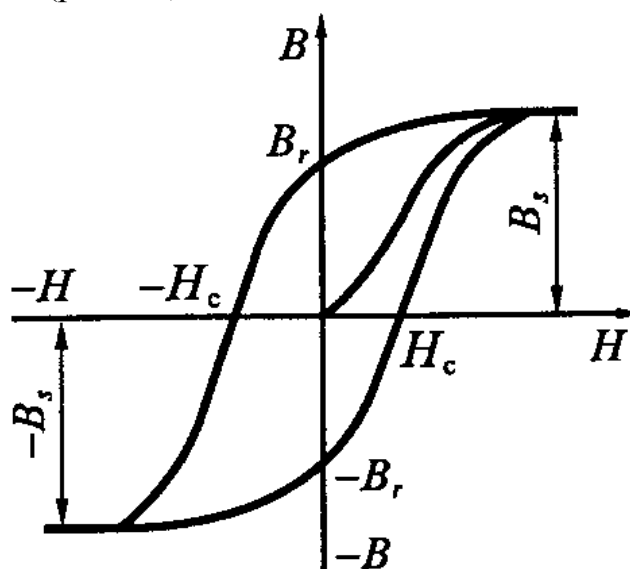


Рисунок 8.6. – Гранична петля гістерезису і основні характеристики магнітних властивостей феромагнетика

До важливих характеристик феромагнітних матеріалів належать:

1) *відносна магнітна проникність* μ . Виходячи із формули (8.1), відносну магнітну проникність визначають як тангенс куту нахилу кривої первинного намагнічування. Використовуючи основну криву намагнічування, можна визначити різні види магнітної проникності (рис. 8.7, а). Розрізняють початкову $\mu_{\text{гн}}$, та максимальну μ_{max} магнітну проникність. Початкова і максимальна магнітні проникності визначаються як тангенси кута нахилу дотичній до основної кривої намагнічування на ділянках 1 і 3 (див. рис. 8.5), на практиці початкова магнітна проникність визначається при напруженості поля $H \leq 0,1 \text{ А/м}$. Залежність магнітної проникності від напруженості поля представлена на рис.8.7, б.

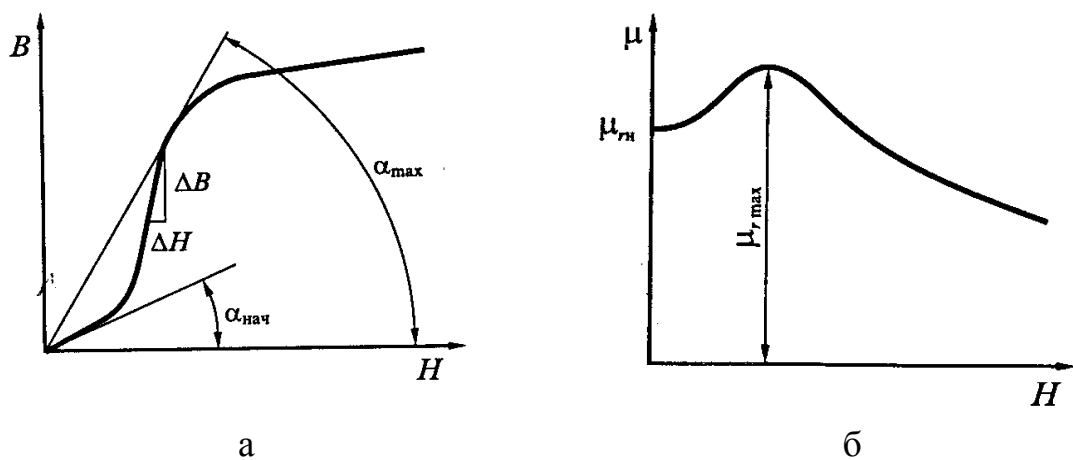


Рисунок 8.7. – Визначення різних видів магнітної проникності (а) та залежність магнітної проникності від напруженості поля (б)

2) *індукція насичення* B_s – максимальна магнітна індукція;

3) *залишкова магнітна індукція* B_r – індукція у попередньо намагніченому до насичення матеріалі при напруженості магнітного поля, що дорівнює нулю;

4) *коерцитивна сила* H_c – величина негативної напруженості магнітного поля, яка приводить до повного розмагнічування матеріалу, що був попередньо намагнічений до насичення.

5) *магнітні втрати*. При роботі магнітного матеріалу у змінному полі відбувається розсіювання енергії, тобто виникають втрати. Магнітні втрати у матеріалі складаються з втрат на гістерезис та втрат на вихрові струми:

$$P_{\text{зв}} = P_{\text{г}} + P_{\text{в}} \quad , \quad (8.2)$$

де $P_{\text{гв}}$ – сумарні втрати у матеріалі;

$P_{\text{г}}$ – втрати на гістерезис;

P_v – втрати на вихрові струми.

Втрати на гістерезис обумовлені затратою енергії зовнішнього поля на зміщення та обертання границь доменів і пропорційні частоті перемагнічування:

$$P_r = af, \quad (8.3)$$

де a – коефіцієнт пропорційності, що залежить від складу та структури матеріалу.

Крім втрат на гістерезис у магнітних матеріалах існують також втрати на вихрові струми, що виникають за рахунок електрорушійної сили самоіндукції і залежать від магнітних та електричних властивостей матеріалу, а також від геометрії магнетика. Втрати на вихрові струми пропорційні квадрату частоти:

$$P_B = bf^2 = \frac{kd^2B^2}{\rho} f^2, \quad (8.4)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від форми магнітопроводу, а також від складу та структури його матеріалу;

d – товщина магнітного матеріалу, м;

ρ – питомий електричний опір матеріалу, Ом·м;

B – магнітна індукція у матеріалі;

f – частота перемагнічування, Гц.

Важливою характеристикою магнітних матеріалів є величина питомих втрат – потужність, що розсіюється при перемагнічуванні 1 кг матеріалу з частотою 50 Гц при індукції 1 Тл ($P_{1/50}$) або 1,5 Тл ($P_{1,5/50}$).

Структура феромагнетика суттєво впливає на його магнітні властивості. Пластична деформація, що пов'язана із збільшенням дефектів кристалічної будови, зменшує магнітну проникність та збільшує коерцитивну силу. Вплив загартування на магнітні властивості аналогічний.

Як відомо, максимальна кількість дефектів кристалічної будови спостерігається по границям зерен. Чим дрібніше зерно, тим більша сумарна площа поверхонь границь, а значить, більша кількість дефектів у металі. Подрібнення зерна феромагнітного матеріалу сприяє зниженню магнітної проникності та збільшенню коерцитивної сили.

При нагріванні вище певної температури, що називається температурою Кюрі і залежить від складу матеріалу, феромагнетик переходить у парамагнітний стан (для заліза температура Кюрі дорівнює 768°C). У інтервалі робочих температур (-60...+60°C) із збільшенням температури

магнітна проникність зростає, а коерцитивна сила зменшується, що пояснюється збільшенням рухомості границь доменів.

На магнітні властивості матеріалів значно впливає оточуюче середовище. Магнітні матеріали повинні мати високу корозійну стійкість, а в умовах контакту з агресивним середовищем необхідно передбачати методи захисту від корозії.

Враховуючи те, що магнітна проникність матеріалу залежить від напруженості магнітного поля, для забезпечення стабільності характеристик необхідно застосовувати магнітні екрани з метою захисту магнітних пристроїв для випадкових магнітних полів.

Залежно від умов роботи та значень магнітних характеристик ферромагнітні матеріали поділяються на дві групи: магнітно-м'які та магнітно-тверді матеріали.

8.3. Магнітно-м'які матеріали

Магнітно-м'які матеріали легко намагнічуються та перемагнічуються. Вони застосовуються у магнітних ланцюгах трансформаторів, електричних машин, для виготовлення магнітних екранів та ін

В залежності від частотного діапазону використання магнітно-ніякі матеріали поділяються на низькочастотні та високочастотні.

У загальному випадку магнітно-ніякі матеріали повинні мати такі властивості:

- 1) високе значення магнітної проникності, тобто здатність намагнічуватися та перемагнічуватися у будь яких полях;
- 2) високе значення індукції насичення, що забезпечує високу потужність магнітних пристроїв при зменшенні їх габаритів;
- 3) низькі магнітні втрати;
- 4) високі механічні властивості (велика пластичність, достатня міцність, відсутність старіння та ін.);
- 5) висока технологічність;
- 6) низька вартість.

Найбільш поширені у техніці такі групи *низькочастотних магнітно-м'яких матеріалів*: залізо, електротехнічні сталі та матеріали, що мають високу магнітну проникність у слабких полях (пермалої та альсифер).

Залізо – один з основних електротехнічних матеріалів. Воно має високі значення магнітної проникності та індукції насичення, гарні технологічні властивості (легко піддається деформуванню та зварюванню).

Наявність домішок у феромагнітному матеріалі суттєво впливає на його магнітні властивості. Домішки спотворюють кристалічні решітки, підвищують внутрішні напруження у металі, що обумовлює підвищення коерцитивної сили та залишкової індукції, зменшує магнітну проникність та збільшує втрати на гістерезис. Навіть незначна кількість таких домішок, як вуглець, кисень, азот, суттєво впливає на магнітні властивості заліза (табл.8.1).

Таблиця 8.1 Склад та магнітні властивості заліза різних ступенів чистоти

Матеріал	Кількість домішок, %		Магнітні властивості		
	вуглець	кисень	μ_H	μ_{max}	H_c , А/м
Технічно чисте залізо	0,02	0,06	250	7000	64
Електролітичне залізо	0,02	0,01	600	15000	28
Карбонільне залізо	0,005	0,005	3300	21000	6,4
Електролітичне залізо, переплавлене у вакуумі	0,01	–	–	61000	7,2
Залізо, оброблене у водні	0,005	0,003	6000	200000	3,2
Монокристал найчистішого заліза, відпаленого у водні особливо ретельно	–	–	–	1430000	0.8

Елементи, що спеціально вводяться до заліза (наприклад, кремній) нейтралізують вплив шкідливих домішок, підвищують магнітну проникність та зменшують коерцитивну силу заліза.

Як магнітно-м'який матеріал, залізо використовується у вигляді технічно чистого, електролітичного та карбонільного заліза.

Електротехнічні сталі поділяються на нелеговані та леговані. Нелеговані електротехнічні сталі виготовляють тими ж методами, що й

технічне залізо. Вони мають невелику кількість домішок, 0,02...0,04 % вуглецю та до 0,8 % кремнію, що був введений при виправленні як розкислювач. Нелеговані електротехнічні сталі мають низький питомий електричний опір ($\rho \leq 0,1$ мкОм·м), що веде до збільшення втрат на вихрові струми та обмежує застосування цієї сталі в умовах змінних магнітних полів.

Маркування нелегованих електротехнічних сталей цифрове. Перша цифра вказує на метод виготовлення сталі (1 – гарячекатана, 2 – холоднокатана ізотропна сталь); друга – на кількість кремнію (0 – не більше 0,4 %, 1 – від 0,4% до 0,8%), третя цифра визначає основну властивість, яку забезпечує підприємство-виготовник (цифра 8 позначає коерцитивну силу H_c). Дві останні цифри вказують на значення цього параметру в А/м.

Наприклад, 20864 – сталь електротехнічна нелегована, холоднокатана ізотропна, що містить до 0,4 % кремнію. Підприємство-виготовник гарантує, що коерцитивна сила зразків з цієї сталі $H_c = 64$ А/м. Властивості деяких нелегованих електротехнічних сталей наведені у табл.8.2.

Таблиця 8.2 Магнітні властивості нелегованої електротехнічної тонколистової сталі

Сталь	H_c , А/м	μ_{max}	$B(Tл)$ при $H=30кА/м$
10895	95	3,8	2,05
20895	95	3,8	2,05
10865	64	5,6	2,05
20864	64	5,6	2,05
10848	48	6,0	2,05
20848	48	6,0	2,05

Леговані електротехнічні сталі містять до 4,5% кремнію, кількість вуглецю в них не перевищує 0,04 %. Кремній – недефіцитний елемент, який підвищує електричний опір сталі, сприяє зростанню зерна, що приводить до збільшення магнітної проникності і зменшення коерцитивної сили та магнітних втрат. Більш висока ($\geq 4,8$ % Si) кількість кремнію робить сталь дуже крихкою.

В маркуванні легованих електротехнічних сталей перша цифра показує метод її виготовлення (1 – гарячекатана, 2 – холоднокатана ізотропна, 3 – холоднокатана текстурована). Друга й цифра свідчить про кількість кремнію (0 – $< 0,4\%$; 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 позначає основний нормований параметр, що

гарантується виготовником (l – питомі втрати при $B=1,5$ Тл та $f=50$ Гц, тобто $P_{1,5/50}$), четверта – код чисельного значення нормованого параметру (чим більше ця цифра, тим нижчі питомі втрати). Властивості деяких легованих електротехнічних сталей наведені у табл.8.3.

Таблиця 8.3 Магнітні властивості легованої електротехнічної тонколистової сталі

Сталь	$P_{1,5/50}$, Вт/кг	B (Тл) при $H=30$ кА/м
1311	0,1	1,95
1411	4,4	1,94
1511	3,5	1,90
2011	9,0	2,02
2111	10,0	2,0
2211	7,0	1,96
2311	5,8	1,96
2311	3,0	1,96
3411	2,45	2,02
3416	0,89	1,95

Усі електротехнічні сталі поділяються на дві групи: динамні та трансформаторні. Динамні сталі містять до 2,5% кремнію та використовуються для виготовлення магнітопроводів електричних генераторів, електродвигунів та інших електричних машин. Трансформаторні сталі, що містять більше 2,5% кремнію і мають більш високу твердість, використовують в осердях силових трансформаторів.

Електротехнічні сталі випускають у вигляді листів або стрічок товщиною 0,05...0,5 мм. Із зменшенням товщини листів знижуються втрати на вихрові струми. Перед складанням осердь пластини лакують.

Шляхом комбінованої гарячої та холодної прокатки і термічної обробки можна одержати особливу крупнокристалічну структуру крем'янистої сталі, причому вісь легкого намагнічування кристалів буде співпадати з напрямком прокатки, тобто одержати магнітну структуру. Використання текстурованої сталі в сплавах трансформаторах дозволяє знизити їх масу та мають невелику кількість домішок, 0,02...0,04 % вуглецю та до 0,8 % кремнію.

Пермалої – це сплави системи Fe – Ni, що містять 45...83 % нікелю та характеризуються великою магнітною проникністю ($\mu_n < 35000$, $\mu_{max} < 220000$)

та малою коерцитивною силою ($H_c < 16$ А/м). Залізо з нікелем утворюють твердий розчин, тому, згідно із закономірностями М.С.Курнакова, електричний опір сплаву більший, ніж опір вихідних компонентів, що дозволяє використовувати пермалої при частоті до 25 кГц. За значенням магнітної індукції пермалої з великою кількістю нікелю поступаються залізу та сталі. Пермалої мають дуже високу пластичність, тому легко прокатуються у тонкі листи та стрічки, що використовуються при виготовленні осердь трансформаторів.

Магнітні властивості пермалоїв значно змінюються під дією навіть невеликих напружень. При стискальних напруженнях 5 МПа магнітна проникність зменшується в 5 раз, а коерцитивна сила збільшується вдвічі. Тому деталі з пермалоїв піддають термічній обробці (відпалу), а у процесі складання запобігають ударів, затягування або здавлювання обмоткою.

Альсифери – це потрійні сплави системи Fe – Al – Si, що не містять дорогих або дефіцитних компонентів. Сплав оптимального складу (9,5% Si, 5,6% Al, решта – залізо) має такі властивості: $\mu_n = 35500$, $\mu_{max} = 120000$, $H_c = 1,8$ А/м, $\rho = 0,8$ мкОм/м, тобто не поступається пермалою. Альсифери мають високі ливарні властивості, але дуже крихкі, тому деталі з альсиферів можуть бути виготовлені лише методом виливання з товщиною стінок не менше 2...3 мм (магнітні екрани, корпуси приладів та ін.). Завдяки крихкості альсиферу його перемелюють у порошок і використовують при виготовленні високочастотних порошкових осердь.

Високочастотні магнітно-м'які матеріали працюють при високих та надвисоких частотах. Високочастотні магнітно-м'які матеріали у першу чергу повинні мати високий електричний опір, а також високу магнітну проникність, що слабо залежить від значень напруженості магнітного поля, та малу коерцитивну силу. Таким вимогам відповідають магнітодіелектрики та ферити.

Магнітодіелектрики – це композиційні матеріали, одержані за технологією порошкової металургії, що складаються з порошку низькочастотного магнітно-м'якого матеріалу (альсифер, карбонільне залізо, магнетит пермалої та діелектричної зв'язки. Діелектриком може бути фенолформальдегідна смола, бакелітова смола, полістирол, шелак, скло та ін.

Ізоляція окремих часточок магнітно-м'якого матеріалу підвищує електричний опір матеріалу в цілому і збільшує стабільність магнітної проникності до достатньо високих частот (зменшуються втрати на вихрові струми). Електричний опір та магнітні характеристики магнітодіелектрика

залежать від кількісного співвідношення магнітного матеріалу та діелектричної зв'язки.

Найбільш поширені магнітодіелектрики на основі альсиферу та карбонільного заліза.

Магнітодіелектрики на основі альсиферу маркуються за частотою (ТЧ – тональної частоти, $f=10\ldots15$ кГц; ВЧ – високочастотні, $f=15\ldots150$ кГц). Цифри, що стоять після букв, позначають приблизне значення магнітної проникності. Магнітодіелектрики на основі карбонільного заліза маркуються буквою Р (радіочастотні) та цифрами, що позначають максимальну частоту використання у мегагерцах.

Магнітодіелектрики технологічні (можна одержати деталі будь-якої конфігурації), мають невисоку вартість, але магнітна проникність їх низька, тому галузь застосування цих матеріалів обмежена.

Феритами називають магнітні матеріали, що одержані методами порошкової металургії з суміші оксидів заліза з оксидами двовалентних (іноді-одновалентних) металів.

Ферити – дуже тверді та крихкі матеріали, не піддаються обробці тиском та різанням (їх можна лише шліфувати та полірувати), за величиною питомого електричного опору, який у $10^6\ldots10^{11}$ раз перевищує опір заліза, належать до магнітних напівпровідників. Завдяки високому електричному опору та достатній магнітній проникності ($\mu \leq 6000$) ферити є основними матеріалами високочастотної техніки. Внаслідок низької індукції насичення ($B=0,15\ldots0,5$ Тл) використання феритів на низьких частотах не доцільне - там вони поступаються компактним матеріалам.

За своїм складом прості ферити відповідають формулі $Fe_2O_3 - MeO$, де індекс Me позначає двовалентний (Fe, Ni, Zn, Mn, Mg та ін.) або одновалентний (Li) метал.

Технологія виготовлення феритів досить складна. Суміш оксидів піддають попередньому обпалюванню при температурі $900\ldots950$ °С, ретельно розмелюють, змішують з пластифікатором (парафін, сирий каучук, полівініловий спирт) і пресують для одержання заготовок заданої форми. При кінцевому спіканні ($t= 1200\ldots1400$ °С, тривалість – до десятків годин) відбувається взаємне розчинення часток окремих оксидів і утворення нової речовини – фериту, що має структуру твердого розчину. Властивості феритів значною мірою залежать від режимів спікання, а також від температури та частоти.

Допустиму робочу температуру феритів визначає температура точки Кюрі, поблизу від якої значення магнітної проникності різко знижується. Граничною частотою застосування феритів ($f_{гр}$) вважають таку частоту, при якій магнітна проникність починає зменшуватися, а значення $\operatorname{tg} \delta$ (кута діелектричних втрат) досягає 0,1.

У маркуванні феритів на першому місці стоять цифри, що відповідають початковій магнітній проникності, на другому – букви, що визначають частотний діапазон роботи феритів (Н – низькочастотні, ВЧ – високочастотні, СЧ – надвисокочастотні), на третьому – букви, що позначають легуючий елемент: Н – нікель – цинковий, М – марганець-цинковий ферит. Наприклад, 2000НМ: $\mu_H=2000$, низькочастотний, марганець-цинковий ферит. Наприклад, 2000нМ: $\mu_H=2000$, низькочастотний, марганець-цинковий ферит.

Ферити для пристроїв НВЧ. Діапазон НВЧ відповідає частотам від сотень МГц до десятків ГГц, тобто довжинах хвиль від метрів до міліметрів. Для передачі електромагнітної енергії такої частоти застосовують хвилеводи – полоскові лінії передачі, порожнисті металеві труби різної конфігурації, коаксіальні лінії передачі. Якщо помістити феритовий елемент певної конфігурації в електродинамічну систему, то в результаті взаємодії фериту з електромагнітної хвилею, що проходить, можна змінювати структуру електромагнітного поля, швидкість поширення хвиль і величину загасання, що залежать від магнітних і електричних властивостей НВЧ-фериту. Так як магнітними параметрами фериту можна управляти зовнішнім магнітним полем, то вони є основою створення різних приладів НВЧ-техніки. Практичне застосування феритів НВЧ засноване на магнітооптичному ефекті Фарадея; ефекті феромагнітного резонансу; зміні зовнішнім магнітним полем значення магнітної проникності фериту.

Магнітооптичний ефект Фарадея полягає в повороті площини поляризації високочастотних коливань в фериті, намагніченому зовнішнім магнітним полем.

Феромагнітний резонанс спостерігається при збігу частоти зовнішнього збуджуючого поля з власною частотою прецесії спинів електронів, яку можна змінювати за допомогою постійного підмагнічуючого (керуючого) поля H перпендикулярного збуджуючому полю. При резонансі різко зростає поглинання енергії електромагнітної хвилі, що розповсюджується в хвилеводі в зворотному напрямку, а для хвилі прямого напрямку поглинання виявляється значно меншим. Чим вужчі лінії феромагнітного резонансу H , тим сильніше поглинання електромагнітної енергії, що позитивно позначається на

характеристиках ряду пристроїв НВЧ (антенні перемикачі та циркулятори, які служать для розподілу енергії між окремими хвилеводами; модулятори, фільтри.

До фериту, що застосовуються в техніці НВЧ, висувається ряд специфічних вимог, основними з яких є: висока чутливість матеріалу до керуючого поля (можливість керувати слабким зовнішнім полем); високий об'ємний питомий електричний опір ($10^6 \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$) і мала величина тангенса кута діелектричних втрат ($10^{-3} \dots 10^{-4}$), а також магнітних втрат поза області феромагнітного резонансу; вузька крива феромагнітного резонансу за значенням напруженості керуючого поля (до 1 кА/м); температурна стабільність властивостей і можливо більш високе значення точки Кюрі.

У техніці НВЧ застосовуються три групи матеріалів: ферошпінелі, ферогранати і гексаферити. Ферошпінелі, як правило, застосовуються в приладах сантиметрового діапазону і довгохвильовій частини міліметрового діапазону, гексаферити – в міліметровому діапазоні, а ферогранати – в дециметровому діапазоні і довгохвильовій частини НВЧ діапазону. У НВЧ техніці застосовуються як полікристалічні, так і монокристалічні ферити; останні мають більш вузьку криву феромагнітного резонансу.

В оптичному зв'язку (передача і обробка інформації за допомогою лазерів) застосовуються магнітооптичні пристрої, що використовують ефект Фарадея (оптичні вентиля, оптичні циркулятори, оптичні модулятори). Магнітні матеріали, призначені для магнітооптичних пристроїв повинні мати малу намагніченість насичення і досить велике значення магнітооптичної добротності. Цим вимогам задовольняють монокристали феритів зі структурою граната і ортоферити.

Магнітні матеріали з прямокутною петлею гістерезису (ППГ). Ферити СПАР застосовують при конструюванні магнітних запам'ятовуючих пристроїв ЕОМ, магнітних підсилювачів, ліній затримки і т. д. Одним з основних параметрів, що характеризують придатність феритів для цих цілей, є коефіцієнт прямокутності їх петлі гістерезису, рівний відношенню залишкової індукції B_r до максимальної індукції B_{max} , виміряної при $H = 5H_c$:

$$K_{\text{П}} = \frac{B_r}{B_{\text{max}}}, \quad (8.5)$$

Необхідно, щоб $K_{\text{П}}$ якомога менше відрізнялося від одиниці. Крім того, ферит повинен мати низьку коерцитивної силу. Такі властивості мають, зокрема, магній-марганцеві ферити, у яких $K_{\text{П}} = 0,96$ і $H_c = 8 \dots 40 \text{ А/м}$.

Фізичний принцип, що лежить в основі магнітної «пам'яті», полягає в наступному. Припустимо, що ферит з прямокутною петлею гістерезису намагнічений до V_{max} полем H , спрямованим зліва направо (рис. 8.8).

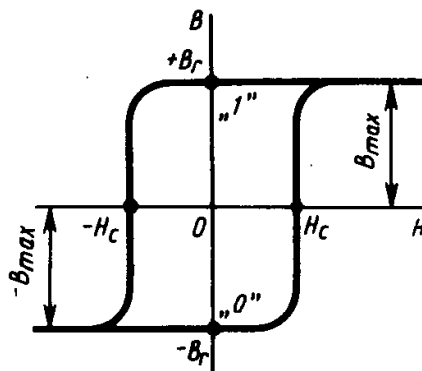


Рисунок 8.8. – Прямокутна петля гістерезису

При зменшенні цього поля до нуля індукція падає до значення V_r , яке для прямокутної петлі гістерезису мало відрізняється від V_{max} . При зміні напрямку поля H на протилежне індукція є майже незмінною аж до $H = H_c$. При $H = -H_c$ індукція стрибкоподібно змінює знак на зворотний, досягаючи при цьому майже граничного значення $-V_{max}$, мало залежного від подальшого зростання H . Якщо тепер це поле зменшувати, то при $H = 0$ залишкова індукція фериту виявиться рівною $-V_r$. Таким чином, при напруженості зовнішнього поля $H = 0$ ферит може перебувати в двох стійких станах: з $V = +V_r$ і $V = -V_r$ в залежності від «передісторії» свого намагнічування. На цій властивості феритів «пам'ятати» попереднє стан намагніченості і ґрунтується дія магнітних запам'ятовуючих пристроїв.

Швидкість перемагнічування матеріалів з ППГ характеризують коефіцієнтом перемикання S_q . Коефіцієнт перемикання чисельно дорівнює кількості електрики на одиницю товщини сердечника, яке необхідно для перемагнічування його зі стану залишкової індукції в протилежний стан максимальної індукції. Крім того, матеріали з ППГ повинні забезпечувати малий час перемагнічування і велику температурну стабільність.

В якості металевих матеріалів з ППГ застосовують пермалой, що має магнітну або кристалографічну текстуру. Осердя з пермалой, виготовлені зі стрічки товщиною кілька мікрметрів, мають кращі магнітні властивості в порівнянні з осердями з феритів. Однак прокатка мікронної стрічки, її термообробка, а також виготовлення осердь зі стрічки значно складніше, ніж виготовлення виробів з феритів, і тому вони значно дорожче.

Аморфні металеві сплави (АМС) за хімічним складом поділяють на залізні, залізо-нікелеві і кобальтові. Вони містять 20...25% (ат.) елементів-аморфізаторів з числа В, Si, Р, С, а також добавки Сг, Мо, Nb, V, Mn. Основною технологією виробництва стрічок з АМС є швидке гартування розплаву. Стрічки є основним видом напівфабрикатів, з яких вироби отримують вигинанням, навивкою, вирубкою.

Вихідна магнітна структура АМС формується при гартуванні розплаву і наступному охолодженні нижче 0°C . Магнітна структура швидкозагартованих стрічок є нерівноважною і анізотропною. Напрямки легкого намагнічування визначаються переважно орієнтацією доменних стінок (через хімічні неоднорідності ближнього порядку) і напрямком залишкових напружень, що розтягують (магнітопружна анізотропія через геометричні неоднорідності ближнього порядку). Для отримання стійкого комплексу властивостей стрічки АМС відпалюють нижче t_K з накладенням магнітного поля і без нього.

Відпал без накладення магнітного поля з регульованим охолодженням усуває наслідки структурної релаксації: зменшується H_c , підвищується μ_n , усувається магнітопружна анізотропія незважаючи на збільшення B_s , так як знімаються залишкові напруження. Структура АМС стає більш упорядкованою (рис. 8.9).

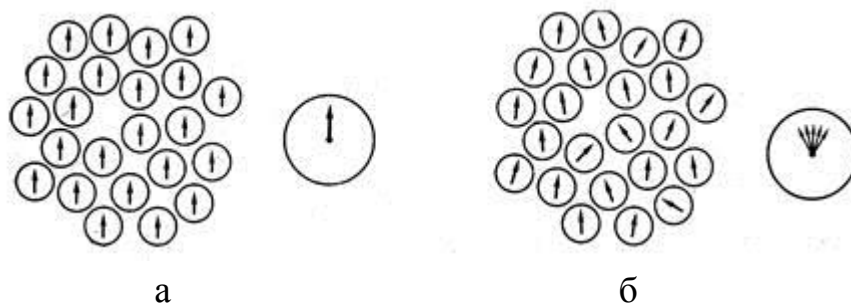


Рисунок 8.9. – упорядкована (а) і неупорядкована (б) структура АМС

Відпал в поздовжньому магнітному полі створює поздовжню орієнтацію доменів ($B_r/B_s > 0,9$), значно зростає μ_{max} і зменшуються втрати при підвищених частотах. Відпал в поперечному магнітному полі забезпечує поперечну орієнтацію доменів ($B_r/B_s < 0,1$) і знижує втрати при підвищених частотах; отримана орієнтація доменів забезпечує лінійне збільшення μ_n при зростанні напруженості поля від 0 до 1 кА/м.

АМС на основі заліза мають високу індукцію насичення ($B_s = 1,5 \dots 1,6 \text{ Тл}$) і малі втрати на перемагнічування при звичайних і підвищених частотах (до 10^4 Гц). У цих АМС втрати на порядок нижче, ніж у кременистих електротехнічних сталей. Залізні АМС використовують в якості матеріалу

осердь високочастотних трансформаторів, дроселів, магнітних підсилювачів; їх застосовують в магнітомеханічних системах завдяки значній магнітострикції і високій чутливості магнітних властивостей до прикладених навантажень, а також в механічних фільтрах, лініях затримки, датчиках, магнітострикційних вібраторах.

У залізо-нікелевих АМС введення нікелю знижує B_s . Так, в сплавах з оптимальним співвідношенням заліза і нікелю ($Fe/Ni = 1$) $B_s = 0,7...1$ Тл. Коерцитивна сила цих сплавів на порядок менше, ніж залізних АМС ($H_c < 0,5$ А/м). Магнітострикція залізо-нікелевих АМС приблизно в 3 рази менше, ніж залізних. Особливістю цих сплавів є досить низькі втрати на перемагнічування і високі значення μ_H або μ_{max} , що досягаються спеціальною обробкою. Залізо-нікелеві АМС застосовують в якості матеріалу сердечників малогабаритних трансформаторів, магнітних фільтрів, магнітних екранів.

АМС на основі кобальту мають $B_s = 0,5...0,6$ Тл, близьку до нуля магнітострикцію і малу коерцитивну силу (не більше 0,5А/м). По поведінці в магнітних полях невеликої напруженості ці АМС схожі з пермалоями ($\mu_H = 10^5$, $\mu_{max} > 8 \cdot 10^5$). Властивості сплавів покращують легуванням невеликою (до 5% (ат.)) кількістю Fe, Mn, Cr, V, Nb, Mo. Залізо або марганець підвищують B_s , але одночасно знижують магнітну проткність.

8.4 Магнітно-тверді матеріали

Магнітно-тверді матеріали використовують для виготовлення постійних магнітів, призначення яких – створювати у певному просторі магнітне поле. Вони намагнічуються в сильних полях ($H > 1000$ кА/м, мають великі втрати при перемагнічуванні, залишкову індукцію 0,5...1 Тл і коерцитивну силу до 560 кА/м.

Постійні магніти мають робочий зазор; отже, на розімкнутих кінцях виникають полюси, що створюють розмагнічуюче поле з напруженістю H_d , що знижує індукцію всередині магніту до B_d , котра менше залишкової індукції B_r . Розрахунки свідчать, що енергія, яку віддає у повітряний проміжок одиничний об'єм матеріалу, може бути підрахована за формулою

$$W = \frac{H_d B_d}{2}, [\text{Дж/м}^3] \quad (8.6)$$

де H_d – напруженість поля, що відповідає енергії B_d (рис.8.10).

Індукція разомкнутого магніту B_d зменшується з збільшенням зазору. При замкнутому магніті $B_d = B_r$ – магнітна енергія дорівнює нулю, так як $H_d =$

0. Якщо зазор між полюсами великий, то напруженість магнітного поля в зазорі рівна коерцитивній силі матеріалу H_c , а $B_d = 0$.

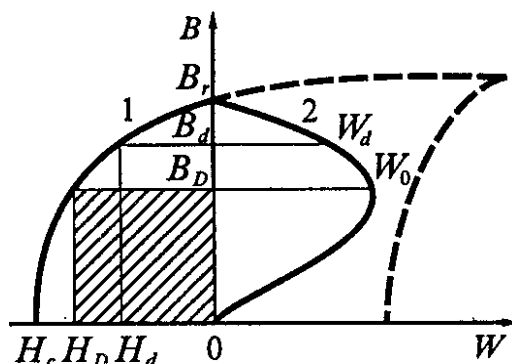


Рисунок 8.10. – Криві розмагнічування та магнітної енергії магнітно-твердого матеріалу

Отже, в цьому випадку магнітна енергія $W_d = 0$. При деяких значеннях B_d і H_d енергія досягає максимального значення W_{max} .

Форма кривої розмагнічування характеризується коефіцієнтом опуклості:

$$\gamma = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c} \quad (8.7)$$

Коефіцієнт опуклості наближається до одиниці зі збільшенням прямокутності петлі гістерезису.

Максимальна магнітна енергія, яку віддає магніт у проміжок, разом з B_r та H_c є важливою характеристикою магнітно-твердих матеріалів. Для сучасних матеріалів, що використовуються для виготовлення постійних магнітів, $W = 1 \dots 75$ кДж/м³. Усі фактори, що є шкідливими для магнітно-м'яких матеріалів (наявність домішок, структурна недовершеність та ін.), позитивно впливають на властивості постійних магнітів.

Магнітно-тверді матеріали за технологією виготовлення поділяють на такі групи: мартенситні сталі, литі сплави, деформівні сплави, порошкові магніти, магнітно-тверді ферити.

Мартенситні сталі містять більше 1% вуглецю і при гартуванні набувають мартенситної структури, що характеризується високим рівнем структурної недовершеності. Більш високі магнітні властивості ($H_c = 4 \dots 5$ кА/м, $B_r = 0,8 \dots 1,0$ Тл, $W_{max} = 0,8 \dots 1,2$ кДж/м³) мають високовуглецеві сталі, леговані хромом, молібденом, вольфрамом, кобальтом та ін. Маркуються ці

сталі буквою “Е” (сталь магнітно-тверда) і буквами та цифрами, що позначають легуючі елементи і їх кількість у відсотках.

Мартенситні магнітно-тверді сталі технологічні, мають невисоку вартість і використовуються у магнітах великих розмірів, а також для невідповідальних деталей магнітопроводів складної форми.

Литі магнітно-тверді сплави – це сплави систем Fe – Ni – Al та Fe – Ni – Al – Co, леговані міддю, титаном, ніобієм та іншими елементами, що мають такі властивості: $H_c=30 \dots 40$ кА/м, $B_r=0,3\dots 0,5$ Тл, $W_{\max}=3,5\dots 5$ кДж/м³. Маркуються литі магнітно-тверді сплави так, як і леговані сталі.

Магнітні властивості литих сплавів можуть бути підвищені шляхом охолодження при гартуванні у сильному магнітному полі ($H>120$ кА/м). Підвищена крихкість та висока твердість литих сплавів виключають будь-яку їх обробку, крім шліфування.

Деформівні магнітно-тверді сплави легко піддаються обробці різанням та тиском. Найбільш поширені з них сплави систем Cu – Ni – Fe (куніфе), Cu – Ni – Co (куніко) та Co – Fe – V (вікалой), що мають такі властивості: $H_c=30\dots 45$ кА/м, $B_r=0,5\dots 0,6$ Тл, $W_{\max}=6,5\dots 9$ кДж/м³.

Деформівні магнітні сплави мають високу вартість, тому використовуються головним чином для виготовлення мініатюрних магнітів у електровимірювальних приладах.

Порошкові магніти поділяються на дві групи за технологією виготовлення. Їх одержують за технологією порошкової металургії з розмелених литих сплавів (металокерамічні магніти) або шляхом пресування металевих порошків з органічною зв'язкою з наступною витримкою для полімеризації. Магнітні властивості порошкових магнітів дещо нижчі, ніж литих, але вони більш технологічні, що дозволяє знизити кількість відходів, та мають більш високу міцність. Використовуються для невеликих та точних за розмірами магнітів.

Магнітно-тверді ферити одержують з оксидів барію та кобальту за такою технологією, що й магнітно-ніякі. Такі ферити мають досить високі магнітні характеристики: $H_c=120\dots 210$ кА/м, $B_r=0,2\dots 0,35$ Тл, $W_{\max}=3,5\dots 10$ кДж/м³.

Барієві ферити випускаються двох видів: ізотропні (БІ) та анізотропні (БА). При виготовленні анізотропних феритів пресування ведеться в орієнтованому магнітному полі. Барієві ферити характеризуються високою стабільністю щодо впливу зовнішніх магнітних полів і не бояться тряски і ударів. Питомий електричний опір барієвих феритів складає $10^4\dots 10^7$ Ом /м, тобто в 10^6 вище литих металевих магнітно-твердих сплавів, тому їх можна

використовувати і на високих частотах. За вартістю вони майже в 10 разів дешевше магнітів з ЮНДК24. Недоліком їх є низька механічна міцність, велика крихкість і сильна залежність магнітних властивостей від температури; вони виявляють необоротну зміну магнітних властивостей при охолодженні нижче -60°C .

Стронцієві ферити за фізичними і магнітними властивостями подібні барієвим феритам, але вони характеризуються кращою технологічністю у виготовленні. Кобальтові ферити відрізняються від барієвих більш високою температурною стабільністю, але вартість їх вище. Перспективними є ферити на основі рідкоземельних металів, магнітна потужність яких $W_{\text{вах}}=10^4$ кДж/м³. Це значення потужності на наш час максимальне для усіх магнітно-твердих матеріалів.

8.5 Тонкі магнітні плівки

Магнітні плівки являють собою шари магнітного речовини товщиною 0,1...1 мкм, нанесені на немагнітну підкладку (скло, ситалл, кварцові пластини, немагнітні метали) методами вакуумного термічного випаровування, катодного або іонно-плазмового розпилення. В якості магнітного матеріалу плівок застосовуються сплави Fe – Ni, Fe – Ni – Co, Mn – Ві і ін. Якщо нанесення плівки на підкладку проводиться в постійному магнітному полі, діє в площині плівки, то плівка набуває одноосьовим магнітну анізотропію з віссю легкого намагнічування, спрямованої уздовж поля. Плівка з одноосною магнітною анізотропією, намагнічена уздовж осі легкого намагнічування, має прямокутну петлю гістерезису з двома стійкими станами +Vr і -Vr при Vr/Vs = 0,9. При намагнічуванні плівки уздовж осі важкого намагнічування гістерезис не має місця.

Інтерес до магнітних плівок обумовлений тим, що на їх основі можуть бути розроблені запам'ятовуючі пристрої (ЗП) для ЕОМ, які мають низку переваг перед ЗП на феритових осердях. До таких переваг, зокрема, належать такі: перемагнічування плівок вимагає набагато меншою енергії, ніж перемагнічування осердь; трудомістка операція створення і з'єднання окремих осердь замінюється напиленням одночасно більшої кількості осередків з усіма необхідними шинами і з'єднаннями; використання когерентного обертання вектора намагніченості в одночасних по товщині плівках дозволяє помітно збільшити швидкодію ЗП.

Магнітні плівки з циліндричними магнітними доменами (ЦМД) являють собою монокристалічну магнітну плівку завтовшки $0,1 \dots 10 \mu\text{м}$, нанесену на підкладку з магнітною монокристалічною структурою. Якщо площина плівки перпендикулярна осі легкого намагнічування, то у відсутності зовнішнього магнітного поля в плівці виникає лабіринтова доменна структура, в якій домени (темні і світлі на рис 8.11, б) мають протилежну спрямованість намагніченості J_s (рис. 8.11, а).

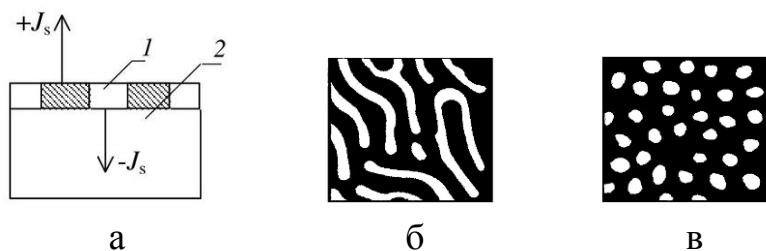


Рисунок 8.11. – Схема виникнення ЦМД в монокристалічних плівках: а - поперечний розріз плівки (1 – магнітна плівка; 2 – монокристалічна немагнітна підкладка J_s – напрямком намагніченості доменів); б – лабіринтна структура плівки, в – циліндричні магнітні домени, що виникають під дією зовнішнього магнітного поля H

Зовнішнє магнітне поле, перпендикулярне площині плівки, змінює геометрію доменної структури. При включенні зовнішнього магнітного поля H певної величини, магнітні домени, в яких намагніченість J_s збігається з напрямком зовнішнього поля H , будуть збільшуватися, а з протилежного зменшуватися. У міру збільшення напруженості поля спочатку відбувається розрив лабіринтової структури, а потім утворюються циліндричні магнітні домени (ЦМД), або «магнітні бульбашки» (рис. 8.11, в).

При подальшому збільшенні H розмір ЦМД буде зменшуватися, а при деякому критичному значенні напруженості зовнішнього поля циліндричні домени зникають і вся плівка стає однорідно намагніченою. Якщо в площині плівки створити неоднорідне магнітне поле, то можна переміщати ЦМД під дією цього поля. В даний час розроблені способи, що дозволяють генерувати і знищувати домени, керувати їх переміщенням, фіксувати їх наявність або відсутність в заданій точці. Це аналогічно відповідно запису, передачі, зберіганню і стиранню інформації. Для спрямованого переміщення ЦМД можна використовувати послідовність струмових імпульсів, що подаються в систему провідників; зовнішні магнітні поля, які обертаються і переміщують

ЦМД по пермалоевим плівкам; взаємодію пульсуючого ЦМД з пермалоевими плівковими структурами; пермалоеві аплікації і синусоїдальний струм.

Зчитування інформації здійснюється за допомогою датчиків Холла, магніторезисторів або оптичних датчиків. Принцип дії останніх заснований на поляризації світла, що проходить через датчик.

Вперше циліндричні магнітні домени були виявлені в монокристалах ортофериту з хімічною формулою MeFeO_3 , де Me – тривалентний іон ітрію чи рідкоземельного елементу. Діаметр ЦМД, отриманий в епітаксійних плівках ортоферитів, становить близько 10мкм, що обмежує застосування їх в запам'ятовуючих пристроях через великі розміри доменів.

Менші розміри доменів (1...5мкм) одержані в монокристалах фериту-граната складу $\text{Me}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, де Me – елемент Y або рідкоземельні метали Sm, Eu, Ho, Er. Методом епітаксійного вирощування плівок з рідкої фази отримують плівки площею до 40 см² з коерцитивної силою H_C близько 24 А/м і розміром ЦМД 1мкм. В якості підкладки при цьому застосовують немагнітний монокристал гадоліній-галієвого граната ($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$). Для виготовлення монокристалічних плівок з ЦМД застосовують також гексаферити $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ і ферошпінелі $\text{Mg}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_3$.

При діаметрі доменів близько 5мкм при виготовленні пермалоевих структур (аплікацій) для управління і реєстрації ЦМД використовуються методи фотолітографії. При цьому в запам'ятовуючих пристроях щільність запису інформації становить приблизно $10^5 \dots 10^6$ біт/см². При використанні матеріалів з розміром доменів близько 1мкм щільність запису доходить до 10^7 біт/см². Але при цьому необхідно застосовувати методи електронно-променевої літографії для отримання необхідних розмірів елементів схем.

В аморфних магнітних плівках на основі сплавів перехідних металів з рідкоземельними елементами (сплави типу Gd – Co, Gd – Fe) одержані ЦМД з діаметром доменів менше 1мкм, що дозволяє отримати щільність запису інформації до 10^9 біт/см².

Контрольні запитання та завдання

1. На які групи поділяються матеріали за магнітними властивостями?
2. Охарактеризуйте процеси намагнічування та перемагнічування феромагнітного матеріалу.
3. Що називається петлею гістерезису?
4. Що називається основними характеристиками магнітних властивостей?

5. Які фактори впливають на магнітні характеристики феромагнітних матеріалів?
6. Які матеріали називають магнітно-м'якими?
7. Охарактеризуйте низькочастотні магнітно-м'які матеріали.
8. Як маркуються електротехнічні сталі?
9. Які магнітно-м'які матеріали використовуються на високих частотах?
10. Які основні магнітні характеристики магнітно-твердих матеріалів?
12. Які матеріали відносять до магнітно-твердих? Де вони застосовуються?

9. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

9.1. Класифікація матеріалів за електричними властивостями

Усі речовини залежно від їх електричних властивостей поділяють на провідники, напівпровідники та діелектрики. Ця класифікація враховує величину питомого електричного спору речовини, характер залежності його від температури та тип провідності.

Провідники – це матеріали з питомим опором $10^{-8} \dots 10^{-5}$ Ом.м., який збільшується із зростанням температури. Їх використовують для провідників змінного та постійного струму, резисторів, нагрівальних елементів, контактів тощо.

Напівпровідники мають електричний опір $10^{-5} \dots 10^8$ Ом.м, що зменшується при підвищенні температури. Напівпровідники використовують для випрямлення, посилення електричних сигналів, перетворення різних видів енергії у електричну та ін.

Діелектрики мають дуже великий електричний опір ($10^8 \dots 10^{16}$ Ом.м), який також зменшується із збільшенням температури. Ці матеріали використовують як ізолятори.

Фізичну природу електропровідності, зокрема вид вільних носіїв зарядів та характер залежності електричної провідності від температури можна пояснити за допомогою зонної теорії твердих тіл.

9.2. Зонна теорія твердих тіл

Зонна теорія – це теорія руху валентних електронів у періодичному полі кристалічних решіток.

Згідно з принципом Паулі електрон в ізольованому атомі може знаходитись на певних енергетичних рівнях, тобто значення його енергії дискретні і визначаються силами притягнення електронів до ядра і силами відштовхування від інших електронів.

Картина енергетичної структури твердого тіла порівняно з ізольованим атомом є суттєво іншою. Так, при зближенні ізольованих атомів і утворення з них кристалу, що складається з N атомів, кожний окремий атом взаємодіє з своїми сусідами, що приводить до появи в кристалі N близько розміщених один від одного підрівнів, які утворюють енергетичну зону.

Найбільший вплив поле решітки чинить на зовнішні валентні електрони атомів. Тому стани цих електронів в кристалі відчувають найбільші зміни, а енергетичні зони, які утворені з енергетичних рівнів цих електронів, виявляються найбільш широкими.

Внутрішні ж електрони, які сильно зв'язані з ядром, відчувають лише незначні збудження від інших атомів, внаслідок чого їх енергетичні рівні в кристалі залишаються практично такими ж вузькими, як і в ізольованих атомах. На рис. 9.1 схематично наведена картина утворення енергетичних зон в кристалі із дискретних атомних рівнів.

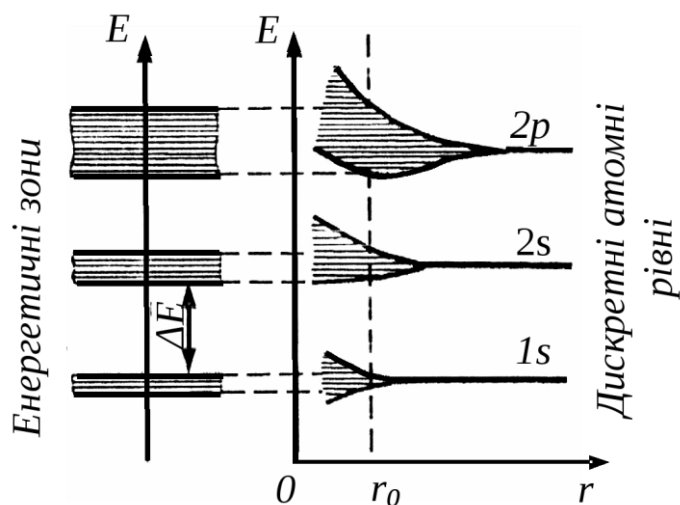


Рисунок 9.1. – Утворення енергетичних зон у кристалі

Таким чином, процес утворення твердого тіла супроводжується розщепленням енергетичних рівнів у енергетичні зони.

Для реальних мікроскопічних об'ємів кристала відстань між енергетичними рівнями не перевищує 10^{-33} Дж. При кімнатній температурі енергія, яку атоми можуть одержати від теплових коливань решітки, становить $\sim 10^{-28} \dots 10^{-27}$ Дж. Тому електрони можуть вільно переходити з одного енергетичного рівня у межах зони на інший, а енергетичні зони вважаються безперервними.

Електрони у ізольованому атомі прагнуть зайняти рівні з мінімальною енергією; верхні енергетичні рівні залишаються вільними. Відповідно до цього не всі енергетичні зони твердого тіла заповнені електронами. Найвищу із заповнених зон називають *валентною зоною*, а найнижчу із вільних зон – *зоною провідності*. Енергетичні зони, подібно енергетичним рівням ізольованого атома, відокремлені одна від одної областями значень енергії, яку не можуть мати електрони даного типу атомів, – *забороненими зонами*. Енергетичні діаграми твердих кристалічних тіл наведені на рис. 9.2.

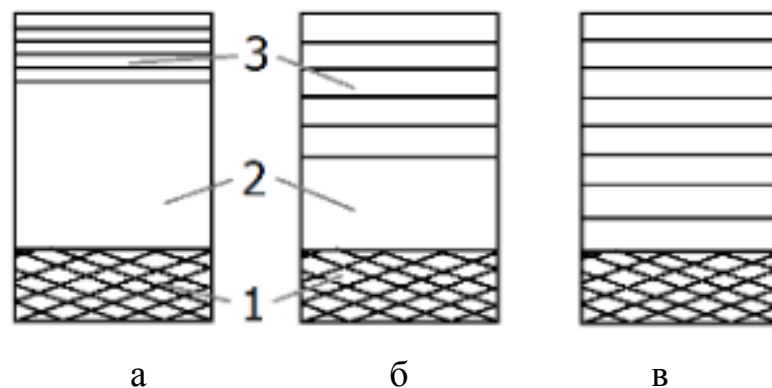


Рисунок 9.2. – Енергетичні діаграми для діелектриків (а), напівпровідників (б) та провідників (в) при абсолютному нулі: 1 – валентна зона; 2 – заборонена зона; 3 – зона провідності.

В кристалах неметалів (рис. 9.2, а, б) валентні зони заповнені повністю і відокремлені від зони провідності, у якій є вільні підрівні, широкою забороненою зоною. З точки зору зонної теорії різниця між діелектриками та напівпровідниками чисто кількісна і полягає у ширині забороненої зони.

Ширина забороненої зони – це різниця між нижнім рівнем зони провідності і верхнім рівнем забороненої зони. У діелектриків ширина

забороненої зони велика – $\Delta E = (5...15) \cdot 10^{-19}$ Дж (рис. 9.2, а). Таку зону електрони здолати не можуть, тому у діелектриків немає електронної провідності. До напівпровідників відносять речовини з шириною забороненої зони $\Delta E \leq 5 \cdot 10^{-19}$ Дж (рис. 9.2, б). При нагріванні відбувається термічне збудження електронів. Деяка частина електронів стає здатною здолати зони заборонених енергій і вийти у вільну зону. З'являється електрична провідність, яка збільшується із зростанням зовнішнього енергетичного впливу.

На відміну від неметалів, у металів розщеплення відповідних енергетичних рівнів відбувається таким чином, що повністю або частково заповнена валентна зона і повністю вільна зона провідності перекриваються і утворюють одну спільну зону, в якій кількість енергетичних станів перевищує кількість електронів (рис. 9.2, в). Електрони таких зон беруть участь у електропровідності.

Домішки та дефекти кристалічної будови суттєво впливають на електричні властивості твердих тіл. Наявність дефектів вносить локальні зміни у ширину забороненої зони, що викликає локальне підвищення електропровідності. З певним припущенням зонну теорію можна застосовувати для твердих тіл з аморфною або частково кристалічною будовою (бетон, кераміка, скло, пластмаси).

9.3. Електричні властивості діелектриків

Електричні властивості діелектричного матеріалу разом з механічними властивостями визначають область його застосування.

Характерною особливістю будь-якого діелектрика є його здатність поляризуватися в електричному полі. Сутність процесу поляризації полягає у зміщенні зв'язаних електричних зарядів під дією зовнішнього електричного поля. Зміщені заряди утворюють власне внутрішнє електричне поле, яке направлено назустріч зовнішньому. Здатність діелектрика до поляризації характеризує відносна *діелектрична проникність* ϵ .

Ця величина являє собою відношення заряду Q , одержаного при деякому напруженні на конденсаторі, до заряду Q_0 , який можна було б одержати у конденсаторі такого ж розміру і при тому ж напруженні, якби між електродами знаходився б вакуум:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_D}{Q_0} = 1 + \frac{Q_D}{Q_0} \quad (9.1)$$

З цього рівняння витікає, що відносна діелектрична проникність будь-якої речовини більше одиниці.

Враховуючи, що при постійній напрузі заряд конденсатора залежить від його ємності, діелектричну проникність ϵ може визначити як відношення ємності конденсатора з даним діелектриком до ємності конденсатора тих же розмірів, діелектриком якого є вакуум:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C_D U}{C_0 U} = \frac{C_D}{C_0} \quad (9.2)$$

За значенням ϵ пасивні діелектрики поділяють на *ізоляційні* ($\epsilon \leq 12 \dots 15$) та *конденсаторні* ($\epsilon \leq 10^4$).

Найбільш важливими видами поляризації є електронна, іонна, дипольна та спонтанна (рис. 9.3).

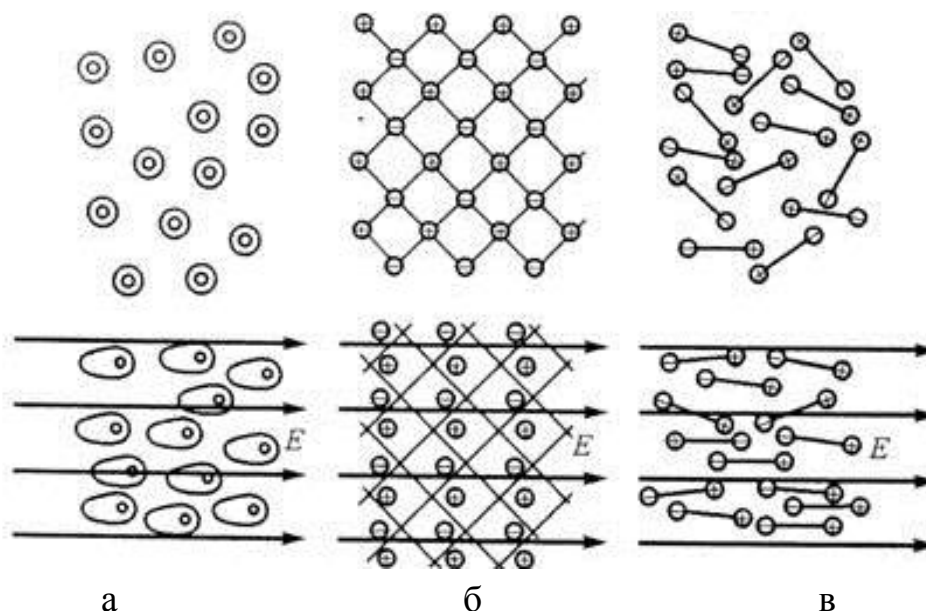


Рисунок 9.3. – Види поляризації діелектриків: електронна (а), іонна (б) та дипольна (в).

Електронна поляризація являє собою пружне зміщення електронних оболонок під дією поля (рис. 9.3,а). Відбувається вона практично миттєво ($10^{15} \dots 10^{-14}$ с) і тому практично не залежить від частоти. Цей вид поляризації характерний для усіх діелектриків. Якщо діелектрик поляризується за електронною схемою, то $\epsilon \approx 2 \dots 3$. При нагріванні об'єм діелектрика збільшується, густина зарядів відповідно знижується і тому із зростанням температури електронна поляризація зменшується.

Іонна поляризація (рис. 9.3. б) характерна для речовин з іонною будовою кристалічної решітки (слюда, скло, кераміка). Цей вид поляризації обумовлений зміщенням іонів від положень рівноваги на відстані, не перевищуючі міжіонні. Час встановлення іонної поляризації дуже невеликий ($\sim 10^{-13}$ с) і тому вона також не залежить від частоти. Діелектрична проникність дорівнює 4...8, з підвищенням температури зростає. Це пов'язано із зниженням притягування між іонами і збільшенням їх зміщення.

Найбільш сильно підвищується поляризація, коли іони починають зміщуватися на відстані, які перевищують міжіонні. У такому випадку поляризація встановлюється повільно – за 10^{-5} ... 10^{-3} с, залежить від частоти і називається *іонно-релаксаційною*.

Дипольна поляризація (рис.9.3, в) відбувається у речовинах, які мають молекулярну будову з полярними молекулами (вода, касторове масло, полімери – полівінілхлорид, фторопласт-4). Дипольна поляризація являє собою розворот дипольних молекул або полярних радикалів під дією поля. Вона з'являється та виникає значно повільніше, ніж електронна або іонна поляризація (10^{-8} ... 10^{-2} с).

Характер зміни дипольної поляризації при нагріванні визначається співвідношенням міжмолекулярного притягування та теплового руху. Послаблення притягування полегшує орієнтацію диполів, а посилення теплового руху їй заважає. У зв'язку з цим поляризація спочатку збільшується до деякого максимуму, а потім зменшується. Дипольна поляризація пов'язана з розсіювання енергії, тобто з виділенням тепла.

Спонтанна поляризація характерна тільки для одного класу діелектриків – сегнетоелектриків. При температурах, які не перевищують температуру Кюрі, об'єм сегнетоелектрика розділений на області (домени), які самочинно поляризовані до насичення. У відсутності поля домени розташовані безладно, і сумарна поляризація дорівнює нулю. Зовнішнє електричне поле у таких матеріалах викликає розворот та переорієнтацію доменів у напрямку поля, що дає ефект дуже сильної поляризації. Температурна залежність ϵ від температури має один чи декілька максимумів. Цій вид поляризації також супроводжується значним розсіюванням енергії.

Електрична провідність діелектриків обумовлена наявністю деякої кількості вільних носіїв зарядів. Як відомо, ширина забороненої зони діелектриків перевищує $5 \cdot 10^{-19}$ Дж. Навіть у сильному електричному полі ($\sim 10^6$ В/м) електрон набуває енергію лише $\sim 10^{-21}$ Дж, якої недостатньо для здолаття забороненої зони. Тому діелектрики не можуть проводити

електричний струм за рахунок власних електронів. Електрична провідність діелектриків пов'язана з недовершеністю їх будови і наявністю невеликої кількості вільних або слабо зв'язаних носіїв зарядів, переважно іонів.

Електрична провідність діелектриків оцінюється питомим об'ємним ρ_v [Ом·м] та питомим поверхневим опором ρ_s [Ом].

Питомий об'ємний опір ρ_s – це опір куба даного діелектрика з ребром 1 м за умовою протікання струму вздовж ребра куба.

Питомий поверхневий опір характерний лише для твердих діелектриків і дорівнює квадрату поверхні діелектрика, коли струм тече паралельно одній із сторін.

Діелектричними втратами називають потужність, яку розсіює діелектрик у електричному полі і яка іде на його нагрівання. Діелектрик розсіює електричну потужність як у постійному, так і у змінному електричному полі, але при частотах більше 20 кГц величина втрат стає одним з найважливіших параметрів діелектрика.

У постійному полі потужність P , яку розсіює діелектрик, дорівнює

$$P = IU = \frac{U^2}{R}, \quad (9.3)$$

де R – електричний опір діелектрика, Ом.

У змінному електричному полі ідеальний діелектрик зручно представляти як конденсатор, у якому відсутній струм витоку. За таких умов кут зсуву фаз α між струмом та напругою становить 90° і тому потужність P , що розсіюється діелектриком, дорівнює нулю:

$$P = IU \cdot \cos \alpha = IU \cdot \cos 90^\circ = 0, \quad (9.4)$$

тобто у ідеальному діелектрику діелектричних втрат немає.

У реальному діелектрику існує струм витоку, а кут зсуву фаз між струмом та напругою відрізняється від 90° на кут δ , що називається кутом діелектричних втрат (рис. 9.4).

Формула діелектричних втрат реального діелектрика набуває вид:

$$P = UI_a = UI_c \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega \epsilon_0 \epsilon \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (9.5)$$

де U – напруга, В;

ω – кутова частота, Гц; $\omega = 2\pi f$;

$\operatorname{tg} \delta$ – характеристика здатності діелектрика до розсіювання потужності у електричному полі.

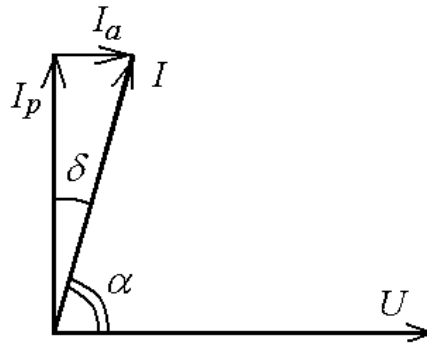


Рисунок 9.4. – Векторна діаграма реального діелектрика: I_a – активний струм, I_p – реактивний струм.

Аналіз цієї формули свідчить, що для роботи у високочастотних полях потрібно застосовувати матеріали з низькими значеннями ϵ та $\text{tg}\delta$. Для високочастотних діелектриків значення $\text{tg}\delta$ не повинні перевищувати 0,001, для низькочастотних $\text{tg}\delta = 0,001 \dots 0,1$. Добуток $\epsilon \cdot \text{tg}\delta$, що називається коефіцієнтом діелектричних втрат, є важливою характеристикою діелектричних матеріалів.

До основних джерел втрат у діелектрику належать його поляризація і електропровідність, іонізація газів у порах та неоднорідність структури, що викликана наявністю домішок та дефектів будови.

Електрична міцність діелектриків характеризує їх здатність протистояти електричному пробою. Пробій – це втрата діелектриком ізолюючих властивостей внаслідок проходження через нього великого струму. Електричною міцністю або пробивною напруженістю $E_{пр}$ називають відношення напруги $U_{пр}$, що викликала пробій, до товщини діелектрика h у місці пробою:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \text{ [В/м]} \quad (9.6)$$

За механізмом виникнення розрізняють три види пробою: електричний, електрохімічний та тепловий.

9.4. Активні діелектрики

Сегнетоелектрики – це діелектричні матеріали, що мають спонтанну поляризацію, напрямок якої може бути змінено за допомогою зовнішнього електричного поля. Вперше спонтанна поляризація була виявлена в кристалі

сегнетової солі ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) і тому матеріали, що мають ефект спонтанної поляризації називають сегнетоелектриками.

При температурах, які не перевищують температуру Кюрі, об'єм сегнетоелектрика розділений на області (домени) розміром $0,01 \dots 1 \mu\text{м}$, які самочинно поляризовані до насичення. У відсутності поля домени розташовані безладно, і сумарна поляризація дорівнює нулю. Зовнішнє електричне поле у таких матеріалах викликає розворот та переорієнтацію доменів у напрямку поля, що дає ефект дуже сильної поляризації. Тому сегнетоелектрики мають дуже великим значенням діелектричної проникності ϵ . Для сегнетоелектриків характерні такі основні властивості:

1. Високе і надвисоке значення діелектричної проникності, яке може досягати величини 10^5 .

2. Нелінійна залежність діелектричної проникності від напруженості електричного поля (рис. 9.5).

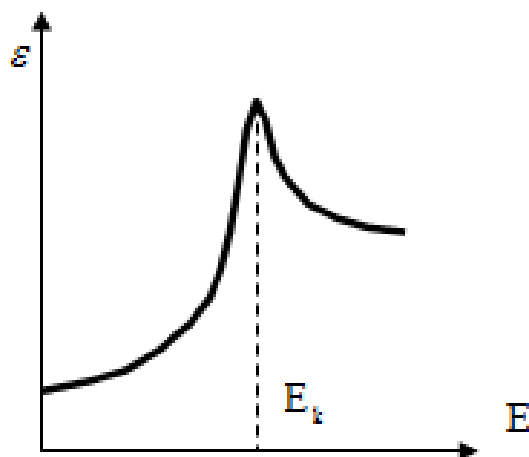


Рисунок 9.5. – Залежність діелектричної проникності сегнетоелектрика від напруженості електричного поля

Сегнетоелектрики поділяються на матеріали з високою та низькою нелінійністю. Нелінійність характеризується коефіцієнтом нелінійності k :

$$k = \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\min}}, \quad (9.7)$$

де ϵ_{\min} — діелектрична проникність матеріалу, що визначається у слабких полях ($E=2 \dots 5 \text{ В/м}$);

ϵ_{\max} — максимальне значення діелектричної проникності при підвищенні температури.

3. Сильна залежність діелектричної проникності від температури з максимум при певній температурі T_K , званій точкою Кюрі. Вище цієї температури сегнетоелектрик переходить в параелектричний стан (рис.20.6). Перехід сегнетоелектрика в параелектричний стан супроводжується різким зменшенням $\text{tg}\delta$. Значення точки Кюрі для різних сегнетоелектриків знаходяться в межах $-170^\circ\text{C} \dots +1200^\circ\text{C}$.

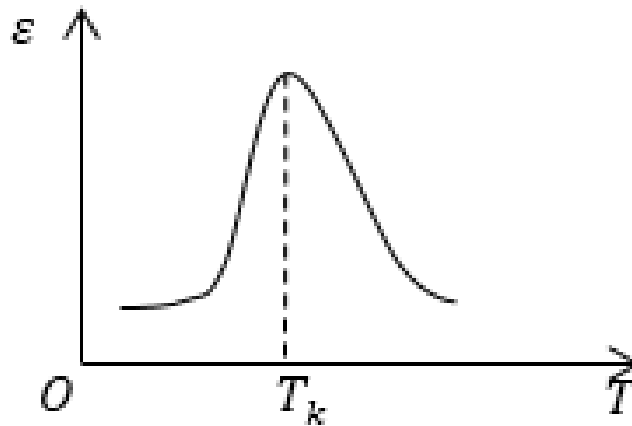


Рисунок 9.6. – Залежність діелектричної проникності сегнетоелектрика від температури для матеріалів з великою нелінійністю

4. Досить різко виражена залежність ϵ і $\text{tg}\delta$ від частоти, особливо в області надвисоких частот.

5. Наявність діелектричного гістерезису, який обумовлений відставанням поляризації від прикладеного поля (рис. 9.7). Площа гістерезисної петлі пропорційна енергії, що розсіюється в діелектрику за період. Внаслідок втрат на гістерезис сегнетоелектрики характеризуються великою $\text{tg}\delta$, що доходить до 0,1.

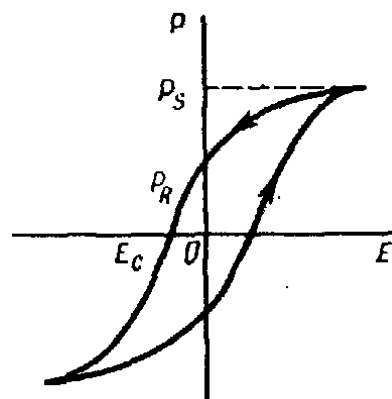


Рисунок 9.7. – Петля гістерезису сегнетоелектрика

З рис. 9.7 видно, що при певному значенні напруженості E поляризація досягає насичення P_s . Якщо після досягнення насичення поле зменшується до нуля, то зберігається поляризація P_R , звана залишковою. Для того, щоб цю поляризацію звести до нуля, необхідно прикласти зовнішнє поле зворотного напрямку. Це поле E_c називають коерцитивною силою. Залишкова поляризація і коерцитивна сила залежать як від природи матеріалу, так і від чинників, що впливають на рух доменних стінок, – розмірів кристалітів, домішок, дефектів.

За типом хімічного зв'язку і фізичним властивостям усі сегнетоелектричні матеріали підрозділяють на дві групи: іонні кристали; дипольні кристали.

Сегнетоелектричні матеріали застосовуються для виготовлення різних компонентів і пристроїв радіоелектронних засобів: малогабаритних низькочастотних конденсаторів з великою питомою ємністю, варикондів – електрично керованих конденсаторів, електрооптичних кристалів для генерації, модуляції, відхилення і перетворення частоти лазерного випромінювання.

П'єзоелектрики — речовини, у яких під дією механічних напружень виникає поляризація (прямий п'єзоэффект) або під дією електричного поля змінюються розміри (зворотний п'єзоэффект). Отже, п'єзоелектрики є електромеханічними перетворювачами, що перетворюють механічну енергію в електричну і навпаки.

До п'єзоелектриків відносяться поляризовані сегнетоелектрики із залишковою поляризацією, а також кристали, що не мають центра симетрії. В основі п'єзоэффекту лежить зсув іонів у кристалічних ґратах при пружній деформації. П'єзоэффект є анізотропним і характеризується п'єзомодулем – зарядом, що з'являється на поверхні пластин п'єзоелектрика під дією одиничної сили:

$$q = \sigma d \quad (9.8)$$

де q – заряд, який припадає на одиницю площі ($q = Q/s$);

σ – механічне напруження в перетині діелектрика;

d – п'єзомодуль, значення якого залежить від виду п'єзоелектрика і становить $10^{-11} \dots 10^{-12}$ Кл/Н.

Розрізняють поздовжній і поперечний п'єзоелектричні ефекти. При поздовжньому п'єзоэффекті заряди або механічна деформація виникають на протилежних гранях п'єзопластинки в напрямку прикладеного механічного зусилля або електричного поля відповідно. При поперечному п'єзоэффекті

заряди або деформація виникають в напрямку, перпендикулярному напрямку механічних зусиль або прикладеного електричного поля відповідно. Звичайно вимірюють так званій поздовжній п'єзомодуль d_{33} по заряду на поверхні, перпендикулярній напрямку поляризації, коли навантаження прикладене перпендикулярно цієї ж поверхні.

При поздовжньому п'єзоєфекті утворюються хвилі стиснення і розтягування (поздовжні хвилі), а при поперечному п'єзоєфекті зсувні коливання (поперечні хвилі). Максимальна амплітуда механічних коливань буде в тому випадку, коли частота змінного електричного поля буде дорівнює власній (резонансній) частоті п'єзоелектрика, яка визначається за формулою

$$f_{\text{рез}} = \frac{V}{h}, \quad (9.9)$$

де h – товщина пластини п'єзоелектрика;

V – швидкість поширення механічних хвиль.

Швидкості поширення поздовжньої V_i і поперечної V_t хвиль визначається з виразів

$$V_i = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad V_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (9.10)$$

де E , G – модуль пружності і модуль зсуву п'єзоелектрика;

ρ – густина.

Оскільки модуль зсуву $G < E$, то $V_t < V_i$. Величини цих швидкостей пов'язані співвідношенням $V_i = V_t \sqrt{2(1 + \mu)}$, де μ – коефіцієнт Пуассона.

П'єзоелектричний ефект спостерігається в кристалічних матеріалах з іонним або ковалентним зв'язком, що не мають центру симетрії. Крім того, хорошими п'єзоелектричними властивостями володіють п'єзоелектрики з високим питомим опором, тому що в провідних матеріалах поляризація компенсується вільними носіями заряду. В даний час відома дуже велика кількість матеріалів, (в тому числі всі сегнетоелектрики), що володіють п'єзоелектричними властивостями. Все п'єзоелектрики за структурою можна поділити на монокристалічні і полікристалічні.

До монокристалічних п'єзоелектриків відносяться кристали кварцу SiO_2 ; п'єзоелектрики на основі іонних сегнетоелектриків, наприклад, ниобата літію LiNbO_3 , танталату літію LiTaO_3 , германату вісмуту $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ і на основі дипольних сегнетоелектриків: сульфату літію $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, дигідрофосфату амонію NH_4PO_4 і інші.

Кварц є найбільш вживаним п'єзоелектричним матеріалом, що зберігає свої властивості до 573°C, вище якої п'єзоелектричні властивості зникають, так як структура його переходить в симетричну β -форму.

Плоскопаралельна пластина з кварцу з нанесеними електродами є п'єзоелектричним резонатором, де частота власних коливань зворотно пропорційна товщині пластини. Кварцові резонатори з власною резонансною частотою вище 10 МГц виготовити важко з огляду на те, що пластини товщиною менше 0,2 мм мало міцні. Тому в резонаторах на більш високих частотах використовують непарні гармоніки $3f$, $5f$ і т.д. Завдяки високій добротності кварцові резонатори широко використовують для стабілізації і еталонування частоти генераторів. Кварц і сегнетоелектрики на основі ніобата і танталу літію застосовуються в якості електричних фільтрів на поверхневих акустичних хвилях (ПАХ).

Полікристалічні п'єзоелектрики одержують на основі керамічних сегнетоелектриків поляризацією їх в сильному електричному полі при температурі, близькій до ТК. З п'єзокераміки можна виготовити п'єзоелементи будь-якої форми і розмірів з можливістю збудження в них як поздовжніх, так і поперечних акустичних коливань.

У полімерних плівках властивості п'єзоелектрика з'являються після створення в матеріалі системи «сидячих» зарядів завдяки орієнтації диполів або обробці поверхні високоенергетичним потоком електронів. Для практичного застосування таких матеріалів потрібна стабільність вихідних характеристик, щоб час напіврозпаду був би не менше декількох років. Витік зарядів через малий, але не рівної нулю об'ємної провідності або повільна релаксація орієнтованих диполів зменшують вихідні значення п'єзомодулів. П'єзокераміку широко використовують в якості п'єзоперетворювачів для об'ємних ультразвукових ліній затримки, потужних ультразвукових випромінювачів для цілей гідроакустики, дефектоскопії, механічної обробки матеріалів, для очищення поверхонь деталей перед нанесенням різних покриттів. П'єзокерамічні датчики застосовують в якості датчиків тиску, деформацій, вібрацій.

Плівкові п'єзоелектрики одержують на основі монокристалічних сполук AlN, ZnS, CdS, CdSe і окису цинку ZnO з певною кристалографічною орієнтацією. П'єзоелектричними властивостями володіють також деякі полімерні матеріали у вигляді механічно орієнтованих і поляризованих в електричному полі плівок. Найкращими п'єзоелектричними властивостями володіють плівки, на основі полівініліденфториду (ПВДФ) зі структурною

формулою $\text{CH}_2\text{-CF}_2$. Застосування полімерних плівок із п'єзоелектричними властивостями обходиться дешевше й має технологічні переваги при виготовленні датчиків з великою робочою поверхнею. Висока чутливість плівок до стиску став основою для їхнього застосування в датчиках тиску, акселерометрах, а також у датчиках, що працюють у рідких середовищах (гідроакустична апаратура, медичні прилади).

9.5. Електричні властивості провідників

Провідникові матеріали призначений для передачі електричної енергії та електричних сигналів, а також для розсіювання електричної енергії.

Електрична провідність провідникових матеріалів пов'язана з наявністю в них вільних носіїв електричних зарядів. Розрізняють провідники з електронною провідністю (метали та сплави), проходження струму в яких обумовлене переміщенням електронів, та провідники з іонним типом провідності (рідини-електроліти), протікання струму в яких пов'язане не тільки з переміщенням заряду, а й з масопереносом. Найбільш поширені у техніці провідники першого роду.

До найважливіших параметрів, що характеризують властивості провідникових матеріалів, відносяться:

- 1) питома електрична провідність γ або зворотна величина – питомий електричний опір ρ_v ;
- 2) температурний коефіцієнт електричного опору TK_p (або α_p);
- 3) питома теплопровідність λ ;
- 4) контактна різниця потенціалів та термоелектрорушійна сила (ТЕРС);
- 5) робота виходу електронів з металу;
- 6) границя міцності σ_B та відносне подовження при розриві δ .

Питома електрична провідність та питомий електричний опір пов'язані між собою співвідношенням

$$\gamma = \frac{1}{\rho_v}, \quad (9.11)$$

Електричний опір матеріалу залежить від його складу, структури, кількості дефектів, а також від температури.

В ідеальному металевому кристалі при температурі абсолютного нуля електрони, що забезпечують провідність, рухаються вільно, не зустрічаючи

ніяких перешкод. Опір виникає при температурі, відмінній від нульової, і збільшується з її зростанням, що пов'язано з розсіюванням електронів внаслідок теплових коливань іонів решітки. Домішки та дефекти будови ведуть до збільшення електронного опору реального провідника у порівнянні з ідеальним. Температура нагрівання провідника впливає лише на той опір, що визначається тепловим розсіюванням, домішкове розсіювання залишається постійним.

Для технічних металів та їх сплавів вплив температури нагрівання на електричний опір виражається формулою

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha_\rho T), \quad (9.12)$$

де ρ_T – питомий електричний опір при температурі T , залежить від теплового та домішкового розсіювання;

ρ_0 – питомий опір при 0 К (визначається лише домішковим розсіюванням);

α_ρ – температурний коефіцієнт опору.

Температурний коефіцієнт питомого електричного опору показує відносну зміну опору при зміні температури на 1 К :

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, \quad (9.13)$$

Для більшості технічних металів $\alpha_\rho = 0,004$ К⁻¹, у феромагнетиків, наприклад, у заліза він дещо більший ($0,006$ К⁻¹).

Теплопровідність провідникових матеріалів, тобто їх здатність переносити тепло, як і електрична провідність, обумовлена рухом електронів. Таким чином за однакових умов високу теплопровідність мають метали з високою електропровідністю.

При температурі близькій до нормальної, теплопровідність металів, як правило, залишається постійною і від зміни температури не залежить.

Термоелектрорушійна сила (ТЕРС). При зіткненні двох різних металевих провідників між ними виникає контактна різниця потенціалів. Причина появи цієї різниці потенціалів полягає у відмінності значень роботи виходу електронів з різних металів, а також у тому, що концентрація електронів, отже, і тиск електронного газу у різних металів та сплавів можуть бути неоднаковими.

Розглянемо схему двох ізольованих провідників різних металів А та В, що утворюють замкнене електричне коло. Якщо обидва з'єднання мають однакову температуру ($T_1=T_2$), сума різниць потенціалів у контурі дорівнює

нулю. Коли з'єднання мають різну температуру ($T_1 \neq T_2$), між ними виникає термоелектрорушійна сила :

$$U = k(T_1 - T_2) = k\Delta T, \quad (9.14)$$

де k – постійний для даної пари провідників коефіцієнт ТЕРС.

Ефект виникнення термоЕРС між двома різними провідниками використовується у термопарах, що призначені для вимірювання температур (наприклад, температури двигуна автомобіля або температури нагрівання металу при термічній обробці). У термопарах використовують провідники, що мають великий та стабільний коефіцієнт ТЕРС. Для обмоток вимірювальних приладів та еталонних резисторів застосовують провідникові матеріали, що мають низький коефіцієнт у парі з міддю, щоб запобігти появі у вимірювальних схемах паразитних ТЕРС, які б могли б знизити точність вимірювань.

Механічні властивості провідників характеризуються у першу чергу тимчасовим опором σ_B та відносним подовженням δ , значення яких залежать від складу матеріалу, механічної та термічної обробки та ін. Провідникові матеріали повинні мати достатню міцність та високу пластичність, що пов'язано з необхідністю виготовлення електричних дротів та фольги. Крім того, провідникові матеріали повинні мати високу стійкість проти атмосферної корозії, бути технологічними та економічними.

За своїм призначенням провідникові матеріали поділяються на такі групи:

- 1) метали та сплави високої електричної провідності;
- 2) припої;
- 3) надпровідники;
- 4) контактні матеріали;
- 5) сплави високого електричного опору.

Призначення *матеріалів високої електричної провідності* – передача електричної енергії з мінімальними втратами, тому електричний опір таких матеріалів не повинен перевищувати 0,05 мкОм·м (при $t = 20^\circ\text{C}$).

Найбільш широке застосування серед металів високої провідності мають мідь та алюміній.

Припої – це сплави, що використовуються при паянні металів високої провідності. Для одержання якісного з'єднання припій повинен утворювати з основним металом невеликий перехідний опір, мати нижчу, ніж у цього металу, температуру плавлення, у розплавленому стані добре змочувати його і мати приблизно однаковий з ним коефіцієнт лінійного розширення.

Розрізняють припої для низькотемпературного паяння, що мають температуру плавлення до $t=400^{\circ}\text{C}$, та для високотемпературного з більш високою температурою плавлення. Як правило, високотемпературні припої забезпечують більш високу міцність з'єднання.

Для низькотемпературного паяння застосовують олов'яно-свинцеві та олов'яно-цинкові припої. Припої олов'яно-свинцеві ПОС-61, ПОС-18, ПОС-30, ПОС-40, ПОС-50, ПОС-90 (цифра свідчить про кількість олова у відсотках) застосовуються для паяння дуже тонких дротів з міді та мідних сплавів, а також у тих випадках, коли не можна перегрівати зону паяння. Олов'яно-цинкові припої ПОЦ-90, ПОЦ-40, ПОЦ-60, ПОЦ-70 використовують для паяння алюмінію та його сплавів. У тих випадках, коли температура нагрівання у зоні паяння не повинна перевищувати 100°C , використовують сплави вісмута з оловом, свинцем, кадмієм. Такі припої крихкі і не забезпечують високої міцності з'єднання.

Для високотемпературного паяння використовують мідь, мідно-цинкові і мідно-фосфористі припої, а також припої, що містять срібло.

Електричними контактами називають з'єднання або пристрої, що призначені для пропускання струму з одного провідника у іншій з мінімальними втратами. В електричних ланцюгах контакти з найбільш навантаженими елементами, що визначають надійність системи.

Залежно від характеру роботи контактів вони поділяються на три групи: нерухомі, ковзні, розривні. Нерухомі контакти взагалі не розмикаються під напругою або розмикаються та замикаються дуже рідко. Вони можуть бути нероз'ємними (зварними та паяними) та роз'ємними (штепсельними, затискними). Матеріали нерухомих контактів повинні мати низьке значення перехідного опору, бути стабільними при невисоких контактних зусиллях, мати високу міцність, пластичність, корозійну стійкість. Таким вимогам задовольняють мідь, латунь, олово, благородні метали, цинк.

Ковзні контакти призначені для пропускання струму між рухомим та нерухомим провідниками. Прикладом такого контакту є щітка та колектор електродвигуна. Основні вимоги до матеріалів ковзних контактів такі: високий опір зварюванню, низький перехідний опір, висока корозійна стійкість, висока зносостійкість, висока здатність прироблятися. В електронних машинах колектор виготовляють з мідних пластин, а щітки – з графіту. Застосовуються також мідно-графітові (МГЗ, МГ5) та срібно-графітові (СГЗ, СГ5, цифра – кількість графіту), композиційні матеріали, берилієва бронза, композиції $\text{Ag} - \text{CaO}$ та інші.

Розривні контакти призначені для комутації електричних ланцюгів, що знаходяться під напругою. Це розмикачі, тумблери, реле, рубильники, вимикачі та ін. Матеріали розривних контактів повинні бути стійкими проти електричної та механічної ерозії, проти утворення дуги, мати низький перехідний опір та високу температуру плавлення.

Для слабонавантажених розривних контактів використовують благородні метали (золото, срібло, платину, паладій, іридій) та їх сплави, що мають низький перехідний електричний опір та підвищену стійкість проти окислення. Застосовуються також сплави міді з цинком, сріблом, кадмієм. Для середньонавантажених контактів в основному використовують сплави срібла з кадмієм, іноді – порошкові матеріали, що складаються із срібла та оксиду кадмію. Важконавантажені контакти виготовляють з вольфраму, молібдену та їх сплавів. Ці матеріали здатні працювати не тільки при великому струмі та напрузі, а й в умовах частих переключень. В найбільш потужних контактах використовують порошкові композиції вольфраму з міддю або сріблом.

Сплави високого електричного опору призначені для розсіювання електричної енергії. Їх використовують для прецизійних елементів опору (обмоток потенціометрів, шунтів, котушок опору, тензометричних датчиків), резисторів загального призначення, термопар та нагрівальних елементів.

Підвищений електричний опір мають сплави із структурою твердого розчину. Сплави високого опору повинні також мати малий температурний коефіцієнт електричного опору α_p , високу жаростійкість, малу електрорушійну силу (ТЕРС) у парі з міддю. В більшості випадків сплави високого опору використовують у вигляді дроту або стрічок, тому пластичність їх повинна бути високою.

9.6. Електричні властивості напівпровідників

Велику групу матеріалів з електронним типом провідності, що мають питомий опір $10^{-5} \dots 10^8$ Ом·м, відносять до напівпровідників. Характерною особливістю напівпровідників є дуже сильний вплив зовнішньої енергетичної дії та кількості домішок на величину електричної провідності. Керування електропровідністю шляхом зміни температури, освітлення, напруженості електричного поля, навантаження покладене в основу принципу дії терморезисторів (термісторів), фоторезисторів, нелінійних резисторів (варисторів), тензорезисторів та ін.

Напівпровідникові властивості мають 12 елементів, що утворюють групу простих напівпровідників (табл.9.1), а також багато хімічних з'єднань. Напівпровідникові хімічними з'єднаннями є з'єднання елементів різних груп таблиці Менделєєва, що відповідають загальним формулам $A^N B^M$ (табл. 9.2), де N та M – номери груп, а також складні сполуки і деякі органічні речовини.

Таблиця 9.1. Властивості напівпровідникових елементів

Елемент	Група	Ширина забороненої зони, $\cdot 10^{-19}$ Дж	Елемент	Група	Ширина забороненої зони, $\cdot 10^{-19}$ Дж
Бор	III	1,76	Арсен	V	1,9
Вуглець (алмаз)	IV	8,5	Сурма	V	0,19
Кремній	IV	1,8	Сірка	VI	4
Германій	IV	1,15	Селен	VI	2,7
Олово	IV	0,13	Телур	VI	0,58
Фосфор	V	2,4	Йод	VII	0,2

Таблиця 9.2. Властивості напівпровідникових простих з'єднань

Група	З'єднання	Тип	Ширина забороненої зони, $\cdot 10^{-19}$ Дж	Рухомість електронів, $m^2/(V \cdot c)$	Рухомість дірок, $m^2/(V \cdot c)$
Сульфіди	ZnS	$A^{II}B^{VI}$	5,9	-	-
	PbS		0,58	0,04	0,003
	CdS		3,8	0,02	0,005
Оксиди	ZnO	$A^{II}B^{VI}$	5,1	0,01...0,001	0,0001
	FeO		2,4	0,001	-
	TiO ₂		4/7	0,0001	-
Карбіди	SiC	$A^{IV}B^{IV}$	4,5	0/03	0,003
Фосфіди	AlP	$A^{III}B^{V}$	4,3	-	-
	GaP		3,1	0,011	0,007
	InP		2,2	0,5	0,065
Арсеніди	AlAs	$A^{III}B^{V}$	2,7	-	-
	GaAs		2,4	0,85	0,04

	InAs		1,8	3	0,05
Антимоніди	AlSb		2,2	0,02	0,04
	GaSb		1,1	0,4	0,08
	InSb		0,43	10	0,1

Електропровідність хімічно чистого напівпровідника називається *власною провідністю*. При збудженні у власному напівпровіднику одночасно утворюються два носія зарядів з протилежними знаками, вільний електрон та незавершений зв'язок – дірка (рис. 9.8).

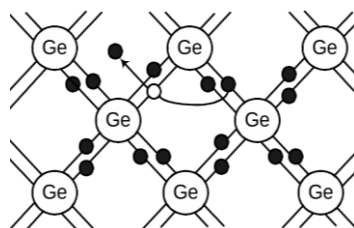


Рисунок 9.8. – Схема ковалентного зв'язку у хімічно чистому германії

У кристалах з ковалентним зв'язком провідність електричного струму може здійснюватися як шляхом переміщення електронів (електронна *n* – провідність), так і шляхом переміщення дірок (дірчаста *p* – провідність). Внаслідок більшої рухомості електронів власна провідність напівпровідників в основному електронна.

Електрична провідність, зумовлена наявністю домішок у напівпровіднику, називається *домішковою провідністю* (рис. 9.9). Домішки елементів V групи обумовлюють електронний тип провідності, тому що віддають у валентну зону напівпровідника чотири валентних електрони, а п'ятий стає носієм електричного струму (рис. 9.9, а). Такі домішки називають донорними. Для германія це арсен та сурма, для кремнію – арсен та фосфор. Напівпровідники в яких переважають донорні домішки, називають електронними або *n*-типу.

Домішки елементів III групи у кремнії та германії визначають дірчастий тип провідності, тому що віддають у валентну зону кристала напівпровідника лише три електрони (рис. 9.9, б). У кристалі утворюються дірки – незаповнені зв'язки, що викликає ряд послідовних переміщень сусідніх електронів. Внаслідок цього дірка переміщується як позитивний заряд. Домішки такого типу називаються акцепторними. Для германія такими домішками є галій та

індій, для кремнію – бор та алюміній. Напівпровідники в яких переважають акцепторні домішки називаються дірчастими або р-типу.

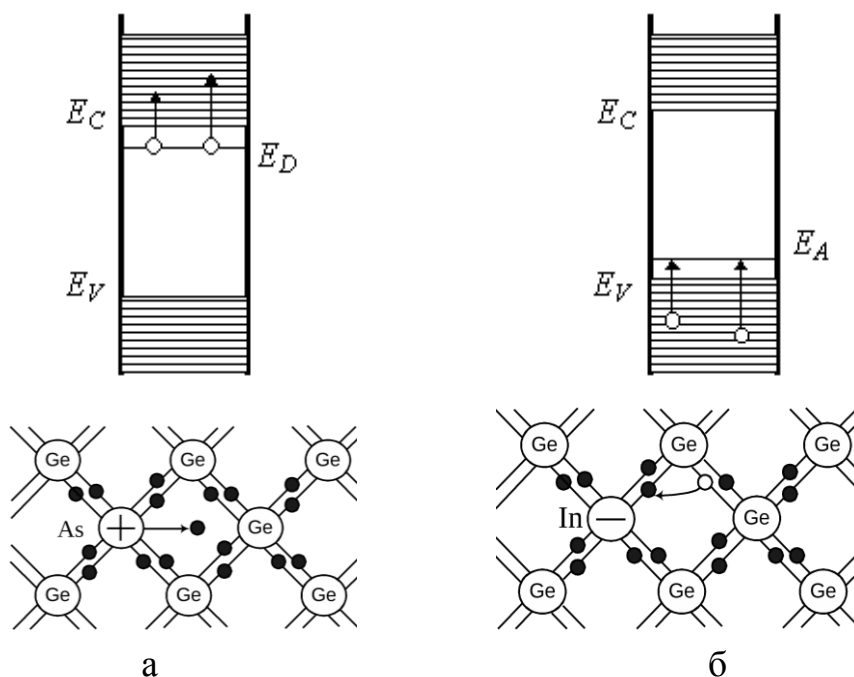


Рисунок 9.9. – Зонні діаграми та схеми ковалентного зв'язку у германії, легованому донорною (а) та акцепторною (б) домішками: E_C – нижня границя зони провідності, E_V – верхня границя валентної зони, E_D – рівень активації донорної домішки, E_A – рівень активації акцепторної домішки

Домішки різко змінюють електричну провідність напівпровідників. Потенціал іонізації у домішок значно менший, ніж у напівпровідників, тому вже при кімнатній температури практично усі атоми домішок іонізовані, а концентрація домішкових носіїв значно перевищує концентрацію власних. Великий вплив на електропровідність має не тільки концентрація домішкових носіїв, а й їх рухомість. Дефекти кристалічної будови, домішки та теплові коливання атомів розсіюють носіїв зарядів, знижуючи їх рухомість, що може привести до неконтрольованих змін електропровідності.

Важливою характеристикою напівпровідників є також час життя домішкових носіїв електричного струму. В напівпровіднику одночасно з процесом виникнення вільних електронів та дірок іде зворотний процес рекомбінації (електрони із зони провідності повертаються у валентну зону, ліквідуючи дірки), тому середня кількість носіїв залишається постійною. Середній час від появи вільного носія до його рекомбінації називається його часом життя. Відстань, яку встигає пройти за цей час носій, називають

дифузійною довжиною. Для стабільної роботи напівпровідникового приладу необхідно, щоб час життя носіїв був не менший 10^{-5} с.

Таким чином, до основних характеристик напівпровідникових матеріалів відносять *електричний опір*, що залежить від *концентрації* та *рухомості носіїв* електричного струму, а також *час життя носіїв* електричного струму. Кожна з цих характеристик визначає властивості напівпровідників і залежить від виду та кількості домішок, а також від наявності дефектів будови. Виходячи з цього, для виготовлення високоякісних приладів необхідні монокристали напівпровідників високої чистоти з довершеною кристалічною будовою. Технологія одержання напівпровідникових матеріалів складається з таких етапів: одержання хімічно чистих кристалів напівпровідників, очищення монокристалів кристалофізичними методами, легування у контрольованих мікродозах та одержання р-п – переходів.

Контрольні запитання та завдання

1. На які групи поділяються матеріали за електричними властивостями ?
2. Які матеріали називаються діелектриками ?
3. Охарактеризуйте електричні властивості діелектриків.
5. Що таке поляризація ? Що характеризує здатність матеріалів до поляризації?
4. Які види поляризації існують ?
5. Чим обумовлена електрична провідність діелектриків?
6. Чи можна використовувати на високих частотах матеріали, що мають такі електричні властивості :

1) $\rho=10^{14}$ Ом.м; $\epsilon=14$; $\text{tg}\delta=0,0001$; $E_{\text{пр}}= 4\text{МВ/м}$.

2) $\rho=10^{20}$ Ом.м; $\epsilon=2,4$; $\text{tg}\delta=0,1$; $E_{\text{пр}}= 2,5 \text{ МВ/м}$.

3) $\rho=10^{16}$ Ом.м; $\epsilon=7,3$; $\text{tg}\delta=0,0003$; $E_{\text{пр}}= 125 \text{ МВ/м}$.

Відповідь поясніть.

7. Які матеріали називають напівпровідниками?
8. Які матеріали називаються провідниковими?
9. Охарактеризуйте властивості провідникових матеріалів.
10. Де застосовуються напівпровідникові матеріали? У чому їх переваги?
11. Що називається власною та домішковою провідністю напівпровідників?

10. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ПРУЖНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Сталі і сплави з високими пружними властивостями знаходять широке застосування в машино- і приладобудуванні. У машинобудуванні їх використовують для виготовлення ресор, амортизаторів, силових пружин різного призначення; в приладобудуванні – для багатьох пружних елементів: мембран, пружин, пластин реле, сильфонів, розтяжок, підвісок і т.п.

10.1 Основні вимоги до пружних матеріалів

Пружини, ресори машин і пружні елементи приладів характеризуються різноманіттям форм, розмірів, різними умовами роботи. Особливість їх роботи полягає в тому, що при великих статичних, циклічних або ударних навантаженнях в них не допускається залишкова деформація. У зв'язку з цим пружинні сплави крім механічних властивостей, характерних для конструкційних матеріалів (міцності, пластичності, в'язкості руйнування, витривалості), повинні мати високий опір малим пластичним деформаціям. В умовах короткочасного статичного навантаження опір малим пластичним деформаціям характеризується межею пружності, при тривалому статичному або циклічному навантаженні – *релаксаційною стійкістю*.

Релаксаційна стійкість оцінюється опором релаксації напружень. Релаксація напружень характеризується зниженням робочих напружень у виробі від σ_1 до σ_2 при заданій пружній деформації ϵ (рис. 10.1).

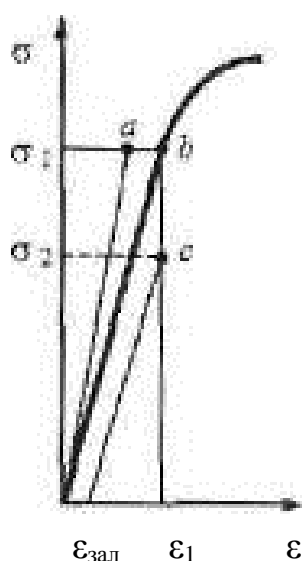


Рисунок 10.1. – Діаграма деформації, що пояснює релаксацію і пружну післядію

Релаксація напружень небезпечна тим, що при переході частини пружної деформації в пластичну ($\epsilon_{\text{зал}}$) пружні елементи після розвантаження змінюють розміри і форму. Наприклад, довгий час стиснута пружина або вигнута пластина реле при знятті навантаження повністю не розпрямляються і втрачають пружні і експлуатаційні властивості.

Релаксація напружень здійснюється шляхом мікропластичної деформації, яка відбувається в окремих зернах і накопичується в часі. При напруженні нижче границі пружності мікропластична деформація може бути викликана вигином дислокацій або зривом окремих з них з місць закріплення при малих напруженнях і переміщеннях загальмованих дислокацій при підвищеному напруженні.

У зв'язку з цим для досягнення в сплаві високої границі пружності і релаксаційної стійкості необхідно створити стабільну дислокаційну структуру, в якій міцно заблоковані не більшість, а практично всі дислокації. Крім того, така структура повинна мати невисокий рівень мікронапружень, які, підсумовуючись з робочими напруженнями, полегшують переміщення дислокацій. Для закріплення дислокацій використовують всі засоби створення ефективних бар'єрів: легування, підвищення щільності дислокацій, виділення дисперсних частинок вторинних фаз. Найбільш сприятливу субструктуру, що забезпечує високі пружні властивості, формує термомеханічна обробка. Її успішно застосовують для всіх пружинних сплавів.

10.2 Матеріали для пружних елементів приладобудування

Пружні елементи приладів, крім високих границь пружності, витривалості і релаксаційної стійкості, повинні мати високу корозійну стійкість, немагнитність, електропровідність.

Одна з найважливіших експлуатаційних вимог – точна і стабільна характеристика. Характеристикою називають залежність деформації ϵ пружного елемента від прикладеної сили P (або напруження) (рис. 10.2). Прикладом характеристики пружини є залежність її опаді від сили стиску; пластини реле – залежність переміщення вільного кінця від діючої на нього сили. Характеристика пружного елемента повинна бути лінійної, інакше не можна забезпечити необхідну точність приладу. Крім того, вона повинна допускати можливе більше пружне переміщення. Чим воно більше при одній і тій же силі, тим вище чутливість пружного елемента. На рис. 10.2 видно, що

при однаковій силі P_1 пружне переміщення першого елемента більше, ніж другого ($\varepsilon_1 > \varepsilon_2$). В результаті перший пружний елемент забезпечить більшу чутливість і меншу відносну помилку вимірювання.

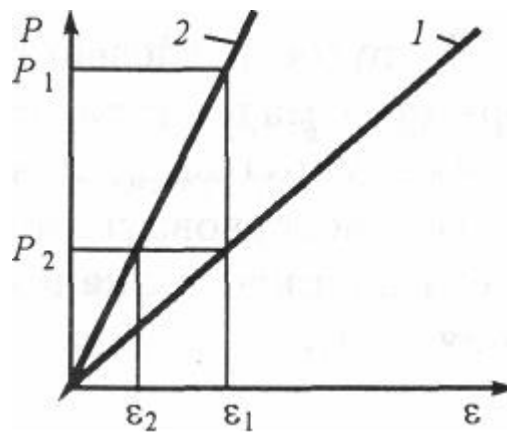


Рисунок 10.2. – Характеристика двох пружних елементів

Якість пружного елемента визначається також силою, необхідною для створення певної пружної деформації. Щоб викликати деформацію, рівну ε_1 , для першого елемента потрібна менша сила, ніж для другого, тому якість його вище.

Характеристика пружного елемента залежить від його конструкції (числа витків пружини, діаметра дроту тощо) і пружних властивостей матеріалу: модуля і границі пружності. Кут нахилу характеристики до осі деформації визначається модулем пружності. Чим він менше, тим більше пружна деформація, найбільша величина якої $\varepsilon_{\max} = \sigma_{0,002} / E$. Стали, маючи високий модуль пружності, не забезпечують високої чутливості пружних елементів приладів. Для їх виготовлення використовують сплави на основі міді (берилієві бронзи), які при практично однаковій зі сталями границі пружності мають майже в 2 рази менший модуль пружності. Різницю в модулі пружності цих матеріалів ілюструє рис. 10.2; де характеристика 1 відповідає бронзам, характеристика 2 – сталям.

Робоче напруження пружного елемента має бути нижче границі пружності матеріалу, так як при навантаженнях, близьких до границі пружності, в сплавах проявляються непружні ефекти, що погіршують роботу елемента і всього приладу. Чим вище границя пружності матеріалу щодо робочих напружень, тим менше непружні ефекти і вище клас точності приладу.

До непружних ефектів відносять пружну післядію, релаксацію, гістерезис і внутрішнє тертя.

Пружна післядія проявляється у відставанні частини пружної деформації матеріалу від напруження. При швидкому зростанні напруження в пружному елементі до значення σ_1 (див. рис. 10.1) деформація буде відповідати точці *a* і лише через деякий час досягне свого дійсного значення - точки *b*. В результаті пружної післядії, яку називають «прямою» при навантаженні і «зворотною» при розвантаженні, показання приладу, що визначаються пружним елементом, будуть відхилятися від істинних значень при швидкій зміні навантаження. В результаті релаксації напруження знизиться до точки *c*. Після розвантаження пружний елемент збереже залишкову деформацію, і показання приладу не повернуться на нуль.

Гістерезис проявляється в розбіжності характеристик пружного елемента при навантаженні і розвантаженні (рис. 10.3). В результаті не збігаються і показання приладу, які визначаються пружним елементом.

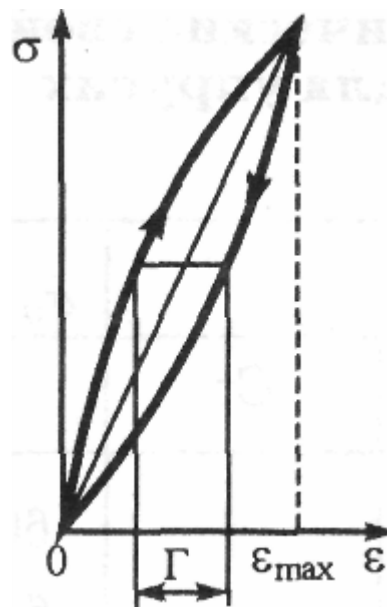


Рисунок 10.3. –Петля пружного гістерезису

Гістерезис викликаний розсіюванням в матеріалі енергії при пружних напруженнях. Мірою розсіювання пружної енергії є площа петлі гістерезису. Гістерезис оцінюють відношенням максимальної ширини петлі Γ до найбільшої пружною деформації ϵ_{\max} .

Перераховані непружні ефекти виникають через неоднорідність будови реальних полікристалів, внаслідок чого в окремих мікрооб'ємах при невисоких напруженнях розвивається мікропластична деформація.

Внутрішнє тертя проявляється при циклічних напруженнях нижче границі пружності в результаті необоротної втрати енергії деформування. Енергія деформування втрачається внаслідок теплообміну в навколишнє

середовище, витрачається на згинання дислокацій і переміщення впроваджених атомів, а в феромагнітних матеріалах – на магнітно-пружний ефект, пов'язаний з механострікцією.

В ідеально пружному матеріалі при циклічному навантаженні, частота якого збігається з власною частотою пружного елемента, в результаті резонансу спостерігається різке зростання амплітуди коливань елемента. У реальних полікристалах амплітуда A коливань пружного елемента зростає в деякому інтервалі частот, що є проявом внутрішнього тертя. Ширину цього інтервалу на висоті $0,7$ максимального значення амплітуди домовилися приймати за величину внутрішнього тертя (рис. 10.4). Відношення резонансної частоти $f_{\text{рез}}$ до ширини інтервалу Δf називають добротністю.

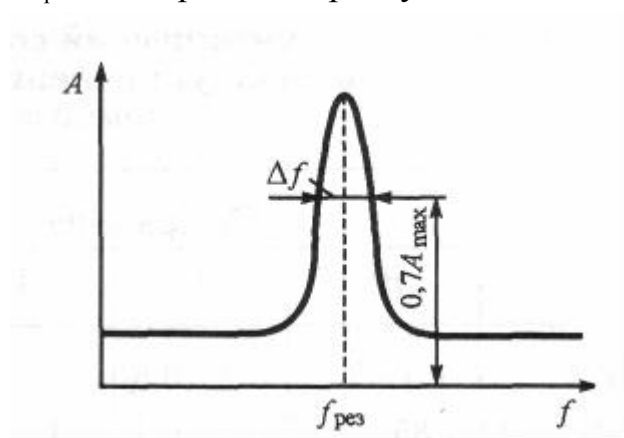


Рисунок 10.4. – Резонансна крива пружного елемента

Для того щоб знизити непружні ефекти, треба підвищити опір малим пластичним деформаціям, тобто сформувати малорухливу дислокаційну структуру. Закріплення дислокацій в розглянутих сплавах здійснюється високодисперсними когерентними частинками вторинних фаз, що виділяються після загартування і старіння.

Вимогу стабільної дислокаційної структури реалізовано в берилієвих бронзах і залізонікелевих сплавах.

Берилієві бронзи використовують для виготовлення пружних елементів відповідального призначення. Берилієві бронзи – це сплави на мідній основі з високою границею пружності і низьким модулем пружності (ГОСТ 18175-78). Таке поєднання властивостей забезпечує малі непружні ефекти при великих пружних деформаціях. Крім цього, сплави мають високу корозійну стійкість, електричну провідність, немагнітних, хорошою технологічністю. Наприклад, сплав БрБ2, в якому вміст берилію становить близько 2%, після загартування і старіння має границю пружності $\sigma_{0,002} = 600$ МПа (табл. 10.1).

Таблиця 10.1 Хімічний склад і механічні властивості термічно зміцнених сплавів для пружних елементів приладів

Сплав	Вміст елементу, %						$\sigma_{0,002}$	$E \cdot 10^{-5}$
	Be	Ni	Ti	Al	Cr	Mg		
БрБ2	1,8... 2,1	0,2... 0,5	-	-	-	-	600	1,28
БрБНТ1,9	1,85... 2,1	0,2... 0,4	0,1... 0,25	-	-	-	650	1,25
36НХТЮ	-	35...37	2,7... 3,2	0,9...1,2	11,5... 13	-	800	2,2
БрБНТ1,6Мг	1,85... 2,1	0,2... 0,4	0,1... 0,25	-	-	0,1	800	1,25

Збільшення вмісту берилію до 2,5% підвищує границю пружності. Однак висока вартість берилію обмежує застосування такого сплаву. Широко використовують сплав БрБНТ1,9, легований титаном і нікелем. За пружними властивостям він мало поступається сплаву БрБ2,5.

Подальше підвищення границі пружності досягається мікролегуванням берилієвих бронз бором (0,01%) або магнієм (0,1%). Введення цих поверхнево-активних елементів змінює процеси старіння в бік збільшення об'ємної частки частинок, що виділяються, ступеня їх дисперсності, а також щільності і рівномірності їх розподілу.

Розроблено способи термомеханічної обробки берилієвих бронз, при якій сплави піддають холодній пластичній деформації в загартованому стані. Це призводить до більш значного зростання границі пружності при старінні і сильного зниження пружної післядії. Так, сплав БрБНТ1,9, деформований на 50% в загартованому стані, після старіння при 350 ° С протягом 0,25 год має границю пружності $\sigma_{0,002} = 1000$ МПа.

Залізнікелеві сплави (ГОСТ 10994-74) менш дефіцитні і дешевше берилієвих бронз. Вони мають приблизно ту ж границю пружності, але мають більш високий модуль пружності, що знижує допустимі пружні деформації елементу.

Сплав 36НХТЮ, застосовуваний для пружних елементів, є сплавом на залізній основі. Високий вміст нікелю і хрому забезпечує отримання аустенітної структури і сприяє високій корозійній стійкості. Аустенітна структура надає сплаву хороші технологічні властивості щодо оброблюваності

тиском і зварюваності. Титан і алюміній утворюють з нікелем і залізом фази змінної розчинності в аустеніті, що дозволяє зміцнювати сплав термічною обробкою.

Після гартування з 925...950°C сплав набуває однофазну структуру. В процесі штучного старіння з аустеніту виділяється проміжна метастабільна γ' -фаза., що зміцнює сплав. Після старіння при 700°C протягом 2 год сплав 36ХНТЮ має межу пружності $\sigma_{0,002} = 800$ МПа (див. Табл. 21.1). Додаткове легування молібденом у кількості 8% (36НХТЮМ8) після термічної обробки дозволяє отримати межа пружності $\sigma_{0,002} = 950$ МПа. Застосування термомеханічної обробки для сплаву 36ХНТЮ підвищує межа пружності до $\sigma_{0,002} = 1100$ МПа.

Контрольні запитання та завдання

1. Яким вимогам повинні відповідати матеріали пружних елементів?
2. З чим пов'язані релаксаційні явища в пружних матеріалах?
3. В чому полягають особливості пружних матеріалів приладобудування?
4. Поясніть явище пружного гістерезису.
5. Що таке непружні ефекти, до чого вони приводять?
6. Охарактеризуйте сталі та сплави для пружних елементів приладів.

11. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ТЕПЛОВИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

11.1. Сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення

До цієї групи матеріалів відносять сплави системи Fe – Ni. При великому вмісті нікелю в сплавах утвориться безперервний ряд твердих розчинів із ГЦК решіткою. Температурний коефіцієнт лінійного розширення (ТКЛР) твердих розчинів у функції сполуки змінюється складно і має значний мінімум при кількості нікелю $\approx 40\%$, що дає можливість створювати сплави з малим

температурним коефіцієнтом лінійного розширення —інварні сплави (рис. 11.1).

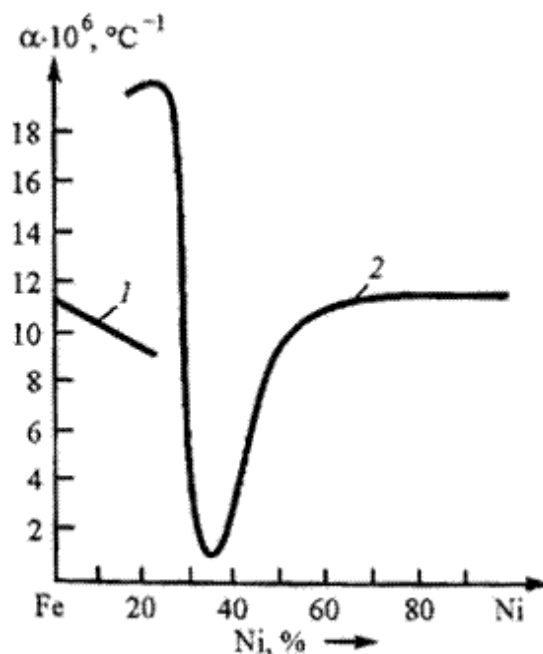


Рисунок 11.1. – Залежність температурного коефіцієнту лінійного розширення від вмісту нікелю у залізо-нікелевих сплавах: 1 – α-фаза, 2 – γ-фаза

Занижене значення температурного коефіцієнта лінійного розширення в інварних сплавах має феромагнітну природу й пояснюється великою магнітострикцією парапроцесу.

В усіх феромагнітних матеріалах, крім сплавів інварного типу, намагніченість M_s в області парапроцесу з ростом поля практично не змінюється. В сплавах інварного типу намагніченість у цій області збільшується в результаті додаткової орієнтації спінових моментів електронів, трохи разорієнтованих тепловим рухом, і викликає більші магнітострикційні явища.

Магнітострикція — зміна розмірів феромагнетику при його намагнічуванні. В області технічного намагнічування ($H < H_s$) магнітострикція носить лінійний характер, в області парапроцесу ($H > H_s$) — об'ємний. Аналогічні явища виникають під впливом внутрішнього магнітного поля феромагнетику: у відсутності зовнішнього поля форма й розмір домену викривлені магнітострикцією. Дійсні розміри виявляються лише при нагріванні до температур вище температури Кюрі ($t > \Theta$), коли усуваються усі магнітострикційні деформації у зв'язку з переходом у парамагнітний стан (рис. 11.2). При охолодженні до температур нижче температури Кюрі ($t < \Theta$) лінійна

магнітострикція спотворює форму домену, витягаючи його в напрямку вектора спонтанної намагніченості. Об'ємна магнітострикція збільшує розміри домену.

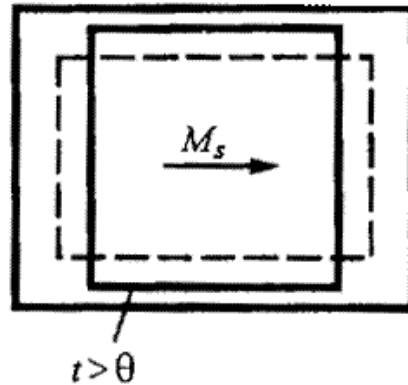


Рисунок 11.2. – Схема зміни форми та розмірів домену під впливом внутрішнього магнітного поля.

У кристалах феромагнетику, крім сплавів інварного типу, магнітострикція, що виникла через внутрішнє поле, не виявляється, тому що об'ємна магнітострикція в них мала, а лінійна – компенсується деформацією доменів у різних напрямках. У сплавах інварного типу розміри феромагнетику виявляються збільшеними, тому що в них велика об'ємна складова магнітострикції.

Температурний коефіцієнт лінійного розширення для феромагнетиків у загальному виді визначається формулою:

$$\alpha = \alpha_0 - \Delta \quad (11.1)$$

де α_0 – нормальний коефіцієнт лінійного розширення, який визначається енергією зв'язку атомів;

Δ – феромагнітна складова коефіцієнту лінійного розширення, основною часткою якої є об'ємна магнітострикція парапроцесу.

Зміна розмірів деталі з інварного сплаву при нагріванні характеризується формулою

$$A_t = A_{20}(1 + \alpha \Delta t), \quad (11.2)$$

і показана схематично на рис. 11.3.

Нормальна складова розміру A_0 , обумовлена енергією зв'язку атомів, росте внаслідок зменшення енергії при нагріванні. Це зростання компенсується зменшенням магнітострикції, тому що при нагріванні зменшується намагніченість феромагнетику через теплові коливання атомів. В результаті розмір A при нагріванні до температури точки Кюрі

збільшується незначно, а для деяких інварних сплавів навіть зменшується, тобто коефіцієнт лінійного розширення має негативне значення.

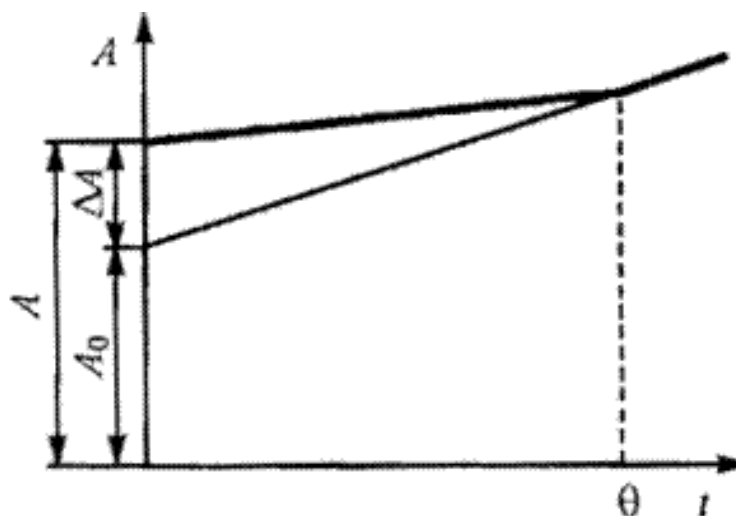


Рисунок 11.3. – Схема зміни розміру кристала інварного сплаву при нагріванні

Так, сплав, що містить 54%Co, 9%Cr і 37%Fe, в інтервалі температур 20...70°C має $\alpha = -1,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Цей сплав через великий вміст хрому має високі антикорозійні властивості.

При нагріванні вище температури точки Кюрі феромагнітна складова коефіцієнта теплового розширення зникає внаслідок переходу сплаву в парамагнітний стан, і коефіцієнт α різко зростає. Все сказане пояснює аномально занижені значення коефіцієнта α в інварних сплавах.

В інварних залізо-нікелевих сплавах, що містять 29...45%Ni, виявлена феромагнітна аномалія коефіцієнта α . Мінімальне значення коефіцієнта, α в інтервалі 0...100°C має сплав Fe+36%Ni. При більш високих температурах цей мінімум спостерігається в сплавах з більшим вмістом нікелю.

Сплав 36Н, названий *інваром*, — основний представник сплавів з мінімальним коефіцієнтом α . Низьке значення коефіцієнта α в області температур 20...25°C, а також високі механічні, технологічні й антикорозійні властивості, дозволили використати інвар як конструкційний матеріал для деталей приладів, від яких потрібна стабільність розмірів при зміні температури в умовах експлуатації.

Значення коефіцієнта α залежать від вмісту домішок (особливо вуглецю) і технології термічної обробки сплаву.

Вуглець у процесі термічної обробки утворює пересичені тверді розчини втілення. В процесі експлуатації через виділення вуглецю значення

коефіцієнта α змінюються. Це пов'язане зі зміною параметра кристалічної решітки і магнітострикції парапроцесу, тому вміст вуглецю в сплаві повинен бути мінімальним (не більше 0,05 %). Мінімальне значення коефіцієнта α в інварі досягається після гартування від 830°C, у процесі якого всі домішки переходять у твердий розчин. Відпуск при 315°C протягом 1 години приводить до виділення дрібнодисперсних надлишкових фаз. Наступне старіння при 95°C протягом 48 годин знімає всі залишкові напруження, що виникають у процесі технологічної обробки деталей, і стабілізує значення коефіцієнта α .

Властивості інвару додатково поліпшують легуванням кобальтом і міддю. Сплав такого типу, називаний *суперінвар*, має ще більш низьке значення α (табл. 11.1).

Таблиця 11.1 Властивості сплавів інварного типу

Сплав	Масова доля елементів, %			$\alpha \cdot 10^6$, °C ⁻¹	Температурний інтервал вимірювання, °C
	Ni	Co	Cu		
36Н (інвар)	35...37	-	-	1,5	-60...+100
32НКД (суперінвар)	31,5...33	3,2...4,2	0,6...0,8	1	-60...+100
29НК (ковар)	28,5...29,5	17...18	-	4,5...6,5	-70...+420
33НК	32,5...33,5	16,5...17,5	-	6...9	-70...+470
47НД (платиніт)	46...48	-	4,5...5,5	9...11	-70...+440

В електровакуумних газорозрядних і напівпровідникових приладах, в лазерній техніці широко використовують паяння металів з такими діелектриками, як скло і кераміка. Для забезпечення герметичності і вакуумної щільності спаяних ділянок необхідна відповідність ТКЛР матеріалів, що з'єднуються, в експлуатаційному інтервалі температур. Щоб уникнути напружень і тріщин, значення термічного коефіцієнту лінійного розширення сплаву має бути максимально наближене до ТКЛР діелектрика і строго регламентовано. Для визначення придатності спаїв металів зі склом використовують чутливий метод – вимірювання в поляризованому світлі пружних напружень, наявних в спаї.

Склад цих сплавів підібраний таким чином, щоб коефіцієнт α сплаву відповідав коефіцієнту α матеріалу, з яким утворюється з'єднання, у всьому інтервалі температур, аж до розм'якшення скла. Це забезпечує збереження спаю при нагріванні й охолодженні (у процесі виготовлення та в умовах експлуатації) і одержання герметичного з'єднання. Крім цієї основної вимоги, такі сплави повинні мати високу пластичність і гарно оброблятися тиском.

Основний представник цієї групи – сплав 29НК (ковар) має такий же коефіцієнт α , як термостійке скло, вольфрам і молібден. В цьому сплаві частина нікелю замінена кобальтом, що підвищує температуру Кюрі й розширює область його застосування до 420°C. При тих же температурах починається розм'якшення термостійкого скла. Сплав пластичний і добре обробляється тиском, тому він замінив менш пластичні й не жаростійкі вольфрам і молібден в електровакуумному виробництві.

Сплав 47НД (платиніт) відноситься до групи сплавів, що мають такий же коефіцієнт α , як платина й нетермостійкі стекла. Його використовують для зварювання й паяння з такими стеклами в електровакуумній промисловості. Завдяки високому вмісту нікелю сплав має високу температуру Кюрі. Для паяння з керамікою застосовують сплав 33НК, що є аналогом ковара, але з підвищеним вмістом нікелю. Для такої пайки не потрібно дуже точного збігу коефіцієнтів α , що спрощує технологію виготовлення цього сплаву.

Ковар застосовують для з'єднання з термостійкими стеклами, а платиніт – зі звичайними легкоплавкими стеклами, застосовуваними в електровакуумній промисловості. На рис 11.4 наведено характер лінійного розширення двох різних сортів скла і відповідних їм сплавів.

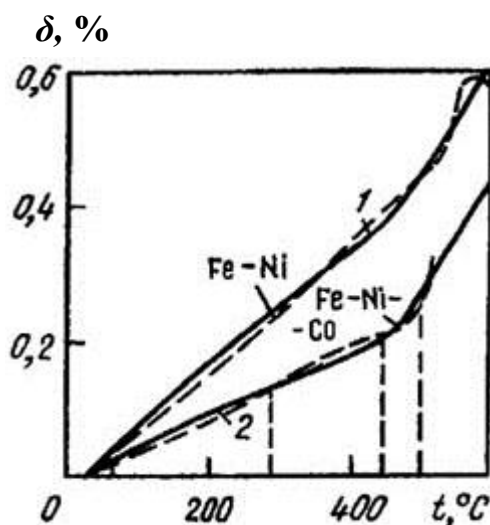


Рисунок 11.4. – Температурні залежності відносної зміни довжини легко-(1) і тугоплавкого (2) скла і сплавів Fe - Ni і Fe - Ni - Co

Сплави з певним тепловим розширенням служать також для виготовлення термобіметалів, коли шар з низьким тепловим розширенням («пасивний шар») шляхом прокатки надійно з'єднують з іншим шаром, що володіє більш високим тепловим розширенням («активний шар»). Біметалічні пластини використовують в якості терморегулятора в приладобудуванні. Нагрівання такої пластинки призводить до її викривлення, що дозволяє розімкнути електричне коло.

Основною властивістю термобіметалів є термочутливість, тобто здатність згинатися при зміні температури. Для цих цілей звичайно використовують інвар 36Н, що має мінімальне значення коефіцієнта α , і сплав з 25 % Ni, у якого коефіцієнт α дуже великий ($20 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). При нагріванні пластинка біметалу сильно викривляється й замикає (або розмикає) електричне коло.

11.2 Сплави із заданим температурним коефіцієнтом модуля пружності

Сплави системи Fe — Ni крім низьких значень температурного коефіцієнта лінійного розширення при деяких концентраціях нікелю мають ще одну унікальну властивість – малий температурний коефіцієнт модуля нормальної пружності. Для всіх твердих тіл, у тому числі і металів, модуль пружності при нагріванні зменшується у зв'язку із зменшенням енергії міжатомних зв'язків. У деяких сплавах системи Fe — Ni, названих *елінварними*, спостерігається аномалія в зміні модуля пружності при нагріванні, що або росте, або змінюється дуже незначно. Це явище називають скорочено ΔE-ефектом.

Елінварні сплави широко застосовують для виготовлення пружних елементів і пружин точних приладів та механізмів (пружин, камертонів, резонаторів, електромеханічних фільтрів та ін.). Сталість модуля пружності забезпечує малу температурну погрішність приладу в умовах експлуатації.

Природа аномальності зміни модуля пружності при нагріванні, так само як і природа інварності, феромагнітного походження. Зовнішні напруження, що розтягують, діють на феромагнетик подібно магнітному полю, орієнтуючи магнітні вектори доменів і викликаючи магніострикцію (лінійну й об'ємну), яку у цьому випадку називають механострикцією. В результаті загальна деформація феромагнетика при дії на нього зовнішніх напружень буде

складатися з пружно-механічної δ_0 та механострикційної δ_m складових. Модуль нормальної пружності для феромагнетика визначається за формулою:

$$E = \frac{\sigma}{\delta_0 + \delta_m} \quad (11.3)$$

тобто значення модуля пружності занижені внаслідок додаткової деформації феромагнітної природи.

В елінварних сплавах, на відміну від інших феромагнетиків, внаслідок великої об'ємної механострикції парапроцесу, ΔE -ефект здобуває велике значення й викликає аномальну зміну модуля пружності при нагріванні.

На рис. 11.5 показана діаграма пружної деформації феромагнетика.

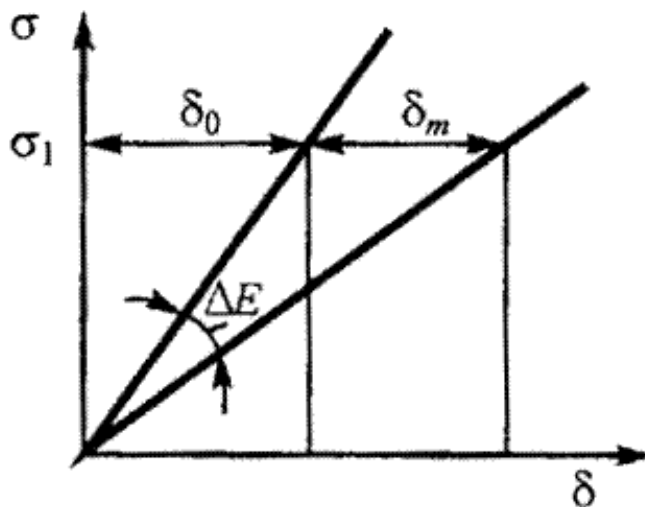


Рисунок 11.5. – Пружна частина діаграми деформації феромагнетика

Якщо до навантаження накласти дуже велике, зовнішнє магнітне поле вичерпає магніострикційну деформацію, і модуль пружності феромагнетика буде визначатися тільки пружно-механічною деформацією і значення його будуть великими:

$$E = \frac{\sigma}{\delta_0} \quad (11.4)$$

Таким чином, у всіх феромагнітних матеріалах модуль нормальної пружності дещо занижений через наявність деформації феромагнітної природи:

$$E = E_0 - \Delta E \quad (11.5)$$

У елінварних сплавах на відміну від решти феромагнетиків, внаслідок великої об'ємної механострикції парапроцесу ΔE -ефект набуває великого значення і викликає аномальне зміна модуля пружності при нагріванні.

Можливий характер залежності модуля пружності E феромагнітного матеріалу від температури нагріву показаний на рис. 11.6.

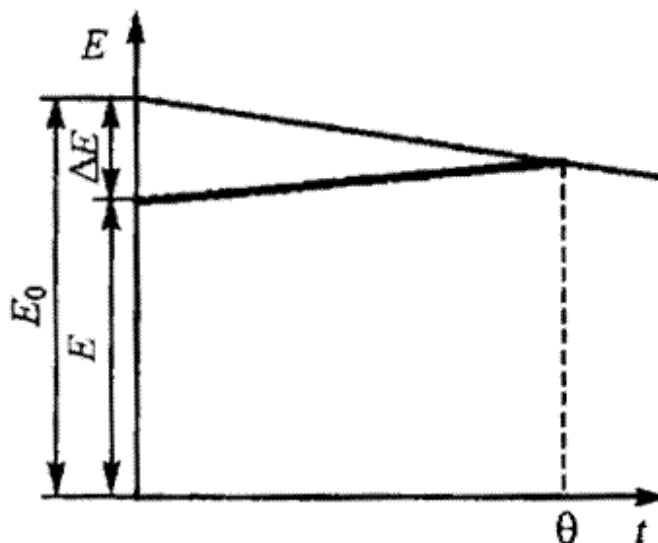


Рисунок 11.6. – Схема зміни модуля нормальної пружності феромагнетику при нагріванні

Зменшення E_0 при нагріванні обумовлено ослабленням сил міжатомної взаємодії. Зниження ΔE з підвищенням температури, викликане зменшенням намагніченості феромагнетику, призводить не до зниження, а, навпаки, до зростання модуля нормальної пружності E . З цієї ж схеми випливає, що модуль пружності феромагнетику може також зберігатися постійним до температури точки Кюрі.

Температурний коефіцієнт модуля нормальної пружності, називаний для стислості термопружним коефіцієнтом γ визначає характер зміни модуля пружності при нагріванні. У феромагнітних матеріалах цей коефіцієнт може мати знак плюс у тих випадках, коли модуль пружності при нагріванні росте, а також знак мінус, коли модуль пружності, як і для неферомагнітних матеріалів, знижується:

$$E_t = E_{20}(1 + \gamma \Delta t) \quad (11.6)$$

де E_{20} – модуль пружності при 20°C ,

E_t – модуль пружності при деякій температурі t ;

Δt – різниця температур між температурою t та 20°C .

В елінварних сплавах термопружний коефіцієнт завжди має позитивне значення й може бути рівним нулю. Для сплавів системи Fe – Ni значення термопружного коефіцієнта визначаються концентрацією нікелю. У сплавах, що містять від 29 до 45 % Ni, коефіцієнт γ має позитивне значення, що свідчить

про наявність великої аномалії в зміні модуля нормальної пружності при нагріванні. Сплави, що містять 29 і 45 % Ni (інше – Fe), мають нульові значення коефіцієнта γ . Однак незначні відхилення в концентрації нікелю, що неминуче в металургійному процесі, різко змінюють значення γ - Тому сплави системи Fe - Ni додатково легують хромом, що робить цю залежність менш різким і дозволяє одержувати в сплавах різних плавів стійке значення γ близьке до нуля.

Першим сплавом такого типу був сплав 36НХ (36%Ni і 12%Cr), названий *елінваром*. На жаль, цей сплав має недоліки. По-перше, у нього низькі значення механічних характеристик, які не можна поліпшити термічною обробкою, тому що в сплаву стійка однофазна аустенітна структура. По-друге, у нього невисока температура Кюрі ($\sim 100^\circ\text{C}$), що обмежує робочий інтервал температур.

Згодом сплав почали легувати титаном і алюмінієм (36НХТЮ), що дозволило зміцнювати його термічною обробкою, але ще більше знизило температуру точки Кюрі. В результаті термічної обробки сплав втратив свою феромагнітність, а отже, і елінварність. Його використовують як сплав з високими пружними властивостями для пружин і пружних елементів, від яких потрібні немагнітність і висока корозійна стійкість в агресивних середовищах.

Подальше поширення елінвари одержали у вигляді сплавів заліза з 5... 6 % Cr і 42 ...44 % Ni. Термопружний коефіцієнт таких сплавів близький до нуля. Підвищений вміст нікелю забезпечує більше високу температуру точки Кюрі, що розширює температурну область їхнього застосування. Для одержання високих механічних властивостей ці сплави додатково легують титаном і алюмінієм, що дозволяє зміцнювати їх термічною обробкою (табл. 11.2).

Таблиця 11.2 Хімічний склад та робочі температури елінварних сплавів

Сплав	Кількість елементу, % (інше – залізо);				Робочі температури, °C
	Ni	Cr	Ti	Al	
42НХТЮ	41,5...43,5	5,3...5,9	2,4...3	0,5...1	<100
44НХТЮ	43,5...45,5	5...5,6	2,2...2,7	0,4...0,8	<200

Вміст вуглецю в цих сплавах повинний бути мінімальним. Наведені сплави мають гарні антикорозійні властивості і, що особливо важливо, низькі

значення внутрішнього тертя. Сплави 42НХТЮ й 44НХТЮ для одержання мінімальних значень коефіцієнта γ і внутрішнього тертя піддають термічній обробці: гартуванню від 950°C, при якому надлишкові фази розчиняються в аустеніті, і наступному відпуску-старінню при 700°C протягом 4 годин. У процесі старіння в дрібнодисперсному вигляді виділяється проміжна метастабільна γ' -фаза.

Правильно проведена обробка зазначених сплавів дозволяє одержувати значення коефіцієнта γ у межах $\pm 1,5 \cdot 10^{-5} \text{C}^{-1}$ в інтервалі температур 20...100°C. Основний недолік даних сплавів – нестабільність значення коефіцієнта γ при можливих коливаннях хімічного складу в межах марки сплаву. Сплави системи Fe-Ni крім низьких значень температурного коефіцієнта лінійного розширення при деяких концентраціях нікелю володіють ще однією чудовою властивістю – малим температурним коефіцієнтом модуля нормальної пружності. У всіх твердих тілах, в тому числі і металах, модуль пружності при нагріванні зменшується у зв'язку зі зменшенням енергії міжатомних зв'язків. У деяких сплавах системи Fe-Ni, званих елітарними, спостерігається аномалія у зміні модуля пружності при нагріванні, який або зростає, або змінюється дуже незначно.

Елінварні сплави широко застосовують для виготовлення пружних елементів і пружин точних приладів і механізмів (пружин, камертонів, резонаторів, електромеханічних фільтрів та ін.). Сталість модуля пружності забезпечує малу температурну похибка приладу в умовах експлуатації.

Контрольні запитання та завдання

1. Що означає магніострикція?
2. Яке значення має коефіцієнт термопружності для елінварних сплавів?
3. Які сплави можуть мати заданий коефіцієнт лінійного розширення?
4. У яких матеріалах намагніченість M_s в області парапроцесу із зростанням поля практично не змінюється?
5. Як змінюється намагніченість M_s в сплавах інварного типу?
6. Дайте характеристику інварних сплавів.
7. В чому полягає сутність ΔE -ефекту?
8. Як змінюється модуль нормальної пружності феромагнетика при нагріванні?
9. Дайте характеристику елінварних сплавів.

Глосарій фахових термінів

А

Абляція (абляция, ablation) – процес віднесення речовини з поверхні твердого тіла під впливом випромінювань і оточуючого потоку гарячого газу.

Абляція лазерна (англ. Laser ablation) – метод видалення речовини з поверхні лазерним імпульсом.

Абсорбція (абсорбция, absorption) – поглинання однієї речовини іншою в усьому об'ємі сорбенту.

Абразив (абразив, abrasive) – матеріал, що складається з твердих дрібних часток, що використовуються у зв'язаному або свobodному вигляді для механічної обробки виробів.

Автозбирання – процес конструювання наноматеріалів за принципом «знизу-вгору», заснований на механосинтезі і виконується з використанням деякої автоматизованої системи (наприклад, СТМ) за заданою програмою.

Адгезія (адгезия, adhesion) – зчеплення, злипання різнорідних тіл, що знаходяться у контакті.

Адсорбція (адсорбция, adsorption) – зміна концентрації речовини на границі розділу фаз. Адсорбція відбувається на будь-яких міжфазних поверхнях, і адсорбуватися можуть будь-які речовини.

Азотування (азотирование, nitriding) – насичення поверхні металу азотом.

Алотропія (алотропия, allotropic) – це можливість існування хімічного елемента у вигляді двох або кількох простих речовин, відмінних за властивостями. Такі речовини називають алотропічними формами або модифікаціями.

Альсифер (альсифер, Alsifer) – сплави системи Fe – Al – Si, що характеризуються великою магнітною проникністю.

Анізотропія (анизотропия, anisotropy) – різниця властивостей у залежності від напрямку випробувань.

Атом (атом, atom) – хімічно неподільна електронейтральна частка речовини, що складається з позитивно зарядженого ядра та негативно заряджених електронів. Атом – найменша частка хімічного елемента, що є носієм його властивостей.

Аустеніт (аустеніт, austenite) – твердий розчин вуглецю у γ -залізі.

Б

Ближній порядок (ближний порядок, short-range order) – узгодженість в розташуванні сусідніх часток в речовині, тобто структурний порядок,

спостережуваний (на відміну від дальнього порядку) на малих відстанях, порівнянних з розмірами самих частинок. Характерний для рідин, квазікристалів і аморфних тіл.

Бронза (бронза, bronze) – сплав міді з будь-якими елементами крім цинку.

В

Вакансія (вакансія, vacancy) – відсутність частки (атома або іона) у вузлі кристалічної решітки.

Витривалість (выносливость, endurance) – здатність металу чинити опір втомі.

Відмова (отказ, failure) – це порушення працездатності машини, викликана ушкодженнями матеріалу внаслідок деформації, зношування, корозії, руйнування.

Відпуск (отпуск, tempering) – термічна обробка, внаслідок якої в попередньо загартованих сплавах відбуваються фазові перетворення, які наближають структуру до рівноважної.

Вуглецеві нанотрубки (углеродные нанотрубки, carbon nanotubes) – протяжні циліндричні структури діаметром від одного до декількох десятків нанометрів і завдовжки до декількох сантиметрів; складаються з однієї або декількох згорнутих в трубку гексагональних графітових площин і закінчуються зазвичай напівсферичної головкою.

В'язкість ударна (вязкость ударная, impact strength) – здатність матеріалу чинити опір руйнуванню при динамічних навантаженнях.

Г

Гартування (закалка, quenching, hardening) – термічна обробка, яка складається з нагрівання металу вище температури перетворень із наступним швидким охолодженням для одержання структурно нестійкого стану сплаву.

Границя витривалості (предел выносливости, fatigue limit) – найбільше значення максимального напруження циклу, під дією якого не виникає втомного руйнування зразка після довільно великої або завданої кількості циклів навантаження.

Границя міцності (предел прочности, tensile strength) – максимальне напруження, яке витримує стандартний зразок при розтягуванні.

Границя текучості (предел текучести, yield point) – напруження, якому відповідає залишкова деформація 0,2% або на діаграмі розтягування є площадка текучості.

Границя пружності (предел упругости, elastic limit) – напруження, при якому пластична деформація досягає заданого малого значення, що встановлюється умовами, як правило 0,05 %.

Графеновий (графітовий) лист (графеновый лист, graphene layer) – гексагональна сітка графітової структури. Основу такої сітки становлять шестикутники, в вершинах кутів яких розташовані атоми вуглецю.

Д

Дальній порядок (дальний порядок, long range order) – характерна для кристалів строга повторюваність у всіх напрямках одного і того ж структурного елемента (атома, молекули, групи атомів або молекул і т.д.) протягом сотень і тисяч періодів кристалічної решітки (на відміну від аморфних тіл).

Дендрит (дендрит, dendrite) – деревоподібний кристал.

Деформація (деформация, deformation) – зміна форми та розмірів тіла під дією зовнішнього зусилля. Кількісною характеристикою деформації є ступінь деформації.

Деформація гаряча (деформация горячая, hot deformation) – деформація, що проводиться при температурі вище температури рекристалізації.

Деформація пластична (деформация пластическая, plastic deformation) – деформація, яка після зняття навантаження залишається і приводить до зміни форми та властивостей деформованого матеріалу.

Деформація пружна (деформация упругая, elastic deformation) – деформація, вплив якої на форму, властивості та структуру тіла повністю зникає після усунення дії зовнішніх сил. Це оборотна деформація.

Деформація холодна (деформация холодная, cold deformation) – деформація, що проводиться при температурі нижче температури рекристалізації.

Дислокація (дислокация, dislocation) – край недобудованої на півплощини у кристалі.

Дисоціація (диссоциация, dissociation) – процес розчинення, розпаду, розкладання.

Діаграма стану (диаграмма состояния, constitutional diagram) – це графічне зображення залежності структури сплавів даної системи від концентрації компонентів та температури.

Довговічність (долговечность, service life) – здатність виробу працювати протягом тривалого часу без видимої зміни розмірів і властивостей і характеризує властивість виробу пручатися поступовій відмові.

Домен (домен, domain) – область кристалу розміром 10^{-6} ... 10^{-4} м, де магнітні моменти атомів орієнтовані паралельно певному кристалографічному напрямку.

Допуск (допуск, tolerance) – різниця між найбільшим та найменшим значенням граничних значень (розмірів, масової долі, маси). Задається на геометричні розміри деталей, механічні, фізичні та хімічні властивості.

Е

Евтектика (эвтектика, eutectic) – дрібнодисперсна механічна суміш двох фаз, яка кристалізується з рідини при постійній температурі.

Евтектоїд (эвтектоид, eutectoid) – дрібнодисперсна механічна суміш двох фаз, яка кристалізується з твердого розчину при постійній температурі.

Ж

Жароміцність (жаропрочность, high-temperature strength, hot strength) – здатність металу зберігати міцність при високих температурах.

Жаростійкість (жаростойкость, scale resistance) – здатність металу чинити опір газовій корозії.

З

Загартовуваність (закаливаемость, hardening capacity) – здатність сплаву зміцнюватися шляхом гартування.

Зерно (зерно, grain) – кристалик металу, що має неправильну зовнішню форму.

Зносостійкість (износостойкость, wear resistance) – здатність матеріалу чинити опір зношуванню та тертю.

І

Інструмент (инструмент, tool) – предмет, пристрій або машина, що використовується для впливу на об'єкт з метою його вимірювання, змінення або дослідження.

Інтерференційна картина (интерференционная картина, the interference pattern) – регулярне чергування областей зниженої та підвищеної інтенсивності світла, що виникає внаслідок накладення когерентних світлових пучків, тобто в умовах постійної (або такої, що регулярно змінюється) різниці фаз між ними.

К

Квантова проволока (квантовая проволока, quantum wire) – фрагмент провідника або напівпровідника, обмежений з двох просторових вимірів і

містить електрони провідності. Проволока повинна бути настільки малою в перерізі, щоб були істотні квантові ефекти.

Квантова точка (квантовая точка, quantum dot) – фрагмент провідника або напівпровідника, обмежений по всіх трьох просторових вимірах і містить електрони провідності. Точка повинна бути настільки малою, щоб були істотні квантові ефекти.

Конструкційна міцність (конструкционная прочность, structural strength) – це комплекс механічних властивостей, які забезпечують надійну та тривалу роботу матеріалу в умовах експлуатації. Це комплексна характеристика, що складається з критеріїв міцності, надійності та довговічності.

Компонент (компонент, component) – хімічний елемент, що входить до складу сплаву.

Кластер (кластер, cluster) – система кінцевого числа пов'язаних атомів або молекул. Кластери відрізняються від мікроскопічних малих частинок тим, що параметри малих мікроскопічних часток є монотонними функціями числа атомів, тоді як параметри кластерів мають екстремуми при деяких магічних числах атомів в них.

Клей (клей, glue) – речовина або суміш речовин, а також багатокомпонентні композиції, здатні з'єднувати (склеювати) різні матеріали.

Кристал (кристалл, crystal) – тверде тіло з упорядкованою внутрішньою будовою, що має вигляд багатогранника з природними плоскими гранями: впорядкованість будови полягає у певній повторюваності у просторі елементів кристала (атомів, молекул, іонів), що зумовлює виникнення кристалічної решітки.

Кристалізація вторинна (вторичная кристаллизация, secondary crystallization) – утворення нових кристалів у твердій кристалічній речовині.

Кристалізація первинна (первичная кристаллизация, primary crystallization) – перехід металу з рідкого або пароподібного стану у твердий з утворенням кристалічної структури.

Критичний розмір зародка (критический зародыш кристалла, critical nuclear of a crystal) – мінімальний розмір зародка, здатного до росту при даних температурних умовах.

Л

Латунь (латунь, brass) – сплав міді з цинком.

Лінза (линза, lens) — деталь із оптично прозорого однорідного матеріалу, обмежена двома полірованими заломлюючими поверхнями обертання, наприклад, сферичними або плоскою і сферичною.

М

Магнітострикція (магнитострикция, magnetostriction) — зміна розмірів ферромагнетика при його намагнічуванні.

Матеріал конструкційний (structural material) – матеріал, з якого виготовляють деталі машин, механізмів, конструкцій, приладів, що працюють в умовах механічних навантажень.

Матеріал композиційний (материал композиционный, composite material) – матеріал, до складу якого надходять компоненти, що значно відрізняються за властивостями, не розчиняються один в одному і відокремлюються у матеріалі межею розподілу.

Мартенсит (мартенсит, martensite) – пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі.

Міцність (прочность, strength) – здатність матеріалу чинити опір деформації та руйнуванню.

Механічні властивості (механические свойства, mechanical property) – характеристики, що визначають поведінку металу (або іншого матеріалу) під впливом докладених до нього зовнішніх механічних навантажень.

Механічні напруження (механические напряжения, stress, tension) – міра внутрішніх сил, здатних до опору зовнішнім навантаженням.

Мода (мода, mode) – одна із можливих траєкторій, за якою може розповсюджуватися світло в оптоволокну.

Н

Наклеп (наклеп, cold working) – зміцнення металу внаслідок деформації.

Надійність (надежность, reliability) – здатність виробу працювати короткочасно поза розрахунковою ситуацією без руйнування й характеризує опір раптовій відмові.

Наноккомпозит (наноккомпозитный материал, nanocomposite material) – матеріал з мікро- і макроскопічними розмірами, побудований з окремих нанооб'єктів.

Нанокристалічний матеріал (нанокристаллический материал, nanocrystalline material) – полікристалічний матеріал з розмірами окремих кристалітів (зерен) менше 100 нм.

Нітроцементация (нитроцементация, carbonitriding) – насичення поверхні сталі одночасно вуглецем і азотом.

Нормалізація (нормализация, normalizing) – термічна обробка, яка складається з нагрівання металу вище температури перетворень із наступним охолодженням у повітрі.

О

Оптичні матеріали (оптические материалы, optical materials) – матеріали, що пропускають електромагнітне випромінювання в ультрафіолетових, видимих і інфрачервоній частинах спектра. До оптичних матеріалів відносяться неорганічне скло, органічне скло та оптичні кристали.

П

Пластичність (пластичность, ductility) – здатність матеріалу деформуватися без руйнування.

Пермалой (пермаллой, Permalloy) – сплави системи Fe – Ni, що містять 45...83 % нікелю та характеризуються великою магнітною проникністю.

Повернення (возврат, recovery) – процеси, що підвищують досконалість наклепаного металу, при яких форма та розмір зерен не змінюються.

Показник заломлення (показатель преломления, refractive index) – відношення швидкості світла у вакуумі до швидкості світла у даному середовищі.

Покриття (покрытие, coating) – поверхневий шар, нанесений на об'єкт. Метою нанесення покриття є поліпшення поверхневих властивостей основного матеріалу, зазвичай званого матеріалом підкладки.

Полігонізація (полигонизация, polygonization) – утворення в деформованому металі ділянок, відділених малокутовими границями.

Поліморфізм (полиморфизм, polymorphism) – здатність речовини у твердому стані при різних температурах (або тиску) утворювати різні типи кристалічних структур.

Поляризація хвиль (поляризация волн, polarization of waves) – явище порушення симетрії розподілу збурень в поперечній хвилі (наприклад, напруженостей електричного і магнітного полів в електромагнітних хвилях) щодо напрямлення її розповсюдження. У поздовжньої хвилі поляризація виникнути не може, так як збурення в цьому типі хвиль завжди збігаються з напрямком поширення.

Р

Растр (растр, raster) – решітка для структурного перетворення спрямованого пучка променів світла. У прозорих растрах чергуються прозорі і непрозорі елементи, відбивні растри складаються з дзеркально відбиваючих і поглинаючих (або розсіюючих) елементів. Растри – основні компоненти растрових оптичних систем.

Рекристалізація (рекристаллизация, recrystallization) – процес утворення

та зростання зерен з меншою кількістю дефектів будови. Внаслідок рекристалізації утворюються зовсім нові зерна рівноважної форми.

С

Самоорганізація (самоорганизация, self-organization) – встановлення в дисипативному нерівноважному середовищі просторових структур (взагалі кажучи, еволюціонуючих у часі), параметри яких визначаються властивостями самого середовища і слабо залежать від просторової структури джерела нерівноваги (енергії, маси тощо), початкового стану середовища і умов на кордонах.

Система (система, system) – сукупність речовин, елементів або хімічних сполук, в який можливі ті чи інші перетворення.

Сколювання (скалывание, скол, cleavage) – руйнування матеріалу під дією дотичного напруження, при якому одна частина матеріалу зміщується відносно іншої по якій-небудь площині (поверхні).

Сплав (сплав, alloy) – матеріал, який складається з двох або більше компонентів, металів або металів з неметалами, і має металічні властивості.

Сталь (сталь, steel) – сплав заліза з вуглецем, що містить до 2,14% вуглецю.

Т

Твердість (твёрдость, hardness) – здатність матеріалу чинити опір впровадженню в його поверхню іншого, більш твердого тіла, яке називають індентором.

Тигель (тигель, crucible) – посудина для нагрівання, висушування, спалювання, відпалу або плавлення різноманітних матеріалів.

Термічна обробка (термическая обработка, heat treatment) – технологічні процеси, які пов'язані з нагріванням та охолодженням металевих виробів з метою зміни їх структури та властивостей.

Ф

Фаза (фаза, phase) – однорідна частина системи, відокремлена від інших границею розділу.

Ферит (ферит, ferrite) – твердий розчин вуглецю в α -залізі.

Фулерен (фуллерен, Fullerene) – молекулярне з'єднання, що належить класу алотропних форм вуглецю і являє собою опуклі замкнуті багатогранники, складені з парного числа трьохкоординуваних атомів вуглецю.

Фулерит (фуллерит, fullerite) – кристал з великих молекул вуглецю C_n – фулеренів.

Х

Хіміко-термічна обробка (ХТО) (химико-термическая обработка, thermochemical treatment) – обробка, яка поєднує термічний та хімічний вплив на метали та сплави з метою зміни хімічного складу, структури та властивостей поверхневого шару.

Холодноламкість (хладноломкость, cold brittleness) – здатність матеріалу зберігати пластичність при низьких температурах.

Ц

Цементит (цементит, cementite) – хімічна сполука Fe_3C .

Цементация (цементация, carburizing) – насичення поверхні виробу вуглецем.

Ч

Чавун (чугун, cast iron, pig iron) – сплав заліза з вуглецем, що містить більше 2,14% вуглецю.

Ш

Шліфування (шлифование, grinding) – процес обробки матеріалів за допомогою абразивного інструменту, ріжучим елементом якого є зерна.

Шихта (шихта, charge) – суміш матеріалів (руди, шлаку, коксу, вугілля і т. ін.), що їх переробляють у металургійних, хімічних та інших агрегатах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов: Учебн. пособие для вузов/ А.Г.Григорьянц, А.Н.Сафонов; Под ред. А.Г.Григорьянца.- М.: Высшая школа, 1988.- 159 с.
2. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера/ В.С.Коваленко, Л.Ф.Головко, В.С.Черненко,- К.: Техника, 1990.-192 с.
3. Материаловедение. Б.Н.Арзамасов, И.И. Сидорин, Г.Ф.Косолапов и др.; Под общ. ред. Б.Н.Арзамасова, - М.: Машиностроение, 1986.-384с.
4. Казановский Д.М., Яманов С.А. Радиотехнические материалы. М.:Высшая школа,1972.- 308 с.
5. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники.- М.: Высшая школа, 1986.- 359 с.
6. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. – М.: Машиностроение, 1990.- 528с.
7. Семушкин О.Г. Механические испытания металлов. – М.: Высшая школа, 1972.-156с.
8. Тимощук Л.Т. Механические испытания металлов. –М.: Металлургия, 1971. -248 с.
9. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1977.- 304 с.
10. Киреев В.А. Курс физической химии. – М.: Химия, 1975 – 775 с.
11. Савровский Д.С., Головня В.Г. Конструкционные материалы и их обработка. – М.: Высшая школа, 1976.-328с.
12. Кондратюк С.Е., Кіндрачук М.В., Степаненко В.О., Москаленко Ю.Н. Матеріалознавство та обробка металів: Навч. посібник: – Київ.: Вид-во «Викторія», 2000 – 254 с.
13. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник/Под ред. Ю. М.Пятина. - М.: Машиностроение, 1982.-528с.
14. Справочник конструктора оптико-механических приборов под редакцией Панова В.М., М.: Машиностроение, 2000. - 742с.
15. Справочник технолога-оптика под редакцией М.А. Окатова, Политехника Санкт-Петербург, 2004. - 679 с.
16. Кристаллические материалы для фотоники /Коллективная монография. Под ред. В.М. Пузикова. – Харьков: НТК «Институт монокристаллов», 2008. – 376 с.
17. ГОСТ 9012-59 (ИСО 410-19882, ИСО 6506-81). Металлы. Метод

измерения твердости по Бринеллю.

18. ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу.

19. ГОСТ 2999-75. Металлы. Метод измерения твердости по Виккерсу.

20. ГОСТ 9450-76. Метод измерения микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.

21. ГОСТ 1497-87. Металлы. Метод испытаний на растяжение.

22. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытаний на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах.

23. ГОСТ 10243-75. Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры.

24. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки.

25. ГОСТ 1050-88. Сталь углеродистая качественная. Марки.

26. ГОСТ 5657-69. Сталь. Методы испытания на прокаливаемость.

27. ГОСТ 14113-78. Сплавы алюминиевые антифрикционные. Марки.

28. ГОСТ 26719-85. Материалы антифрикционные на основе меди. Марки.

29. ГОСТ 26802-86. Материалы антифрикционные на основе железа. Марки.

30. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки.

31. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия.

32. ДСТУ 2825-94. Розрахунки та випробування на міцність. Терміни та визначення основних понять.

33. ДСТУ 2824-94 Розрахунки та випробування на міцність. Види і методи механічних випробувань. Терміни та визначення.

34. ДСТУ 3715-98. Метали. Види поверхонь руйнування (зломів). Терміни та визначення.

35. ДСТУ 2651-94. Сталі вуглецеві звичайної якості. Марки.

36. ДСТУ 3054-95. Чавун і сталь. Методи аналізу. Терміни та визначення.


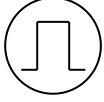
37. ДСТУ 2439-94. Хімічні елементи та речовини прості. Терміни та визначення. Основні поняття. Умовні позначення.

38. ДСТУ 3002-95. Розрахунки та випробування на міцність. Методи випробувань на втому матеріалів високочастотним осьовим навантаженням.

39. Прикладная оптика / под ред. А.С. Дубовика. – М.: Машиностроение, 2002. – 470 с.
40. Погарев Г.В. Юстировка оптических приборов. – М.: Машиностроение, 2002. – 320 с.
41. Справочник конструктора оптико-механических приборов./ М.Я. Кругер и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 760 с.
42. Сулим В.А. Производство оптических деталей. – М.: Высшая школа, 1975. – 316с.
43. Гусев А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
44. Рагуля А. В., Скороход В. В. Консолидированные наноструктурные материалы. – К: Наукова думка, 2007. – 374 с.
45. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000.– 272с.
46. Пул Ч., Оуэнс Ф. Нанотехнологии. Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2004. – 328 с.
47. ГОСТ 13240-78 Заготовки из оптического стекла. Технические условия.
48. ГОСТ 14887-80 Клеи оптические. Типы.
49. ГОСТ 15130-86 Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия.
50. ГОСТ 13659-78 Стекло оптическое бесцветное. Физико-химические характеристики. Основные параметры.
51. ГОСТ 2.412-81. ЕСКД Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий.
52. ГОСТ 23136-93 Материалы оптические. Параметры.
53. ГОСТ 3514-94 Стекло оптическое бесцветное. Технические условия.

Додаток А – Умовні позначення покриттів на креслениках

Тип покриття	Скорочена назва	Умовне позначення
Дзеркальне зовнішнє	Дзеркальн.	
Дзеркальне заднє	Дзеркальн.	
Світлороздільне (напівпрозоре дзеркало)	Світлозод.	
Просвітлююче	Просвітл.	
Покриття-фільтр	Фільтр	
Захисне прозоре	Захисн.	
Струмопровідне	Струмопров.	
Поляризує	Поляриз.	
Інтерференційне відрізаюче	О	
Інтерференційне вузькополосне	У	

Інтерференційне спеціальне	С	
Інтерференційне полосове	П	

Навчальне видання

АФАНАСЬЄВА Ольга Валентинівна

ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Частина друга

Навчальний посібник

Відповідальний випусковий Ю.П.Мачехін

Редактор

План 2019, поз.
Підп. до друку
Умов.- друк. арк.
Зам. №

Формат 60x84_{1/16}.
Облік.-вид. арк.
Ціна договірна

Спосіб друку – різнографія.
Тираж примірників.

ХНУРЕ, Україна, 61166, Харків, просп. Леніна 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо – поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Леніна 14