

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

Афанасьєва О.В.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА КРИСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів напрямку «Опtotехніка»

Харків 2015

УДК 621.002.3(075.8)

Афанасьєва О.В. Матеріалознавство та конструкційні матеріали.
Навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 188 с.

ISBN 978-966-659-210-4

У навчальному посібнику викладено закономірності формування структури матеріалів при затвердінні, пластичній деформації і термічній обробці; 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.

Зміст навчального посібника відповідає програмі та курсу лекцій з дисципліни «Матеріалознавство та конструкційні матеріали».

Рекомендовано студентам денної та заочної форм навчання за напрямком 6.051004 – «Опtotехніка».

Іл.. 122. Табл.. 24. Бібліогр. наймен. 38

Рецензенти:

С.О. Лузан, д-р техн. наук, професор, проф. кафедри Технології металів та матеріалознавства ХНАДТУ

Є. М. Одаренко, д-р ф.-м. наук, професор кафедри ФОЕТ ХНУРЕ

ISBN 978-966-659-210-4

© Афанасьєва О.В. 2015

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА.....	8
Глава 1. АТОМНО-КРИСТАЛІЧНА БУДОВА РЕЧОВИНИ.....	8
1.1 Аморфні та кристалічні речовини.....	8
1.2 Структура кристалів.....	9
1.3 Типи кристалічних решіток.....	10
1.4 Кристалографічні індекси	13
1.5 Анізотропія і поліморфізм твердих тіл	15
1.6 Вплив типу зв'язку на структуру та властивості кристалів.....	16
1.7 Дефекти кристалічної будови.....	18
1.8 Рідкі кристали	21
1.9 Особливості будови неметалічних матеріалів	22
Глава 2. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ	26
2.1 Визначення механічних характеристик при випробуваннях на розтягування	26
2.2 Вимірювання твердості	29
2.3 Механічні характеристики, які визначаються при динамічних випробуваннях.	31
2.4 Випробування при циклічному навантаженні	34
Глава 3. КРИСТАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛІВ	37
3.1 Самочинна кристалізація.	37
3.2 Механізм самочинної кристалізації	39
3.3 Несамочинна кристалізація	41
3.4 Форма кристалів та будова зливків.	41
3.5 Одержання монокристалів	44
3.6. Аморфні метали	45
3.7 Нанокристалічні матеріали	47
Глава 4. ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ ТА РЕКРИСТАЛІЗАЦІЯ...48	
4.1. Загальні відомості про деформації	48
4.2 Механізм пластичного зсуву	48
4.3 Особливості деформування монокристалів	50
4.4. Пластична деформація полікристалічних матеріалів	52
4.5 Вплив пластичної деформації на властивості металів	53
4.6 Рекристалізація деформованого металу	54
4.7 Холодна та гаряча деформація	58
4.8 Поверхнева пластична деформація (ППД)	58
Глава 5. МЕТАЛЕВІ СПЛАВИ.	60
5.1 Загальні відомості про металеві сплави.	60
5.2 Діаграми стану сплавів.	62
5.3 Діаграма стану сплаву, компоненти якого утворюють механічну суміш	63
5.4 Правило відрізків	63

5.5	Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю у твердому стані.	66
5.6	Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю у твердому стані.	67
5.7	Закономірності М.С. Курнакова.	68
	Глава 6. ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ.	70
6.1	Компоненти і фази в сплавах заліза з вуглецем.	70
6.2	Діаграма стану системи Fe – Fe ₃ C	71
6.3	Вуглецеві сталі	74
6.4	Леговані сталі	75
6.5	Чавуни	77
	Розділ 2. ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ	80
	Глава 7. ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СПЛАВІВ.	80
7.1	Критичні точки у залізовуглецевих сплавах.	80
7.2	Перетворення в сталі при нагріванні	81
7.3	Фазові перетворення в сталі при охолодженні	82
7.4	Класифікація видів термічної обробки	87
7.5	Відпал і нормалізація	88
7.6	Гартування	89
7.7	Загартованість та прогартовуваність	92
7.8	Відпуск загартованих сталей.	94
7.9	Термічна обробка сплавів із змінною розчинністю компонентів у твердому стані.	96
7.10	Дефекти термічної обробки	98
	Глава 8. МЕТОДИ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ	100
8.1	Поверхнева пластична деформація (ППД).	100
8.2	Поверхнєве гартування.	101
8.3	Лазерне гартування	103
8.4	Хіміко-термічна обробка	105
	Розділ 3. ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ	110
	Глава 9. КОНСТРУКЦІЙНІ МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ.	110
9.1	Загальні вимоги до конструкційних матеріалів.	110
9.2	Вплив вуглецю та постійних домішок на властивості сталей.	111
9.3	Вуглецеві конструкційні сталі.	114
9.4	Леговані конструкційні сталі.	115
9.5	Мідь та сплави на її основі.	117
9.6	Алюміній і його сплави	120
	Глава 10. КОМПОЗИЦІЙНІ ТА ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ	124
10.1.	Загальна характеристика та класифікація композиційних матеріалів	124
10.2.	Композиційні матеріали на металевій основі.	125
10.3.	Композиційні матеріали на неметалевій основі.	128
10.4.	Технологія порошкової металургії.	131

10.5. Порошкові матеріали та вироби	133
Глава 11. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ МАГНІТНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ.....	135
11.1. Класифікація матеріалів за магнітними властивостями	135
11.2. Основні характеристики магнітних властивостей матеріалів...	138
11.3. Магнітно-м'які матеріали	142
11.4. Магнітно-тверді матеріали	147
Глава 12. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	150
12.1. Класифікація матеріалів за електричними властивостями	150
12.2. Зонна теорія твердих тіл	150
12.3. Електричні властивості діелектриків	153
12.4. Активні діелектрики	156
12.5. Електричні властивості провідників	158
12.6. Електричні властивості напівпровідників	161
Глава 13. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ТЕПЛОВИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	165
13.1. Сплави із заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення.	165
13.2. Сплави із заданим температурним коефіцієнтом модуля пружності	169
Глава 14. МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ОПТИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	174
14.1. Загальна характеристика і класифікація неорганічного скла	174
14.2. Загальні властивості скла.	175
14.3. Оптичне скло	177
14.4. Органічне скло (плексиглас)	177
14.5. Оптичні кристали	178
Глосарій фахових термінів	182
ЛІТЕРАТУРА	187

ВСТУП

Матеріалознавство – міждисциплінарна галузь науки, що вивчає зв'язок між складом, будовою та властивостями матеріалів, а також впливом на їх будову і властивості теплових, хімічних, електромагнітних та інших факторів. Як будь-яка наука, матеріалознавство являє собою сукупність знань, отриманих розрахунковим і експериментальним шляхом, які дозволяють зробити узагальнення й висновки, а також передбачати шляхи розвитку науки про матеріали. Теоретичною основою матеріалознавства є відповідні розділи фізики та хімії, але ця наука в основному розвивається експериментальним шляхом.

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.

На початку третього тисячоліття найбільш поширеними серед металевих матеріалів залишаються залізні сплави і насамперед – сталі.

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

Збільшення в XXI 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 XXI століття отримають 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.

Метою викладання дисципліни є вивчення зв'язку між складом, будовою та властивостями матеріалів; дослідження впливу зовнішніх факторів на структуру, властивості та застосування конструкційних матеріалів.

Головним завданням цієї дисципліни є набуття знань та навичок по оцінці властивостей матеріалів, раціональному і доцільному вибору їх для конкретних умов роботи, вміння застосовувати ефективні технологічні методи обробки та зміцнення, які б привели в результаті до здешевлення виробів, зменшення витрат матеріалів з одночасним збільшенням терміну експлуатації.

За всіх часів використання природних і створених людиною матеріалів залежало від міцності, надійності й довговічності виконаних з них виробів. Сьогодні метали і їхні сплави є самим великим та універсальним за застосуванню класом матеріалів. В даному посібнику розглянуто металеві, неметалеві та композиційні конструкційні матеріали, а також інші функціональні матеріали опtotехніки (матеріали з особливими магнітними, електричними, оптичними, тепловими властивостями). Технологія матеріалів знайомить із закономірностями технологічних процесів, способами їх оптимізації, дозволяє орієнтуватися в основних напрямках науково-технічного прогресу.

Розділ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

Глава 1.

АТОМНО-КРИСТАЛІЧНА БУДОВА РЕЧОВИНИ

1.1 Аморфні та кристалічні речовини

Речовина, що знаходиться в твердому стані, називають твердим тілом. У природі існують дві форми твердої речовини – кристалічна та аморфна.

У кристалічній речовині частки мають упорядковане просторове розташування, в аморфній – розміщені безладно (рис. 1. 1).

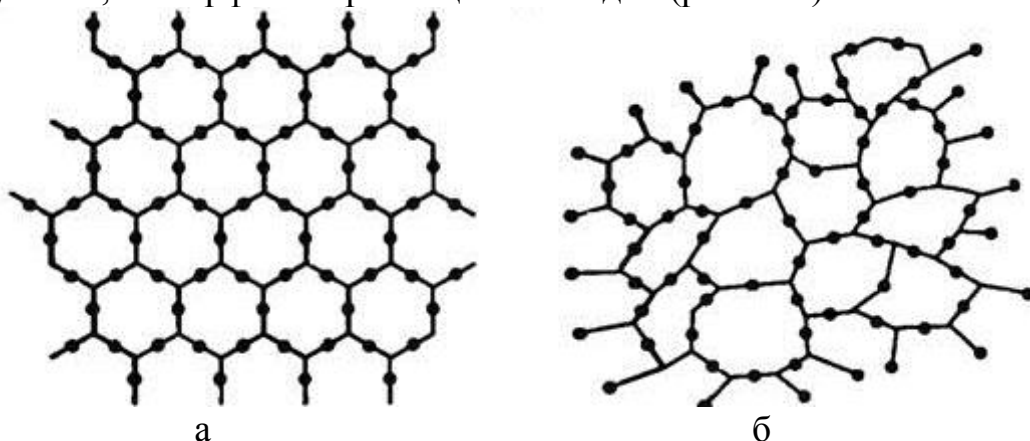


Рисунок 1.1. – Сchemа розташування часток у кристалічній (а) та аморфній (б) речовині

Характерною особливістю *аморфних* тіл є їх *ізотропність*, тобто незалежність всіх фізичних властивостей (механічних, оптичних і т. д.) від напрямку. Молекули і атоми в ізотропних твердих тілах розташовуються хаотично, утворюючи лише невеликі локальні групи, які містять кілька частинок (*ближній порядок*). Якщо аморфне тіло нагрівати, то воно поступово розм'якшується, і перехід в рідкий стан займає значний інтервал температур.

Кристалічні тіла залишаються твердими, тобто зберігають надану їм форму до певної температури, при якій вони переходять у рідкий стан. У кристалічних тілах частинки розташовуються в строгому порядку, утворюючи просторові періодично повторювані структури у всьому об'ємі тіла (*дальній порядок*).

Кристалічний стан твердого тіла більш стабільний, ніж аморфний. Аморфні тіла на відміну від рідин мають знижену рухливість часток. Аморфний стан можна зафіксувати в багатьох органічних і неорганічних речовинах прискореним охолодженням з рідкого стану. Однак при повторному нагріванні, тривалій витримці 20...25°C, а в деяких випадках при деформації нестабільність аморфного твердого тіла проявляється в частковому або повному переході в кристалічний стан.

Властивості кристалів залежать від електронної будови атомів і характеру взаємодії їх у кристалі, від просторового розташування часток, хімічного складу. Всі ці деталі будови кристалів характеризує поняття «структура».

1.2 Структура кристалів

У кристалі частки (іони, атоми, молекули), з яких побудований кристал, зближені до зіткнення і розташовуються по-різному, але закономірно по різних напрямках. Кристалічну будову можна уявити у вигляді решітки, у вузлах якої розташовані атоми (в металах у вузлах решітки розташовані позитивні іони, між якими рухаються вільні електрони).

Якщо в кристалі провести три напрямки x , y , z , що не лежать в одній площині, то відстані між частками, розташованими по цих напрямках, у загальному випадку неоднакові й відповідно дорівнюють a , b , c .

Площини, паралельні координатним площинам, що перебувають на відстані a, b, c , розбивають кристал на безліч паралелепіпедів, рівних і паралельно орієнтованих. Найменший паралелепіпед називають *елементарною коміркою*. Вона відображає форму всієї кристалічної структури даного тіла. Послідовне переміщення її утворить просторову кристалічну решітку. Вершини паралелепіпеда називають **вузлами** кристалічної решітки. Із цими вузлами збігаються центри мас часток, з яких побудований кристал (рис. 1. 2).

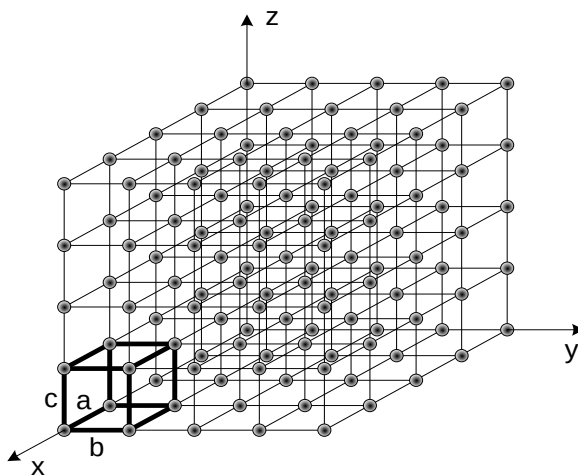


Рисунок 1.2. – Схема кристалічної решітки (a , b , c – періоди кристалічної решітки)

Елементарна комірка в загальному випадку має форму косокутного паралелепіпеда. Всі розташовані в ній атоми прийнято називати *базисом* елементарної комірки кристала. Закономірності будови елементарної комірки і базису, зокрема ступінь їх симетричності визначає багато властивостей кристала, в першу чергу електричні, магнітні і механічні. Елементарна комірка може містити як один, так і декілька видів атомів. Так у багатьох металів, наприклад заліза, хрому, міді, срібла, вона складається з атомів

одного виду. У тих випадках коли, кристал складається з декількох хімічних елементів, наприклад, натрію і хлору, елементарна осередок буде містити як мінімум два види атомів: натрій і хлор. Широко поширені кристали з елементарною коміркою, що складається з кількох зчеплених один з одним молекулярних груп, наприклад кристали льоду або ж багатьох магнітних матеріалів. Існують кристали, наприклад, білкові, елементарна комірка яких складається з молекул, що містять кілька тисяч атомів.

Елементарні комірки характеризуються координаційним числом – числом часток, які оточують частку в кристалічних решітках, а також параметрами: трьома відрізками, рівними відстаням a , b , c до найближчих часток по осях координат, і трьома кутами α , β , γ між цими відрізками. Розмір елементарної комірки кристалічної решітки оцінюють відрізки a , b , c . Їх називають *періодами решітки*.

1.3 Типи кристалічних решіток

За допомогою теорії груп було показано, що все різноманіття кристалів може бути описано за допомогою 14 типів кристалічних решіток (решіток Браве). Їх прийнято групувати в сім систем, що розрізняються видом елементарної комірки: триклинну, моноклінну, ромбічну, тетрагональну, тригональну, гексагональну і кубічну. Кожна система має свої співвідношення між величинами a , b , c і α , β , γ . Деякі з цих решіток мають різновиди: примітивна – P , об'ємноцентрована (ОЦ) – I , гранецентрована (ГЦ) – F і з однією парою центрованих протилежних граней – C (табл.1.1).

Таблиця 1.1. – Типи кристалічних систем

Система	Параметри	
	Періоди	Кути
Триклинна	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$
Моноклінна	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma \neq 90^\circ$
Ромбічна	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Тетрагональна	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Кубічна	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Гексагональна	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Тригональна (ромбоедрична)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

1. В триклинній системі як всі кути не рівні один одному, так і всі довжини сторін не рівні одна одній (рис. 1.3). Дана решітка має центр симетрії в центрі елементарної комірки.

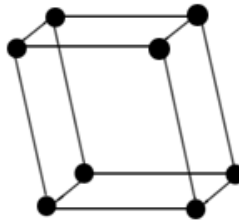


Рисунок 1.3. – Елементарна комірка триклинної решітки

2. В моноклінній системі комірка має форму прямої призми з ребрами різної довжини (рис. 1.4). Комірка може бути примітивною (Р, рис. 1.4, а) і з центрованими основами прямої призми (С, рис. 1.4, б). У такої решітки додаються елементи симетрії: площина симетрії, паралельна основі прямої призми, і вісь обертання 2-го порядку, що проходить через середини основ.

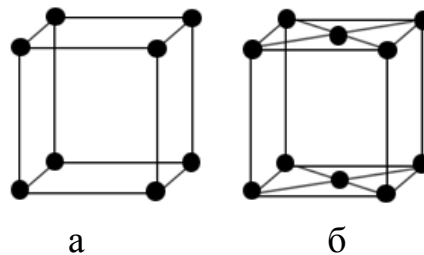


Рисунок 1.4. – Елементарна комірка моноклінної решітки: а – Р-типу, б – С-типу.

3. В ромбічній системі комірка має форму прямокутного паралелепіпеда з ребрами різної довжини (рис. 1.5).

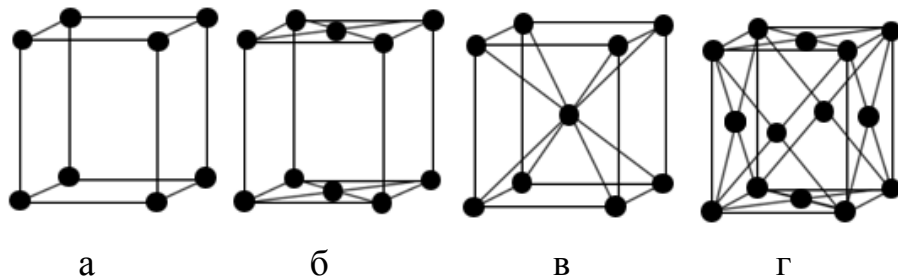


Рисунок 1.5. – Елементарна комірка моноклінної решітки: а – Р-типу, б – С-типу, в – І-типу, г – F -типу.

Комірка має всі 4 різновиди: Р, І, F, С. У такий решітці ще більше елементів симетрії: три площини симетрії, паралельні граням, і три осі обертання 2-го порядку, що проходять через середини протилежних однакових граней.

4. В тетрагональній системі комірка має форму прямокутного паралелепіпеда з квадратною основою (рис. 1.6). Комірка може бути примітивною (Р, рис. 1.6, а) і об'ємноцентрованою (І, рис. 1.6, б). У порівнянні з попередньою решіткою у неї з'являється вісь обертання 4-го порядку і кілька площин симетрії.

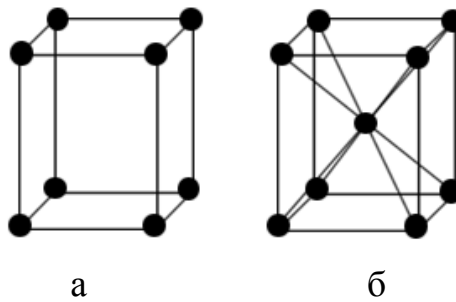


Рисунок 1.6. – Елементарна комірка тетрагональної решітки

5. В кубічній системі комірка має форму куба (рис. 1.7).

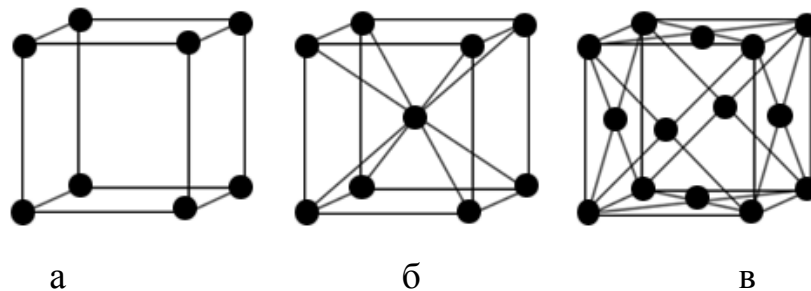


Рисунок 1.7. – Елементарна комірка кубічної решітки: а – Р-типу, б – І-типу, в – F -типу.

Комірка може бути з центрованими гранями куба (ГЦК – гранецентрований куб) або центром (ОЦК – об’ємноцентрований куб).

6. У гексагональній системі комірка має форму прямої призми з ромбом в основі, причому кут в ромбі дорівнює 60° градусам (рис. 1.8, а). Часто розглядають потрійну комірку (рис. 1.8, б), що має вигляд правильної шестигранної призми з віссю симетрії шостого порядку (звідси і її назва).

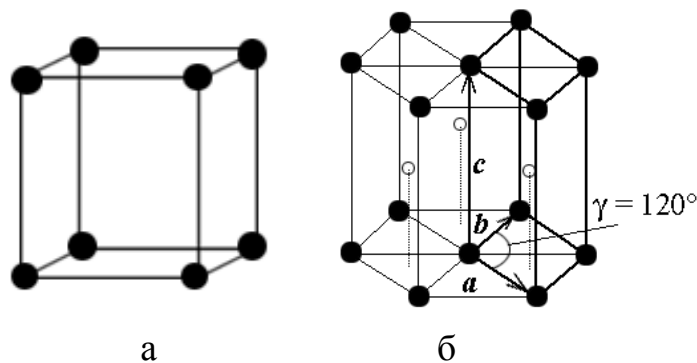


Рисунок 1.8. – Елементарна комірка гексагональної решітки: а – примітивна (Р-типу), б – потрійна

7. В тригональній системі комірку прийнято вибирати у вигляді ромбоедра, всі грані якого – однакові ромби з кутом при вершині $\gamma \neq 90^\circ$ (рис. 1.9).

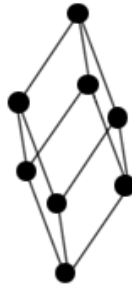


Рисунок 1.9. – Елементарна комірка тригональної решітки

У більшості випадків решітки мають складну будову, тому що частки перебувають не тільки у вузлах, але й на гранях або в центрі решітки. Всі інші «типи» решіток можуть бути зведені вибором інших векторів до одного з зазначених вище типів.

Кристалічні решітки металів можуть бути різних типів, але найбільш часто зустрічаються об'ємноцентрована кубічна – ОЦК (Li, Na, K, V, Cr, Fe₂, Pb, W та ін.), гранецентрована кубічна – ГЦК (Al, Ca, Fe, Ni, Cu, Ag, Au та ін.) та гексагональна щільноупакована (Be, Mg, Cd, Co, Zn та ін.). Елементарні комірки решіток цих типів наведені на рис. 1.10.

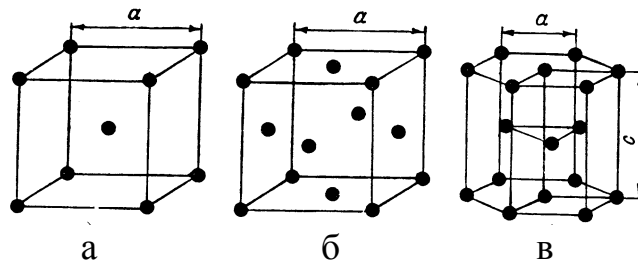


Рисунок 1.10. – Елементарні комірки ОЦК, ГЦК та ГПУ кристалічних решіток.

1.4 Кристалографічні індекси

Напрямок в кристалічній решітці задають координатами їх направляючого вектора в базисних векторах $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, зазвичай їх розміщують у квадратні дужки. При цьому знак мінуса в разі від'ємності координати зображують над числом (рис. 1.11). Найбільш важливі напрямки задаються як правило цілими числами.

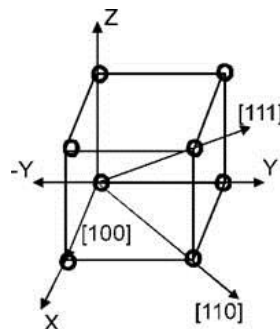


Рисунок 1.11. – Кристалографічні напрямки

На рис. 1.11 напрямок $[100]$ паралельний ребру куба, напрямок $[111]$ паралельний просторовій діагоналі куба, а напрямок $[110]$ – діагоналі його нижньої основи.

Деякі напрямки в силу симетричності решітки, в першу чергу кубічної, фізично рівноцінні, наприклад $[110]$, $[101]$, $[011]$ і $[\bar{1}10]$. Для опису такого сімейства напрямків використовують трикутні дужки, $\langle 110 \rangle$.

У кристалі велике значення мають особливі кристалографічні площини, що проходять через вузли кристалічної решітки. Саме кристалографічні площини, на яких розташована велика кількість вузлів кристалічної решітки, важливі як для передбачення огранювання кристала, так і при розгляді руху частинок в ньому.

Кристалографічні площини прийнято описувати індексами Міллера – набором трьох цілих чисел, укладених в круглі дужки (hkl) . Знак «-» негативного індексу прийнято ставити над ним. Ці індекси мають простий геометричний зміст. Якщо уздовж трьох координатних осей, заданих векторами $\vec{a}$, $\vec{b}$, $\vec{c}$, відкласти відповідно відрізки з довжинами a/h , b/k , c/l (рис. 1.12), то отримані три точки однозначно задають площину (hkl) .

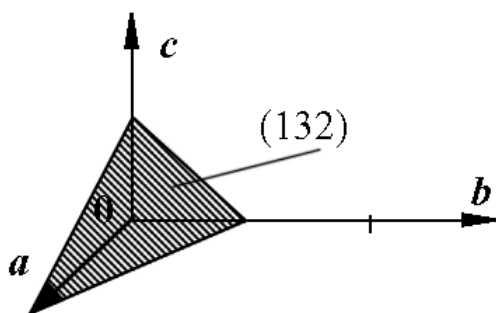


Рисунок 1.12. – Індекси Міллера площини в кристалі

На рис. 1.13 показані площини (100) , (200) , (00) , (110) , (111) .

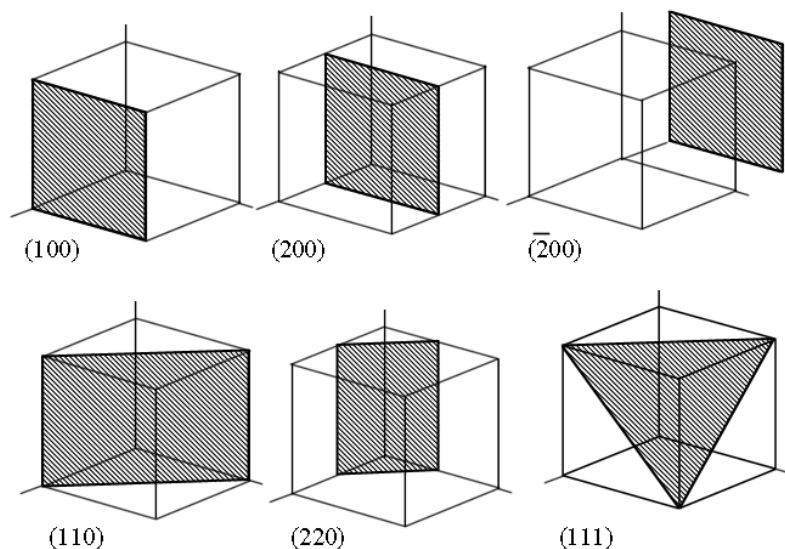


Рисунок 1.13. – Деякі кристалографічні площини кубічної решітки

У кристалах з кубічною коміркою індекси Міллера площини співпадають з координатами напрямку вектора нормалі до неї, у разі інших осередків це, як правило, не так.

1.5 Анізотропія і поліморфізм твердих тіл

В елементарних комірках є площини, які більш густо засіяні атомами, ніж інші. Властивості кристалів у напрямку цих площин відрізняються від властивостей в інших напрямках. Різниця властивостей у залежності від напрямку випробувань носить назву **анізотропії**.

Анізотропію фізичних властивостей визначає симетрія решітки. Анізотропія деяких фізичних властивостей може бути передбачена по виду елементарної комірки. Наприклад, для ромбічної, моноклінної і триклінної решіток, що мають порівняно малу кількість елементів симетрії, спостерігається анізотропія багатьох характеристик, наприклад, відносної електричної проникності, коефіцієнта теплопровідності. У разі симетричної кубічної решітки ці величини можуть перетворитися на скалярні; у разі тетрагональної або гексагональної решітки властивості кристала можуть виявитися однаковими у площині, перпендикулярній ребру c . Анізотропія властивостей проявляється при використанні монокристалів, отриманих штучним шляхом. Кристали металів мають, як правило, невеликі розміри. Тому метали складаються з великої кількості кристалів. Така структура називається полікристалічною. Кристали полікристалічного тіла мають неправильну форму і називаються кристалітами або зернами. Кристалічні решітки зерен довільно орієнтовані у просторі, тому полікристалічні матеріали, як правило, не мають анізотропії властивостей. Серед металів розповсюджене явище поліморфізму.

Поліморфізм – це здатність речовини у твердому стані при різних температурах (або тиску) утворювати різні типи кристалічних структур. Ці кристалічні структури називають модифікаціями. Низькотемпературну модифікацію позначають – α , інші – $\beta, \gamma, \delta, \dots$.

Температурний поліморфізм є характерним для 30 металів, в тому числі для заліза, кобальту, нікелю, марганцю та ін. Якщо ж при цьому міняти і тиск, то число речовин, здібних до поліморфізму, збільшиться, наприклад, берилій, літій, германій та ін..

Поліморфне перетворення за своїм механізмом - кристалізаційний процес і здійснюється шляхом утворення зародків і наступного їхнього зростання. Зародки нової модифікації найчастіше виникають на межах зерна вихідних кристалітів або в зонах з підвищеним рівнем вільної енергії. Кристали, що знову утворюються, закономірно орієнтовані відносно кристалів вихідної модифікації. Розглянемо поліморфні перетворення на прикладі заліза (рис. 1.14).

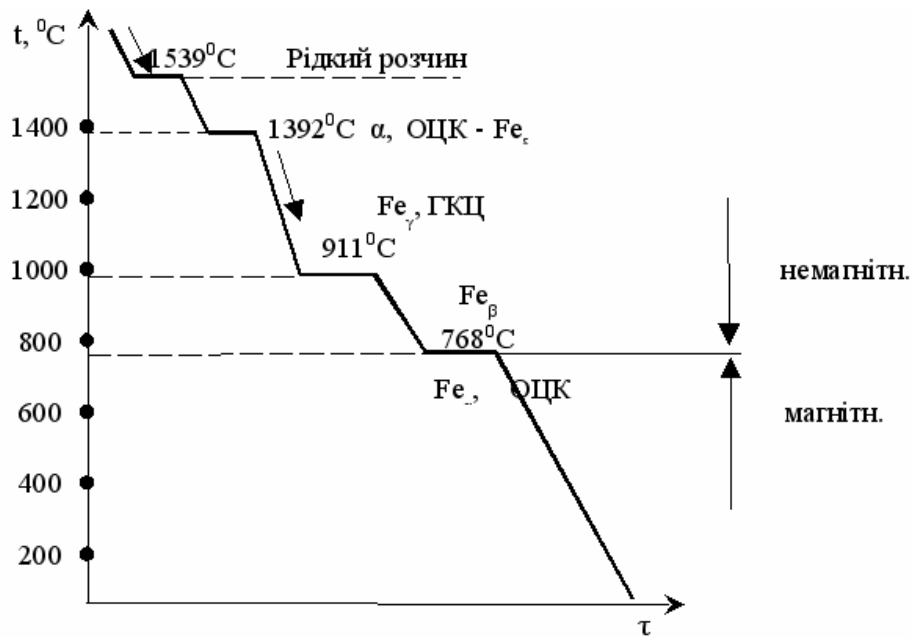


Рисунок 1.14. – поліморфні перетворення у залізі

До температури 911 $^{\circ}\text{C}$ існує α -модифікація заліза, яка має ОЦК – решітку (позначається Fe_{α}), в інтервалі температур 911...1392 $^{\circ}\text{C}$ – γ - модифікація, що має ГЦК – решітку (Fe_{γ}), а від 1392 $^{\circ}\text{C}$ до температури плавлення – Fe_{δ} з кристалічною решіткою ОЦК.

Іноді виділяють β - модифікацію заліза. Модифікація Fe_{β} – це немагнітне залізо з ОЦК - решіткою, яке існує від температури Кюрі ($t_0 = 768^{\circ}\text{C}$) до 911 $^{\circ}\text{C}$.

1.6 Вплив типу зв'язку на структуру та властивості кристалів

Залежно від природи часток, що утворюють кристалічні решітки, та типу зв'язку між ними розрізняють такі типи кристалів: молекулярні, атомні, іонні та металічні (рис. 1.15).

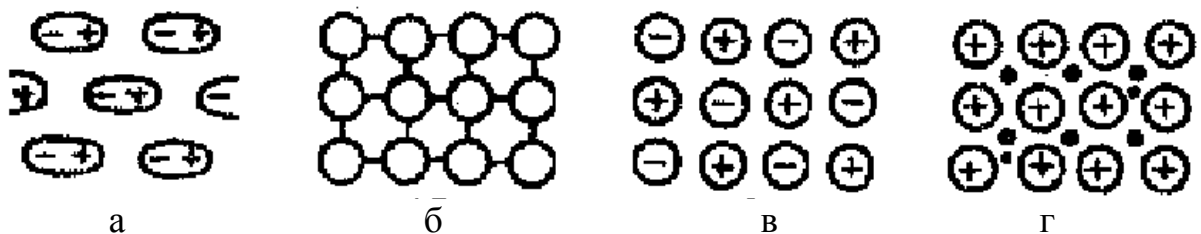


Рисунок 1.15. – Типи кристалічних решіток: а – молекулярна; б – атомна; в – іонна; г – металічна.

Молекулярні кристали утворені молекулами, атоми в яких з'єднані ковалентним полярним (рис. 1.15, а) чи неполярним зв'язком. Між такими молекулами існують ван-дер-ваальсові сили або водневий зв'язок. Сили міжмолекулярної взаємодії слабкі, тому кристали з молекулярними

дер-ваальсовий ще з одним. Такий зв'язок приводить до утворення шаруватої структури. Відстань між атомами (сусідніми) в плоскому шарі становить 0,141 нм, а між шарами – 0,340 нм, що обумовлює слабкий зв'язок між шарами.

1.7 Дефекти кристалічної будови.

Дослідження показали, що кристалічна будова зерен відрізняється від ідеальної. В реальних металах завжди є дефекти, а тому немає ідеального розташування атомів у всьому об'ємі зерна. Дефекти кристалічної будови поділяються на точкові, лінійні та поверхневі.

Точкові дефекти мають розміри, які не перевищують декількох атомних діаметрів. До точкових дефектів відносяться вакансії, міжвузельні атоми основної речовини, домішкові атоми втілення та заміщення (рис. 1.17).

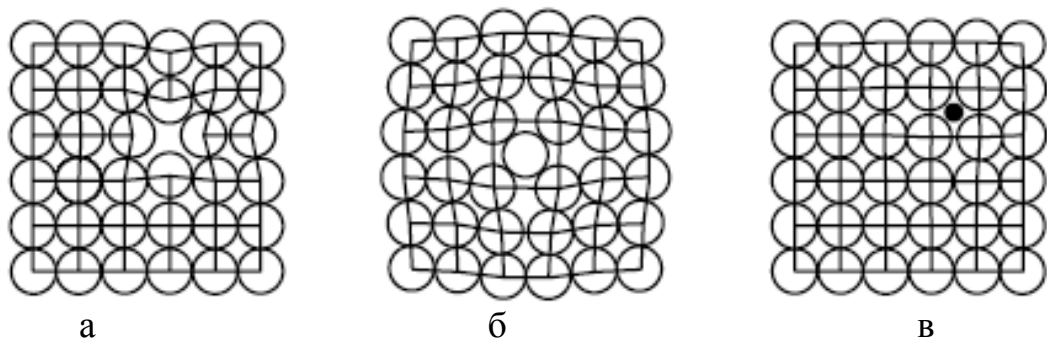


Рисунок 1.17. – Точкові дефекти кристалічної будови: а – вакансія; б – міжвузельний атом, в – домішко вий атом

Найбільш важливим видом точкових дефектів є вакансії. *Вакансія* – це відсутність атома у вузлі кристалічної решітки. Вакансії дуже рухливі, безперервно переміщуються по решітці, тому вони прискорюють усі процеси, пов'язані з переміщенням атомів (дифузія, спікання порошків та ін.). З підвищенням температури рухливість вакансій збільшується.

Міжвузельними називається атом, переміщений з вузла до позицій між вузлами. Вакансії та міжвузельні атоми з'являються в металах при температурі, відмінній від абсолютного нуля, внаслідок теплових коливань атомів. Кожній температурі відповідає рівноважна концентрація вакансій та міжвузельних атомів. Наприклад, в міді при $t^0=20...25^{\circ}\text{C}$ містяться 10^{-13} ат. % вакансій (1 вакансія на 10^{15} атомів), а при $t^0 = 1000^{\circ}\text{C}$ (поблизу точки плавлення) 10^{-2} ат. % (одна вакансія на 10^4 атомів).

Високий рівень точкових дефектів досягається при різкому охолодженні після високотемпературного нагрівання, після пластичної деформації та опромінювання нейтронами.

Усі види точкових дефектів спотворюють кристалічні решітки і впливають на фізичні властивості, зокрема, підвищують електричний опір металів. На механічні властивості вплив їх незначний.

Серед лінійних дефектів найбільш важливими є дислокації. Розрізняють крайові та гвинтові дислокації (рис. 1.18).

Крайова дислокація являє собою край «зайвої» напівплощини (екстраплощини) у решітці (рис. 1.18, а). Навколо дислокації кристалічна решітка пружно спотворена: у тій частині кристала, де розташована екстраплощина, діють розтягуючі напруження, там, де її нема – стискуючі.

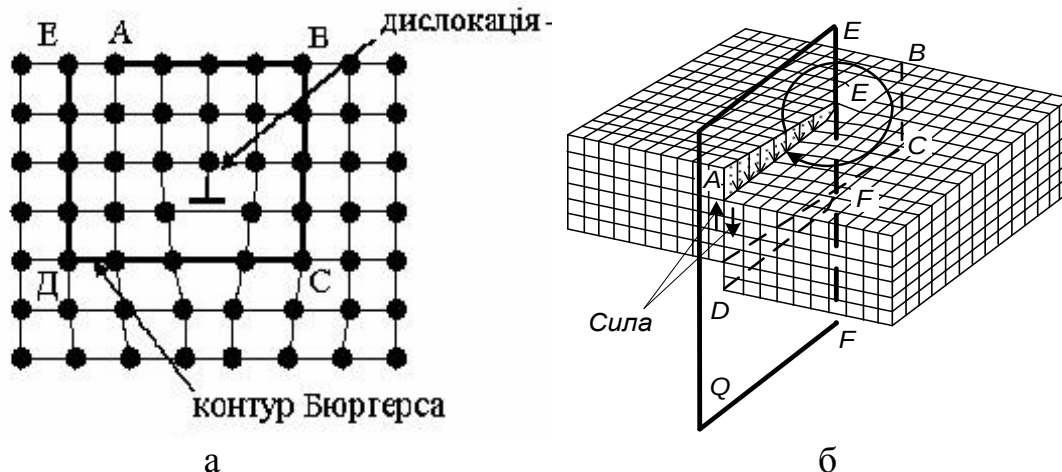


Рисунок 1.18. – Схема крайової (а) та гвинтової (б) дислокації.

Лінія крайової дислокації перпендикулярна векторові зсуву. Край екстраплощини являє собою лінію крайової дислокації, довжина якої може досягати багатьох тисяч параметрів кристалічної решітки. Дислокація вважається позитивною, якщо розміщується в верхній частині кристалу і позначається $\perp$ та негативною, якщо розміщена в нижній частині кристалу і позначається ∇ .

На відміну від крайової дислокації *гвинтова дислокація* і вектор зсуву паралельні (рис. 1.18, б). гвинтові дислокації утворюються при частковому зсуві атомних шарів по площині Q . Кристал ніби закручується гвинтом навколо лінії EF , яка є лінією дислокації. Вище лінії дислокації решітка стиснута, нижче – розтягнута. Гвинтова дислокація, що утворена обертанням за годинникову стрілкою, називається правою, а проти годинникової стрілки – лівою.

Енергія викривлення кристалічної ґратки є однією з найважливіших характеристик дислокації будь-якого типу. Критерієм цього викривлення служить вектор Бюргерса (b). Для визначення вектора Бюргерса крайової дислокації проведемо навколо дислокації контур $ABCDE$. Контур проводять так, щоб від точки A рівномірно відраховувалась однакова кількість міжатомних відстаней AB , BC , CD і DE . Контур замкнеться на ділянці DA . Різницю довжини контурів AE називають вектором Бюргерса (b). Визначення вектора Бюргерса для кристала, що містить гвинтову дислокацію, роблять аналогічно. У крайовій дислокації вектор Бюргерса перпендикулярний до її лінії, а в гвинтовий —паралельний їй. Якщо вектор Бюргерса охоплює кілька дислокацій, то величина його відповідає геометричній сумі векторів окремих дислокацій. Вектор Бюргерса дозволяє

знайти сили, необхідні для просування дислокації, сили взаємодії і енергію дислокацій.

Дислокації з'являються в металі при його кристалізації. Вони відіграють важливу роль в дифузійних процесах – вздовж дислокаційної лінії швидкість дифузії набагато вище, ніж у бездефектному металі. Але найсильніше впливають дислокації на механічні властивості металів.

Характеристикою кількості дислокацій є *густина дислокацій* ρ :

$$\rho = \frac{\sum l}{V} \left[\frac{\text{см}}{\text{см}^3} \right], \quad (1.1)$$

де $\sum l$ – сумарна довжина дислокацій в об'ємі V .

Густина дислокацій суттєво впливає на міцність металів. Залежність механічних властивостей, особливо міцності, від густини дислокацій має екстремальний характер (рис. 1.19).

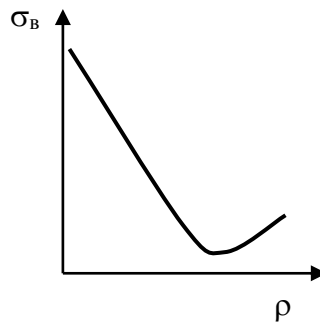


Рисунок 1.19. – Залежність міцності від густини дислокацій:

Міцність бездефектних кристалів, в яких $\rho=0$, називається теоретично. (розрахунковою). Теоретична міцність у 100...1000 разів перевищує міцність реальних кристалів. Із збільшенням густини дислокацій міцність зменшується. В монокристалах густина дислокацій $\rho=10^3...10^6 \text{ см}^{-2}$; в полікристалах $\rho=10^6...10^9 \text{ см}^{-2}$. Найменшу міцність мають метали у рівноважному стані. Збільшити кількість дислокацій можна за рахунок термічної обробки або холодної пластичної дислокації. В деформованих полікристалах $\rho=10^{11}...10^{12} \text{ см}^{-2}$. Міцність при цьому зростає.

В напівпровідникових матеріалах дислокації впливають на фізичні властивості, знижують електричний опір, зменшують час життя носіїв зарядів. Значення дислокацій особливо зростає в мікроелектроніці, де застосовують тонкі плівкові кристали, а дислокації відіграють роль тонких провідних каналів, вздовж яких переміщуються атоми домішок.

У промисловості використовують як монокристалічні, так і полікристалічні матеріали. Полікристалічний метал містить велику кількість зерен. В сусідніх зернах решітки орієнтовані по-різному (рис. 1.20) і границя між зернами являє собою перехідний шар шириною 1...5 нм.

В ньому порушена періодичність розташування атомів, підвищена густина дислокацій та домішок. Границя зерен являє собою *поверхневий*

дефект кристалічної будови. Зерно складається із субзерен та блоків, границі яких також відносяться до поверхневих дефектів.

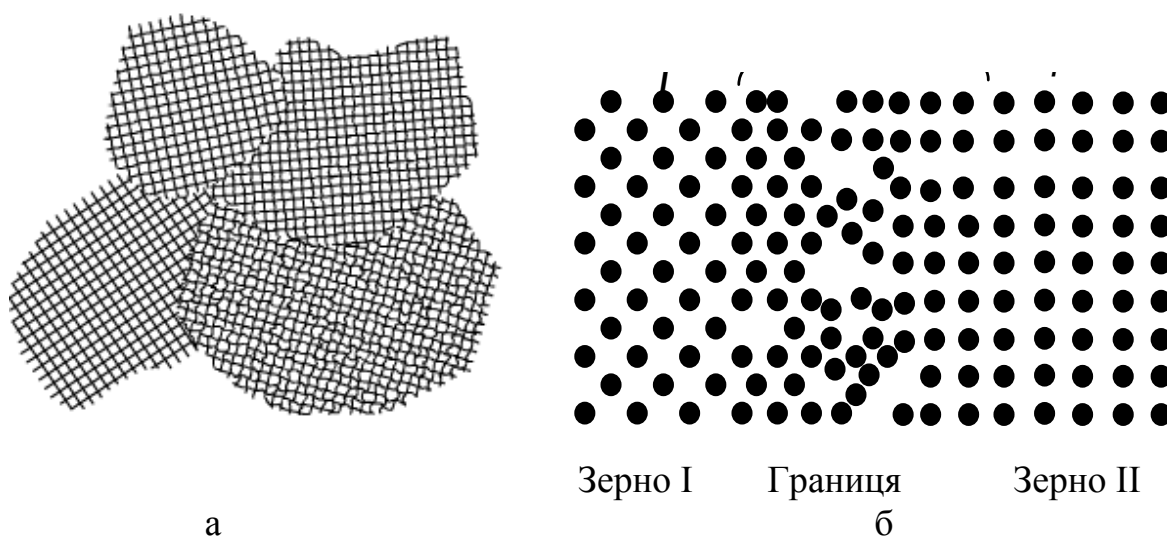


Рисунок 1.20. – Схема полікристалічного тіла (а) та міжзеренної границі (б)

Поверхневі дефекти впливають на механічні та фізичні властивості металів. Особливо велике значення мають границі зерен. Уздовж границь зерен та субзерен дифузія протікає набагато швидше, ніж через кристал, особливо при нагріванні. Корозійне руйнування також більш інтенсивне по границях зерен та субзерен, ніж по об'єму зерен.

Взаємодія між дефектами різних типів, переміщення їх у кристалах, зміна концентрації дефектів – усе це впливає на властивості металів та має велике практичне значення.

1.8 Рідкі кристали

Рідкі кристали – це рідини з упорядкованою молекулярною структурою. Завдяки упорядкуванню молекул вони займають проміжне положення між кристалами й звичайними рідинами з безладним розташуванням молекул. Рідкі кристали текучі, як звичайні рідини, але в той же час мають анізотропію властивостей, як кристали.

Рідкі кристали утворюються органічними речовинами, молекули яких мають подовжену форму й проявляють певну твердість уздовж поздовжньої осі. Упорядкована молекулярна структура виникає при достатній рухливості молекул речовини, що утворить рідкі кристали. Ця необхідна умова досягається при плавленні або розчиненні речовини. У першому випадку рідкі кристали називаються термотропними, у другому – ліотропними.

Рідкокристалічний стан, що виник при плавленні органічної речовини, зберігається від точки плавлення речовини до точки переходу в ізотропну рідину. При переході через теплові коливання, що підсилюються, упорядкована молекулярна структура повністю зникає, збільшується

прозорість речовини, і тому верхню температурну точку існування рідкого кристала часто називають *точкою просвітління*.

За структурою рідкі кристали розділяють на три класи: смектичні, нематичні, холестеричні (рис. 1.21).

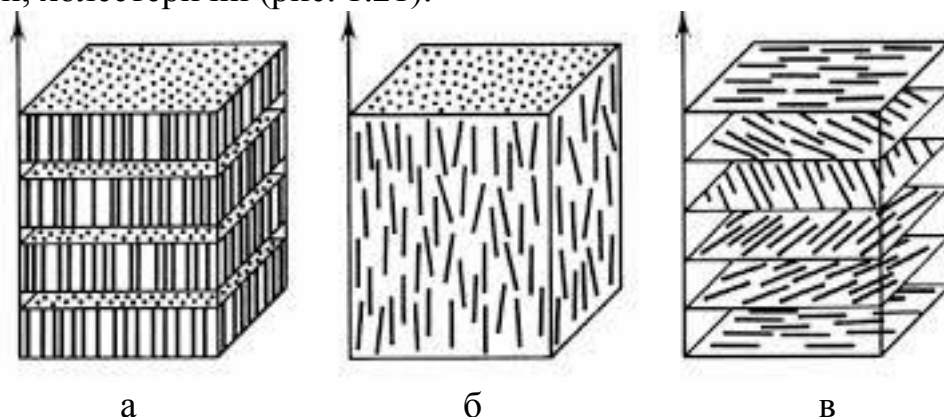


Рисунок 1.21. – Типи структур рідких кристалів: а – смектичні, б – нематичні, в – холестеричні

У смектичних кристалах (рис. 1.21, а) молекули утворюють паралельні шари, які легко зміщуються один щодо іншого.

У нематичних кристалах (рис. 1.21, б) молекули побудовані в ланцюжки; напрямок переважної орієнтації молекул є оптичною віссю рідкого кристала.

В холестеричних кристалах (рис. 1.21, в) структура найбільш складна: молекули розміщуються по просторовій спіралі. Довгі молекули утворюють паралельні шари, у кожному шарі є структура рідкого кристала першого класу. Напрямок переважної орієнтації плавно міняється при переході від шару до шару, утворюючи спіраль із певним кроком.

Рідкі кристали використовують у кольорових індикаторах і інших пристроях: калькуляторах, ручних годинниках, вимірювальних приладах автомобілів, пристроях для відхилення світлового потоку й ін.

Для кольорових зображень застосовують суміші рідких кристалів з барвниками, що також мають довгасті молекули. При низькій напруженості поля молекули рідкого кристала розміщуються перпендикулярно електродам осердя й захоплюють за собою молекули барвника. У такому положенні фарбування не видне. При обертанні молекул під впливом поля більше високої напруженості молекули барвника офарблюють зображення в певний колір. У рідких кристалах третього класу при нагріванні крок спіrali збільшується, що міняє умови інтерференції світла на кристалах і супроводжується зміною фарбування відбитого світла.

1.9 Особливості будови неметалічних матеріалів

Неорганічне скло слід розглядати як особливого виду затверділий розчин – складний розплав високої в'язкості кислотних і основних оксидів.

Основу скла утворює об'ємна сітка з однорідних структурних елементів. У найбільш простому за складом кварцовому склі такими елементами є тетраедри SiO_4 , які з'єднуються своїми вершинами. З таких саме тетраедрів утворена структура кристалічного кварцу. Відмінність між двома речовинами однакового хімічного складу пояснюється розміщенням SiO_4 . Кути між зв'язками кремній - кисень у сусідніх тетраедрах у кварцовім склі міняється в широких межах ($120\ldots 180^\circ$), чим й пояснюється неупорядковане розташування тетраедрів SiO_4 . У кристалічному кварці тетраедри SiO_4 розміщені впорядковано й утворюють кристалічну решітку, у цьому випадку значення кутів перебувають у більш вузькому інтервалі. Структура аморфного скла виникає, коли підвищення в'язкості скляної маси перешкоджає її кристалізації.

При нагріванні скло плавиться в деякому температурному інтервалі, який залежить від складу. Механічні властивості скла залежать від хімічного складу і термічної обробки. Хімічна стійкість скла залежить від хімічного складу, температури і тиску. З підвищенням температури й збільшенням тиску хімічна стійкість скла зменшується.

У сучасній техніці широко використовуються *ситали*, або склокристалічні матеріали. Ситали можуть бути прозорими матеріалами, а також пофарбованими в жовтий, опаловий і інші кольори. Головна особливість ситалів – комбінація високої твердості й механічної міцності з відмінними електроізоляційними властивостями, високою температурою розм'якшення, гарною термічною й хімічною стійкістю. Властивості ситалів ізотропні. У них зовсім відсутня в'язка пористість. Усадка матеріалу при його переробці незначна. Велика абразивна стійкість робить їхніми малочутливими до поверхневих дефектів. По теплопровідності ситали в результаті підвищеної щільності перевершують стекла.

Структура ситалів являє собою суміш дуже дрібних ($0,01\ldots 1$ мкм), безладно орієнтованих кристалів ($60 \ldots 95 \%$) і залишкового скла ($5\ldots 40 \%$). Вихідне скло по хімічному складу відрізняється від залишкового скла, у якому накопичуються іони, що не входять до складу кристалів. Для утворення кристалів у стекла вводять Li_2O , TiO_2 , Al_2O_3 і інші сполуки.

В оптично прозорих ситалах розмір кристалів не перевищує довжини півхвилі видимого світла. Тому оптичне кварцеве скло може бути замінене прозорими ситами, які мають перед ним ту перевагу, що в силу малих коефіцієнтів 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.

Керамікою називаються матеріали, отримані при високотемпературному спіканні мінеральних порошків. При нагріванні вихідні речовини взаємодіють між собою, утворюючи кристалічну і аморфну фази. Кераміка, являє собою пористий матеріал, що містить ковалентні або іонні кристали – складні оксиди, карбіди або тверді розчини на їх основі. Аморфна фаза є склом, яке за своїм хімічним складом відрізняється від

кристалів. Керамічний матеріал містить одну або декілька кристалічних фаз; окремі види кераміки зовсім не мають скла в своїй структурі. Як правило, кераміка, має полікристалічну структуру з прошарками скла і з безладним розташуванням зерен і тому однорідна, за властивостями.

Характерною особливістю керамічних матеріалів є крихкість. Опір руйнуванню тим вище, чим дрібніше кристали і менше пористість. Наприклад, щільна мікрокристалічна кераміка на основі Al_2O_3 з розміром зерен 1...5 мкм в 5...6 разів міцніше за звичайну, розмір зерен якої 10...15 мкм. Вироби з щільної дрібнозернистої кераміки – тонкої кераміки – отримують за більш складною технологією, і тому вони дорогі. Пористу кераміку використовують як вогнетривких матеріалів, фільтрів, діелектриків в електротехніці. Менш щільну кераміку застосовують для деяких деталей машин.

Полімерами називаються речовини з великою молекулярною масою (> 10), у яких молекули складаються з однакових груп атомів – ланок. Кожна ланка являє собою змінену молекулу вихідної низькомолекулярної речовини – мономера. Лінійні молекули мають головні ланцюги і бічні групи. При молекулярній масі $10^4...10^6$ в лінійній молекулі об'єднуються сотні ланок і довжина головного ланцюга у багато разів більше розмірів бічних груп. Бічні групи утворюють атоми (водень, галоїди), радикали ($OH-$, $CN-$, C_6H_5- та ін.), короткі полімерні ланцюги з декількох ланок. Очевидно, що за наявності бічних груп кількох видів є можливість розмістити їх уздовж головного ланцюга як неупорядковано, так і в певному порядку. Найбільш характерною і важливою формою теплового руху макромолекул є повороти частин молекул по відношенню один до одного (рис. 1.22). Рівноважному стану відповідають певні значення кутів δ між зв'язками. Форма лінійної молекули весь час змінюється.

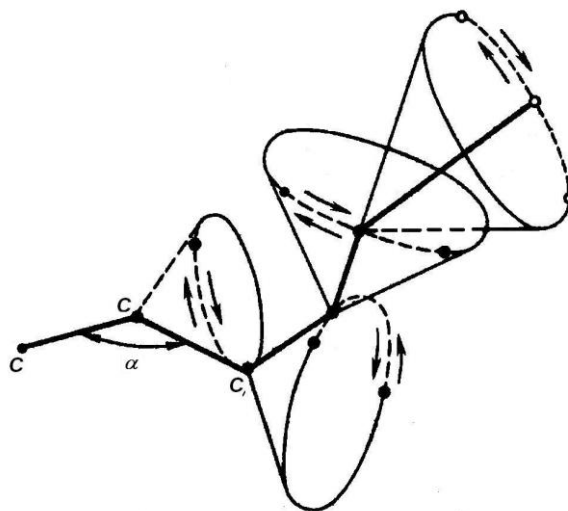


Рисунок 1.22. – Схема розвороту ланок навколо зв'язків у головному ланцюгу макромолекули

Полімери з нерегульованим чергуванням груп називаються нерегулярними, а з упорядкованим – регулярними.

Залежно від характеру зв'язків між лінійними молекулами полімери поділяють на термопластичні і термореактивні.

Перші здатні багаторазово розм'якшуватися при нагріванні і тверднути при охолодженні без зміни своїх властивостей, другі при нагріванні залишаються твердими аж до повного термічного розкладання.

Ця відмінність поведінки при нагріванні пояснюється тим, що у термопластичних полімерів між молекулами діють слабкі сили Ван-дер-Ваальса. При нагріванні зв'язки між молекулами значно послаблюються, матеріал стає м'яким і податливим. У термореактивних полімерів крім сил Ван-дер-Ваальса є поперечні ковалентні зв'язки між молекулами. Завдяки їм термореактивний матеріал залишається твердим при нагріванні.

Структура молекул визначається способом виробництва полімеру. При обробці полімерів (нагрівання, розчинення і т.д.) структура молекул майже не змінюється, і не можна, наприклад, нерегулярний полімер зробити регулярним. Загальна структура полімерів складається зі структури молекул і надмолекулярної структури, тобто взаємної укладання лінійних молекул в полімерному речовині. Надмолекулярна структура з'являється під впливом сил тяжіння між молекулами і теплового руху самих молекул. Для нерегулярних полімерів характерні пачкові структури, коли на порівняно великих ділянках головні ланцюги сусідніх молекул розташовуються паралельно. У регулярних полімерів типовими надмолекулярними структурами є кристали.

Контрольні запитання та завдання

1. В чому відміна між кристалічними та аморфними речовинами? Наведіть приклади кристалічних та аморфних речовин, порівняйте їх властивості.
2. Що називається кристалічною решіткою, які типи кристалічних решіток існують?
3. Що називається елементарною коміркою кристалічної решітки, які показники її характеризують?
4. Як за допомогою індексів Міллера позначити грані, площини, кути й напрямки в простих кубічних решітках?
5. У чому різниця між поліморфним і ізоморфним станами речовини?
6. Чим відрізняються ідеальні кристали від реальних?
7. Охарактеризуйте точкові дефекти кристалічної будови. Як вони впливають на властивості кристалів?
8. Охарактеризуйте лінійні дефекти кристалічної будови. Як вони впливають на властивості кристалів?
9. Охарактеризуйте поверхневі дефекти кристалічної будови. Як вони впливають на властивості кристалів?
10. Що таке рідкі кристали? Де застосовуються рідкі кристали в електронній техніці?
11. Яку будову та властивості мають скло, кераміка, полімери?

Глава 2

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

Будь-який матеріал, що застосовується в промисловості, має цілий комплекс властивостей – фізичних, хімічних, механічних, технологічних, електричних, магнітних тощо. Для конструкційних матеріалів, тобто матеріалів для виготовлення деталей машин, конструкцій та споруд, найважливішими є механічні властивості.

Механічні властивості – це характеристики, що визначають поведінку металу (або іншого матеріалу) під впливом докладених до нього зовнішніх механічних навантажень.

До механічних властивостей матеріалу відносять опір деформації (міцність) і опір руйнування (пластичність, в'язкість, здатність не руйнуватися при наявності тріщин). Визначають ці властивості при механічних випробуваннях.

При проведенні механічних випробувань одержують числові значення механічних властивостей, тобто значення напружень або деформацій, при яких відбувається зміна фізичного або механічного стану матеріалів.

Механічні випробування проводять при статичному, динамічному або циклічному навантаженні.

2.1 Визначення механічних характеристик при випробуваннях на розтягування

Статичними називають випробування, при яких навантаження зразка зростає повільно. Найчастіше застосовують випробування на розтягування (ГОСТ 1497-87), які дозволяють за результатами одного досліду визначити декілька важливих механічних характеристик матеріалу. Для проведення таких випробувань використовують стандартні зразки, виготовленні з металу, що досліджуються. (рис.3.1).

Зразки розтягують на спеціальній розривній машині з певною швидкістю, фіксуючи при цьому величину сили, яка чинить опір докладеному навантаженню. За даними досліджень розраховують механічні напруження та деформацію зразка.

Механічними напруженнями називають міру внутрішніх сил, що здатні до опору зовнішнім навантаженням. Механічні напруження позначаються буквою σ та обчислюються за формулою

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2.1)$$

де F – сила, яка чинить опір деформації, Н;
 S_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, м².

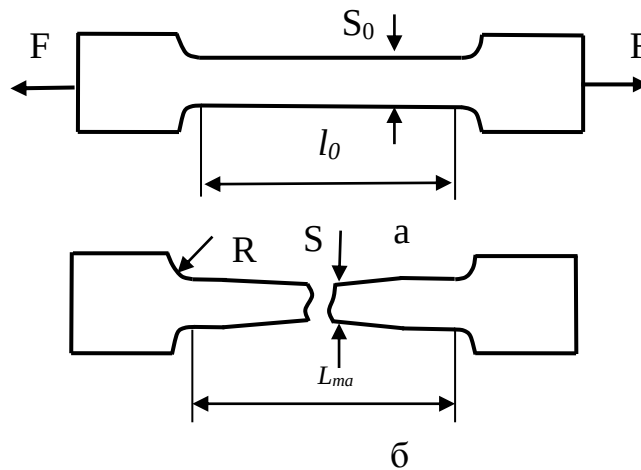


Рисунок 2.1. – Зразки для випробувань на розтягування: а – до випробувань, б – після випробувань.

Деформацією називаються зміна форми та розмірів тіла під дією зовнішнього зусилля. Кількісною характеристикою деформації є ступінь деформації, що визначається відносною зміною довжини зразка під час розтягування:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} 100\%, \quad (2.2)$$

де l та l_0 – довжина деформованого зразка та початкова довжина відповідно.

Одержані дані графічно представляють у вигляді діаграм розтягування, які будують у координатах «навантаження – подовження зразка» або координатах «напруження – деформація». Залежно від властивостей матеріалу діаграми розтягування можуть мати вигляд, представлений на рис. 2.2.

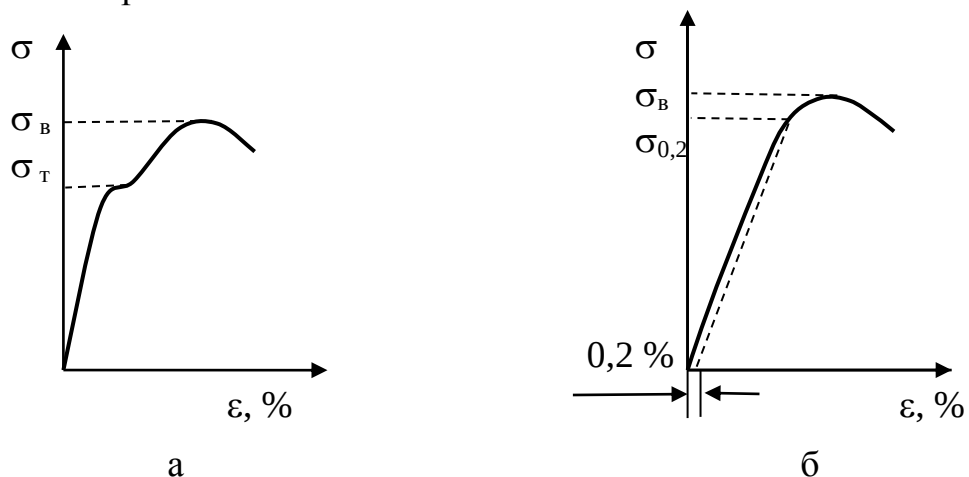


Рисунок 2.2. – Діаграми розтягування дуже пластичного (а) та пластичного (б) матеріалів.

Розглянемо більш детально діаграму розтягування для пластичного матеріалу, наприклад, маловуглецевої сталі (рис. 2.2, б). На початковій лінійній ділянці деформація пропорційна напруженню, тобто

підпорядковуються закону Гука. Тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис характеризує *модуль пружності* матеріалу E :

$$E = \operatorname{tg} \beta = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

Модуль пружності є кількісною характеристикою жорсткості матеріалу, тобто його здатності чинити опір пружній (оборотній) деформації. Здатність матеріалу чинити опір пластичній (необоротній) деформації та руйнуванню називається *міцністю*. Напруження $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,2}$, σ_B – стандартні характеристики міцності.

Границю пружності $\sigma_{0,05}$ називають напруження, при якому пластична деформація досягає заданого малого значення, що встановлюється умовами. Використовують значення залишкової деформації 0,05 %. Границя пружності – важлива характеристика матеріалів, з яких виготовляють пружні елементи приладів та машин.

Границя текучості умовна – це напруження, якому відповідає залишкова деформація 0,2%, позначається $\sigma_{0,2}$

Границя текучості фізична визначається за діаграмою розтягування, коли на ній є площадка текучості (рис. 2.2, а). Позначається σ_T .

Границя текучості $\sigma_{0,2}$ – важлива характеристика для конструкторських розрахунків. Вона визначає допустимі навантаження на матеріал. За значенням цієї характеристики розрізняють три групи матеріалів (табл.2. 1):

Таблиця 2.1. Класифікація матеріалів за міцністю

Клас матеріалів	$\sigma_{0,2}$, МПа		
	Fe-сплави (сталі)	Al-сплави	Ti-сплави
Низької міцності	650	200	400
Середньої міцності	650...1300	200...400	400...800
Високої міцності	1300...1400	400	800

Границя міцності або *тимчасовий опір* – це максимальне напруження, яке витримує стандартний зразок при розтягуванні (рис.2.2).

Значення границі міцності обчислюється за формулою

$$\sigma_B = \frac{F_{MAX}}{S_0}, [\text{МПа}], \quad (2.4)$$

де F_{max} – максимальне навантаження, яке попереджує деформацію, Н;

S_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, м.

Пластичність, тобто здатність матеріалу деформуватися без руйнування характеризується відносним подовженням при розриві δ , а також відносним поперечним звуженням, що розраховуються за такими формулами:

$$\delta = \frac{l_{\max} - l_0}{l_0} 100\% \quad (2.5)$$

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_1} 100\% \quad (2.6)$$

де l_0 та S_0 – початкові довжина та площа поперечного перерізу зразка відповідно;

$l_{\max}$ – кінцева довжина зразка (після руйнування);

S_1 – площа поперечного перерізу зразка в місці руйнування.

2.2 Вимірювання твердості

Важливою характеристикою механічних властивостей є **твердість** – здатність матеріалу чинити опір впровадженню в його поверхню іншого, більш твердого тіла, яке називають *індентором*. Найбільш поширеними методами визначення твердості є методи Брінелля, Роквелла та Віккерса. Твердість, виміряна за цими методами, позначається відповідно HB, HR, HV.

Вимірювання *твердості за Брінеллем* (ГОСТ 9012-59, ISO 410-82, ISO 6506-81) полягає у вдавлюванні в матеріал загартованої сталевий кульки діаметром $D = 2,5; 5; 10$ мм при зусиллі F від 152 до 29430 Н (15,6 ...3000 кГс) (рис. 2.3).

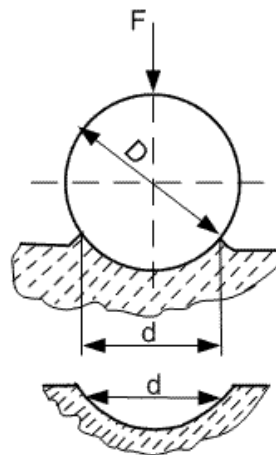


Рисунок 2. 3. – Схема вимірювання твердості за Брінеллем

Після зняття навантаження вимірюють діаметр сферичного відбитка d та визначають значення твердості за допомогою спеціальних таблиць або за формулою (2.7), де D та d – діаметри кульки та відбитка відповідно.

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, [\text{МПа}] \quad (2.7)$$

При дослідженні сталей та чавунів, як правило, використовують навантаження $F = 29420$ Н (3000 кГс), при дослідженні міді, алюмінію, нікелю та їх сплавів $F = 9800$ Н (1000 кГс), а при випробуванні деяких металів (свинець, сурма, олово та їх сплави) $F = 2450$ Н (250 кГс).

Твердість за Брінеллем позначають цифрами, що характеризують величину твердості, та буквами HB, наприклад, 2200HB.

Між значенням твердості НВ та границею міцності σ_B існує певна залежність: для сталей $\sigma_B=0,34$ НВ, для мідних сплавів $\sigma_B=0,45$ НВ, для алюмінієвих $\sigma_B=0,36$ НВ.

Недолік методу Брінелля полягає в тому, що при вимірюванні твердих матеріалів індентор-кулька починає деформуватися, тому за методом Брінелля досліджують лише ті матеріали, твердість яких не перевищує 4500 НВ [МПа] (450 НВ [кГс/мм²]).

Метод Роквелла (ГОСТ 9013-59, ІСО 6508-86) – більш універсальний, його можна застосувати як для м'яких, так і для твердих матеріалів, а також для тонких поверхневих шарів. Індентором може бути сталева загартована кулька діаметром 1,5875 мм або алмазний конус з кутом 120°. Індентор вдавлюється в поверхню металу, що досліджується, під дією послідовно докладених навантажень – попереднього F_0 та основного F_1 (рис. 2.4).

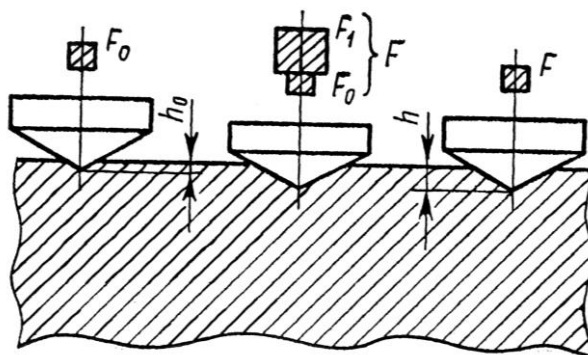


Рисунок 2. 4. – Схема вимірювання твердості за Роквеллом

Після зняття основного навантаження та збереження попереднього прилад показує число твердості за Роквеллом HR. Прилад має три шкали – А, В, С. У таблиці 2.2 наведені значення характеристик вимірювання твердості за різними шкалами.

Таблиця 2.2. Вимірювання твердості за різними шкалами

Шкала	Індентор	Навантаження, кГс			Позначення	Застосування
		F_0	F_1	F		
А	Алмазний конус	10	50	60	HRA	Дуже тверді матеріали, а також тонкі шари (цементовані, ціановані, азотовані та ін.)
В	Сталева кулька	10	90	100	HRB	Порівняно м'які матеріали (кольорові сплави, сталі в нетермообробленому стані)
С	Алмазний конус	10	140	150	HRC	Тверді матеріали (сталі в термообробленому стані, деякі сплави)

Для порівнянь значень твердості, які одержано при вимірюванні твердості за різними методами, їх за допомогою спеціальних таблиць переводять у НВ.

Метод Віккерса (ГОСТ 2999-75) полягає у вдавлюванні в поверхню металу правильної алмазної піраміди з кутом 136° при навантаженні $F = 9,8 \dots 980 \text{ Н}$ ($1 \dots 100 \text{ кГс}$) (рис.2.5). Після зняття навантаження вимірюють діагоналі та за спеціальними таблицями, знаходять значення твердості за Віккерсом.

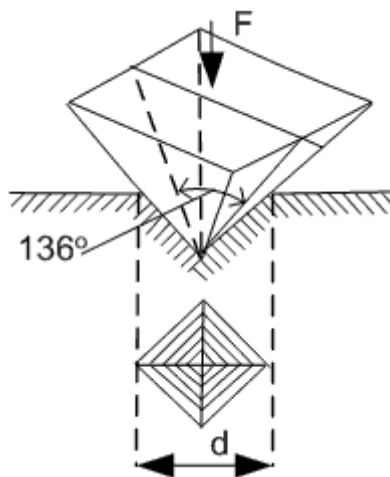


Рисунок 2.5. – Схема вимірювання твердості за Віккерсом

Твердість за Брінеллем та Віккерсом має однакову розмірність і для деяких матеріалів значення твердості практично співпадають. При випробуванні твердих матеріалів точніші дані одержують за допомогою методу Віккерса, ніж за допомогою методів Брінелля та Роквелла.

Вимірювання мікротвердості (ГОСТ 9450-76) подібне до методу Віккерса. Прилад для визначення мікротвердості з механізму вдавлювання алмазної піраміди та оптичного мікроскопа. Навантаження не перевищує $1,96 \text{ Н}$ ($0,2 \text{ кГс}$). Цей метод застосовується для визначення твердості структурних складових сплавів, окремих зерен, тонких покриттів. В основному вимірювання мікротвердості використовується в дослідницьких роботах.

2.3 Механічні характеристики, які визначаються при динамічних випробуваннях.

Багато деталей машин, приладів та механізмів при експлуатації працюють в умовах, коли навантаження зростає з великою швидкістю. Для більшості металів зростання швидкості навантаження веде до зростання їх характеристик міцності, тому випробування на розтягування для матеріалів, що працюють в умовах динамічних (високошвидкісних) навантажень, не дають достовірних результатів.

Для визначення механічних характеристик металів при динамічних навантаженнях проводять динамічні (ударні) випробування. Ударні випробування класифікують за видом деформації, кількістю ударів та

температурою випробувань.

За видом деформації розрізняють три основних види динамічних (ударних) випробувань: на ударний розрив, на ударне стискування та на ударний згин. Випробування проводять шляхом нанесення одного або багатьох ударів. За температурними умовами випробування поділяють на три види: при нормальній, підвищеній або зниженій температурі.

Найбільш поширеними є динамічні випробування на ударний згин (ГОСТ 9454-78), які дають змогу виявити схильність металу до крихкого руйнування. Метод заснований на руйнуванні зразка з концентратором (рис. 2.6, б) одним ударом маятникового копра (рис. 2.6, а).

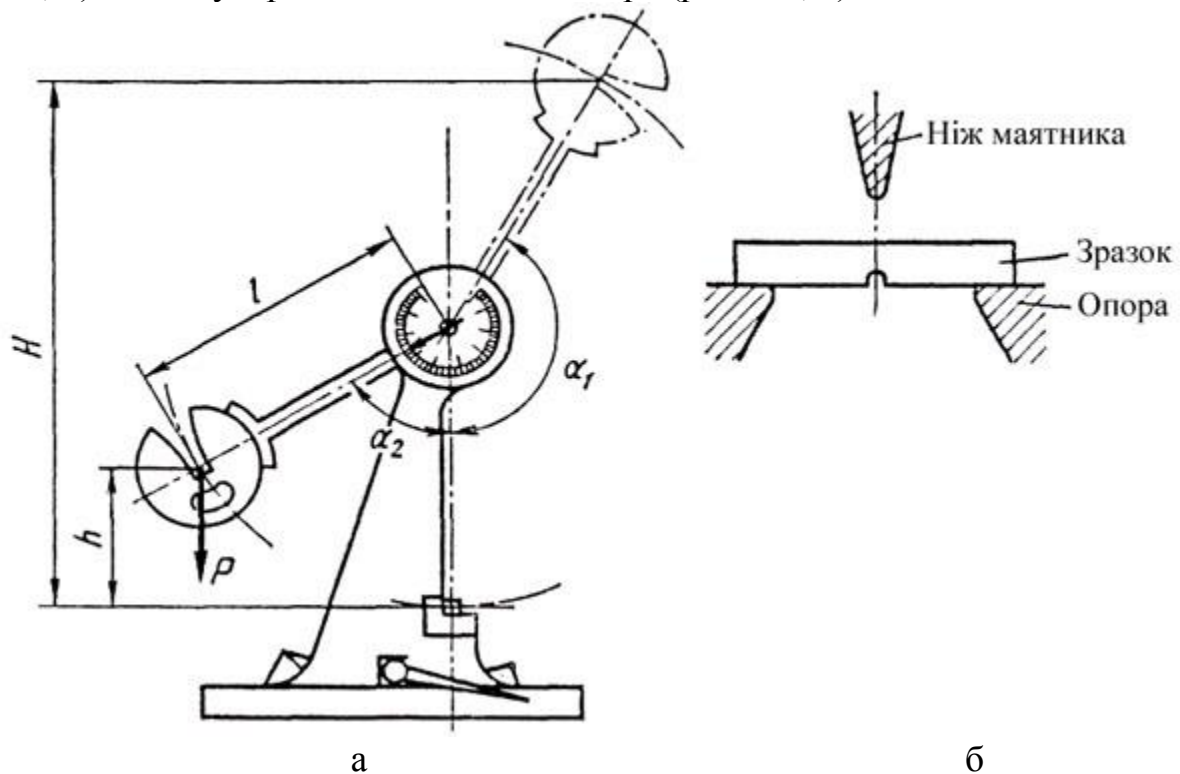


Рисунок 2.6. – Схема маятникового копра (а) та методу випробування на удар (б)

Маятник вагою P підіймають на деяку висоту H . Зразок встановлюють на опори на шляху руху маятника. Маятник, що обертається при падінні на кут α_1 , набуває кінетичної енергії, яка дорівнює добутку ваги P на висоту підйому H . Після руйнування зразка маятник обертається на менший кут α_2 та піднімається на меншу висоту h . Енергія маятника після руйнування зразка дорівнює добутку ваги P на висоту підйому h . Повна робота K , витрачена при ударі (робота удару), обчислюється за такою формулою:

$$K = PH - Ph = PH(\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1) \quad (2.8)$$

Роботу руйнування K_C визначають за шкалою приладу з точністю до 0,1 кгс·м або до 0,1 кгс·см в залежності від градування шкали. Опір матеріалу руйнуванню при динамічних навантаженнях характеризує *ударна*

в'язкість (КС). Їх визначають як питому роботу руйнування призматичного зразка з концентратом (надрізом) за один удар:

$$КС = \frac{A}{S_0}, \quad (2.9)$$

де A – робота руйнування зразка, Дж;

S_0 – площа поперечного перерізу зразка в місці концентратора, м^2 .

Методика випробувань передбачає використання зразків з концентраторами трьох видів (рис. 2.7):

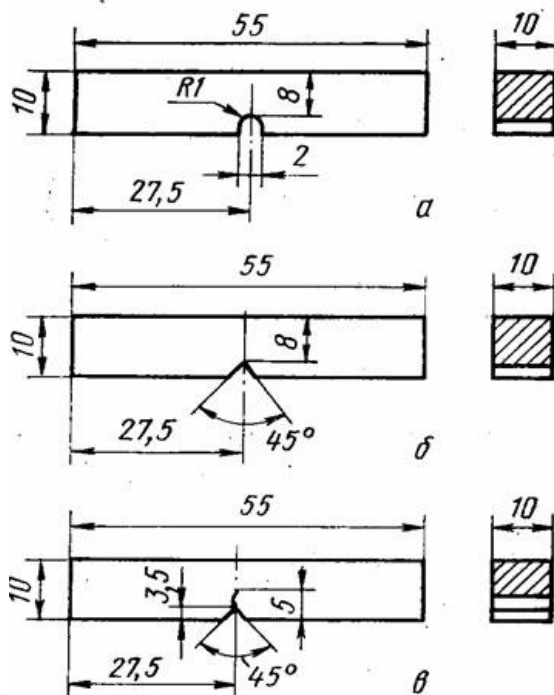


Рисунок 2.7. – Зразки для випробувань на удар

- У з радіусом концентратора 1 мм (рис.2.7, а),
- V з радіусом 0,25 мм та кутом 45° (рис. 2.7, б),
- Т з радіусом 0,25мм та втомною тріщиною (рис. 2.7, в).

Відповідно ударна в'язкість позначається КСУ, КСВ, КСТ. Чим більше величина ударної в'язкості, тим краще працює матеріал в умовах динамічних навантажень. Злам зразків з високою ударною в'язкістю матовий – метал спочатку деформується, на що витрачається частина роботи, а потім руйнується. Злам крихких зразків блискучий – руйнування йде по границях зерен.

Величина ударної в'язкості залежить від виду металу, його структури, швидкості деформації, температури випробувань. Із зниженням температури ударна в'язкість металів зменшується, а ймовірність крихкого руйнування зростає.

Значення ударної в'язкості залежать від температури випробувань (рис. 2.8).

Для визначення мінімально допустимої температури роботи даного металу чи сплаву проводять серію випробувань. За *пори́г холодноламкості* приймається температура, при якій у зламі зразка спостерігається 50%

крихкої складової.

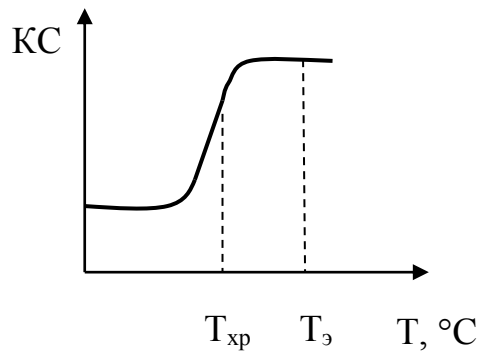


Рисунок 2.8. – Залежність ударної в'язкості від температури.

Ділянка, де ударна в'язкість має високі значення, відповідає в'язкому руйнуванню, а ділянка, де ударна в'язкість має низькі значення, відповідає крихкому руйнуванню. Температура переходу з в'язкої в крихку область, називається порогом холодноламкості ($T_{хр}$). Температура експлуатації $T_э$ повинна бути завжди вище порога холодноламкості. Різниця температур експлуатації й порога холодноламкості називається температурним запасом в'язкості (ΔT):

$$\Delta T = T_э - T_{хр} \quad (2.10)$$

Чим більше запас в'язкості, тим менше ймовірність крихкого руйнування.

2.4 Випробування при циклічному навантаженні

Під тривалою дією повторно-змінних напружень руйнування металу може починатися навіть при напруженнях, що не перевищують $\sigma_{0,2}$.

Поступове накопичення пошкоджень у металі під дією циклічних навантажень, що призводять до утворення тріщин та руйнування, називається втомою, а здатність металу чинити опір втомі – витривалістю.

Випробування на втому проводять для визначення границі витривалості, тобто найбільшого значення максимального напруження циклу, під дією якого не виникає втомного руйнування зразка після довільно великої або заданої кількості циклів навантаження.

Цикл навантаження – це сукупність змінних значень напружень за один період їх зміни. За максимальне $\sigma_{\max}$ або мінімальне $\sigma_{\min}$ значення напруження циклу приймають найбільше або найменше за алгебраїчною величиною напруження. Цикл характеризується коефіцієнтом асиметрії R :

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2.11)$$

Якщо $R = -1$, цикл називають *симетричним*), якщо $\sigma_{\min}$ та $\sigma_{\max}$ не рівні за величиною, то цикл *асиметричний*.

Границя витривалості позначається σ_R (де R – коефіцієнт асиметрії циклу), і σ_{-1} – при симетричному циклі.

Границю витривалості визначають на зразку, що обертається з прикладенням згинального навантаження за симетричним циклом (рис.2.9) .

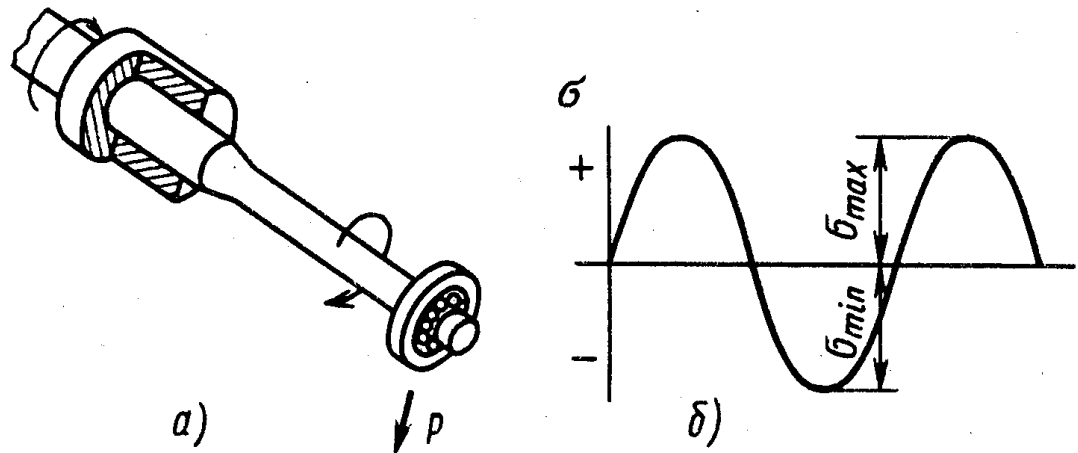


Рисунок 2.9. – Схема випробувань на втому (а) та циклічних змін напружень (симетричний цикл $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$) (б)

Для досліджень використовують не менше десяти зразків. Кожний зразок випробують лише на одному рівні напружень до руйнування або до базової кількості циклів. База випробувань N повинна бути не менша, ніж $10 \cdot 10^6$ циклів для сталі та $100 \cdot 10^6$ циклів для кольорових та легких сплавів. За результатами досліджень окремих зразків будують криві втоми в координатах « $\ln \sigma_{max} - \ln N$ ».

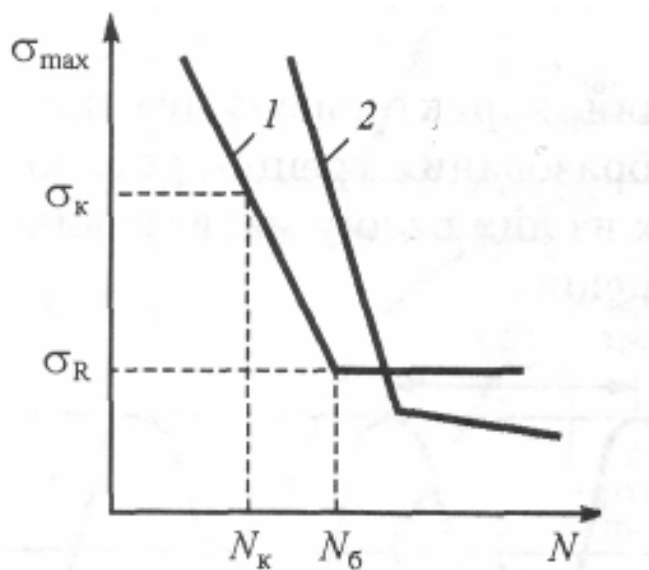


Рисунок 2.10. – Криві втоми для сталі (1) та кольорових металів (2)

Границі витривалості σ_R відповідає максимальне значення напруження σ_{max} , що не викликає руйнування при будь-якій кількості циклів.

Випробування на втому можуть проводитись при підвищених або знижених температурах. Контроль температури при цьому здійснюється за допомогою термопари, закріпленої у зразку. Проводяться також випробування на втому в умовах агресивного середовища.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке механічні властивості металу?
2. Які види механічних випробувань існують?
3. Що таке твердість? Методи вимірювання твердості.
4. Охарактеризуйте метод вимірювання твердості за Брінеллем. У чому полягають недоліки цього методу?
5. У чому полягає вимірювання твердості за Роквеллом?
6. У чому полягає вимірювання твердості за Віккерсом?
7. Яке навантаження слід застосовувати при випробуванні твердості за Брінеллем для сталі, мідних та алюмінієвих сплавів?
8. Яким методом виміряють твердість листової нетермообробленої сталі товщиною 1 мм? Чому?
9. Чому випробування на розтягування застосовуються найбільш широко у порівнянні з іншими методами випробувань?
10. Охарактеризуйте методи випробувань на розтягування та характеристики, що визначаються при цих випробуваннях.
11. Як пов'язане число твердості НВ з тимчасовим опором σ_B ?
12. Для чого використовують динамічні випробування?
13. Методика та обладнання для динамічних випробувань.
14. Що більше – КСU, КСV, КСТ одного й того ж матеріалу? Чому?
15. Що таке границя витривалості і як її визначають?
16. Два зразки з різних матеріалів піддавали випробуванню на розтягування. Зразок №1 діаметром 20мм зруйнувався при навантаженні 157кН, зразок №2 діаметром 50мм – при навантаженні 667кН. Який з матеріалів (зразків №1 чи №2) міцніший? Відповідь поясніть.
17. Чи можна використовувати алюмінієвий сплав ($\sigma_B = 450 \text{ МПа}$) для виготовлення деталі діаметром 40мм, якщо в процесі роботи виникає навантаження на деталь 620кН? Відповідь поясніть.
18. Твердість алюмінієвого зразка дорівнює 670НВ. Знайдіть міцність цього зразку.

Глава 3

КРИСТАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛІВ

Перехід металу з рідкого або пароподібного стану у твердий з утворенням кристалічної структури називається *первинною кристалізацією*. Первинна кристалізація характерна для всіх металів. Утворення нових кристалів у твердій кристалічній речовині називається *вторинною кристалізацією*. Вона властива лише тим металам та сплавам, які зазнають поліморфних перетворень.

Процес кристалізації складається з двох стадій, які протікають одночасно: утворення центрів кристалізації та зростання кристалів навколо цих центрів. Кристали можуть утворюватися самочинно (самочинна кристалізація) або зростати на готових центрах кристалізації (несамочинна кристалізація).

3.1 Самочинна кристалізація.

У природі усі перетворення, що протікають повільно, в тому числі кристалізація та плавлення, обумовлені тим, що новий стан у нових умовах виявляється більш стійким, має менший запас енергії. Чим більша вільна енергія системи, тим система менш стійка, і, коли є можливість, то система переходить у стан, де вільна енергія менша.

Самочинна або гомогенна кристалізація обумовлена прагненням речовини мати більш стійкий стан, який характеризується зменшенням термодинамічного потенціалу (енергії Гіббса) G :

$$G = H - TS \quad (3.1)$$

де H – ентальпія системи,

S – ентропія,

T – температура проведення процесу.

З підвищенням температури термодинамічний потенціал речовини як у твердому, так і в рідкому стані зменшується, що показано на рис. 3.1.

Вище температури T_n більш стійким є рідкий стан металу, що має менший рівень вільної енергії, а нижче цієї температури більш стійкий твердий стан. При температурі T_n значення енергій Гіббса металу у рідкому та твердому станах рівні. Температура T_n відповідає *рівноважній температурі кристалізації* (або плавлення) даної речовини, при якій дві фази (тверда та рідка) можуть існувати одночасно. Процес кристалізації при рівноважній температурі ще не починається. Кристалізація металу починається лише тоді, коли утворюється різниця енергій ΔG , яка виникає внаслідок зменшення енергії Гіббса твердого металу у порівнянні з рідким.

Таким чином, процес кристалізації може протікати лише при переохолодженні металу нижче рівноважної температури T_n . Різниця між температурою T_n та температурою T_k , при якій може відбуватися процес кристалізації, називається *ступенем переохолодження* ΔT :

$$\Delta T = T_n - T_k \quad (3.2)$$

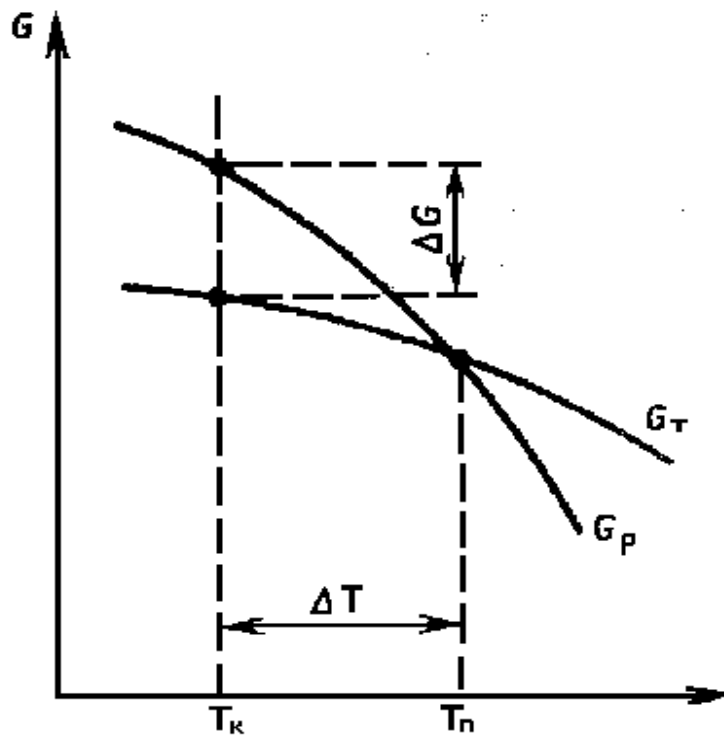


Рисунок 3.1. – Залежність енергії Гіббса від температури для метала у рідкому (G_P) та твердому (G_T) стані.

Чим повільніше охолоджується метал, тим ступінь переохолодження менше. При кристалізації чистої речовини виділення теплоти внаслідок охолодження компенсується теплотою, що виділяється при кристалізації. У зв'язку з цим на кривій охолодження, що побудована в координатах «температура – час» процесу кристалізації відповідає горизонтальна ділянка (рис. 3.2).

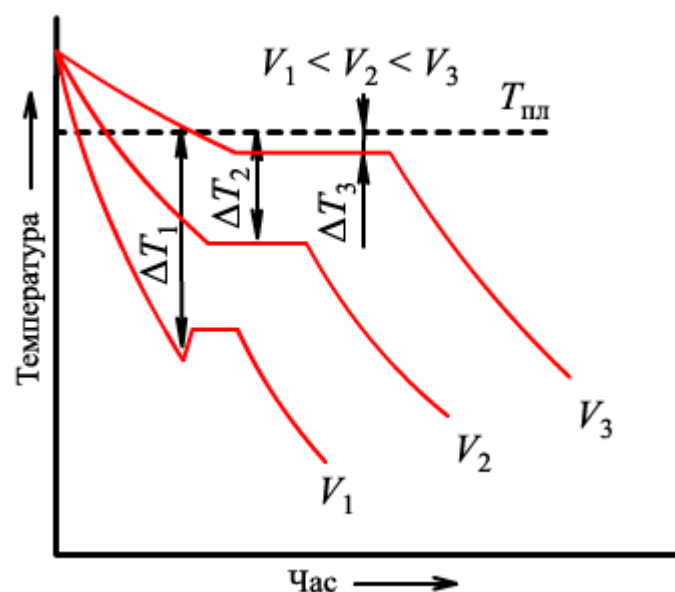


Рисунок 3.2. – Залежність ступеня переохолодження від швидкості охолодження металу

При великому об'ємі металу, що кристалізується, теплота кристалізації підвищує температуру практично до рівноважної (швидкість охолодження V_3). При кристалізації малого об'єму металу теплоти, що виділяється. Недостатньо, внаслідок чого кристалізація відбувається із значним переохолодженням (швидкість охолодження V_2).

Ступень переохолодження залежить від природи металу. Вона збільшується із підвищенням чистоти металу та зростанням швидкості охолодження. При кристалізації хімічно чистого металу з високою швидкістю V_1 ступень переохолодження дуже великий, але теплота, що виділяється. Приводить до зростання температури кристалізації.

Зазвичай ступень переохолодження у виробничих умовах не перевищує $10...30^{\circ}\text{C}$; але при великих швидкостях охолодження може сягати сотень градусів.

3.2 Механізм самочинної кристалізації

В рідкому стані атоми речовини внаслідок теплового руху перемішуються хаотично. В цей же час у рідині є угруповання атомів малого об'єму, в межах яких розташування атомів речовини подібно до їх розташування у кристалічних решітках. Ці угруповання нестійкі, вони розпадаються і знов утворюються у рідині.

Утворення об'ємів з правильним розташуванням часток змінює енергію Гіббса системи. З одного боку, при переохолодженні перехід частини рідини у твердий стан зменшує термодинамічний потенціал, з другого боку, енергія зростає внаслідок появи границі розподілу між кристалами та рідким металом. Сумарна енергія залежить від розміру кристалічних угруповань. Утворення дрібних кристаликів приводить до зростання енергії системи. Такі угруповання є нестійкими і розпадаються. При однаковому сумарному об'ємі великий кристал має меншу площу поверхні, ніж декілька дрібних, тому утворення великих кристалів викликає зменшення енергії Гіббса системи. Такі угруповання атомів стійкі й здатні подальшого зростання. Їх називають центрами кристалізації (зародками).

Мінімальний розмір зародка, здатного до росту при даних температурних умовах, називають *критичним розміром зародка*, а сам зародок критичним або рівноважним. Критичний розмір зародка залежить від поверхневого натягіння рідини, тобто від природи речовини, та від температури. Із збільшенням ступеня переохолодження критичний розмір зародка зменшується, а їх кількість зростає.

Схематично процес кристалізації представлений на рис. 3.3. При переохолодженні нижче T_n у багатьох ділянках рідкого металу утворюються стійкі, здатні до зростання кристалічні зародки. Зростання зародків відбувається за рахунок переходу атомів з переохолодженої рідини до кристалів. Кристал збільшується шар за шаром, при цьому кожен шар має одноатомну товщину. Доки утворені кристали зростають вільно, вони мають майже правильну геометричну форму. При зіткненні кристалів їх правильна

форма порушується, тому що на таких ділянках зростання граней припиняється. Внаслідок цього кристали одержують неправильну форму і називаються кристалітами або *зернами*.

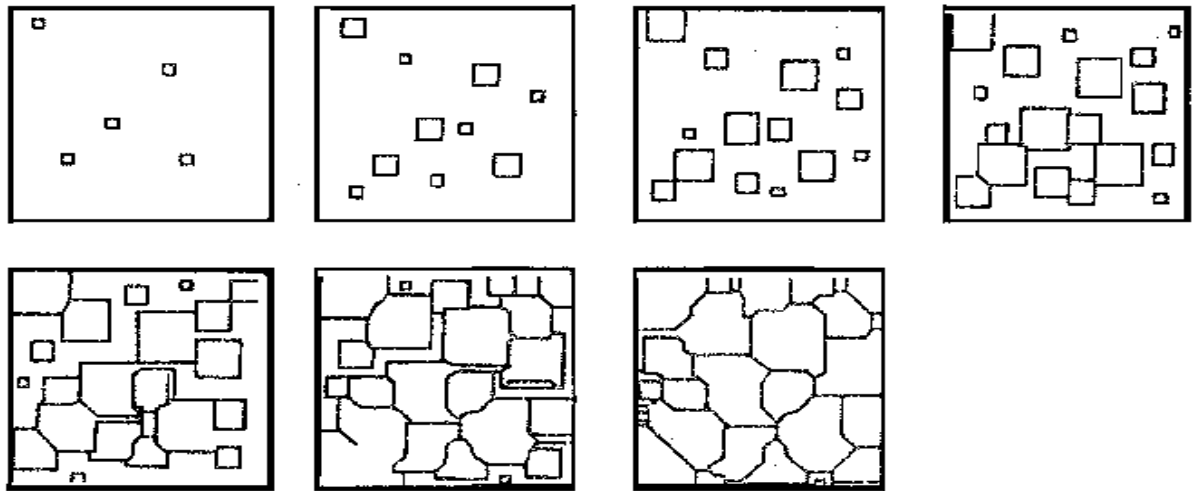


Рисунок 3.3. – Схема процесу кристалізації.

Досліди показують, що величина і кількість зерен на кінець кристалізації залежать від швидкостей зародження і росту кристалів. Під *швидкістю зародження* розуміють кількість кристалів, які сформувалися в одиниці об'єму за одиницю часу (кількість центрів (КЦ) $1/\text{мм}^3 \text{ с}$). Під *швидкістю росту* розуміють швидкість збільшення лінійних розмірів зростаючого кристалу (ш.р.) мм/с (рис. 3.4).



Рисунок 3.4. – Вплив ступеня переохолодження на кількісні показники кристалізації.

При незначних ступенях переохолодження, коли критичний розмір зразка великий, а швидкість утворення зародків мала, при затвердінні

формується крупнокристалічна структура. При збільшенні ступеня переохолодження внаслідок уповільнення дифузійних процесів формується структура з дрібним зерном.

Поряд із ступенем переохолодження на розмір зерна впливає також температура розливання металу, його хімічний склад і, особливо, наявність в ньому домішок, які стають джерелами зародків кристалів.

3.3 Несамочинна кристалізація

В реальних умовах процеси кристалізації та характер структури, що утворюється, в значній мірі залежать від готових центрів кристалізації. Такими центрами є, як правило, тугоплавкі частки оксидів та інтерметалідних з'єднань, що утворені домішками. К початку кристалізації ці частки знаходяться у рідкому металі у вигляді твердих включень. При затвердінні атоми металу відкладаються на поверхні домішок, як на готових зародках. Така кристалізація називається *несамочинною* або гетерогенною.

Подрібнення структури сприяє поліпшенню механічних властивостей металу. На практиці для здрібнювання структури металів і сплавів широко застосовують технологічну операцію, названу *модифікуванням*. Вона складається у введенні в рідкий сплав перед розливанням спеціальних добавок – модифікаторів. У якості останніх використовують поверхнево-активні речовини (наприклад, бор у сталях, натрій в алюмінії і його сплавах), а також елементи, що утворюють тугоплавкі дисперсні частки (наприклад, титан, цирконій в алюмінії і його сплавах; алюміній, титан у сталях). Модифікатори додають у сплави в кількостях від тисячних до десятих часток відсотка.

При збільшенні температури рідкого металу домішки, що грають роль додаткових центрів кристалізації, розчиняються або дезактивуються, тому підвищення температури рідкого металу перед розливанням приводить до укрупнення зерна при кристалізації. Навпаки, підстижування металу перед розливанням до температур, що незначно перевищують температуру плавлення металу, сприяє зменшенню розміру зерна. Підстижування ефективно при наявності домішок (або модифікаторів), що утворюють фази зі структурною й розмірною відповідністю з основним металом; у цьому випадку навіть після значних перегрівів можна одержати дрібне зерно, особливо якщо подовжити витримку перед розливанням.

3.4 Форма кристалів та будова зливків.

Форма й розмір зерен, що утворюються при кристалізації, залежать від умов їхнього росту, головним чином від швидкості й напрямку відводу теплоти й температури рідкого металу, а також від змісту домішок. Ріст зерна відбувається за дендритною (деревоподібною) схемою (рис.3.5).

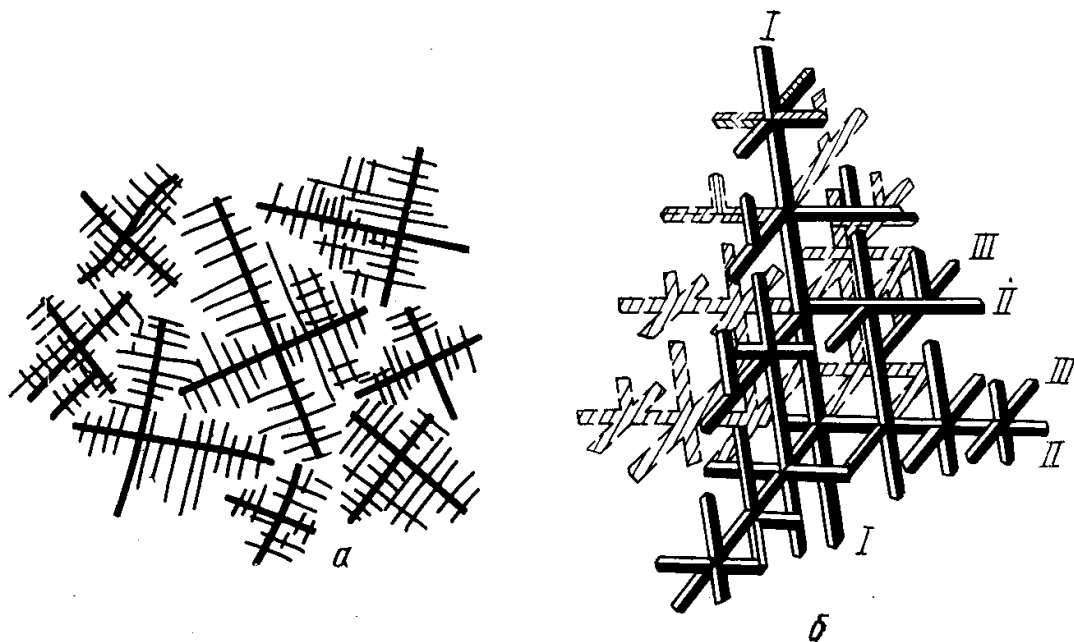


Рисунок 3.5 – Дендритна кристалізація: схема дендритного кристалу (а) та схема його росту (б). I, II та III – відповідно осі першого, другого та третього порядків.

Установлено, що максимальна швидкість росту кристалів спостерігається по таких площинах і напрямкам, які мають найбільшу щільність упакування атомів. В результаті виростають довгі гілки, які називаються осями першого порядку. Потім на осях першого порядку з'являються й починають рости гілки другого порядку, від яких відгалужуються осі третього порядку й т.д. В останню чергу йде кристалізація в ділянках між осями дендритів.

Дендрити ростуть доти, поки не стикнуться між собою. Після цього остаточно заповнюються простір між дендритами, і дендрити перетворюються в кристали з неправильним зовнішнім огранюванням. Такі кристали називають *зернами* або кристалітами. При нестачі рідкого металу для заповнення між дендритних просторів (наприклад, на відкритій поверхні злитка або в усадочній раковині) кристал зберігає дендритну форму.

Умови відводу теплоти при кристалізації значно впливають на форму зерен. Кристали ростуть переважно в напрямку, зворотному відводу теплоти. Тому при спрямованому тепловідведенні утворюються витягнуті (стовпчасті) кристали. Якщо теплота від зростаючого кристала приділяється у всіх трьох напрямках із приблизно однаковою швидкістю, формуються рівноосні кристали.

Структура злитка залежить від багатьох факторів, основні з яких наступні: кількість і властивості домішок у чистому металі або легуючих елементах у сплаві, температура розливання, швидкість охолодження при кристалізації, а також конфігурація, температура, теплопровідність, стан внутрішньої поверхні ливарної форми. На рис. 3.6 наведені схеми макроструктур злитків, отриманих у простій вертикальній металевій формі.

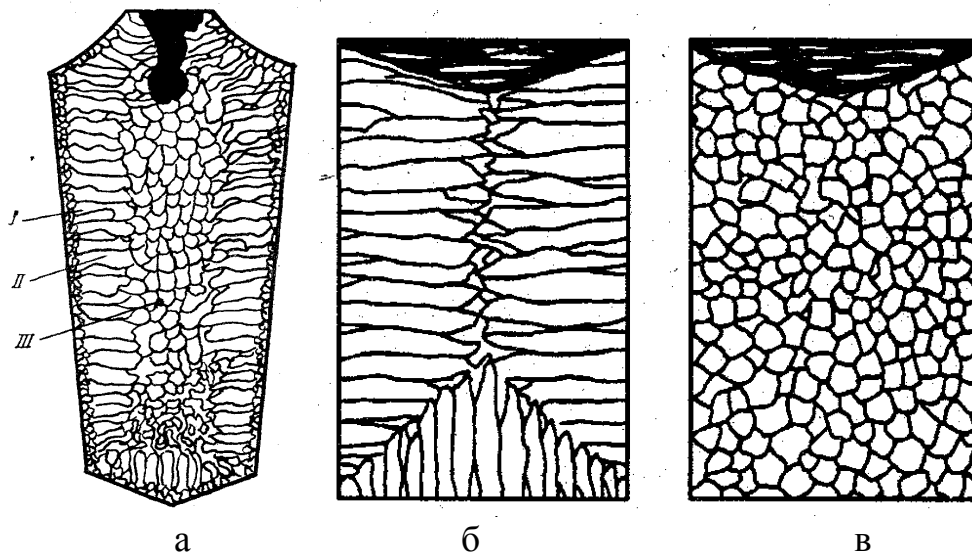


Рисунок 3.6. – Схеми макроструктур зливків: а – типова, б – транскристалічна; в – однорідна дрібнозерниста

Типова структура злитка сплавів складається із трьох зон (див. рис.3.6, а). Рідкий метал насамперед переохолоджується в місцях зіткнення з холодними стінками форми. Більший ступінь переохолодження сприяє утворенню на поверхні злитка зони 1 дрібних рівноосних кристалів. Відсутність спрямованого росту кристалів цієї зони пояснюється їхньою випадковою орієнтацією, що є причиною зіткнення кристалів і припинення їхнього росту. Орієнтація кристалів, у свою чергу, залежить від стану поверхні форми (шорсткість, адсорбовані гази, волога) і наявності в рідкому металі оксидів, неметалічних включень. Ця зона дуже тонка й не завжди помітна неозброєним оком. Потім відбувається переважний ріст кристалів, найбільше сприятливо орієнтованих стосовно тепловідведення. Так утвориться зона 2 стовпчастих кристалів, розташованих нормально до стінок форми. Нарешті, у середині злитка, де спостерігається найменший ступінь переохолодження й не відчувається спрямованого відводу теплоти, утворюються рівноосні кристали більших розмірів (зона 3).

Застосовуючи різні технологічні прийоми, можна змінити кількісне співвідношення зон або виключити зі структури злитка яку-небудь зону взагалі. Наприклад, перегрів сплавів перед розливанням і швидке охолодження при кристалізації приводять до формування структури, що складає практично з одних стовпчастих кристалів (рис. 3.6, б). Така структура називається транскристалічною. Подібну структуру мають злитки дуже чистих металів. Зона стовпчастих кристалів характеризується найбільшою щільністю, але в місці стику стовпчастих кристалів збираються нерозчинні домішки, і злитки із такою структурою часто розтріскуються при обробці тиском. Транскристалічна структура, утворюючись у зварених швах, зменшує їхню міцність.

Низька температура розливання сплавів, продувка рідкого металу інертними газами, вібрація, модифікування приведуть до зменшення й навіть

зникненню зони стовпчастих кристалів і одержанню злитків зі структурою, що складається з рівноосних кристалів (див. рис. 3.6, в).

Злитки сплавів мають неоднорідний склад. Наприклад, у сталевих злитках по напрямку від поверхні до центра й знизу нагору збільшується концентрація вуглецю й шкідливих домішок – сірки та фосфору.

Хімічна неоднорідність по окремих зонах злитка називається *зональною ліквіацією*. Вона негативно впливає на механічні властивості. У реальних злитках крім зональної зустрічаються й інші види ліквіації. Так, *дендритна ліквіація* властива сплавам із широким інтервалом кристалізації. Вона характеризується неоднаковим хімічним складом по перетині зерна (дендрита). Центр зерна збагачений більше тугоплавким елементом, до периферії його кількість зменшується.

3.5 Одержання монокристалів

Велике наукове й практичне значення мають монокристали. Монокристали відрізняються мінімальними структурними недосконалостями. Одержання монокристалів дозволяє вивчати властивості металів, виключивши вплив границь зерен. Застосування в монокристалічному стані германія й кремнію високої чистоти дає можливість використати їхні напівпровідникові властивості й звести до мінімуму неконтрольовані зміни електричних властивостей.

Монокристали можна одержати, якщо створити умови для росту кристала тільки з одного центра кристалізації. Існує кілька методів, у яких використаний цей принцип. Найважливішими з них є методи Бриджмена й Чохральського.

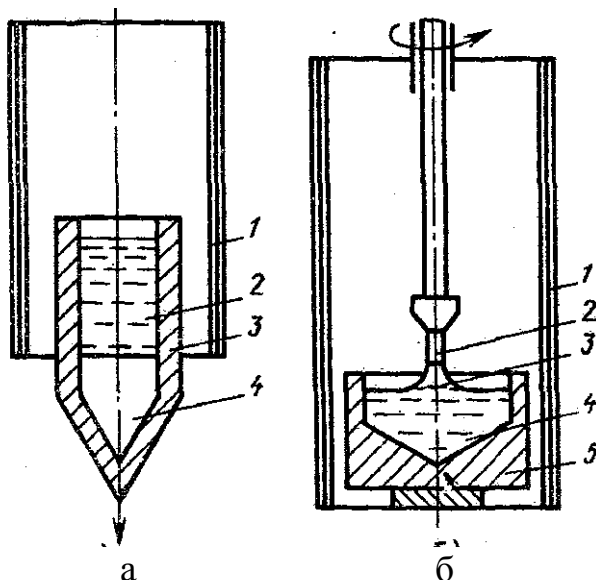


Рисунок 3.7. – Схеми установок для вирощування монокристалів: а – метод Бриджмена; б – метод Чохральського

Метод Бриджмена (рис.3.7, а) полягає в тому, що метал, поміщений у тигель із конічним дном 3, нагрівається у вертикальній трубчастій печі 1 до

температури на $50...100^{\circ}\text{C}$ вище температури його плавлення. Потім тигель із розплавленим металом 2 повільно віддаляється з печі. Охолодження настає в першу чергу у вершині конуса, де й з'являються перші центри кристалізації. Монокристал 4 виростає з того зародка, у якого напрямок переважного росту збігається з напрямком переміщення тигля. При цьому ріст інших зародків придушується. Для безперервного росту монокристала необхідно висувати тигель із печі зі швидкістю, що не перевищує швидкість кристалізації даного металу.

Метод Чохральського (рис. 3.7, б) складається у витягуванні монокристалу з розплаву, нагрітого в печі 1. Для цього використовується готовий невеликий зразок 2, вирізаний з монокристалу. Він вводиться в поверхневий шар рідкого металу 4, що має температуру ледве вище температури плавлення. Площина кристалу, що стикається з поверхнею розплаву, повинна мати кристалографічну орієнтацію, що бажано одержати в зростаючому монокристалі 3. Кристал витримують у рідкому металі для оплавлення й установаження рівноваги в системі рідина — кристал. Потім його повільно, зі швидкістю, не перевищуючою швидкості кристалізації ($\sim 1...2$ мм/хв), видаляють із розплаву. Рідкий метал, що тягнеться за кристалом, в області більш низьких температур над поверхнею ванни кристалізується, успадковуючи структуру первинного кристалу. Для одержання симетричної форми зростаючого монокристалу й рівномірного розподілу домішок у ньому ванна 5 з розплавом обертається зі швидкістю до 100 об/хв, а назустріч їй з меншою швидкістю обертається монокристал. Діаметр зростаючого монокристалу залежить від швидкості вирощування й температури розплаву. Збільшення швидкості вирощування веде до виділення більшої теплоти кристалізації, перегріву розплаву й зменшенню діаметра монокристала.

3.6 Аморфні метали

При надвисоких швидкостях охолодження з рідкого стану ($> 10^3$ C/c) дифузійні процеси настільки вповільнюються, що придушується утворення зародків і ріст кристалів. У цьому випадку при затвердінні утвориться аморфна структура. Матеріали з такою структурою одержали назву *аморфні металеві сплави* (АМС), або металеві стекла. Затвердіння з утворенням аморфної структури принципово можливо практично для всіх металів. У цей час аморфна структура отримана в більш ніж 200 сплавів і напівпровідникових матеріалів. Це сплави легкоплавких, рідкоземельних (Sc, Y, La і ін.) і перехідних металів. Для утворення аморфної структури перехідних металів до них необхідно додавати так звані аморфізатори (P, B, N, S і др.).

Надвисокі швидкості охолодження рідкого металу ($> 10^6$ °C/c) для одержання аморфної структури можна реалізувати такими способами, як катапультування краплі на холодну пластину, центрифугація краплі або струмені, розпилення струменя газом або рідиною з високою охолодною

здатністю й ін. Найбільш ефективними способами одержання стрічок, придатних для практичного застосування, вважають охолодження рідкого металу на зовнішній або внутрішній поверхнях обертових барабанів, виготовлених з матеріалів високої теплопровідності, прокатку між холодними валками металу, що подається у вигляді струменя. Тонкий шар аморфного металу одержують при розплавленні поверхні виробів лазерним променем завдяки швидкому відводу теплоти при затвердінні масою основного металу.

Тонкий шар аморфного металу отримують при розплавленні поверхонь виробів лазерним променем завдяки швидкому відводу теплоти при затвердінні масою основного металу. АМС можна отримати і шляхом надшвидкого охолодження з газового середовища (пароподібного або іонізованого стану), електролізом і катодним розпиленням з високими швидкостями осадження, хімічним осадженням (сплави Ni – P) і механічним легуванням.

АМС значно відрізняються від своїх кристалічних аналогів за будовою і, отже, за властивостями. У їх структурі відсутній дальній порядок в розміщенні атомів і характерні особливості структури полікристалічних сплавів: межі зерен, дислокації і інші дефекти. У АМС немає зональної ліквідації і в цілому вони більш однорідні за структурою і хімічним складом, ніж їх кристалічні аналоги. Водночас АМС в залежності від умов отримання зберігають геометричні та хімічні неоднорідності ближнього порядку. У макромасштабі вони проявляються у формі неоднорідностей густини по товщині і довжині стрічок. Як наслідок, в стрічках виникають залишкові напружки і зміна властивостей.

Границею збереження аморфного стану при нагріванні зі швидкістю близько $20^{\circ}\text{C} / \text{хв}$ є температура кристалізації $t_k \sim 0,5$ тпл. Для підвищення стабільності властивостей АМС застосовують термічну обробку (відпал).

У порівнянні з кристалічними аналогами АМС мають більш низьку щільність, на 20...40% нижче модуль пружності і в 2 ... 4 рази більше питомий електричний опір.

Особливістю АМС є відсутність наклепу при різних технологічних операціях. У порівнянні з кристалічними аналогами АМС зберігають надлишкову енергію, яка виділяється при кристалізації. З цієї причини АМС хімічно активні; корозійно-стійкими є лише сплави, у яких утворюється пасивуюча захисна плівка. Це, в першу чергу, сплави заліза з хромом і достатньою кількістю фосфору і вуглецю. У порівнянні з корозійно-стійкими сталями ці АМС виявляються більш стійкими і для додання їм корозійної стійкості потрібно менше хрому: 8...9% проти 13% в сталях.

АМС на основі заліза є магнітно-м'якими матеріалами, у яких немає кристалографічної магнітної анізотропії й істотно знижені втрати на перемагнічування. При цьому магнітні властивості малочутливі до механічних впливів. Отримано магнітні матеріали й з високою магнітною енергією. Вони являють собою сполуки рідкоземельних і перехідних металів.

3.7 Нанокристалічні матеріали

Нанокристалічними називають матеріали з розмірами кристалів (зерен або часток) менше 100 нм. По комплексу властивостей вони значно відрізняються від звичайних матеріалів такого ж хімічного складу, навіть якщо структура останніх є дрібнозернистою з розміром зерен в поперечному напрямку не більше 5...10 мкм.

Властивості нанокристалічних матеріалів визначаються розмірами окремих зерен, властивостями граничного шару, а також колективною взаємодією основних складових структури з поверхневими шарами частинок. У нанокристалічних матеріалах частка поверхневого шару швидко зростає при подрібненні зерен від 100 до 4...5 нм: в нанокристалічних матеріалах, починаючи з діаметра зерен 6 нм, обсяг граничного шару стає більше обсягу кристалу.

У компактному вигляді нанокристалічні матеріали отримують трьома способами:

- 1) переробкою частинок розміром <100 нм методами порошкової технології в компактний матеріал;
- 2) кристалізацією аморфних металевих сплавів в контролюємих умовах;
- 3) рекристалізаційним відпалом інтенсивно деформованих металевих сплавів.

Порошки металів, карбідів, нітридів, оксидів та інших керамічних матеріалів отримують фізичними і хімічними методами: випаровуванням матеріалів в інертному або активної газовому середовищі; помелом з інтенсивним підведенням енергії в зону подрібнення; синтезом порошку з використанням плазми, лазерного нагріву, термічного розкладання (речовин-попередників), електролізом.

Нанокристалічні матеріали тільки починають використовувати. Часто підставою застосування матеріалу стає будь-яке одне властивість. Так, керамічні матеріали, що містять нанокристалічні частки металу, використовують для поглинання електромагнітного випромінювання в радіодіапазоні довжин хвиль. Суспензії частинок заліза з розмірами від 30 нм до 1...2 мкм в мастилі відновлюють зношені деталі (не перериваючи роботи) двигуна.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке кристалізація? Які види кристалізації існують?
2. Які умови необхідні для протікання процесу кристалізації?
3. Механізм процесу кристалізації.
4. Чим відрізняється гомогенне утворення зародків від гетерогенного?
5. Від яких показників залежить розмір зерна?
6. Шляхи одержання дрібного зерна у металі.
7. Як можна одержати не кристалічний, а аморфний стан речовини?

Глава 4

ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ ТА РЕКРИСТАЛІЗАЦІЯ

4.1. Загальні відомості про деформацію

Деталі машин, приладів, обладнання постійно знаходяться під впливом різноманітних навантажень та піддаються деформації.

Деформація – це зміна форми та розмірів тіла під дією зовнішніх зусиль. Розрізняють пружну та пластичну деформацію. *Пружною* називають деформацію, вплив якої на форму, властивості та структуру тіла повністю зникає після усунення дії зовнішніх сил. Це оборотна деформація. *Пластична* (необоротна) деформація після зняття навантаження залишається і приводить до зміни форми та властивостей деформованого матеріалу.

В основі пружної деформації лежать незначні зміщення іонів кристалічної решітки від своїх положень рівноваги. При розтягуванні відстань між іонами збільшується, при стискуванні – зменшується. При цьому порушується баланс сил електростатичного притягування та відштовхування.

Після усунення навантаження іони повертаються у початкові положення рівноваги й метал набуває початкової форми та розмірів. Механізм пластичної деформації більш складний. Кількісною мірою деформації є ступінь деформації:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} 100\%, \quad (4.1)$$

де l та l_0 – довжина деформованого зразка та початкова довжина відповідно.

4.2 Механізм пластичного зсуву

При зовнішньому навантаженні в металі виникають механічні напруження, які в загальному випадку можна поділити на дві складові: нормальну та дотичну. Напруження, які направлені перпендикулярно перерізу зразка, називають нормальними (σ_n), вздовж перерізу – дотичними або тангенціальними (τ).

Невеликі нормальні напруження викликають пружну деформацію, великі – руйнування шляхом відриву. Невеликі дотичні напруження також викликають пружну деформацію, а великі дотичні напруження, значення яких перевищують $\tau_{кр}$, пластичну деформацію.

Деформація монокрystalу відбувається шляхом зсуву однієї частини криystalу відносно іншої під дією дотичних напружень.

Розрізняють зсув ковзанням та двійникуванням. При ковзанні одна частина криystalу зміщується паралельно другій частині вздовж площини, яку називають площиною зсуву. Ковзання – головний вид зсуву в металах та сплавах. Деформація двійникуванням являє собою перебудову частини криystalу в нове положення, дзеркально симетричне до його недеформованої

частини. Порівняно з ковзанням двійникування відіграє другорядну роль. Механізм його складний і тут розглядатися не буде.

Деформація ковзанням розвивається по площинах та напрямках, де густина атомів максимальна (рис. 4.1).

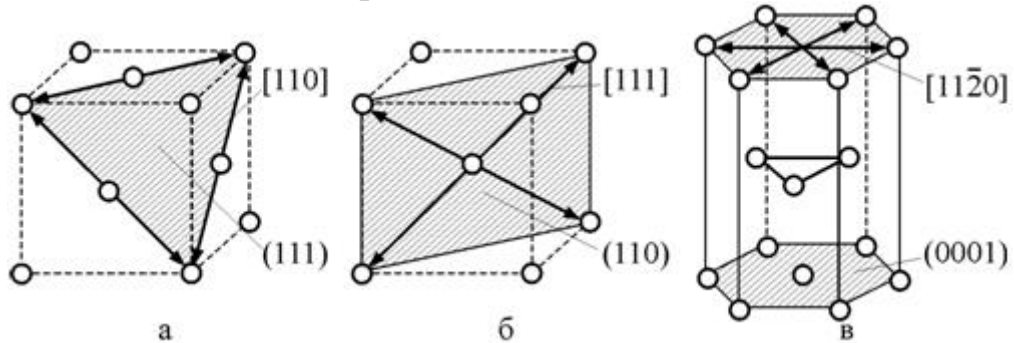


Рисунок 4.1. – Системи ковзання в металах з ОЦК (а), ГЦК(б) та ГПУ (в) решітками, закреслені площини найбільш легкого зсуву.

Площина зсуву разом із напрямком ковзання утворюють систему ковзання. У металів з ГЦК решітками 12 еквівалентних систем ковзання, у металів з ОЦК – 48. Із збільшенням кількості систем ковзання підвищується здатність металу до пластичного деформування.

Елементарний акт зсуву – це зміщення однієї частини кристалу відносно іншої на одну міжатомну відстань. В ідеальному бездефектному кристалі усі атоми, що знаходяться вище площини зсуву зміщуються одночасно під дією дотичних напружень τ із початкового положення і послідовно переходять у нове положення, змістившись на міжатомну відстань (рис. 4.2).

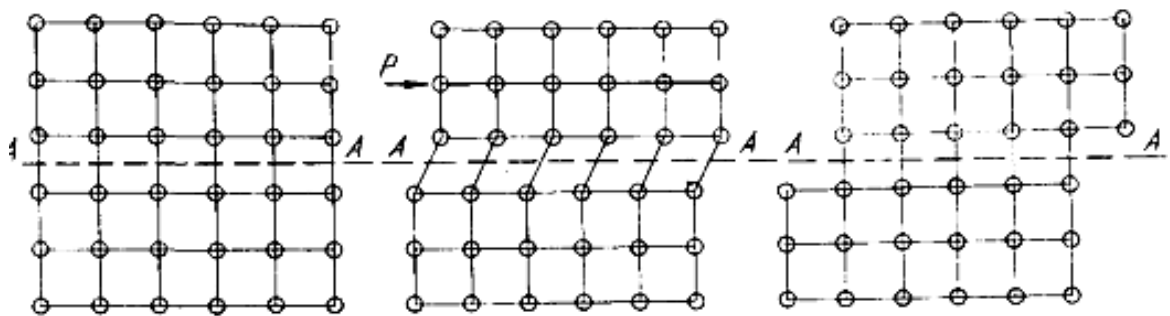


Рисунок 4.2. – Схема пластичної деформації у ідеальному кристалі

Як показали розрахунки, такий синхронний «жорсткий» зсув потребує великих критичних напружень (за формулою Я.І.Френкеля):

$$\tau_{кр} = \frac{a}{b} \cdot \frac{G}{2\pi}, \quad (4.2)$$

де G – модуль пружності зсуву (модуль Юнга);

a – міжатомна відстань у напрямку ковзання;

b – міжплощинна відстань.

Для компактних металічних решіток $a \approx b$, тому теоретичне зусилля (теоретична міцність) для здійснення зсуву $\tau_{кр} \approx 0,16G$. В реальних кристалах зсув на одну міжатомну відстань потребує напруження $\tau_{кр} \approx 10^{-4} G$, що майже у 1000 раз менше теоретичного значення. Низька міцність реальних кристалів пов'язана з їх структурною недовершеністю, тобто з наявністю дефектів, у першу чергу – дислокацій.

Пластична деформація в реальних монокристалах відбувається шляхом послідовного переміщення дислокацій (рис. 4.3).

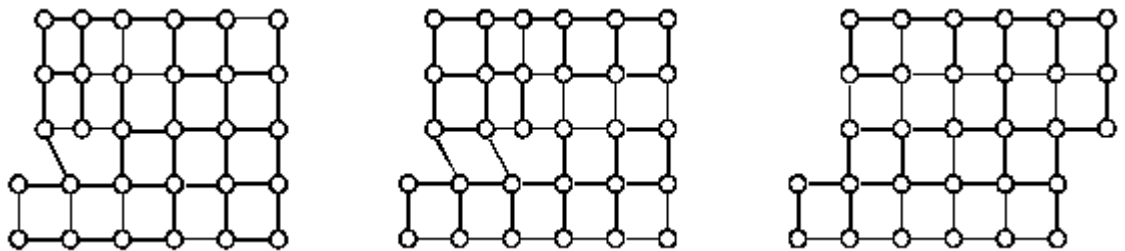


Рисунок 4.3. – Схема переміщення атомів при ковзанні крайової дислокації.

Переміщення крайової дислокації при зрушенні на одну міжатомну відстань являє собою погоджене перегрупування атомів біля дислокації й не супроводжується дифузійним переносом маси. Під дією дотичного напруження ряд атомів, що утворять дислокаційну лінію, витісняє найближчий ряд атомів у сусідній площині. Цьому сприяють пружні перекручування кристала біля дислокації, що полегшують розрив старих і утворення нових міжатомних зв'язків. Як показано на рис. 4.3, при витисненні найближчого ряду атомів площина кристала розділяється на дві частини: одна частина поєднується з надлишковою напівплощиною в цілу площину, інша – «приймає» дислокацію й стає надлишковою напівплощиною. Переміщаючись щораз на одну міжатомну відстань, дислокація зрештою вийде на поверхню кристала, і тут з'явиться сходинка, рівна міжатомній відстані. В площині ковзання рухаються десятки й сотні дислокацій. Послідовні переміщення багатьох дислокацій вздовж площини ковзання утворюють процес пластичної течії металу. Висота сходинки при цьому збільшується пропорційно кількості дислокацій, що вийшли на поверхню кристала. Сходинка, яку спостерігають за допомогою мікроскопа, називається лінією ковзання. Групи ліній ковзання, які розташовані на невеликій відстані, утворюють смуги ковзання.

4.3 Особливості деформування монокристалів

Пластична деформація монокристалів починається в першу чергу в тій системі ковзання, де дотичні напруження першими досягають критичних значень. Якщо при деформації монокристала площина ковзання виявилася паралельною напрямку дотичного напруження, то монокристал не

зміцнюється, а його деформація велика. Початкову стадію I деформування називають стадією легкого ковзання (рис. 4.4).

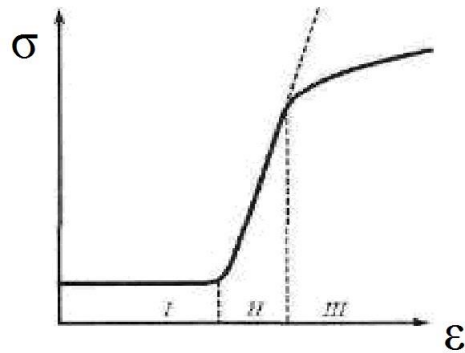


Рисунок 4.4. – Діаграма деформування монокристалу: I – стадія легкого ковзання; II – стадія множинного ковзання; III – стадія динамічного повернення

На цій стадії переміщення дислокацій не зустрічає перешкод (границь зерен, міжфазних границь, інших дислокацій). Деформація монокристалів з ГПУ решітками на стадії легкого ковзання досягає 1000%, у ГЦК і ОЦК монокристалів вона не перевищує 10...15%.

Із збільшенням деформації одночасно з переміщенням дислокацій відбувається збільшення їх кількості, ковзання поширюється на інші системи, і виникає множинне ковзання. На II стадії дислокації переміщуються в пересічних площинах, зростає опір їх руху, і утворюється складна дислокаційна структура. Подальший рух дислокацій потребує все більших напружень, тобто міцність металу зростає. Продовження деформування може привести до утворення тріщин у металі і його руйнування.

Нарешті, III стадія характеризується більшим уповільненням зміцнення порівняно зі II стадією. Гвинтові дислокації переходять в суміжні площини ковзання, і виникає поперечне ковзання, яке, за своєю суттю, є процесом знеміцнення. Знеміцнення на III стадії розвивається в міру деформування, і його називають динамічним поверненням.

Ковзання дислокацій не пов'язане з дифузією, так як відбувається без переносу маси. Цим пояснюється порівняльна легкість їх переміщення і при негативних температурах, коли швидкість дифузії мала.

У процесі ковзання виникають нові дислокації, і їх щільність підвищується від 10^3 до 10^{12}см^{-2} (більш високу щільність одержати неможливо через появу тріщин і руйнування металу). Існує декілька механізмів утворення нових дислокацій. Найважливішими з них є джерело Франка - Ріда (рис. 4.5).

Під дією дотичного напруження закріплена дислокація вигинається, поки не прийме форму півкола. З цього моменту вигнута дислокація розповсюджується самочинно у вигляді двох спіралей.

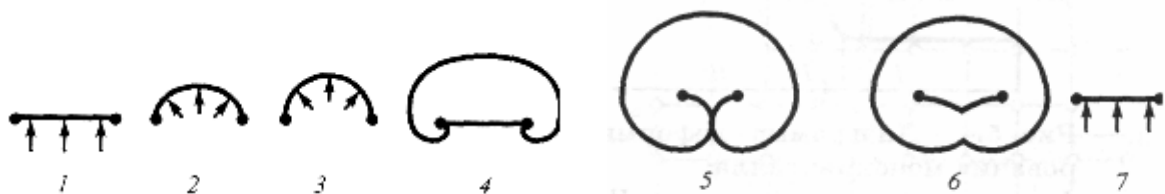


Рисунок 4.5. – Послідовність утворення (1-7) нової дислокації при дії джерела Франка - Ріда

При зустрічі спіралей виникають дислокаційна петля, що розширюється, і відрізок дислокації. Відрізок розпрямляється, займає вихідне положення, і генератор дислокацій готовий до повторення циклу. Одне джерело Франка - Ріда здатне утворити сотні нових дислокацій.

В основі зміцнення металу при деформуванні лежить підвищення густини дислокацій. Руху дислокації заважають різні перешкоди – границі зерен, дефекти пакування, міжфазні поверхні, дислокації, що перетинають площину ковзання. Через деякі перешкоди дислокації проходять, але при більш високих напруженнях. Такими перешкодами є, наприклад, інші дислокації, що перетинаються з площиною ковзання дислокації.

Кожне скупчення дислокацій створює поле напружень, що відштовхує дислокацію, яка до нього наближається. Чим більше дислокацій в скупченні, тим сильніше відштовхування і тим важче деформується метал. Коли щільність дислокацій в скупченні досягає певного значення, в цьому місці зароджується тріщина.

4.4 Пластична деформація полікристалічних матеріалів

Основна маса промислових матеріалів має полікристалічну будову. *Деформація полікристалів* починається одразу із стадії множинного ковзання спочатку в окремих зернах, які орієнтовані найбільш сприятливо відносно діючого навантаження і де дотичні напруження досягли критичного рівня. У порівнянні з монокристалами деформація полікристалів приводить до більш значного зміцнення металу (рис. 4.6).

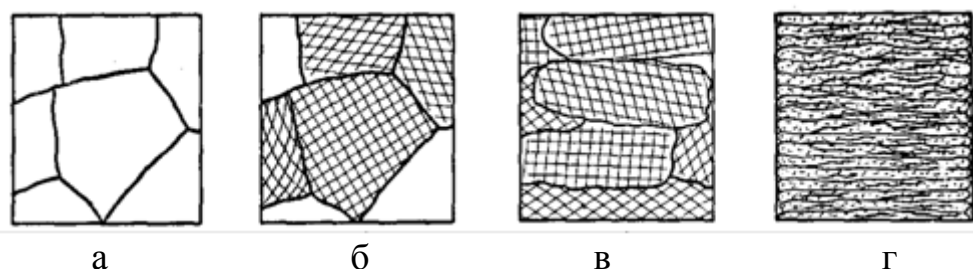


Рисунок 4.6. – Схема змінення мікроструктури при пластичній деформації полікристалу: а – вихідний стан ($\epsilon = 0\%$); б – $\epsilon = 1\%$; в – $\epsilon = 40\%$; г – $\epsilon = 80 \dots 90\%$

Недеформовані зерна мають правильну рівновісну форму (рис. 4.6, а). При невеликих ступенях деформації ковзання супроводжується поворотом

зерен, в яких площини зсуву не співпадають за напрямком із дотичними напруженнями (рис. 4.6, б). З ростом ступеня деформації зерна поступово витягуються в напрямку пластичної течії (рис. 4.6, в). Усередині зерен підвищується щільність дефектів. При значній деформації в металі з'являється кристалографічна орієнтація зерен, яка називається текстурою деформації (рис. 4.6, г).

Текстура деформації – це результат одночасного деформування зерен за кількома системами ковзання. Вона залежить від виду деформування, кристалічної структури металу, наявності домішок і умов деформування. Утворення текстури приводить до анізотропії механічних та фізичних властивостей.

4.5 Вплив пластичної деформації на властивості металів

Під дією пластичної деформації змінюються механічні та фізичні властивості металів. Метал накопичує 5...10% енергії, витраченої на його деформування. Ця енергія йде на утворення дефектів кристалічної будови (густина дислокації зростає до $10^9...10^{12}\text{см}^{-2}$) та на пружне спотворення кристалічних решіток. Зміна властивостей деформованого металу збільшуються із зростанням деформації (рис. 4.7).

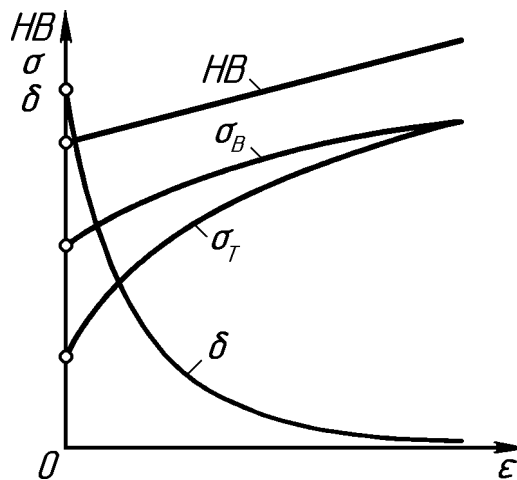


Рисунок 4.7. – Зміна властивостей деформованого металу в залежності від ступеня деформації.

При деформації зростають характеристики міцності ($\sigma_B, \sigma_{0,2}, \sigma_{0,05}$) і твердість та знижуються пластичність і в'язкість (δ, ψ, KCU). На початковій стадії деформування метал зміцнюється дуже інтенсивно, потім зростання міцності уповільнюється. Границя текучості збільшується швидше, ніж границя міцності, і при великих ступенях деформації ці дві характеристики зрівнюються між собою, а пластичність металу дорівнює нулю. Такий стан металу називається граничним, подальша деформація приводить до руйнування.

Зміцнення металу внаслідок деформації називається *наклепом* або *нагартовкою*. Шляхом наклепу можна підвищити твердість та міцність металу в 1,5...3 рази. Метали з ГЦК решітками зміцнюються сильніше, ніж з ОЦК решітками, а сплави – сильніше, ніж чисті метали.

Із збільшенням деформації підвищується питомий електричний опір (максимально на 6%), а у феромагнетиків, до яких належить більшість сталей, знижуються магнітна проникність і залишкова індукція, зростає коерцитивної сила.

Наклеп знижує щільність металу через порушення порядку в розміщенні атомів при збільшенні щільності дефектів та освіті мікропор. Зменшення густини використовують для збільшення довговічності деталей, які при експлуатації працюють в умовах знакозмінних навантажень. З цією метою застосовують поверхневе пластичне деформування деталі за допомогою обдування дробом або обробки спеціальним інструментом. Наклепаний шар прагне розширитися, зустрічаючи опір з боку не наклепаних ділянок деталі. В результаті в цьому шарі виникнуть напруження стиснення, а під ним, на більшій відстані від поверхні, з'являться напруження розтягнення. Стискаючи напруження в поверхневому шарі уповільнюють зародження втомної тріщини і тим самим збільшують довговічність деталей.

Наклепані метали легше піддаються корозії і схильні до корозійного розтріскування.

Наклеп широко використовується для підвищення міцності деталей, виготовлених методами обробки тиском. Зниження пластичності при наклепі поліпшує здатність в'язких та пластичних металів та сплавів (латуні, сплави алюмінію, титан) до обробки різанням

4.6 Рекристалізація деформованого металу

Пластична деформація переводить метал у термодинамічно нестійкий стан, який здатний тривалий час зберігатися при кімнатній температурі. Перехід металу в більш стабільний стан може відбутися лише при нагріванні. При підвищених температурах прискорюється переміщення точкових дефектів та створюються умови для перерозподілу дислокацій і зменшення їх кількості.

При нагріванні деформованого металу при зростанні температури спостерігається зниження міцності й підвищення пластичності, що схематично показано на рис. 4.8.

Представлену схему можна розділити на три області:

I область – повернення;

II область – первинна рекристалізація;

III область – збиральна рекристалізація.

Процеси, які відбуваються при нагріванні, поділяють на дві основні стадії: повернення та рекристалізацію. I повернення, і рекристалізація супроводжуються виділенням тепла та зниженням рівня внутрішньої енергії.

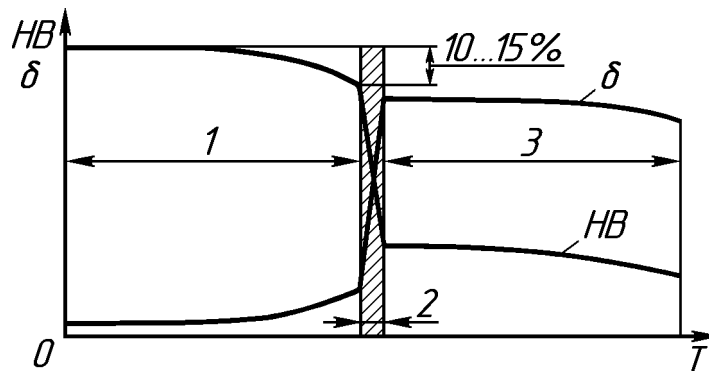


Рисунок 4.8. – Схема зміни властивостей деформованого металу при нагріванні.

Поверненням називають процеси, що підвищують досконалість наклепаного металу, при яких форма та розмір зерен не змінюються.

Залежно від характеру елементарних процесів, що відбуваються, при поверненні мають місце два види явищ: 1) відпочинок (при більш низькій температурі) і 2) полігонізація (при більш високій температурі).

Відпочинком деформованого металу називають стадію повернення, при якій зменшується кількість точкових дефектів, в основному вакансій. Перерозподіл дислокацій супроводжується зменшенням залишкових напружень. Відпочинок зменшує питомий електроопір і підвищує густину металу. Твердість і міцність зменшуються на 10...15% початкових значень і на стільки ж відповідно збільшується пластичність. Після відпочинку підвищується опір корозійному розтріскуванню.

Полігонізація – це утворення в деформованому металі ділянок, відділених малокутовими границями. Ці зони утворюються за рахунок переміщення дислокацій. Але загальна щільність дислокацій практично не змінюється. Схематично формування полігональної структури зображено на рис. 4.9.

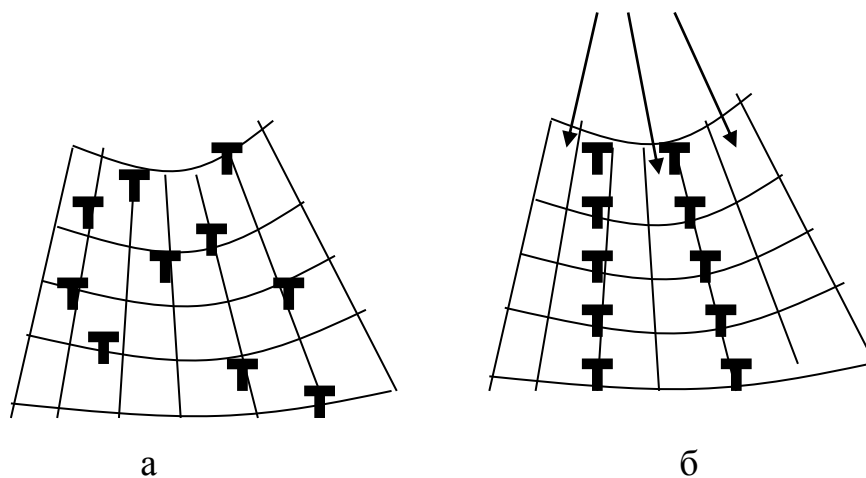


Рисунок 4.9. – Схематичне зображення розташування дислокацій до полігонізації (а) і після полігонізації (б)

До проходження полігонізації (рис. 4. 9, а) дислокації, які позначаються $\perp$, розташовані хаотично. В результаті полігонізації дислокації, переміщаючись, утворять полігональні стінки, тобто ділянки, вільні від дислокацій (рис. 4.9, б).

Полігонізація в ряді випадків може сприяти збереженню зміцнення й зниженню порога холодноламкості. Тому утворення полігональних структур на різних стадіях обробки виробів є ефективним і широко розповсюдженим методом підвищення їхніх експлуатаційних властивостей.

Рекристалізація – це процес утворення та зростання зерен з меншою кількістю дефектів будови. Внаслідок рекристалізації утворюються зовсім нові зерна рівноважної форми.

Процес рекристалізації може відбуватися лише за певних умов:

1. Ступень деформації повинен перевищувати деяке критичне значення. При менших деформаціях рівень накопиченої енергії невисокий і релаксація напружень відбувається вже на стадії повернення. Значення критичної деформації невисокі: для алюмінію – 2%, для заліза та міді – 5%, для нікелю – 6%.

2. Існує температура рекристалізації, тобто мінімальна температура нагрівання, при якій можуть утворюватися нові зерна. Таким чином, процес рекристалізації буде відбуватися в металі, деформованому із ступенем більшим за критичне значення, при нагріванні вище температури рекристалізації.

Температура рекристалізації $T_{рек}$ будь-якого металу чи сплаву залежить від температури його плавлення $T_{пл}$:

$$T_{рек} = aT_{пл} \quad (4.3)$$

де a – коефіцієнт пропорційності, для хімічно чистих металів $a = 0,2$, для технічно чистих металів та сталей $a = 0,4$, для складних сплавів $a = 0,8$.

Утворення нових зерен при рекристалізації починається на ділянках з найбільшою густиною дислокацій, як правило, на межах деформованих зерен (рис. 4.10).

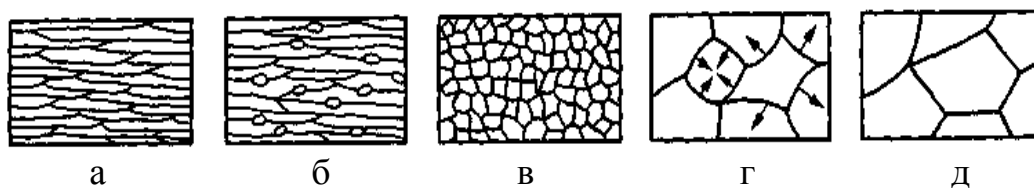


Рисунок 4.10. – Схема зміни мікроструктури деформованого металу при рекристалізації

Чим вищий ступінь деформації, тим більше виникає центрів рекристалізації. Зародки зерен являють собою області з мінімальною кількістю дефектів. Ці центри зростають за рахунок переходу атомів до більш довершеної решітки. Ця стадія називається первинною рекристалізацією і завершується утворенням дрібних рівноосних зерен у всьому об'ємі деформованого металу (рис. 4.10, а – в). Внаслідок рекристалізації наклеп практично повністю знімається; міцність

зменшується, а пластичність зростає. Властивості металу наближаються до вихідних. Первинна рекристалізація закінчується при повному заміщенні новими зернами всього обсягу деформованого металу (рис. 4.10, в).

По завершенні первинної рекристалізації починається зростання утворених зерен, тобто вторинна (збиральна) рекристалізація (рис. 4.10, г). Цей процес відбувається самочинно при достатньо високих температурах внаслідок того, що збільшення зерна сприяє зниженню рівня внутрішньої енергії за рахунок зниження поверхневої енергії. Зростання зерен при вторинній рекристалізації відбувається шляхом переходу атомів від одних зерен до інших через поверхню розподілу. При цьому одні зерна зменшуються і зовсім зникають, а інші стають великими і поглинають сусідні зерна. Крупнозерниста структура (рис. 4.10, д) негативно впливає на механічні властивості металу, особливо ударну в'язкість.

Пластична деформація істотно впливає на розмір рекристалізованого зерна. Розмір зерна змінюється немонотонно при збільшенні деформації. При певному ступені деформації, що називається критичним, при нагріванні має місце різке збільшення розміру зерна (рис. 4.11).

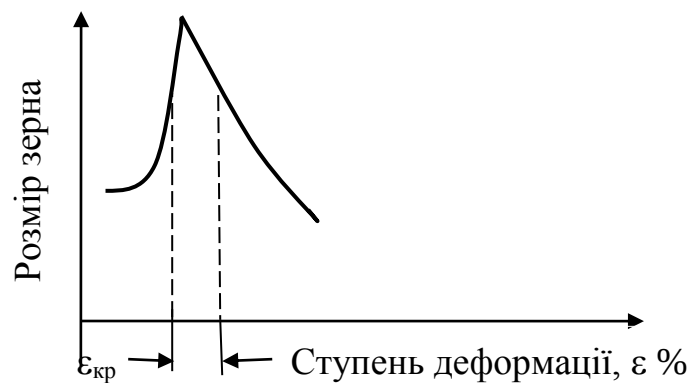


Рисунок 4.11. — Залежність розміру зерна від ступеня вихідної деформації при постійній температурі нагрівання

Збільшення розмірів зерна негативно впливає на механічні властивості матеріалів, у першу чергу на ударну в'язкість. Це треба враховувати при проведенні пластичної деформації і деформувати метал зі ступенем деформації менше або більше критичного.

Таким чином, вже при первинній рекристалізації наклеп знімається повністю, а властивості металу наближаються до тих, що були в нього до деформації. Вторинна рекристалізація погіршує властивості й тому небажана. Термічна обробка, яка полягає в нагріванні деформованого металу вище температури рекристалізації, називається *рекристалізаційний відпал*. Призначення відпалу — зменшення міцності та відновлення пластичності деформованого металу. Рекристалізаційний відпал часто застосовують як міжопераційну пом'якшуючу обробку при холодній прокатці, волочінні та інших операціях обробки тиском. На виробництві для скорочення часу обробки температуру відпалу призначають на $100...200^{\circ}\text{C}$ вище температури рекристалізації (табл.4.1).

Таблиця 4.1 Температури рекристалізації, рекристалізаційного відпалу та гарячої обробки тиском для деяких металів та сплавів.

	Температура, °C			
	плавлення	рекристалізація теоретична (при $a=0,4$)	рекристалізаційного відпалу	гарячої обробки тиском
Залізо	1539	450	600...700	1300...1800
Сталь	~1500	450	600...700	1300 (1100)... 800
Мідь	1083	270	450...500	800...600
Латунь	~1000	250	400...450	750...600
Алюміній	660	100	250...350	460...350
Молібден	2625	900	1400...1600	2100...1600
Титан	1660	500	650...700	1200...1100

4.7 Холодна та гаряча деформація

Залежно від температури деформування розрізняють холодну та гарячу деформацію. *Холодна* деформація проводиться при температурі нижче температури рекристалізації, а гаряча – при більш високих температурах.

Гаряча деформація також супроводжується зміцненням, яке повністю або частково знімається рекристалізацією, що відбувається одночасно з деформуванням. Зберегти деформаційне зміцнення можна лише при певних умовах охолодження. Термомеханічна обробка (ТМО), що полягає в гарячому деформуванні металу з наступним швидким охолодженням, дозволяє вирішити цю проблему і забезпечити поєднанням високої міцності металу з його достатньою пластичністю.

Приклад. Якою буде деформація при кімнатній температурі для таких металів, як свинець ($t_{пл} = 327^{\circ}\text{C}$) та титан ($t_{пл} = 1660^{\circ}\text{C}$).

Визначимо температуру рекристалізації цих металів.

Для свинцю $T_{рек} = 0,4 (327+273) = 240\text{K} (-33^{\circ}\text{C})$

Для титану $T_{рек} = 0,4 (1660+273) = 773\text{K} (500^{\circ}\text{C})$.

Для свинцю $t_{деф} > t_{рек}$, тому це гаряча деформація.

Для титану $t_{деф} < t_{рек}$, тому це холодна деформація.

4.8 Поверхнева пластична деформація (ППД)

Для підвищення витривалості металу в промисловості широко застосовують метод поверхневої пластичної деформації або поверхневого наклепу. Найбільш поширеними технологічними методами ППД є обдування дробом, накатування сталевую кулькою або роликком, алмазне вигладжування (рис. 4. 12).

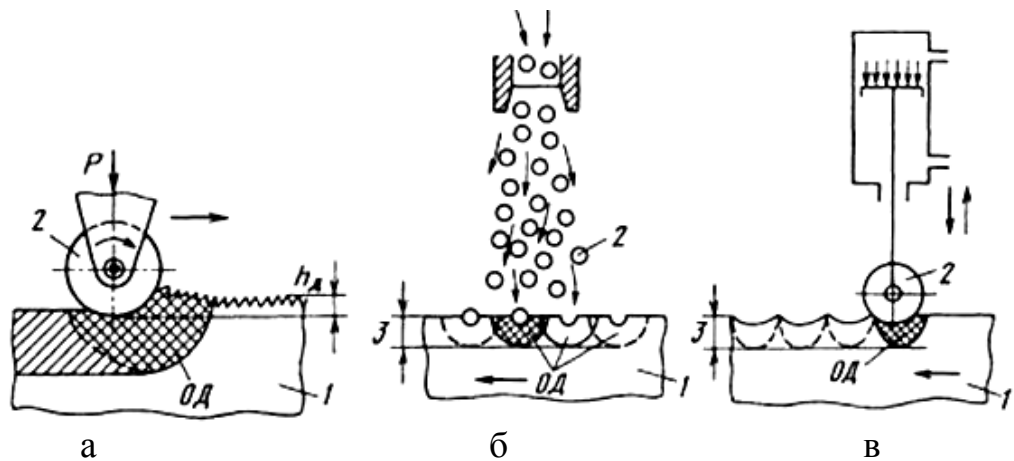


Рисунок 4.12. – Основні види поверхневої пластичної деформації: а – накатування сталевим роликом, б – обдування дробом, в – алмазне вигладжування; ОД – область деформації, 1 – деталь, що обробляється, 2 – інструмент

Поверхнєве деформування підвищує густину дислокацій у шарі металу глибиною 1,5...2 мм, в якому формуються стискальні напруження, що запобігають утворенню тріщин. При поверхневому деформуванні деталей їх зносостійкість підвищується у 1,5...2 рази. Границя міцності збільшується на 30...50%, довговічність пружних елементів – на 20...25%, зростає корозійна стійкість металу. Важливою особливістю методу ППД є можливість його локального застосування – обробляють лише ті ділянки деталей, де рівень робочих напружень максимальний (підрізи, галтелі, різьби, канавки, пружні елементи та ін.).

Контрольні запитання та завдання:

1. Що таке деформація? Які види деформації бувають?
2. В чому відміна між пружною та пластичною деформацією?
3. Як відбувається пластична деформація в монокристалі?
4. Як відбувається пластична деформація в полікристалі?
5. Як визначити температуру рекристалізації?
7. Що таке наклеп? Як він виникає і як впливає на властивості?
8. Що називають холодною та гарячою деформацією?
9. Два олов'яні зразки були продеформовані при кімнатній температурі : №1 з $\epsilon=10\%$; №2 з $\epsilon=30\%$. Який із зразків буде мати більш високу пластичність, твердість? Відповідь поясніть.
10. Два зразки з міді продеформовані таким чином: №1 з $\epsilon=30\%$ при температурі $t = 100^\circ\text{C}$; №2 з $\epsilon=40\%$ при $t = 300^\circ\text{C}$. Який із зразків буде мати більш високу ударну в'язкість? Відповідь поясніть.
11. Сплав міді з свинцем має структуру механічної суміші. Знайдіть питомий електричний опір сплаву, що містить 75% міді та 25% свинцю.
12. Два зразки з цинку продеформовані при температурі $t = 100^\circ\text{C}$: №1 з $\epsilon=20\%$; №2 з $\epsilon=30\%$. Який із зразків буде мати більш високу міцність, пластичність? Відповідь поясніть.

Глава 5

МЕТАЛЕВІ СПЛАВИ.

5.1 Загальні відомості про металеві сплави.

Сучасна промисловість використовує велику кількість матеріалів природного та штучного походження. Найбільш поширеним серед них є металеві матеріали – метали та сплави.

Металевим сплавом називають матеріал, який складається з двох або більше компонентів і має металічні властивості.

Традиційним методом одержання сплавів є сплавлення компонентів. Але в наш час усе ширше застосовують сплави, виготовлені шляхом спікання, кристалізації з газоподібного стану, дифузії, електролізу тощо.

При дослідженні металів та сплавів використовують терміни «компонент», «система», «фаза», «структура».

Компонентами називають хімічні елементи, які входять до складу сплаву.

Система – це сукупність речовин, елементів або хімічних сполук, в який можливі ті чи інші перетворення.

Системи можуть бути простими, що складаються з одного елемента (Fe, Ni, C тощо) або хімічної сполуки (Fe_3C , Fe_2O_3 та ін.) та складними, які складаються з двох або більше компонентів. Позначаються складні системи таким чином: Cu – Ni, Pb – Sb – Sn, Al – CuAl₂.

Фазою називають однорідну частину системи, відокремлену від інших границею розділу.

Будова металевого сплаву більш складна, ніж будова чистого металу, і залежить від складу сплаву та характеру взаємодії компонентів сплаву.

У рідкому стані більшість металів розчинюються один в одному та утворюють рідкий розчин. При кристалізації найбільш поширеними є такі три випадки взаємодії компонентів.

1. Компоненти сплаву в твердому стані не розчинюються один у одному і не здатні до хімічної взаємодії. Такий сплав являє собою *механічну суміш*, а його структура складається із зерен компонентів A та B (рис. 5.1).

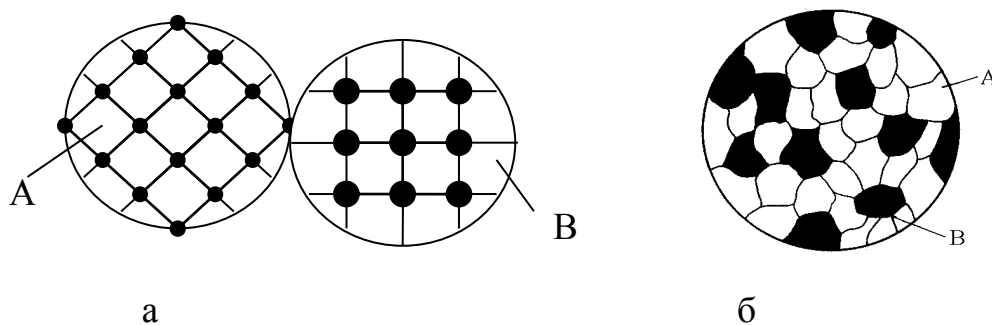


Рисунок 5.1. – Атомно-кристалічна будова (а) и мікроструктура (б) механічної суміші.

В межах кожного зерна зберігаються кристалічні решітки, характерні для чистих компонентів.

2. Компоненти взаємодіють один з одним і утворюють *хімічну сполуку*. При кристалізації хімічної сполуки утворюється нова кристалічна решітка з упорядкованим розташуванням у ній атомів компонентів. Таким чином, хімічна сполука являє собою нову речовину, склад якої відповідає формулі $A_n B_m$ (A, B – відповідні компоненти, n, m – прості числа), із новими властивостями. Якщо хімічну сполуку утворюють тільки металеві елементи, то у вузлах решіток розташовується позитивні іони металів, які утримуються електронним газом (металічний зв'язок). Коли до складу хімічної сполуки надходять атоми металів та неметалів, у речовині виникає іонний зв'язок.

Властивості хімічних сполук можуть значно відрізнятися від властивостей вихідних компонентів. Так твердість хімічної сполуки $CuAl_2$ становить 4000НВ, а міді – 350НВ, алюмінію – 200НВ, Твердість технічного заліза не перевищує 80НВ, а вуглецю (графіт) – 30НВ. Сплави заліза з вуглецем містять хімічну сполуку Fe_3C (цементит) із твердістю 800НВ.

3. *Тверді розчини* утворюються в тому випадку, коли компоненти у твердому стані зберігають здатність розчинюватися і кристалізуються в спільну кристалічну решітку. Позначаються тверді розчини буквами грецького алфавіту: α, β, γ ... або $A(B)$, де A – розчинник, B – розчинений елемент. Схема мікроструктури твердого розчину приведена на рис. 5.2.

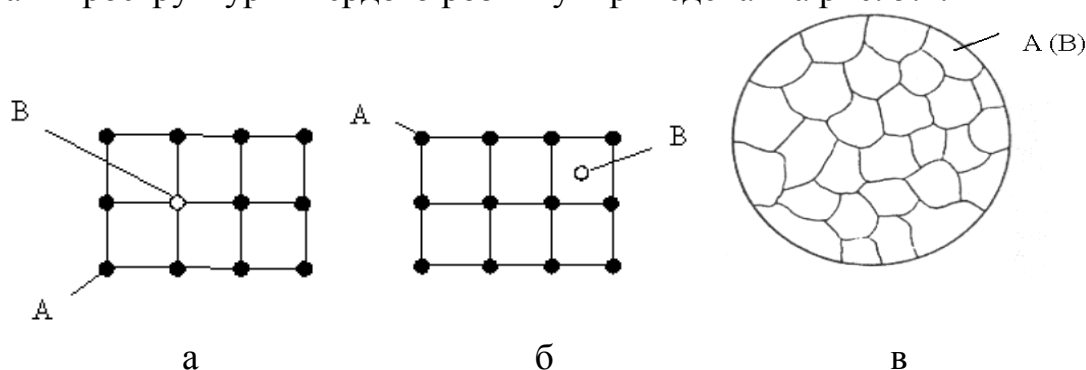


Рисунок 5.2. – Схема твердих розчинів: а – заміщення, б – втілення; та мікроструктура твердого розчину (в).

Розрізняють тверді розчини заміщення та втілення. У першому випадку атоми розчиненого елемента B розміщуються у вузлах кристалічних решіток розчинника A (рис. 5.2, а), а другому – у міжвузловому просторі (рис. 5.2, б).

Як і в рідких розчинах, розчинність компонентів у твердому розчині може бути обмеженою і необмеженою. Необмежена розчинність спостерігається у твердих розчинах заміщення при одночасному виконанні двох умов:

1) компоненти мають однаковий тип кристалічних решіток (структурний фактор);

2) розміри атомів компонентів відрізняються не більше чим на 15% (розмірний фактор).

5.2 Діаграми стану сплавів.

При дослідженні властивостей різних сплавів важливе значення мають їх діаграми стану.

Діаграма стану сплаву – це графічне зображення залежності структури сплавів даної системи від концентрації компонентів та температури. Діаграми стану називають ще рівноважними діаграмами, тому що вони характеризують рівноважний стан сплаву, тобто стан, який відповідає мінімуму енергії Гіббса системи.

Як правило, діаграми стану будуються за допомогою методу *термічного аналізу*. Схема установки для термічного аналізу наведена на рис. 5.3.

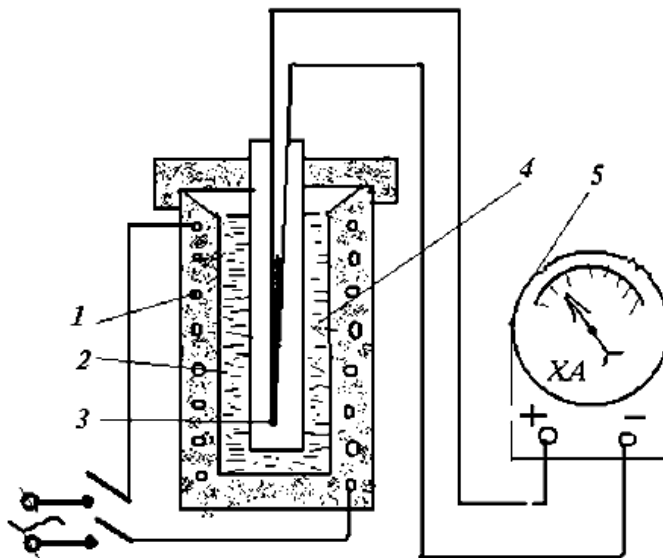


Рисунок 5.3. – Схема установки для визначення критичних точок металів і сплавів: 1 – електропіч; 2 – тигель; 3 – термопара; 4 – розплавлений метал (сплав); 5 – гальванометр.

Сутність цього методу полягає в тому, що для певної кількості сплавів даної системи за експериментальними даними будують графіки залежності зміни температури сплаву в часі в процесі охолодження (або нагрівання) з постійною швидкістю. Такі графічні залежності називаються кривими охолодження або нагрівання.

Сплав певного складу, який потрібно дослідити, розплавляють. Одержаний розплав повільно охолоджують (такі умови охолодження відповідають мінімальному значенню G), а його температуру фіксують за допомогою термопар. Температури будь-яких інших змін в стані металу або сплаву, які спостерігаються в ньому при нагріванні або охолодженні і супроводжуються поглинанням або виділенням тепла, як і відповідні їм точки на графіках нагрівання або охолодження, називаються критичними.

По критичних точках температурних кривих (наприклад, початок або кінець кристалізації) будують криву охолодження сплаву в координатах «температура – час». Дослідження певної кількості сплавів даної системи дозволяє побудувати діаграму стану в координатах «температура – концентрація».

Додаткові відомості про структуру та властивості сплавів одержують за допомогою досліджень мікроструктури, такої структури, електричних і магнітних характеристик тощо.

5.3 Діаграма стану сплаву, компоненти якого утворюють механічну суміш

Розглянемо детально методику побудовання діаграми стану подвійної системи Pb–Sb. На рис. 5.4 зображені криві охолодження для чистих металів Pb (крива I), Sb (крива V) та їх сплавів, що містять 95%Pb, 5%Sb (крива II), 87%Pb, 13%Sb (крива III), 45%Pb, 55%Sb (крива IV).

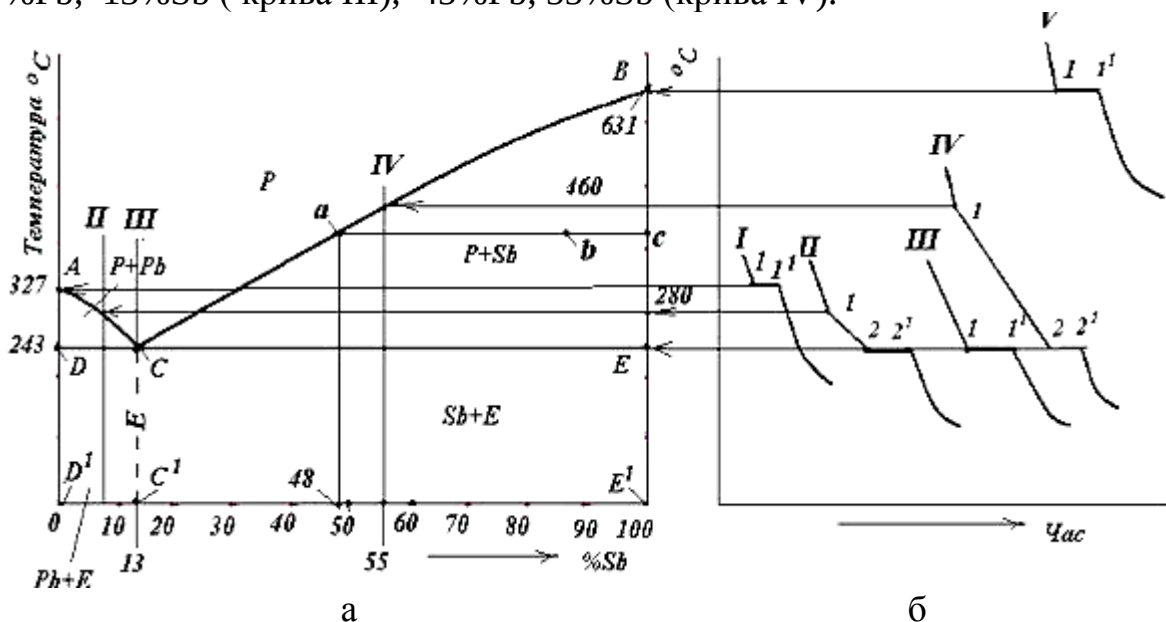


Рисунок 5.4. – Діаграма стану (а) та криві охолодження сплавів різного складу (б) системи Pb – Sb

Для аналізу кривих охолодження застосовують правило фаз (закон Гіббса), яке виражається формулою

$$C = K - \Phi + 1, \quad (5.1)$$

де C – число ступенів свободи, тобто число зовнішніх факторів (температура, концентрація), які можна змінювати без зміни числа фаз в сплаві;

K – число компонентів (в сплавах Pb – Sb $K = 2$, це свинець і сурма);

Φ – число фаз.

Процес кристалізації чистого свинцю характеризує крива охолодження I на рис. 5.4, б. При температурі вище 327°C метал знаходиться в рідкому стані. При $t = 327^\circ\text{C}$ відбувається кристалізація (ділянка 1 – 1'), а нижче цієї температури охолоджується свинець у кристалічному стані.

Крива охолодження II сплаву, який містить 95% Pb та 5% Sb має суттєві відміни від першої. Вище точки 1 сплав знаходиться в рідкому стані і має одну фазу, тоді $C = 2-1+1=2$.

При двох ступенях свободи в цій області можна змінювати концентрацію та температуру, а сплав залишиться однорідним – рідким. Крива охолодження круто спадає вниз.

Точка 1 – початок кристалізації, точка 2 – закінчення кристалізації. В інтервалі температур від точки 1 до точки 2 проходить утворення кристалів свинцю, на цій ділянці сплав являє собою суміш рідини і кристалів свинцю. Тобто між точками 1 і 2 існує дві фази – рідка і тверда: $C = 2-2+1=1$. При одному ступені свободи незалежною змінною є тільки температура. Із зменшенням температури сплаву кристалів утворюється більше, рідини залишається менше.

На ділянці 2 – 2' залишки рідини кристалізуються в механічну суміш свинцю та сурми, існують три фази (кристали свинцю, кристали сурми і рідкий сплав). Число ступенів свободи $C = 2-3+1=0$.

При цьому виділяється велика кількість теплоти і температура залишається постійною. Нижче точки 2 сплав знаходиться повністю в твердому стані.

Сплав, який містить 87% Pb та 13% Sb, кристалізується при постійній температурі з утворенням евтектики.

Евтектика – це дрібнодисперсна механічна суміш двох фаз, яка кристалізується з рідини при постійній температурі. Для системи Pb – Sb евтектичним є сплав, який містить 87% Pb та 13% Sb. Сплави з більшою концентрацією свинцю називаються доевтектичними. У заевтектичних сплавах вміст свинцю нижчий за 87%.

Крива III – охолодження евтектичного сплаву (13 % Sb, 87 %Pb). Евтектичний сплав має криву охолодження аналогічну кривій чистого металу, тільки із більш швидким охолодженням розчину. Кристалізація протікає при сталій температурі і концентрації (в точці C). Утворюється механічна суміш компонентів (свинцю та сурми).

Заевтектичному сплаву відповідає крива IV. Точка 1 відповідає початку кристалізації, 2 – кінцю кристалізації. В інтервалі температур від 1 до 2 проходить утворення кристалів сурми. На цій ділянці сплав являє собою суміш рідини та кристалів сурми. Із зниженням температури сплаву кристалів утворюється більше, рідини залишається менше. На ділянці 2 – 2' залишок рідини кристалізується в механічну суміш кристалів свинцю та сурми (евтектику).

Таким чином, термічний аналіз розглянутих сплавів дозволяє визначити температури їх фазових переходів (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 Температури початку (t_n) та кінця (t_k) кристалізації сплавів системи Pb – Sb.

Сплав	100%Pb	95%Pb+ 5%Sb	87%Pb+ 13%Sb	45%Pb+ 55%Sb	100%Sb
-------	--------	----------------	-----------------	-----------------	--------

$t_n, ^\circ\text{C}$	327	300	246	355	630
$t_k, ^\circ\text{C}$	327	243	243	243	630

Одержані температури нанесемо на діаграму з координатами «температура-концентрація», з'єднаємо однією лінією точки початку кристалізації, другою – точки кінця кристалізації. Діаграму стану системи Pb–Sb побудовано (рис. 5.4, а). Проаналізуємо лінії та області цієї діаграми.

Точки А та В визначають температури плавлення свинцю та сурми відповідно. Лінія ABC – геометричне місце точок початку кристалізації. Вона називається лінія ліквідус (likvidus – рідкий). Вище лінії ліквідус сплав знаходиться в рідкому стані. Лінія DCE – геометричне місце точок кінця кристалізації. Вона має назву лінія солідус (solidus – твердий). Нижче цієї лінії сплав знаходиться у твердому стані. Між лініями ліквідус та солідус структура сплаву двофазна – рідина та кристали. Точка С належить обом лініям. Сплав, концентрація якого відповідає точці С, називається евтектичним.

Евтектичний сплав – це сплав певного хімічного складу, що кристалізується при певній температурі, мінімальній для даної системи, а структура, яка при цьому утворюється, є евтектикою.

Кристалізація евтектики відбувається при температурі $t = 246^\circ\text{C}$. Таким чином, лінія DCE є одночасно лінією евтектичного перетворення. Кристалізація будь-якого сплаву даної системи, крім евтектичного, відбувається за такою схемою. Процес починається з виділенням кристалів того компонента, концентрація якого перевищує евтектичну (для доевтектичних сплавів це свинець, для заевтектичних – сурма). При кристалізації склад рідини постійно змінюється й наближається до евтектичного. Рідкий сплав евтектичного складу кристалізується при постійній температурі. Після завершення кристалізації структура доевтектичного сплаву складається із зерен свинцю та евтектики, заевтектичного – із зерен сурми та евтектики (рис. 5.5).

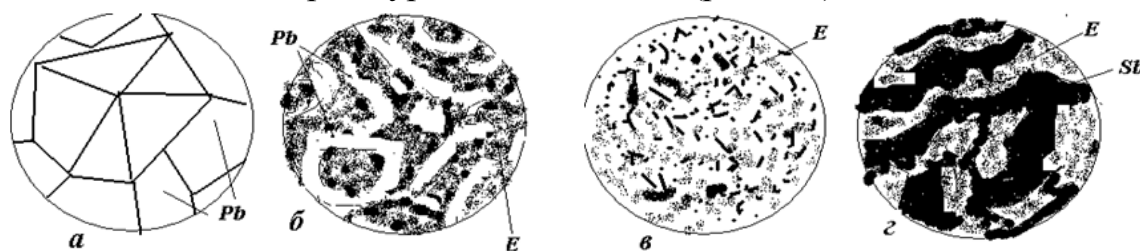


Рисунок 5.5. – Структура сплавів свинець – сурма: а – чистий свинець (схема); б – доевтектичний сплав; в – евтектичний сплав; г – заевтектичний сплав

Аналіз мікроструктури показує, що залежно від концентрації компонентів змінюється мікроструктура сплаву.

Діаграма стану дає можливість визначити стан сплаву при будь-якій температурі та заданій концентрації.

5.4 Правило відрізків

В процесі кристалізації змінюється і концентрація компонентів в фазах, і кількість кожної фази сплаву (при кристалізації кількість твердої фази збільшується, а рідкої зменшується).

В будь-якій точці діаграми, коли в сплаві одночасно існують дві фази, можна визначити кількість обох фаз і їх концентрацію. Для цього служить правило відрізків або правило важеля.

Правило відрізків (правило важеля) застосовують для визначення:

1. Концентрації компонентів в фазах;
2. Кількості (ваги) фаз сплаву в будь-якій точці діаграми.

Використаємо правило відрізків для аналізу стану сплаву в точці *b* (див. рис. 5.4). Проведемо горизонтальну лінію (коноду) через точку *b* до перетину з лініями діаграми. Одержимо лінію *ac*. Точка *b* ділить лінію *ac* на відрізки *ab* і *bc*.

Для визначення концентрації компонентів в фазах необхідно з точок перетину коноди з лініями діаграми опустити перпендикуляри на вісь концентрацій (вісь абсцис) діаграми стану (рис. 5.4, а). Наприклад, в точці *b* сплав складається з кристалів сурми і рідини. Опустивши перпендикуляр з точки *a* на вісь концентрацій, визначимо концентрацію компонентів в рідині. Вона становить 48 % Pb та 52 % Sb. Опустивши перпендикуляр з точки *c* на вісь абсцис, побачимо, що тверда фаза в даній точці складається з кристалів сурми (100 % Sb).

Відповідно до правила відрізків, кількість (вага), наприклад, твердої фази – кристалів сурми – в даній точці діаграми так відноситься до кількості всього сплаву, як довжина відрізка, що прилягає до лінії ліквідус *ab*, відноситься до повної довжини лінії *ac*.

$$G_{ж.ф.} = \frac{ab}{ac}; \quad (5.2)$$

Кількість рідкої фази відповідно дорівнює

$$G_{р.ф.} = \frac{bc}{ac}. \quad (5.3)$$

5.5 Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю у твердому стані.

Діаграма стану сплавів типу необмежений твердий розчин наведена на прикладі сплаву Cu - Ni (рис. 5.6).

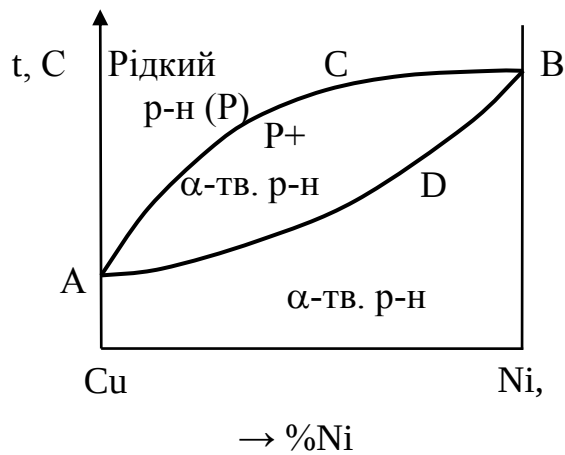


Рисунок. 5.6. – Діаграма стану сплаву системи Cu – Ni.

Як на попередній діаграмі (див. рис. 5.4. а), точками А та В позначені температури плавлення вихідних компонентів. Лінія АСВ – лінія ліквідус, АDB – лінія солідус. Для сплавів такого типу характерно, що в процесі кристалізації безперервно змінюється склад рідкого й твердого розчину. У результаті такого явища має місце дендритна ліквіація – неоднорідність хімічного складу в межах одного кристала. Дендритну ліквіацію можна усунути проведенням гомогенізуючого відпалу, що полягає в нагріванні сплаву до температури трохи нижче лінії солідус і витримці протягом декількох годин, щоб пройшли дифузійні процеси.

5.6 Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю у твердому стані.

Діаграма стану для обмежених твердих розчинів представлена на рис. 5.7.

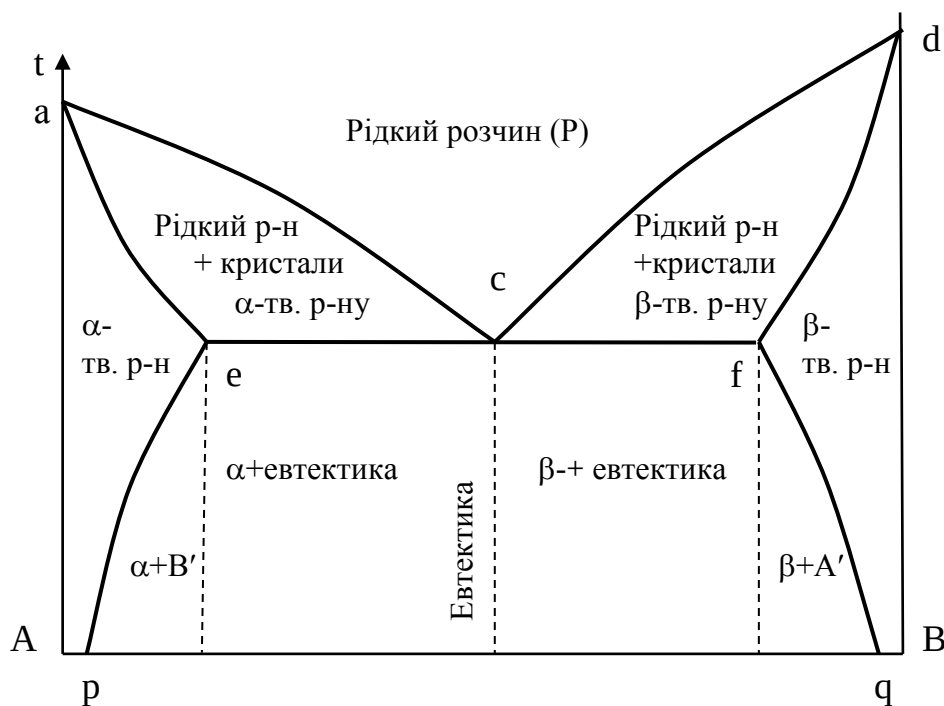


Рисунок 5.7. – Схема діаграми стану для обмежених твердих розчинів

Твердий розчин компонента B у компоненту A позначимо α . Твердий розчин компонента A в компоненту B позначимо β . При концентрації компонентів, яка відповідає точці c , утворюються евтектика з цих твердих розчинів.

Лінія ліквідус – acd ; лінія солідус – $aecfd$; евтектична горизонталь – esf ; лінія обмеженої розчинності компонента B у компоненту A – ep ; лінія обмеженої розчинності компонента A в компоненту B – fq .

Із зниженням температури розчинність зменшується й надлишок компонента B виділяється з α – розчину у вигляді фази, збагаченої цим компонентом (B'). Аналогічно в міру зниження температури надлишок компонента A виділяється з β – розчину у вигляді фази, збагаченої цим компонентом (A'). Для сплавів такого типу характерна дендритна ліквіація.

5.7 Закономірності М.С. Курнакова.

Діаграми стану сплавів мають велике практичне значення. Вони дозволяють визначити, яку структуру буде мати той чи інший сплав у рівноважному стані, а також вирішити питання про можливість термічної обробки та її режими. Крім діаграм стану застосовуються також діаграми "склад – властивості".

Загальні закономірності залежності фізико-механічних властивостей від типу сплаву та концентрації компонентів називаються закономірностями М.С. Курнакова. На рис. 5.9 наведені чотири основних типи діаграм стану та закономірності зміни властивостей сплавів даних типів залежно від зміни концентрацій.

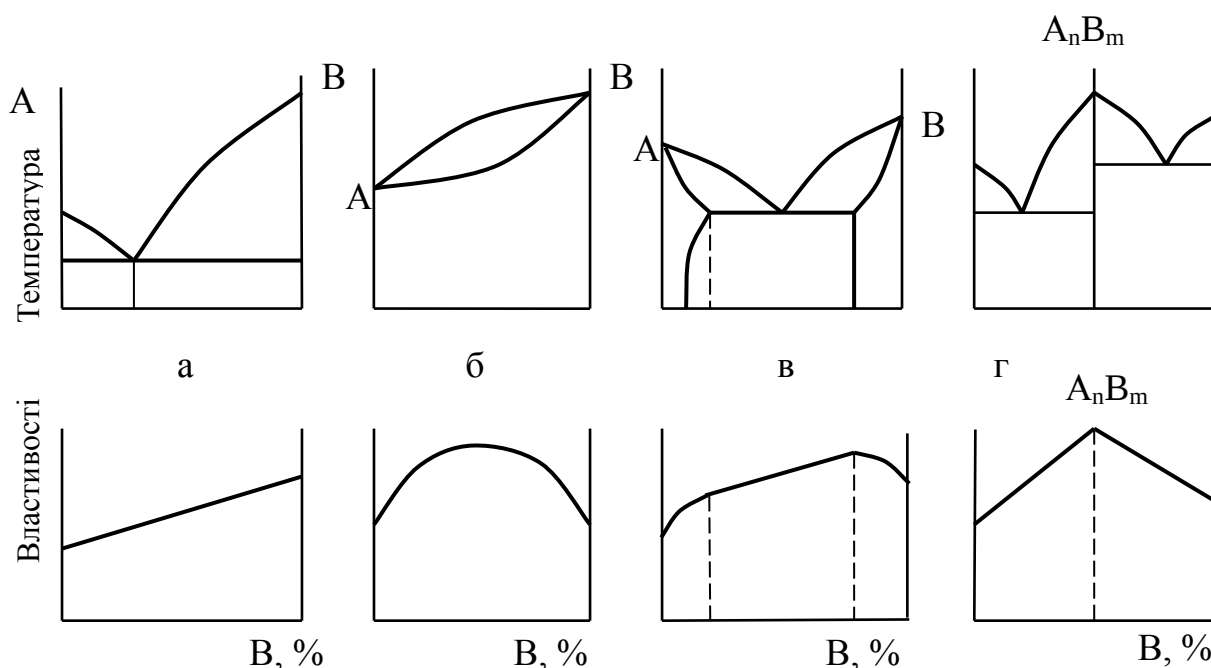


Рисунок 5.8. – Властивості сплавів і вид їх діаграм стану (за М.С. Курнаковим)

1. При утворенні механічних сумішей (рис. 5.8, а) властивості сплавів (твердість, міцність, пластичність, густина, магнітні властивості, тепло- та електропровідність) залежно від складу змінюються за лінійним законом. Значення властивостей сплавів знаходяться в межах властивостей чистих компонентів.

Приклад. Сплав міді з свинцем має структуру механічної суміші. Знайдіть густину сплаву, що містить 75% міді та 25% свинцю.

З довідника знаходимо густину міді (8940 кг/м³) та свинцю (11400 кг/м³). У відповідності до закономірностей М.С.Курнакова, властивості сплавів із структурою механічної суміші змінюються за лінійним законом.

Тому густину заданого сплаву можна знайти за формулою $\rho = 8940 \cdot 0,75 + 11400 \cdot 0,25 = 9555 \text{ кг/м}^3$.

2. При утворенні твердих розчинів (рис. 5.8, б) властивості сплавів змінюються за криволінійним законам; деякі властивості, в першу чергу електропровідність, можуть значно відрізнятись від властивостей вихідних компонентів.

3. У сплавах з обмеженою розчинністю компонентів (сплави змішаного типу) властивості змінюються за лінійним законом у межах існування механічних сумішей та за криволінійним – у межах твердих розчинів (рис. 5.8, в).

4. У сплавах з хімічно сполукою, що являють собою механічну суміш компонентів з хімічно сполукою і не утворюють твердих розчинів (рис. 5.8, г), властивості змінюються за законом прямої, що має перелом при концентрації компонентів, яка відповідає хімічній сполуці.

Закономірності М.С. Курнакова враховуються при розробці сплавів із заданими властивостями. Але слід пам'ятати, що ці закономірності відносяться до сплавів у рівноважному стані і не передбачають вплив термічної обробки та деформації на структуру та властивості сплавів

Контрольні запитання та завдання

1. Що називають металевим сплавом? Які існують методи одержання металевих сплавів?

2. Що таке твердий розчин? Види твердих розчинів.

3. Що таке механічна суміш?

4. У чому полягає метод термічного аналізу?

5. Що таке діаграми стану? Яке вони мають практичне значення?

6. Охарактеризувати лінії та області діаграми стану сплаву, компоненти якого утворюють механічну суміш. Побудуйте криві охолодження доєвтектичного та заєвтектичного сплавів.

7. Що таке евтектика? Побудуйте криву охолодження евтектичного сплаву.

8. Який вид має діаграма стану сплаву типу необмежений твердий розчин? Побудуйте криву охолодження одного зі сплавів цієї системи.

9. Знайдіть питомий електричний опір сплаву типу механічна суміш, що містить 15% компоненту А та 85% компоненту В, якщо $\rho_A = 0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, $\rho_B = 0,036 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

10. Охарактеризуйте лінії та області діаграми сплавів з обмеженою розчинністю компонентів. Як протікає кристалізація сплавів такої системи?

11. У чому полягають закономірності М.С. Курнакова?

12. Компоненти сплаву взаємодіють з утворенням твердого розчину необмеженої розчинності. Густина компонентів А та В 10400 кг/м^3 та 9300 кг/м^3 відповідно. Який із сплавів – №1 (10%А, 90%В) або №2 (60%А, 40%В) – буде мати більшу густину? Відповідь поясніть.

13. Мідь та нікель взаємодіють з утворенням твердого розчину необмеженої розчинності. Який із сплавів – №1 (10%Cu, 90%Ni) чи №2 (60%Cu, 40%Ni) – буде мати більший електричний опір? Відповідь поясніть.

Глава 6

ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

6.1 Компоненти і фази в сплавах заліза з вуглецем.

Залізовуглецеві сплави є найпоширенішими в сучасній промисловості. У рівноважному стані структури цих сплавів визначаються вмістом вуглецю і температурою й можуть бути описані діаграмою стану.

Перетворення у твердому стані, що відбуваються в сплавах цієї системи, обумовлені поліморфізмом заліза. Нижче температури 911°C залізо має об'ємноцентровану решітку (ОЦК) і існує в α -модифікації (Fe_α). В інтервалі температур $911\text{--}1392^\circ\text{C}$ для заліза характерна гранецентрована кубічна решітка (ГЦК) і воно існує в γ -модифікації (Fe_γ). При температурі 1392°C відбувається ГЦК $\rightarrow$ ОЦК перетворення. Високотемпературна модифікація заліза називається δ – залізом.

У твердому стані залізо з вуглецем утворить три фази: ферит, аустеніт, цементит.

Ферит (Ф) являє собою твердий розчин вуглецю в Fe_α . Розчинність вуглецю в Fe_α невелика і при температурі 727°C становить 0,03 %. Зі зниженням температури розчинність вуглецю в Fe_α зменшується й при кімнатній температурі становить 0,006 %. Ферит – це твердий розчин втілення обмеженої розчинності.

Аустеніт (А) – це твердий розчин вуглецю в Fe_γ . Максимальна розчинність вуглецю в Fe_γ при температурі 1147°C становить 2,14 %. Зі зниженням температури розчинність вуглецю зменшується й при 727°C становить 0,8 %. Аустеніт – твердий розчин втілення обмеженої розчинності.

При концентрації вуглецю 6,67 % залізо вступає з вуглецем у хімічну реакцію і утворюється хімічна сполука Fe_3C (рис. 6.1), що називається *цементитом* (карбід заліза, Ц).

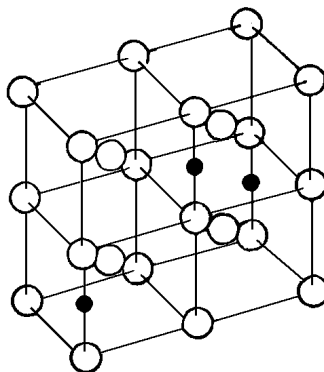


Рисунок 6.1. – Кристалічна решітка цементиту: $\circ$ – атом заліза, $\bullet$ – атом вуглецю

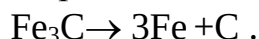
Ферит – м'яка й пластична структурна складова, а цементит – твердий і крихкий.

6.2 Діаграма стану системи $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$

Як уже відомо, залізо відноситься до групи металів, у яких проходить поліморфне перетворення. Температура поліморфного перетворення заліза – 911°C .

Діаграма стану $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ будується в координатах “температура – концентрація вуглецю (кількість цементиту)” (рис. 6.2). Ліва ордината відповідає залізу, права ордината – цементиту. По осі абсцис – дві шкали: одна (верхня) показує кількість вуглецю, інша (нижня) – кількість цементиту.

Точка А (на лівій ординаті) відповідає температурі плавлення (кристалізації) заліза (1539°C). Для спрощення діаграми не показаний лівий кут, де має місце $\gamma \rightarrow \delta$ перетворення при температурі 1392°C . Точка D (на правій ординаті) показує приблизно температуру плавлення цементиту (1260°C). Точно цю температуру важко визначити, тому що цементит (Fe_3C) нестійкий і ще до температури плавлення розпадається відповідно до реакції:



Діаграма $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ містить у собі елементи діаграми із твердими розчинами компонентів, механічними сумішами фаз, обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані.

По лінії AC із рідкого розчину починає кристалізуватися аустеніт, а по лінії CD – цементит, що називається первинним (Ц_I). Лінія AC є лінією ліквідус. Між лінією AC і AE існує двофазна область, у якій є присутнім аустеніт і рідкий розчин. Процес кристалізації закінчується по лінії AE, нижче якої – аустенітна структура.

Подальше охолодження залізовуглецевих сплавів приводить до фазових перетворень, які обумовлені як поліморфним перетворенням $\text{Fe}_\gamma \rightarrow \text{Fe}_\alpha$ (вторинна кристалізація), так і зміною розчинності вуглецю в аустеніті й фериті (для сплавів, які містять $\text{C} \leq 2,14\%$).

Точка G (911°C) на лівій ординаті являє собою температуру поліморфного $\gamma \leftrightarrow \alpha$ перетворення заліза. По лінії GS проходить перетворення аустеніту у ферит. Область GSP – двофазна область, у якій присутні ферит і аустеніт.

Зі зниженням температури розчинність вуглецю в аустеніті зменшується з 2,14% при температурі 1147°C (точка E) до 0,8% при температурі 727°C (точка S) і тому по лінії ES відбувається виділення вуглецю з аустеніту. ES – лінія обмеженої розчинності вуглецю в аустеніті. Залишок вуглецю виділяється у вигляді цементиту, що називається вторинним (Ц_II).

При температурі 727°C (лінія PSK) аустеніт перетворюється в однорідну механічну суміш фериту і цементиту, що називається *перлітом*. Ця структура аналогічна евтектиці. Відмінність полягає в тім, що подібна структура утвориться не з рідкого, а із твердого розчину й називається *евтектоїдом*.

Лінія PSK, по якій відбувається утворення перліту, називається лінією евтектоїдного перетворення (евтектоїдна горизонталь). Для всіх залізовуглецевих сплавів по цій лінії (температура 727°C) відбувається перетворення аустеніту в перліт.

Залежно від змісту вуглецю структурні складові сталей і чавунів нижче температури 727°C різні, а фази – однакові: ферит і цементит.

Точка P показує максимальну розчинність вуглецю у фериті – 0,03% при температурі 727°C . Зі зниженням температури розчинність вуглецю в Fe_α зменшується, а при кімнатній температурі вона становить 0,006 % (точка Q). Область GPQ відповідає фериту (рис. 6.3).

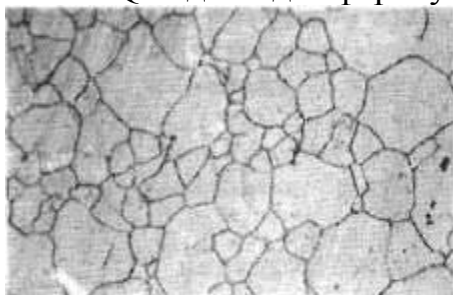


Рисунок 6.3. – Мікроструктура фериту

Зменшення розчинності вуглецю в Fe_α приводить до виділення з фериту надлишкового вуглецю у вигляді цементиту, але його кількість невелика. Такий цементит називається третинним. Лінія PQ називається лінією обмеженої розчинності вуглецю в Fe_α .

Нижче евтектоїдної горизонталі залежно від змісту вуглецю формуються різні структурні складові. У сплавів з концентрацією вуглецю

менше 0,8 % – ферит і перліт. При вмісті вуглецю 0,8% – перліт. Якщо вуглецю більше 0,8%, то структура складається з перліту й цементиту вторинного.

У сплавів зі змістом вуглецю від 2,14% до 4,3% структура – перліт, ледебурит і цементит вторинний. Якщо вуглецю втримується 4,3%, то структура являє собою ледебурит, при вмісті вуглецю більше 4,3% структура – ледебурит і цементит первинний. При цьому вище температури 727°C ледебурит – суміш аустеніту й цементиту, а нижче 727°C – суміш перліту й цементиту.

Залізовуглецеві сплави, які містять вуглецю менше 2,14%, називаються *сталями*. Залізовуглецеві сплави, що містять вуглецю більше 2,14 %, називаються *чавунами*.

6.3 Вуглецеві сталі

Сталі залежно від вмісту вуглецю діляться на доєвтектоїдні ($C < 0,8\%$), евтектоїдні ($C = 0,8\%$) і заєвтектоїдні ($C > 0,8\%$).

Структура доєвтектоїдної сталі при кімнатній температурі являє собою ферит і перліт. При цьому чим більше в сталі вуглецю, тим більше перліту. На рис. 6.4, представлена мікроструктура доєвтектоїдних сталей з різним вмістом вуглецю.

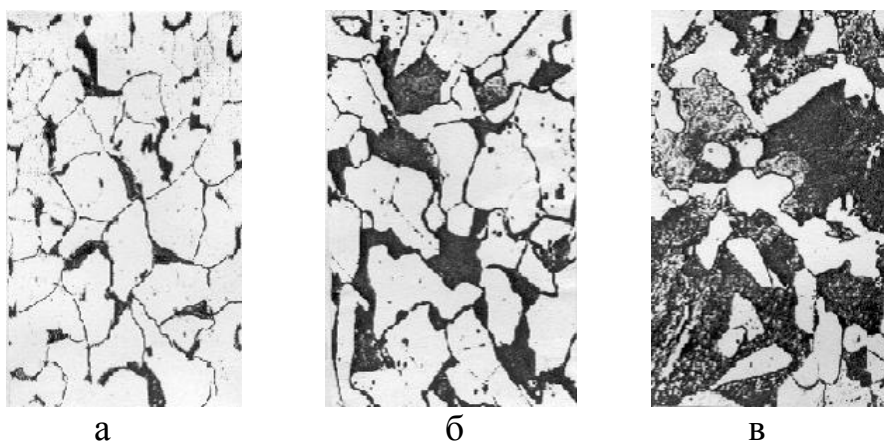
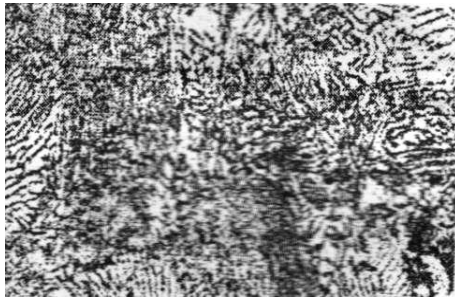


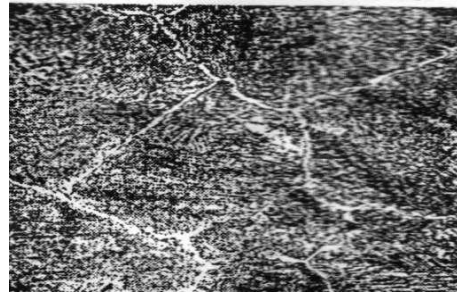
Рисунок 6.4. – Мікроструктура доєвтектоїдних сталей: а – сталь 20 (0,2 % C); б – сталь 40 (0,4 % C); в – сталь 60 (0,6 % C)

Зі збільшенням концентрації вуглецю в сталі зменшується кількість м'якого фериту й зростає частка твердого й крихкого цементиту, як того, що надходить до складу перліту, так і самостійно існуючого у вигляді структурної складової, як у заєвтектоїдній сталі.

На рис. 6.5, а показана структура евтектоїдної сталі, що представляє собою перліт, а на рис. 6.5, б – заєвтектоїдної сталі, що складається із зерен перліту, по границях яких розташована цементитна сітка.



а



б

Рисунок 6.5. – Мікроструктура сталі: а – евтектоїдної У8 ($C = 0,8\%$); б – заевтектоїдної У10 ($C = 1\%$)

Утворення цементитної сітки негативно впливає на механічні властивості сталей.

6.4 Леговані сталі

Крім вуглецевих сталей, властивості яких досить обмежені, широко використовуються леговані сталі, які являють собою залізовуглецеві сплави з добавленими легуючими елементами: металами або неметалами. Введення легуючих елементів дозволяє в дуже широкому діапазоні змінювати та керувати властивостями сплавів, тому доля легованих залізовуглецевих сплавів в загальному виробництві сталей з кожним роком зростає.

Легуючі елементи в сталях знаходяться у вигляді хімічних сполук, окислів, або твердого розчину. При цьому, елементи, що розчиняються в залізі впливають на температурний інтервал існування його алотропних модифікацій.

Легуючі елементи в сталях можуть знаходитись:

- 1) у вільному вигляді;
- 2) у вигляді інтерметалідних включень;
- 3) у вигляді окислів, сульфідів та інших неметалевих включень;
- 4) в карбідній фазі, в вигляді розчину в цементиті або спеціальних карбідів;
- 5) в вигляді твердого розчину в залізі.

Легуючі елементи впливають на властивості фериту і карбідів. Всі легуючі елементи, що розчиняються в фериті, змінюють параметри решітки фериту. Зміна розмірів решітки викликає зміну властивостей фериту: міцність підвищується, а пластичність зменшується. Особливо зміцнюють ферит Si і Mn, але вони істотно підвищують крихкість сталі. Тому, як правило, зміст їх не повинен перевищувати 1 ... 2%.

На рис. 6.6 показано зміну властивостей фериту (твердість, ударна в'язкість) при розчиненні в ньому різних елементів. Як видно з графіка, хром, нікель, вольфрам зміцнюють ферит менше, ніж марганець і кремній у кількості більше 1%. Молібден, вольфрам, а так само марганець і кремній (при вмісті останніх більше 1%) знижують ударну в'язкість фериту.

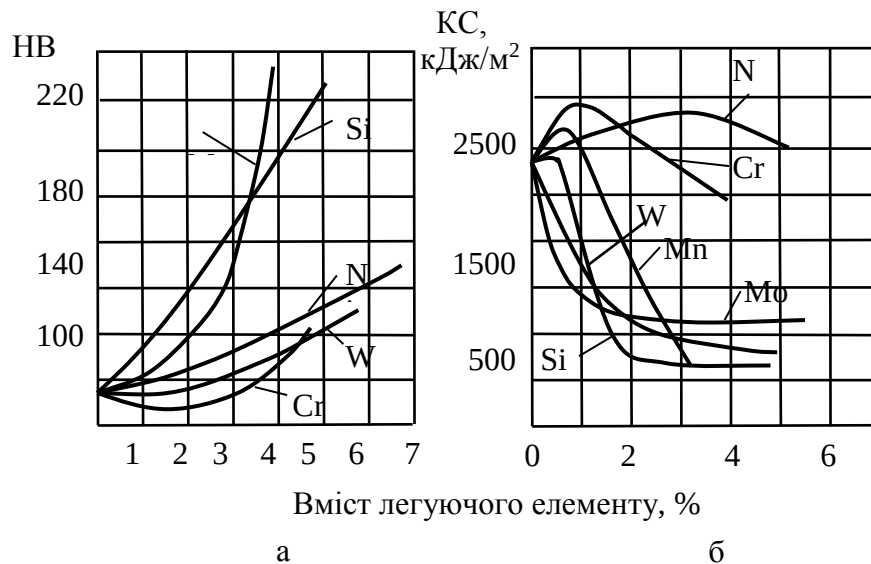


Рисунок 6.6. – Вплив легуючих елементів на властивості фериту: а – твердість; б – ударна в'язкість

Всі легуючі елементи можна розділити на дві групи: не карбідоутворюючі та карбідоутворюючі елементи.

До першої групи належать нікель, кремній, алюміній, кобальт, мідь. Ці елементи не утворюють карбідів і впливають тільки на властивості фериту. Карбідоутворюючі елементи утворюють два види карбідів: легований цементит $(FeMe)_3C$ і спеціальні карбіди Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$, VC , WC , Mo_2C та ін.

Спеціальні карбіди важко розчиняються в аустеніті. Найбільш сильними карбідоутворюючими елементами є Ti , Zr , V , Nb . Навіть при невеликому вмісті вони утворюють спеціальні карбіди TiC , ZrC , VC , NbC та ін.. Твердість спеціальних карбідів вище твердості легованого цементиту. Таким чином, карбідоутворюючі елементи підвищують загальну твердість сталі. Практично всі легуючі елементи, які утворюють карбіди перешкоджають росту зерна в процесі нагріву. Карбіди утворюються по границям зерен і тим самим утруднюють процеси їх злиття і росту. Лише марганець та бор сприяють росту зерна. Елементи, які не утворюють карбідів (нікель, кобальт, кремній), відносно слабо впливають на зростання зерна.

Легуючі елементи зміщують поріг холодноламкості в область більш високих температур, в цьому позначається негативний вплив легування. Винятком є хром у кількості до 2% і нікель. Чим більше вміст нікелю, тим нижче поріг холодноламкості. Так, при вмісті 1% нікелю поріг холодноламкості зменшується до $-50^{\circ}C$, а при вмісті 5% нікелю поріг холодноламкості дорівнює $-90^{\circ}C$. Але нікель є дефіцитним і дорогим металом. Тому є більш доступний спосіб зниження порогу холодноламкості – це зменшення вмісту в сталі фосфору.

Найменше підвищення крихкості має місце при одночасному легуванні декількома елементами. Найкращий варіант – це одночасне

легування карбїдоутворюючими і некарбїдоутворюючими елементами. Це правило є основою перспективного комплексного легування.

6.5 Чавуни

До чавунів ставляться сплави вуглецю із залізом, що містять більше 2,14 % вуглецю. Розрізняють білі та графітізовані чавуни. У білих чавунах весь вуглець перебуває у зв'язаному стані у вигляді цементиту. У графітізованих чавунах вуглець перебуває у вільному стані у вигляді графіту. На діаграмі Fe–Fe₃C (рис. 6.1) представлені білі чавуни. Структури білих чавунів наведені на рис. 6.7.

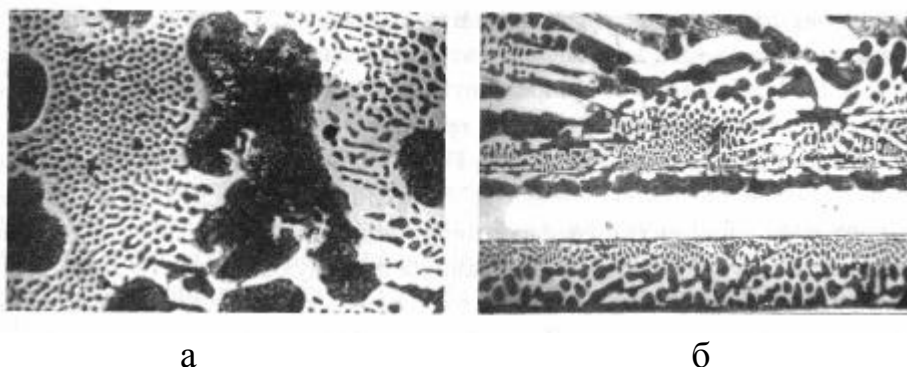


Рисунок 6.7. – Мікроструктура доєвтектичного (а) та заєвтектичного (б) білих чавунів

По вмісту вуглецю білі чавуни діляться на: доєвтектичні ($C < 4,3 \%$), евтектичні ($C = 4,3 \%$) і заєвтектичні ($C > 4,3 \%$). Білі чавуни через наявність у них великої кількості цементиту мають високу твердість, крихкість і практично не піддаються обробці різанням, тому мають обмежене застосування.

У графітізованих чавунах розрізняють графітні включення і металеву основу. Властивості цих чавунів обумовлені розмірами, кількістю, формою графіту й структурою металевої основи. Вирішальну роль грає форма графітних включень.

Залежно від форми графіту розрізняють сірий, ковкий і високоміцний чавун, чавун з вермікулярним графітом.

Чавуни із пластинчастим графітом (рис. 6.8) називають *сірим*. Наявність пластинчастих включень графіту, що мають гострі надрізи й концентратори напружень, спричиняє низькі механічні властивості сірого чавуну. Границя його міцності при розтяганні становить 100...450 МПа, відносне подовження 0,2...0,8 %.

Маркірується сірий чавун за таким принципом: СЧ15, СЧ20 і т.д. Букви позначають приналежність до сірого чавуну, цифри показують межу міцності (тимчасовий опір) в 10^{-1} МПа. Наприклад, чавун марки СЧ15: $\sigma_b = 150$ МПа. Структура металевої основи може бути феритною (рис. 6.8, а) ферито-перлітною (рис. 6.8, б) і перлітною (рис. 6.8, в).

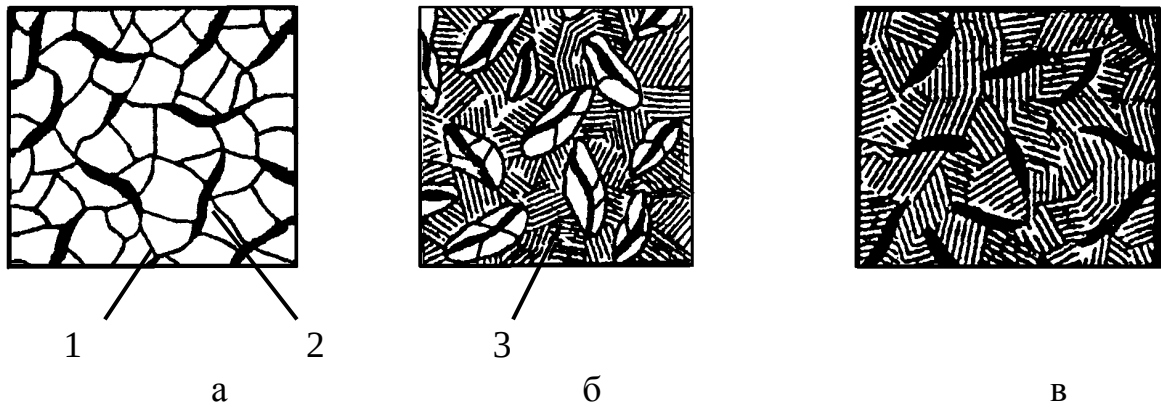


Рисунок 6.8. – Схема мікроструктури сірих чавунів (із пластинчастим графітом): 1 – ферит, 2 – графіт, 3 – перліт

Чавун, у якого графіть має кулясту форму, називається *високоміцним*. Куляста форма графітних включень виключає гострі надрізи в металевій основі. Механічні властивості такого чавуну значно поліпшуються: межа міцності досягає 1000МПа, відносне подовження перебуває в межах 2...22 %. Такий чавун, у ряді випадків, є повноцінним замінником сталі. Маркірується високоміцний чавун за таким принципом: ВЧ 350-22, ВЧ 400-15, ВЧ1000-2. Букви позначають приналежність до високоміцного чавуну, перші числа (до дефіса) показують межу міцності σ_b у МПа, а число через дефіс – відносне подовження δ у відсотках. Наприклад, чавун марки ВЧ 350–22: $\sigma_b = 350\text{МПа}$, $\delta=22\%$. Мікроструктура ферито-перлітного високоміцного чавуну представлена на рис. 6.9.



Рисунок 6.9. – Мікроструктура ферито-перлітного високоміцного чавуну

Ковкий чавун має пластівчасту форму графітних включень. Одержують його тривалою витримкою при високій температурі (~1000 °С) білого чавуну. Така термічна обробка називається графітизуючим відпалом. Цементит розпадається з виділенням графіту у вигляді пластівців. Такі включення менше роз'єднують основу в порівнянні із сірим чавун. Тому ковкий чавун більш міцний та пластичний, ніж сірий чавун. Межа міцності його перебуває в межах 300...700МПа, відносне подовження $\delta=2...12\%$. Позначають ковкі чавуни буквами КЧ, перші дві цифри показують межу

міцності σ_b в 10^{-1} МПа. Інші дві або одна – відносне подовження δ у відсотках. Наприклад, чавун марки КЧ 300–6: $\sigma_b=300$ МПа, $\delta=6\%$. Структура феритного й перлітного чавуну представлена на рис. 6.10.

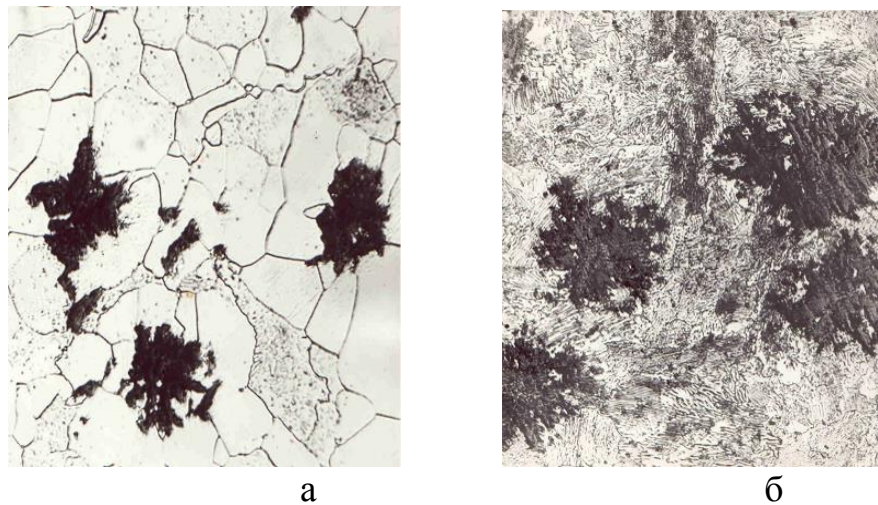


Рисунок 6.10. – Мікроструктура ковких чавунів: а – феритного; б – перлітного

Чавун з *вермікулярним графітом* – порівняно новий конструкційний матеріал. Такий чавун має червоподібну звивисту форму графітних включень. Особливістю структури цього чавуну є наявність у металевій основі великої кількості фериту (до 70...90 %).

Чавун з вермікулярним графітом має більше високі службові властивості в порівнянні із сірим чавуном. Тимчасовий опір (межа міцності) його перебуває в межах 300...500 МПа, а відносне подовження – 1...3 %. Маркірується такий чавун за таким принципом: ЧВГ 300...4, ЧВГ 300...5. Букви позначають приналежність до чавуну з вермікулярним графітом.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке твердий розчин? Які види твердих розчинів існують у залізовуглецевих сплавах?
2. Що таке механічна суміш? Які види механічних сумішей існують у залізовуглецевих сплавах?
3. В чому полягає відміна між евтектикою та евтектоїдом?
4. Дайте характеристику цементиту. Як кількість цементиту впливає на властивості залізовуглецевих сплавів?
4. Охарактеризуйте лінії та області діаграми сплавів системи Fe–Fe₃C. Як протікає кристалізація сплавів такої системи?
5. Які сплави називаються сталями та чавунами?
6. Як впливають легуючі елементи на властивості сталей?
7. Охарактеризуйте білі та сірі чавуни. В чому відміна між їх властивостями?
8. Яке значення має діаграма Fe–Fe₃C?

Розділ 2 ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Глава 7 ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СПЛАВІВ

Термічна обробка сплаву полягає в нагріванні до певної температури, витримці і наступному охолодженні з різною швидкістю для отримання необхідних структури та властивостей.

7.1 Критичні точки у залізобуглецевих сплавах

Термічна обробка дає зміцнюючий ефект тільки в тому випадку, коли в сплаві у твердому стані відбуваються структурні перетворення. Такі відомості можна одержати з діаграми стану. Якщо подивитися на діаграму Fe–Fe₃C, то можна однозначно сказати, що для залізобуглецевих сплавів можливе проведення зміцнюючої термічної обробки, тому що у твердому стані відбуваються фазові перетворення.

При вивченні діаграми Fe–Fe₃C можна відзначити певні критичні точки, або температури фазових перетворень. При охолодженні з рідкого стану це, в першу чергу, лінії ліквідусу і солідусу. При подальшому ж охолодженні внаслідок зміни типу кристалічної решітки заліза ГЦК→ОЦК відбуваються поліморфні перетворення. Вони мають місце в певному інтервалі температур і визначають положення критичних точок, які позначаються A₁ і A₃ (рис. 7.1).

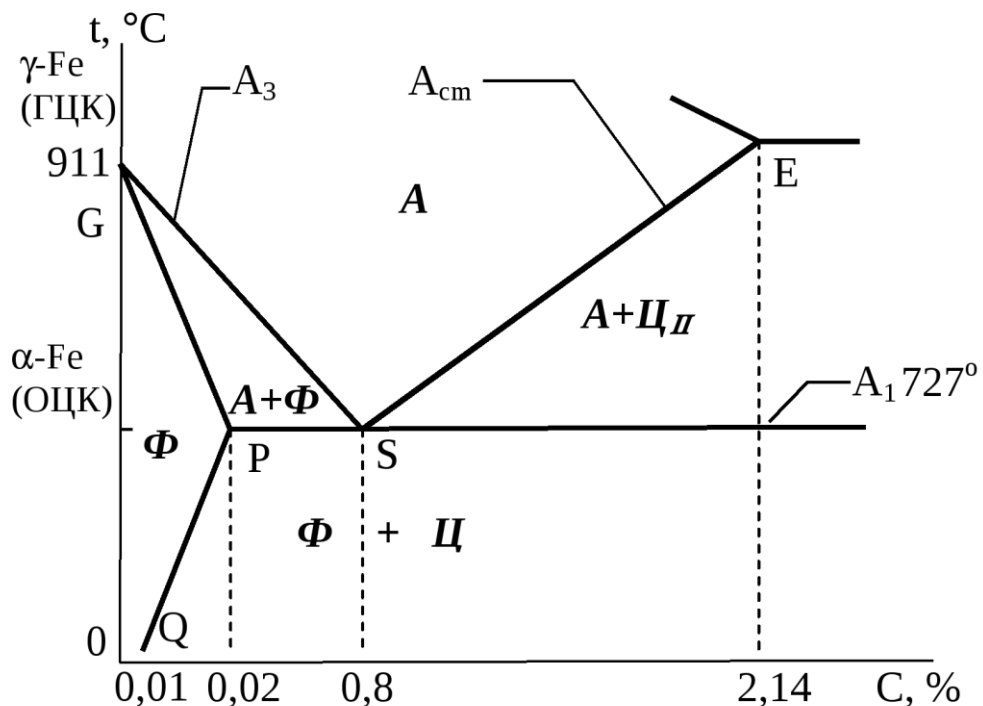


Рисунок 7.1. – «Сталевий кут» діаграми стану системи Fe – Fe₃C

На діаграмі геометричне місце критичних точок A_1 – лінія PSK, а критичних точок A_3 – GSE. Якщо перетворення відбуваються при охолодженні, то до позначення цих критичних точок додається латинська буква "r" і критичні точки при охолодженні позначаються: Ar_1 і Ar_3 . Якщо ж перетворення відбуваються при нагріванні, то до позначення критичних точок додається латинська буква «с» і вони, таким чином, записуються: Ac_1 і Ac_3 . Для заевтектоїдних сталей Ac_3 позначається Ac_m .

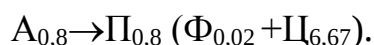
Фізичний зміст критичної точки Ac_1 – це геометричне місце точок, які відповідають температурі початку утворення аустеніту при нагріванні. Критична точка Ac_3 – це геометричне місце точок, які відповідають температурі кінця утворення аустеніту при нагріванні.

7.2 Перетворення в сталі при нагріванні

Для заліза характерні два типи кристалічних решіток – ОЦК, що існує в інтервалах температур до 911°C (Fe_α) та від 1392°C до 1539°C (Fe_δ) і ГЦК, що існує при температурах $911\ldots1392^\circ\text{C}$ (Fe_γ). Ці поліморфні перетворення наслідують і сталь, але вони, як правило, відбуваються в інтервалі температур.

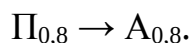
У твердому стані залізо з вуглецем утворюють два твердих розчини – ферит ($\text{Fe}_\alpha(\text{C})$) та аустеніт ($\text{Fe}_\gamma(\text{C})$). Гранична розчинність вуглецю в фериті (т.Р) становить 0,02%, в аустеніті – 2,14 % С (т. Е).

Із зниженням температури розчинність вуглецю в твердих розчинах зменшується і «залишковий» вуглець виділяється у вигляді цементиту (Fe_3C). При температурі 727°C аустеніт містить лише 0,8%С (т. S) і при охолодженні розпадається з утворенням евтектоїду: ферито-цементитної суміші, що називається перліт:



При нагріванні стали перліт перетворюється в аустеніт при температурі критичної точки Ac_1 (лінія PSK, температура 727°C). Насправді перетворення перліту в аустеніт температура нагріву повинна бути обов'язково трохи вище рівноважної температури 727°C .

При нагріванні евтектоїдної сталі вище лінії PSK перліт перетворюється на аустеніт за рахунок одночасного протікання двох процесів: перекристалізації, тобто утворення ГЦК решітки замість ОЦК, та розчинення цементиту в аустеніті. Ці перетворення можна представити такою схемою:



Утворений при нагріванні аустеніт хімічно неоднорідний. Перетворення $\alpha \rightarrow \gamma$ протікає швидше, ніж розчинення цементиту. Після розчинення всього цементиту перетворення закінчується.

На швидкість перетворення перліту в аустеніт впливають такі фактори як дисперсність перліту, швидкість нагріву, форма цементиту (пластинчаста або зерниста) та ін.

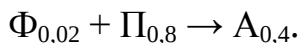
Зерна аустеніту, що утворюються при нагріванні стали вище критичної точки Ac_1 , виходять дрібними (початкове зерно аустеніту). При

подальшому підвищенні температури нагріву або тривалості витримки при даній температурі відбувається зростання зерна аустеніту.

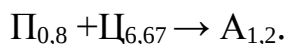
В сплавах, склад яких відмінний від евтектоїдного, процес розпаду аустеніту іде в інтервалі температур: починається при температурах, що відповідають лінії GSE, закінчується – при температурах лінії GPSK.

В інтервалі міжкритичних температур $A_1 - A_3$ в доевтектоїдній сталі присутні ферит і аустеніт, в заевтектоїдній – аустеніт і цементит вторинний. Нагрівання вище лінії GSE (геометричне місце точок A_{c3}) призводить до того, що відбувається перетворення фериту в аустеніт (у доевтектоїдній сталі), а цементит вторинний повністю розчиняється в аустеніті (для заевтектоїдної сталі).

Для сталі, що містить, наприклад, 0,4 %C процес утворення аустеніту закінчується при нагріванні вище лінії GS. Спочатку зерна аустеніту, що утворились з фериту та перліту містять різну кількість вуглецю, але потім внаслідок дифузійних процесів вуглець рівномірно розподіляється в кристалічній решітці γ – заліза:



В сталі, що містить 1,2%С фазові перетворення закінчуються при нагріванні вище лінії SE:

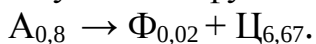


Таким чином присутня одна структурна складова (або фаза) – аустеніт. При повільному охолодженні ці процеси ідуть у зворотному напрямку.

7.3 Фазові перетворення в сталі при охолодженні

Розглянемо структурні перетворення при охолодженні стали на прикладі евтектоїдної стали, у якій критичні точки A_1 та A_3 збігаються.

При охолодженні аустеніту нижче температури 727°C відбувається його розпад на ферит, майже не містить вуглецю, і цементит, що містить 6,67% С. Цей процес супроводжується дифузійним перерозподілом вуглецю:



Про характер структур, що формуються в умовах ізотермічного розпаду аустеніту, можна судити по діаграмах ізотермічного розпаду (С-подібним діаграмам). Будують С-подібну діаграму за допомогою приладу, що називається анізомер Акулова, робота якого заснована на вимірюванні магнітних властивостей.

Зразок розміщують в печі, температура якої вище 727°C , потім переносять в ізотермічну ванну, температура якої трохи нижче 727°C (наприклад, 700°C) і витримують при цій температурі до повного розпаду аустеніту. Аустеніт не має магнітних властивостей, він парамагнетик, але як тільки починається розпад аустеніту з утворенням перших порцій фериту, який є феромагнетиком, анізомер відразу ж реєструє це перетворення. На підставі експериментальних даних будуються кінетичні криві розпаду аустеніту при різних температурах ізотермічної витримки в діапазоні

температур 727...240°C. Найчастіше ізотермічні витримки проводять при температурах 700, 600, 550, 500, 400°C та ін. На рис. 7.2, а наведені такі кінетичні криві розпаду аустеніту при температурах 550 і 700°C.

Якщо охолодити аустеніт нижче 727°C, то розпад аустеніту відбувається не одразу, якийсь час він ще існує і на відміну від аустеніту сталого, або рівноважного, існуючого при температурі вище 727°C, називається аустенітом нестійким. Час до початку розпаду аустеніту називається інкубаційним періодом. На основі кінетичних кривих розпаду аустеніту будується діаграма ізотермічного розпаду аустеніту в координатах «температура – lg часу» (рис.7.2, б).

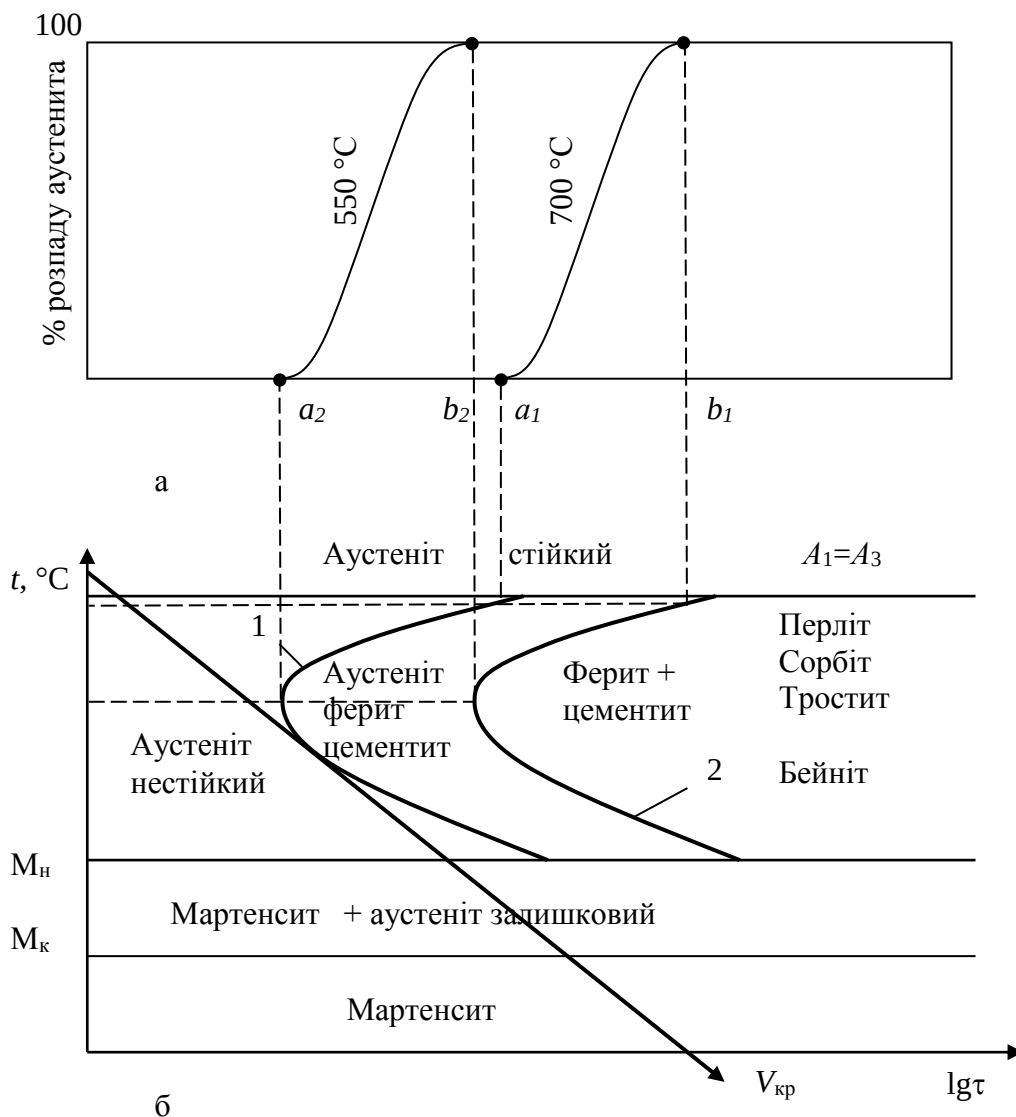


Рисунок 7.2. – Діаграма ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту евтектоїдної стали

Криві на діаграмі мають вигляд букви С, тому їх називають С-подібними кривими. Крива 1 характеризує початок допаду аустеніту на ферито-цементітну суміш. Область, що лежить лівіше кривій початку розпаду аустеніту, визначає область інкубаційного періоду. Крива 2 відповідає кінцю розпаду аустеніту.

Вище вигину С-кривих при розпаді аустеніту утворюються структури перлітного типу, мають пластинчасту будову і відрізняються дисперсністю (товщиною цементитних частинок і відстанню між ними). Властивості і будова продуктів перетворення аустеніту залежать від температури, при якій відбувається розпад. Зниження температури прискорює процес перекристалізації й одночасно зменшує швидкість дифузії. Пластинки цементиту стають все більш тонкими, а відстань між ними зменшується. Структура, яка при цьому утворюється, більш дрібнодисперсна, а твердість металу більша, ніж при невеликій швидкості охолодження.

Найгрубішою структурою є перліт, більш дисперсною – сорбіт і ще більш дисперсною – тростит. Дисперсність перлітних структур оцінюється міжпластинчастою відстанню, за яке приймають середню сумарну товщину сусідніх пластинок фериту і цементиту. Для перліту воно складає 0,6...1,0 мкм, для сорбіту – 0,25...0,30 мкм, для троститу – 0,1...0,15 мкм.

Процес розпаду аустеніту на ферито-цементитну суміш є дифузійним. При перлітному перетворенні відбувається перерозподіл вуглецю: утворюються пластинки фериту, що містять 0,006% вуглецю, і пластинки цементиту, що містять 6,67% вуглецю. Для утворення цементиту необхідно переміщення атомів вуглецю на відстані, значно перевищують міжатомні, так як середній вміст вуглецю в твердому розчині до перетворення набагато менше, ніж у цементиті.

Нижче температури, відповідної мінімальної стійкості аустеніту, відбувається бейнітне перетворення. Бейніт являє собою голкоподібну структуру, що складається з дещо пересиченого вуглецем фериту і частинок цементиту. Бейніт твердіше і міцніше продуктів перлітного перетворення.

Визначальною особливістю бейнітного перетворення є той факт, що воно протікає в інтервалі температур, коли ускладнюється дифузія вуглецю. Механізм бейнітного перетворення поєднує риси дифузійного перлітного і бездифузійного мартенситного. Тому бейнітне перетворення називають ще проміжним.

При переохолодженні аустеніту до температури нижче критичної точки M_n (для евтектоїдної сталі 240°C) дифузійні процеси повністю придушуються. Відбувається бездифузійного перетворення аустеніту в мартенсит – пересичений твердий розчин вуглецю в Fe_α .

Якщо в рівноважному стані розчинність вуглецю в Fe_α при 20°C з не перевищує 0,006%, то його вміст у мартенситі може бути таким же, як у вихідному аустеніті. Оскільки мартенситне перетворення бездифузійне, то вуглець із твердого розчину не виділяється і у процесі перетворення відбувається лише перебудова атомів заліза. Вуглець, який залишився в ОЦК-решітці спотворює її – замість кубічної вона стає тетрагональною (рис.7. 3). Ступінь тетрагональності, тобто відношення h/a , залежить від кількості вуглецю у сталі.

Характерною особливістю мартенситу є його висока твердість та міцність.

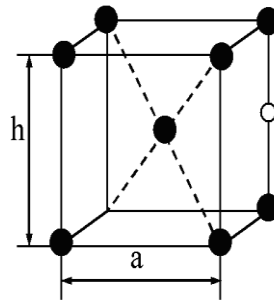


Рисунок 7. 3. –Тетрагональна решітка мартенситу: ● – атом заліза;
○ – атом вуглецю.

Твердість мартенситу залежить від кількості в ньому вуглецю. Тимчасовий опір мартенситу при кількості вуглецю 0,025%С становить 1000МПа, а при 0,6...0,7%С досягає 2600...2700МПа. З підвищенням кількості вуглецю у мартенситі збільшується його схильність до крихкого руйнування. Мартенсит, який містить більше 0,5...0,6%С, має низькі значення ударної в'язкості. Твердість (міцність) мартенситу пов'язана з утворенням пересиченого твердого розчину, високої густини дислокацій та великої кількості інших дефектів, які гальмують пересування дислокацій.

Особливістю мартенситного перетворення є той факт, що воно відбувається в діапазоні температур $M_n...M_k$ (M_n – початок мартенситного перетворення, M_k – кінець мартенситного перетворення). Тому в інтервалі температур $M_n...M_k$ крім мартенситу буде присутній аустеніт, який в даному випадку називають залишковим.

Якщо в мартенситних інтервалі охолодження призупинити і дати витримку, то перетворення аустеніту в мартенсит відразу ж припиняється. Ця особливість різко відрізняє мартенситне перетворення від перлітного, яке повністю протікає при постійній температурі нижче A_1 .

Таким чином, можна виділити такі особливості мартенситного перетворення:

1. Мартенситне перетворення є бездифузійним.
2. Перетворення відбувається без інкубаційного періоду.
3. Перетворення відбувається в діапазоні температур $M_n...M_k$.
4. Мартенситне перетворення відрізняється великою швидкістю протікання, близькою до швидкості звуку в сталі.

Мартенсит може утворитися лише при безперервному охолодженні з певною швидкістю. Мінімальна швидкість охолодження, при якій може бути одержана мартенситна структура, називається критичною швидкістю охолодження ($V_{кр}$). Критична швидкість охолодження $V_{кр}$ – це та найменша швидкість охолодження, при якій утворюється чисто мартенситна структура без продуктів дифузійного розпаду. Графічно ця швидкість виглядає дотичною до лінії, що відповідає початку розпаду аустеніту (див. рис. 7.2).

5. Характерним для мартенситного перетворення є підвищення густини дислокацій, що поряд з утворенням пересиченого вуглецем твердого розчину зумовлює високу твердість мартенситу (60 HRC).

6. Температура початку (M_H) і кінця (M_K) мартенситного перетворення залежить від хімічного складу сталі.

Легуючі елементи суттєво впливають на температурний інтервал мартенситного перетворення. Більшість легуючих елементів знижують мартенситні точки. У цьому ж напрямку позначається вплив вуглецю. На рис. 7. 4 наведена температура початку і кінця мартенситного перетворення в залежності від вмісту вуглецю.

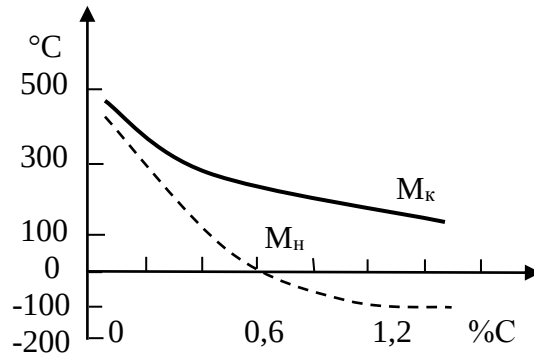


Рисунок 7. 4. – Вплив вмісту вуглецю на температуру початку (M_H) і кінця (M_K) мартенситного перетворення

Як видно з цього графіка (рис. 7.4), із збільшенням кількості вуглецю температури початку і кінця мартенситного перетворення зменшуються.

7. Критична швидкість охолодження залежить від хімічного складу сталі. Легуючі елементи, зсуваючи діаграму ізотермічного розпаду аустеніту вправо, зменшують критичну швидкість охолодження. На рис. 7.5 схематично представлені діаграми ізотермічного розпаду аустеніту для вуглецевої і легованої сталі і показані їх критичні швидкості охолодження.

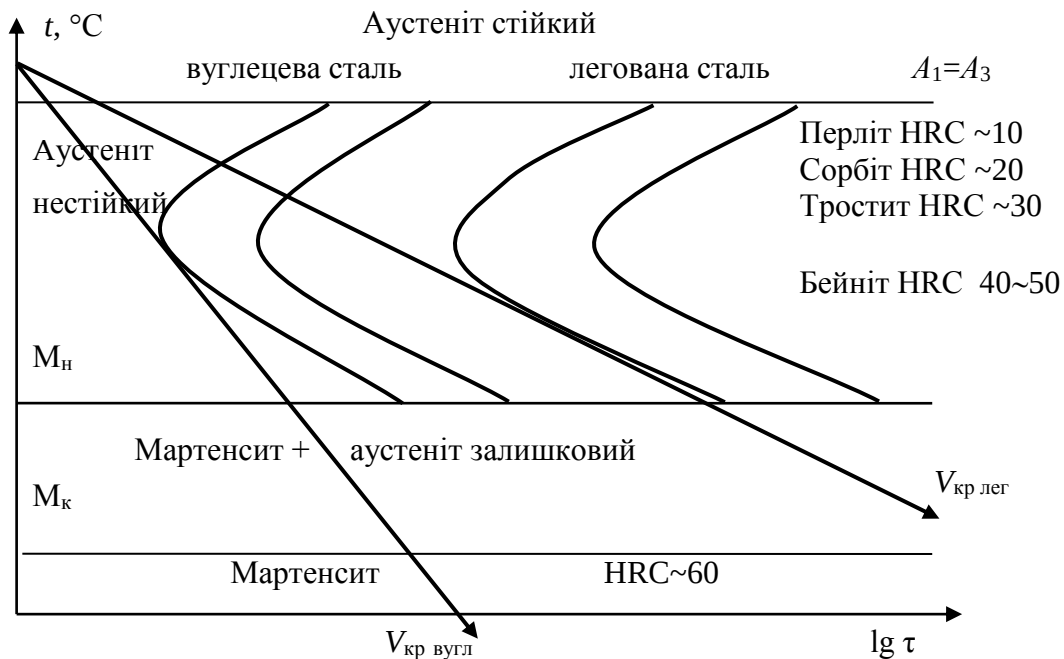


Рисунок 7. 5 – Діаграми ізотермічного розпаду аустеніту для вуглецевої і легованої сталі

Цей факт має позитивне значення, тому що дозволяє охолоджувати з меншою швидкістю леговані сталі для отримання мартенситної структури, а відповідно і високої твердості.

Для вуглецевої сталі характерно те, що криві початку і кінця розпаду переохолодженого аустеніту (С-подібні криві) близько підходять до осі ординат (малий інкубаційний період), що свідчить про малу стійкості аустеніту. Усі легуючі елементи, за винятком кобальту, уповільнюють розпад переохолодженого аустеніту, збільшуючи його стійкість. Це дозволяє використовувати для легованих сталей менш інтенсивний охолоджувач, ніж для вуглецевих.

7.4 Класифікація видів термічної обробки

Основними видами термічної обробки є відпал, нормалізація, гартування та відпуск (старіння). Кожен з указаних видів може мати декілька різновидів.

Відпал та нормалізація – це види термічної обробки, які полягають у нагріванні металу, структура якого внаслідок будь-якої попередньої обробки перейшла у нерівноважний стан, і охолодженні його з невеликою швидкістю.

При відпалі сталеві вироби нагріваються до певних температур і повільно охолоджуються з піччю.

Нормалізація і гартування полягають в нагріванні до температур вище критичних A_{c1} або A_{c3} (A_{cm}), витримці при цих температурах і охолодженні з різною швидкістю. Нормалізація – охолодження на повітрі, гартування – із швидкістю більше або рівній критичної (рис. 7.6).

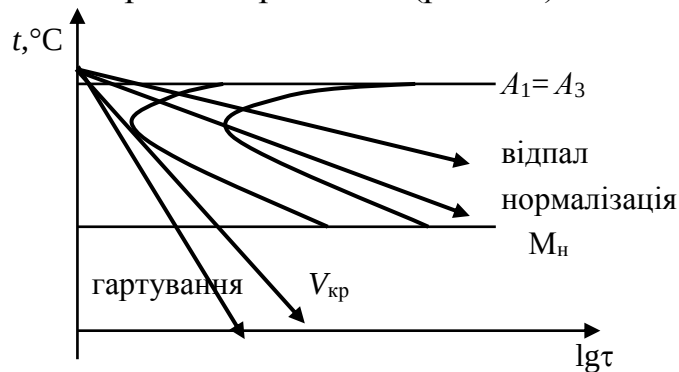


Рисунок 7.6. – Основні види термічної обробки сталі

Відпуск полягає в нагріванні до температури нижче критичної A_{c1} , витримці і, як правило, охолодженні на повітрі.

Відпал та нормалізація приводять до зняття внутрішніх напружень, знеміцнення металу та підвищення пластичності. Вони в основному застосовуються як попередні види термічної обробки деталей та напівфабрикатів перед обробкою різанням.

Гартування – це єдина термічна обробка сталей, призначена для одержання структурно нестійкого стану сплаву. Метою гартування є одержання мартенситної структури і максимальної твердості.

Відпуск (старіння) – термічна обробка, внаслідок якої в попередньо загартованих сплавах відбуваються фазові перетворення, які наближають структуру до рівноважної.

Термін «відпуск» використовують стосовно сплавів, які мають поліморфні перетворення (сталі, деякі титанові сплави); термін «старіння» – стосовно сплавів із змінною розчинністю компонентів, які поліморфних перетворень при гартуванні не мають (сплави на основі алюмінію, нікелеві сплави, титанові сплави).

Принципова можливість застосування того чи іншого виду термічної обробки може бути визначена за допомогою діаграм стану.

7.5 Відпал і нормалізація

Відпал – це знеміцнююча термічна обробка, внаслідок якої підвищується пластичність і знижуються залишкові внутрішні напруження. Залежно від мети застосовують різні види відпалу (рис.7.7).

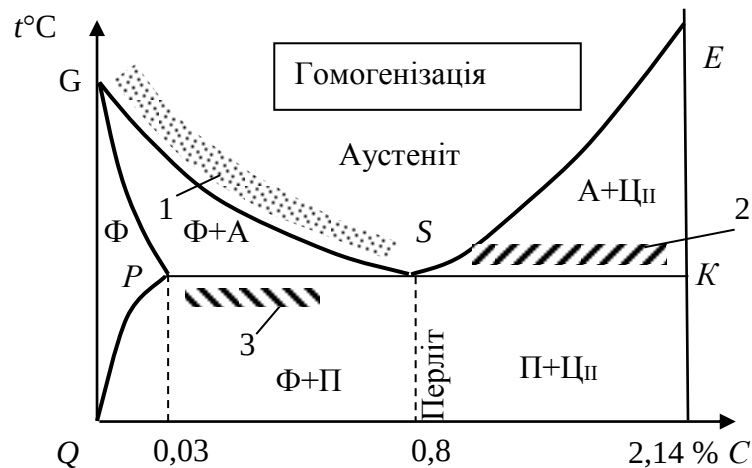


Рисунок 7.7. – Інтервали рекомендованих температур нагрівання сталі при відпалі: 1 – повний відпал; 2 – неповний відпал; 3 – рекристалізаційний відпал.

Гомогенізацію (дифузійний відпал) застосовують для сталевих злитків з метою зменшення або усунення неоднорідності хімічного складу. Оскільки вирівнювання хімічного складу відбувається за рахунок дифузії елементів, що входять до складу сплаву, то виріб нагрівають до високої температури ($1000 \dots 1100^{\circ}\text{C}$) і тривало витримують в цих умовах.

Рекристалізаційний відпал використовують для зняття наклепу холоднодеформованої сталі. Температура рекристалізаційного відпалу сталі знаходиться в межах $650 \dots 700^{\circ}\text{C}$.

Низькому відпалу піддають відливки, зварні з'єднання, деталі після обробки різанням, тиском для зняття залишкових напружень. Температура відпалу знаходиться в межах $180 \dots 600^{\circ}\text{C}$.

Повний відпал проводиться з метою повної фазової перекристалізації для подрібнення зерна і полягає він у нагріванні на $50 \dots 60^{\circ}\text{C}$ вище критичної

точки A_{C3} . Він проводиться головним чином для доевтектоїдної сталі. Повний відпал забезпечує рівноважний структурний стан і повністю знімає внутрішні напруження.

При *неповному відпалі* нагрів здійснюють до температур на $50...60^{\circ}\text{C}$ вище A_{C1} , що призводить до часткової перекристалізації. Тому він застосовується в тому випадку, коли попередня гаряча обробка не створила великого зерна. Використовується такий відпал для поліпшення оброблюваності різанням.

Ізотермічний відпал полягає в тому, що виріб нагрівають вище точки A_{C3} (або A_{C1}) і потім переносять у піч, температура якої на $50...150^{\circ}\text{C}$ нижче A_{C1} і витримують до повного розпаду аустеніту. Ізотермічний відпал дозволяє значно скоротити тривалість процесу і забезпечити отримання більш однорідної структури по перерізу деталі.

Циклічний відпал передбачає кілька циклів нагрівання та охолодження біля критичної точки A_1 (рис. 7.8).

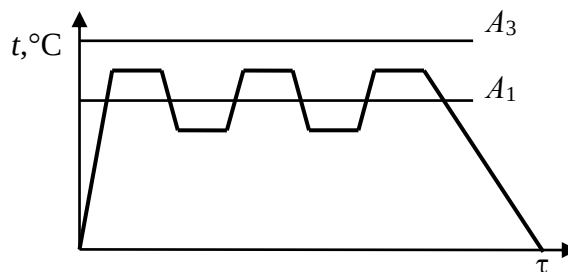


Рисунок 7.8. – Схема циклічного відпалу сталі для отримання зернистого перліту

Циклічний відпал застосовують для отримання карбідів сферичної форми, що необхідно для інструментальних сталей. Однак такий відпал використовують і для доевтектоїдних сталей з метою поліпшення обробки штампуванням.

Нормалізація полягає в нагріванні на $50...60^{\circ}\text{C}$ вище A_{C3} , витримці і охолодженні на повітрі. Нормалізація викликає повну фазову перекристалізації. Вона є більш економічною операцією, ніж повний відпал.

7.6 Гартування

Гартування – це зміцнююча термічна обробка, яка проводиться з метою підвищення твердості і міцності. Температура нагрівання при гартуванні визначається положенням критичних точок A_{C1} і A_{C3} . Швидкість охолодження повинна бути рівною або більше критичної.

Доевтектоїдні сталі нагрівають під гартування до температури на $50...60^{\circ}\text{C}$ вище A_{C3} (рис. 7.9). У цьому випадку сталь здобуває аустенітну структуру. При охолодженні аустеніт перетворюється в мартенсит. Заевтектоїдні сталі під гартування нагрівають до температури на $50...60^{\circ}\text{C}$ вище A_{C1} . У цьому випадку при нагріванні формується структура аустеніту і цементиту вторинного. Після охолодження зі швидкістю більше критичної

структура складається з мартенситу й цементиту, що мають високу твердість.

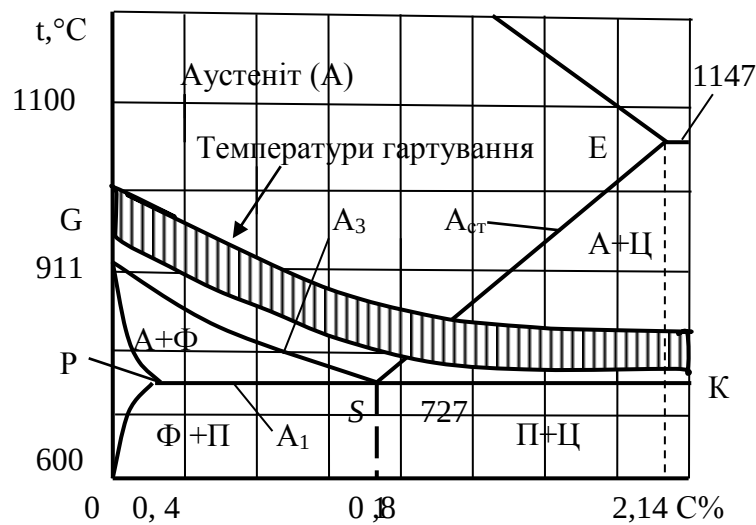


Рис. 7.9. – Температурний інтервал нагрівання для гартування конструкційних сталей.

Нагрівання до температури, яка перевищує температуру фазових переходів на $100...150^{\circ}\text{C}$ або на $200...500^{\circ}\text{C}$, з наступним швидким охолодженням також приводить до утворення мартенситної структури, але такий режим, по-перше, неекономічний, а, по-друге, може викликати появу тріщин і навіть руйнування деталей внаслідок високих термічних напружень.

При виборі охолоджуючого середовища для гартування необхідно враховувати той факт, що при швидкому охолодженні виникають внутрішні напруження, які можуть привести до утворення тріщин. Внутрішні напруження бувають термічні та структурні. Термічні напруження пов'язані з перепадом температур по перерізу деталі при охолодженні. Структурні напруження обумовлені такими факторами: по-перше, природою мартенситу, який є пересиченим твердим розчином вуглецю в Fe_α , що призводить до спотворення решітки, по-друге, різним питомим об'ємом мартенситу і аустеніту (питома об'єм мартенситу більше, ніж аустеніту). На рис. 7.10 наведені на С-подібні діаграми вуглецевої і легованої сталі і нанесені швидкості охолодження у воді і оливі.

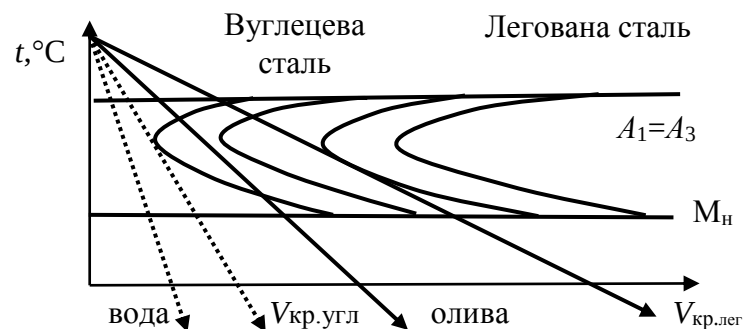


Рисунок 7.10. – Швидкості охолодження у воді і оливі, нанесені на діаграму ізотермічного розпаду аустеніту.

Критична швидкість охолодження для вуглецевих сталей становить $200...800^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Усі легуючі елементи, за винятком кобальту, критичну швидкість охолодження зменшують. Наприклад, введення у сталь 1%Cr зменшує критичну швидкість у 2 рази, а 0,4% Mo – до $50^{\circ}\text{C}/\text{с}$. Оскільки для легованої сталі критична швидкість охолодження значно менша, ніж для вуглецевої, то леговану сталь для отримання мартенситу можна охолоджувати в оливі, що знижує внутрішні напруження. Вуглецеві ж сталі, які мають велику критичну швидкість охолодження, необхідно охолоджувати швидко, наприклад, у воді. При цьому можуть виникнути великі внутрішні напруження, які призводять до викривлення виробу і появи тріщин. На практиці вуглецеві сталі охолоджують у воді (або у розчинах NaCl, NaOH), леговані – у мінеральних оливах.

Спеціальні види гартування застосовуються як види термічної обробки, що зменшують внутрішні напруження (рис. 7.11).

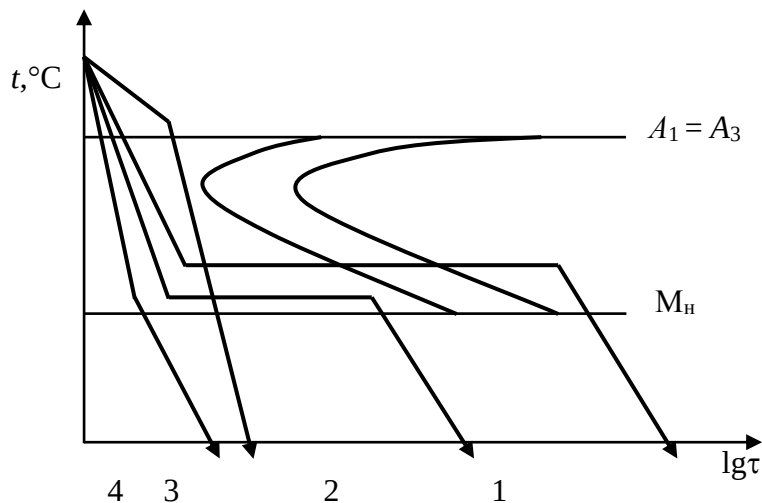


Рисунок 7.11. – Спеціальні види загартування: ізотермічне (1), ступінчасте (2), з підстижуванням (3), переривчасте (у двох середовищах) (4)

Після ізотермічного гартування отримують структуру бейніту, при формуванні якої внутрішні напруження значно менше, ніж при мартенситних перетвореннях, оскільки ферит, що входить до складу бейніту, менше пересичений вуглецем, ніж мартенсит.

При інших трьох видах гартування отримують структуру мартенситу, але досягають істотного зменшення термічних напружень і деякого зменшення структурних.

Витримка при температурі нагрівання потрібна для рівномірного прогрівання деталі по переріз і повного протікання дифузійних процесів. Тривалість витримки в основному залежить від розмірів деталі та теплофізичних властивостей середовища, у якому відбувається нагрівання.

На практиці при нагріванні у газовому середовищі тривалість витримки становить 1хвилину на 1мм перерізу деталі, у розплавлених солях – 0,5хв/мм.

Таким чином, *гартування сталей* – це термічна обробка, яка складається з їх нагрівання на $50...60^{\circ}\text{C}$ вище температури фазових

перетворень (лінія GSK), витримки при цій температурі для протікання дифузійних процесів і охолодження із швидкістю, що перевищує критичну, для утворення мартенситної структури.

7.7 Загартованість та прогартовуваність

Здатність сталі зміцнюватися при гартуванні називається *загартованістю*. Вона залежить від вмісту вуглецю у сталі (рис. 7.12).

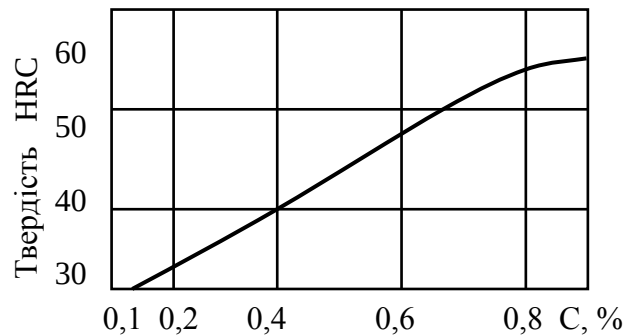


Рисунок 7.12. – Залежність твердості загартованої сталі від вмісту вуглецю

У сталях, які містять менше 0,25% C, при гартуванні утворюється мартенсит, міцність якого невисока. Такі сталі піддають не гартуванню, а хіміко-термічній обробці. Легуючі елементи практично не впливають на загартованість.

Прогартовуваність – це здатність сталі утворювати загартовану зону певної глибини. Вона залежить від хімічного складу сталі. В першу чергу від легуючих елементів. Не наскрізна прогартовуваність пояснюється тим, що поверхня деталі охолоджується швидше, ніж серцевина (рис. 7.13).

Якщо дійсна швидкість охолодження в серцевині виробу менше критичної швидкості, то деталь прогрівається тільки на певну глибину і прогартовуваність буде нескрізною (випадок I, II на рис. 7.13). Якщо дійсна швидкість охолодження в серцевині виробу дорівнює або більше критичної швидкості $V_{кр}$ (випадок III на рис. 7.13), то виріб отримає мартенситну структуру по всьому перерізу і, отже, буде мати місце повна (наскрізна) прогартовуваність.

Таким чином, прогартовуваність тим вище, чим менше критична швидкість охолодження $V_{кр}$. Оскільки легуючі елементи зменшують критичну швидкість охолодження, то вони відповідно підвищують прогартовуваність.

Вуглецеві сталі, що мають малу стійкість аустеніту, мають дуже малу прогартовуваність на глибину кілька міліметрів від поверхні. Найбільш сильно підвищують прогартовуваність марганець, хром, нікель, кобальт. При легуванні стали декількома елементами прогартовуваність може бути збільшена найбільш значно.

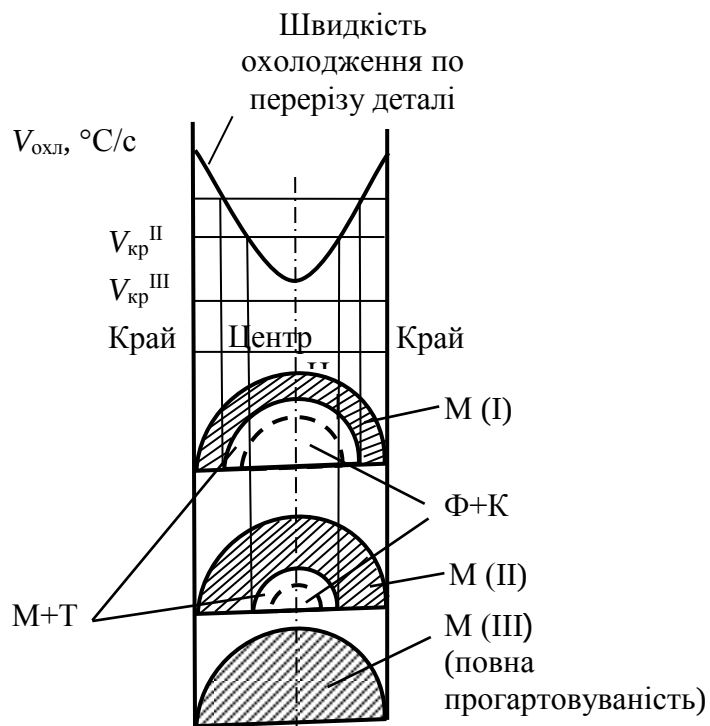


Рисунок 7.13. – Залежність прогартуваності сталі від критичної швидкості охолодження $V_{кр}$: $V_{кр}^I > V_{кр}^{II} > V_{кр}^{III}$, $\Phi + K$ – пластинчаста ферито-карбідна структура (тросит, сорбіт або перліт); M – мартенсит; T – тросит

Деякі елементи, в першу чергу бор, збільшують прогартуваність, якщо містяться в сталі в невеликій кількості, тоді як при великому вмісті подібного їх дії не спостерігається. Ефективний вплив бору на прогартуваність проявляється при його вмісті в сталі в кількості 0,002...0,006%. Введення бору для збільшення прогартуваності сталі дозволяє заощадити дорожчі і дефіцитні елементи.

Для практичної оцінки прогартуваності користуються величиною, яка називається критичним діаметром.

Критичний діаметр (D) – це максимальний діаметр циліндричного прутка, який прогартувається наскрізь у даному охолоджуючому середовищі.

Значення критичних діаметрів для кожної сталі при охолодженні у воді і в маслі наводяться у довідниках. Марка сталі для деталі вибирається таким чином, щоб при термічній обробці деталь прогартувалась наскрізь.

Чим більше переріз деталі, тим більше леговану сталь слід вибирати. Складні по конфігурації деталі, особливо якщо вони піддаються ударних навантажень, рекомендується виготовляти з сталей, що містять нікель. Для великих деталей, які не можна швидко охолоджувати при відпустці, слід використовувати сталі, що містять 0,15...0,30% Mo .

7.8 Відпуск загартованих сталей.

Після гартування сталь має високу твердість та міцність, але й високу крихкість, тобто низьку конструкційну міцність. Для отримання необхідного сполучення твердості, міцності, пластичності, ударної в'язкості та зняття внутрішніх напружень використовують відпуск.

Відпуск – це операція термічної обробки, яка полягає у нагріванні загартованої сталі нижче температури фазових перетворень, витримці та охолодженні як правило на повітрі. В залежності від температури нагрівання розрізняють три види відпуску – низький, середній та високий.

Низький відпуск проводять при нагріванні до $150...220^{\circ}\text{C}$. При такому нагріванні у металі починаються процеси дифузійного перерозподілу вуглецю і часткового виходу його з твердого розчину. При цьому ступінь тетрагональності мартенситу h/a зменшується та наближається до одиниці. Мартенсит гартування переходить у мартенсит відпуску. Внаслідок низького відпуску дещо зростає пластичність та в'язкість при незначному зменшенні твердості та міцності, внутрішні напруження знімаються на третину. Тривалість такого відпуску 2 хвилини на 1мм перерізу деталі, але не перевищує 1...2 години.

Низький відпуск призначається для вуглецевих та низьколегованих інструментальних сталей, а також для деталей після цементації. Для середньовуглецевих сталей (0,3...0,5% C) низький відпуск не застосовується.

Середній відпуск виконують при температурі $350...500^{\circ}\text{C}$. Мартенсит розпадається на ферито-цементитну суміш, що називається тростит відпуску, в якій цементитні включення мають зернисту форму (рис.7.14, а), на дві третини зменшуються внутрішні напруження, істотно підвищується границя текучості. Твердість сталі після середнього відпуску нижча, ніж після гартування, пружні властивості дуже високі.

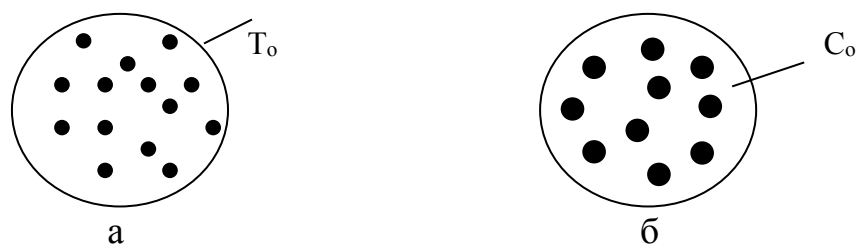


Рисунок 7.14. – Схематичне зображення структури троститу відпуску (а) і сорбіту відпуску (б)

Середній відпуск застосовують головним чином для пружин та ресор, тобто для деталей, які в процесі експлуатації піддаються великим пружним деформаціям.

Високий відпуск проводять при температурі $500...650^{\circ}\text{C}$. Таке нагрівання приводить до укрупнення карбідних часточок, повного зняття внутрішніх напружень, зменшення міцності та твердості і значного зростання пластичності й особливо ударної в'язкості. При цій температурі відбувається два процеси: розпад мартенсита на ферито-цементитну суміш і процес

укрупнення карбідних (цементитних) часток сферичної форми. Це процес називається коалесценція. В результаті утворюється структура зернистої будови, яка називається сорбіт відпуску (рис.7.14, б). Повністю знімаються внутрішні напруження. Різко підвищуються пластичність і ударна в'язкість, зберігається на досить високому рівні умовний границя текучості. При високому відпуску утворюються більші карбіди зернистої форми, ніж при середньому відпуску.

На рис. 7.15 наведена залежність механічних властивостей загартованої сталі 40 від температури відпуску.

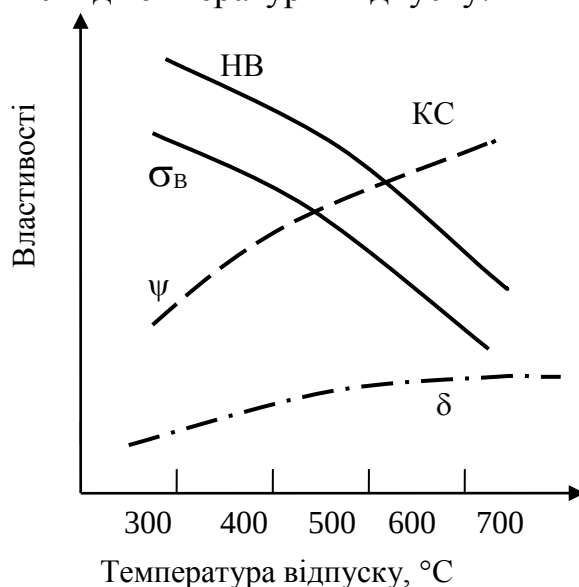


Рисунок 7.15. – Характер зміни механічних властивостей середньовуглецевої сталі при відпуску.

С збільшенням температури відпуску твердість і міцність знижуються, а пластичність і ударна в'язкість – ростуть.

Термічна обробка, яка складається з гартування та високого відпуску, називається *поліпшення*. Таку обробку використовують для середньовуглецевих (0,3...0,5%С) конструкційних сталей, які повинні забезпечувати високу ударну в'язкість та границю витривалості. Поліпшення значно збільшує конструкційну міцність сталі, зменшує чутливість до концентраторів напружень та схильність до крихкого руйнування. Тривалість високого відпуску 1...6 годин в залежності від розмірів деталей.

Нерідко виникає питання про доцільність проведення поліпшення, яке приводить до утворення ферито-цементитної структури, тому що аналогічна структура формується при значно більш економічній нормалізації. Різниця між структурами полягає лише у формі цементитних включень – вони пластинчасті після нормалізації та зернисті після поліпшення.

Форма часточок цементиту значно впливає на властивості металу: при майже однаковій твердості поліпшення забезпечує більш високі значення міцності і особливо ударної в'язкості (табл. 7.1).

Таблиця 7.1 Вплив режимів термічної обробки на механічні властивості середньовуглецевих сталей

Сталь	Обробка	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	КСУ, МДж м ²	НВ, МПа
		МПа		%			
40	нормалізація	570	295	20	40	44	162
40	поліпшення	660	450	16	66	166	188
40Х	нормалізація	590	345	18	45	59	194
40Х	поліпшення	860	720	16	60	147	235
40ХН	нормалізація	570	315	18	35	34	197
40ХН	поліпшення	919	760	20	60	93	221

При однаковому вмісті вуглецю сталь, що має зернисту структуру, має більшу пластичність, ударну в'язкість, умовну границю текучості, границю витривалості у порівнянні зі сталлю, що має пластинчасту структуру.

7.9 Термічна обробка сплавів із змінною розчинністю компонентів у твердому стані.

Змінна розчинність компонентів у твердому стані дає підставу для зміцнення сплавів гартуванням і наступним старінням. За такою схемою проводять термічну обробку сплавів на основі нікелю, титану, деякі мідні сплави. Піддають такій обробці і дуралюміни.

До складу дуралюмінів крім алюмінію входять мідь, марганець, магній та інші елементи. Основним легуючим елементом сплаву є мідь, яка утворює з алюмінієм обмежений твердий розчин (рис.7.16).

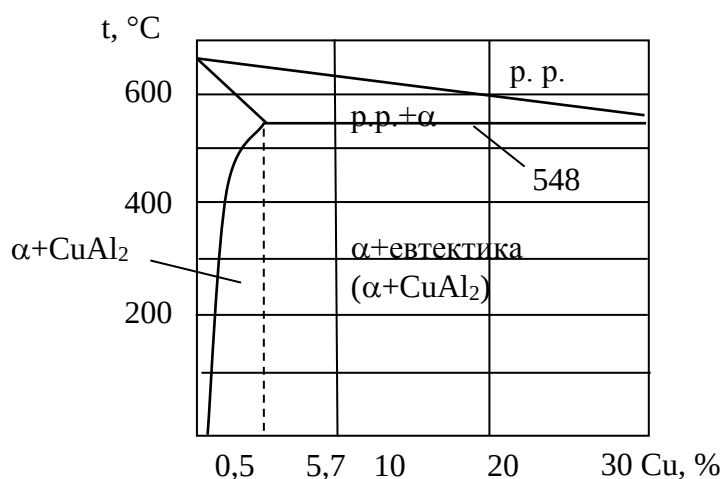


Рисунок 7.16. – Діаграма стану Al – Cu

При температурі 548°C розчинність міді в алюмінії максимальна – 5,7%, а при кімнатній – лише 0,5%. У відпаленому стані (рівноважна структура) дуралюміни, які містять 3,5...4,9%Cu, складаються з α -твердого розчину та надлишкових кристалів CuAl_2 (рис. 7.17). Гартування

цього сплаву полягає у нагріванні вище лінії змінної розчинності, витримці при цій температурі для повного розчинення надлишкової фази CuAl_2 і утворення однорідного твердого розчину, та швидкому охолодженні для одержання пересиченого твердого розчину.

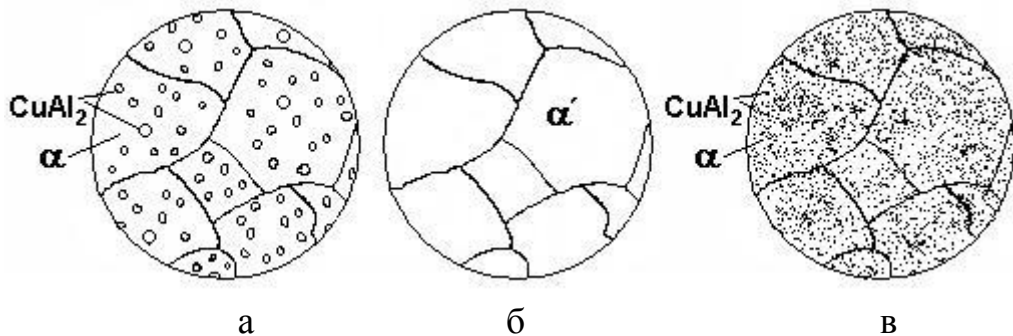


Рисунок 7.17 – Схеми мікроструктур дуралюмінію: а – після відпалу, б – після гартування, в – після старіння.

Міцність і твердість сплаву внаслідок гартування дещо підвищуються, а пластичність залишається високою. Такий комплекс властивостей дозволяє проводити пластичне деформування загартованого дуралюмінію у холодному стані.

Пересичений твердий розчин нестійкий, тому вже при кімнатній температурі в ньому виникають зміни, які наближають його структуру до рівноважної, тобто відбувається його *старіння*. У процесі старіння розпадається пересичений твердий розчин, що супроводжується зміцненням сплаву та зменшенням його пластичності. Розпад пересиченого твердого розчину відбувається в декілька стадій у залежності від температури та тривалості старіння. Якщо старіння протікає при кімнатній температурі, воно називається природним. Тривалість природного старіння дуралюмінів становить 5...7 діб. Природне старіння приводить до утворення мікрооб'ємів, збагачених міддю, так званих зон Гін'є-Престона (ГП). Ці зони являють собою диски діаметром 4...6 нм і товщиною у декілька атомних шарів при збереженні вихідної решітки α -твердого розчину (рис.7.18, а).

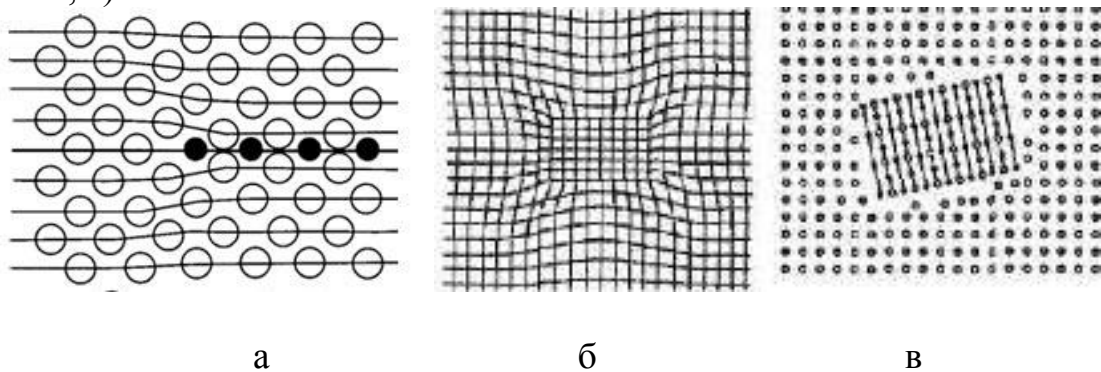


Рис. 7.18. – Схема розвитку процесів старіння пересиченого твердого розчину: ○ – атоми алюмінію, ● – атоми міді.

У сусідніх ділянках зони ГП викликають значні спотворення кристалічної решітки, що стає основною причиною зміцнення сплаву при природному старінні. Тривала витримка при 100°C або декілька годин при 150°C (штучне старіння) приводить до зростання зон ГП і утворення в них власної кристалічної решітки, когерентно зв'язаної з решіткою матриці (рис.7.18, б), тобто зони ГП перетворюються у метастабільні хімічні з'єднання, вміст міді в яких ще недостатній для утворення сполуки CuAl_2 . При подальшому збільшенні температури (або тривалості старіння) із метастабільних сполук утворюється стабільна – CuAl_2 , частки якої поступово зростають (рис.7.18, в).

Виникнення стабільної хімічної сполуки CuAl_2 і зростання (коагуляція) його часток приводять до зниження міцності дуралюмінів. Швидкість зміцнення сплавів збільшується з підвищенням температури старіння (рис. 7.19).

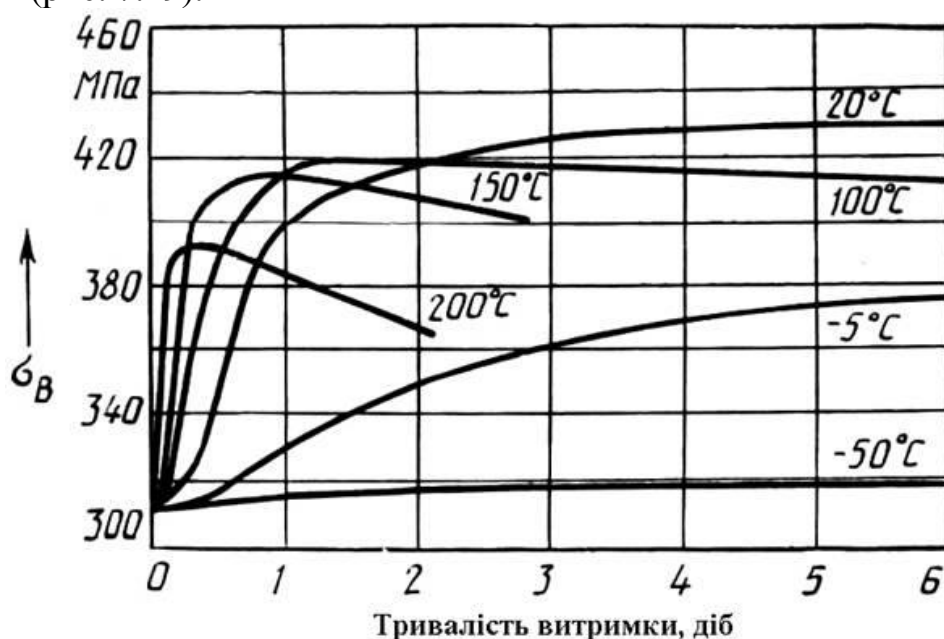


Рисунок 7.19 – Залежність міцності дуралюмінію від режимів старіння

Таким чином, штучне старіння, хоч і потребує значно меншого часу (десятки хвилин), менш ефективне, ніж природне. Для зміцнення дуралюмінів, як правило, застосовують гартування із природним старінням, тому що у даному випадку сплави мають більш високу міцність та пластичність і менш чутливі до концентраторів напружень. Штучному старінню (190°C, 10 годин) піддають лише деталі, які працюють в умовах підвищених температур.

7.10 Дефекти термічної обробки

Основними параметрами, що визначають режим термічної обробки, є температура нагрівання, тривалість витримки та швидкість охолодження (охолоджуюче середовище). Неправильний вибір хоча б одного з цих параметрів приводить до термічного браку. Основним параметром, що

контролює якість термічної обробки, є твердість. Її обов'язково контролюють після кожного виду термічної обробки.

До основних дефектів при термічній обробці відносяться:

- недостатня твердість;
- завищена твердість;
- викривлення і утворення тріщин;
- окислення і знеуглецювання.

Типовими причинами *недостатньої твердості* є такі:

1. Швидкість охолодження при гартування була менше критичної швидкості охолодження (вуглецеву сталь охолодили в оливі, а не в воді);

2. Температура нагрівання під гартування нижче необхідної температури (доевтектоїдну сталь треба гріти вище температури A_{c3} , а нагріли вище A_{c1});

3. Недостатня тривалість витримки, деталь не встигла прогрітися.

4. Завищена температура відпуску.

Цей вид браку можна виправити, проводячи повторну термообробку по правильному режиму.

Завищена твердість, як правило, пов'язана з тим, що температура відпуску була нижче необхідної. Повторним відпуском можна виправити цей вид термічного браку.

Викривлення являє собою несиметричну деформацію деталей, яка з'являється при нерівномірному нагріванні в процесі гартування, при неправильному розташуванні деталі в охолоджуючому середовищі. *Тріщини* являють собою не виправний вид браку. Схильність до утворення тріщин зростає із збільшенням в сталі кількості вуглецю, з підвищенням температури гартування і збільшенням швидкості охолодження в температурному інтервалі мартенситного перетворення. Причиною цих видів браку є термічні і структурні напруження під дією неоднорідних об'ємних змін, викликаних нерівномірним охолодженням і фазовими перетвореннями. Щоб не допустити такий вид браку, необхідно: застосовувати спеціальні види гартування; після механічної обробки перед гартуванням проводити відпал для зняття напружень; вироби великої довжини нагрівати і охолоджувати у вертикальному положенні і інші способи. Деталі з тріщинами або викривлені підлягають переплавленню.

Окислення поверхні і її знеуглецювання виникає при нагріванні деталей при термічній обробці у середовищі, що містить кисень. Для того, щоб шар з низьким вмістом вуглецю не впливав на експлуатаційні властивості виробів, його потрібно зрізати при механічній обробці. Припуск на механічну обробку збільшує витрати металу, підвищує собівартість продукції.

Щоб уникнути окислення і знеуглецювання, слід проводити нагрів в захисному газовому середовищі, вакуумі, розплавах металів, соляних ваннах. Але в умовах виробництва ці методи в основному застосовуються для інструменту та деяких інших особливо важливих деталей.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке термічна обробка та яка її мета?
2. Назвіть основні види термічної обробки.
3. Чи можна зміцнити за допомогою термічної обробки сталь, титановий сплав, мідь, дуралюмін?
4. В чому полягає термічна обробка сталі?
5. Як вибирають режим відпуску сталі?
6. Деталь (шестерня) із сталі 20 товщиною 20 мм виготовлена методом штампування та працює в умовах значного тертя та невеликих механічних навантажень. Запропонуйте режим попередньої та кінцевої термічної обробки, охарактеризуйте структури, що утворюються. Наведіть схему термічної або хіміко-термічної обробки.
7. Чи можна застосовувати низький відпуск для деталей, які в процесі експлуатації нагріваються до 300°C?
8. Деталь (ролик) із сталі ШХ15 діаметром 15мм виготовлена методом штампування та працює в умовах тертя та значних механічних навантажень. Запропонуйте режим попередньої та кінцевої термічної обробки, охарактеризуйте структури, що утворюються.
9. Деталь (вісь) діаметром 25 мм виготовлена із сталі 45 методом штампування та працює в умовах знакозмінних та ударних навантажень. Запропонуйте режим попередньої та кінцевої термічної обробки, охарактеризуйте структури, що утворюються.
10. Деталь (ресора) товщиною 40мм виготовлена методом штампування та працює в умовах знакозмінних навантажень. Запропонуйте режим попередньої та кінцевої термічної обробки, охарактеризуйте структури, що утворюються.

. Глава 8

МЕТОДИ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ МАТЕРІАЛІВ

Поверхнева обробка широко застосовується для покращання властивостей поверхневих шарів деталей та інструменту.

Поверхнева обробка може змінювати хімічний склад поверхневих шарів (ХТО), а також проводитися без змін складу (ППД, різні види поверхневого гартування).

8.1 Поверхнева пластична деформація (ППД).

Для підвищення витривалості металу в промисловості широко застосовують метод поверхневої пластичної деформації або поверхневого наклепу. Поверхневу пластичну деформацію (ППД) проводять залежно від форми виробів обкатуванням роликami й обдуванням дробом.

Поверхнєве деформування підвищує густину дислокацій у шарі металу глибиною 0,15...0,4 мм, в якому формуються стискальні напруження, що запобігають утворенню тріщин. При поверхневому деформуванні деталей їх зносостійкість підвищується у 1,5...2 рази. Границя міцності збільшується на 30...50%, довговічність пружних елементів – на 20...25%, зростає корозійна стійкість металу. Така обробка підвищує умовну границю витривалості σ_{-1} і зменшує шкідливий вплив поверхневих дефектів. Підвищення σ_{-1} обумовлено виникненням залишкових напруг стиску, які компенсують напруження, що розтягують, що з'являються в процесі експлуатації виробів небезпечні. Важливою особливістю методу ППД є можливість його локального застосування – обробляють лише ті ділянки деталей, де рівень робочих напружень максимальний (підрізи, галтелі, різьби, канавки, пружні елементи та ін.). Крім того ППД заліковує дрібні тріщини. ППД ефективно для деталей, які піддаються пружним навантаженням, наприклад ресори, пружини, а також для великої категорії інших деталей.

8.2 Поверхнєве гартування.

При поверхневому загартуванні на поверхні виробу виникають корисні стискаючі напруги, які компенсують виникаючі при експлуатації напруги, що розтягують. Найчастіше використовують два способи проведення поверхневого загартування: газовим полум'ям і індукційне нагрівання.

При першому виді гартування поверхню виробу нагрівають ацетилен-кисневим полум'ям за допомогою пальника. Пальник переміщують уздовж деталі, поверхня якої нагрівається вище A_{c3} . Охолодження нагрітої деталі здійснюється водою, що подається через водопровідну трубку, з'єднану з пальником. Індукційне загартування (рис. 8.1) здійснюється за рахунок нагрівання поверхні виробів струмами високої частоти (ТВЧ). Гартування ТВЧ вперше запропоновано В. П. Вологдіним ще у 1921 році. У промисловості цей метод застосовується з 1932 року.

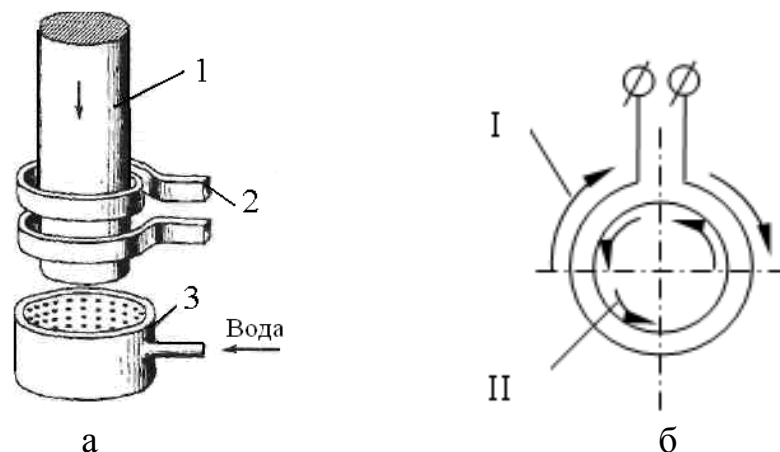


Рисунок 8.1. – Схема індукційного нагрівання: 1 – деталь, 2 – індуктор, 3 – спредер ; I – напрям струму в індукторі; II – напрям струму в деталі.

При гартуванні за цим методом сталеве виріб розміщують всередині індуктора у формі спіралі або петлі (рис. 8.1, а). Струм високої частоти підводиться від генератора до індуктора. Під час проходження струму через індуктор в поверхневих шарах виробу за рахунок індукції виникає струм протилежного напрямку, що нагріває поверхню деталі (рис. 8.1, б). Після нагрівання поверхні, що триває секунди, деталь охолоджують, використовуючи спреєр.

Глибина проникнення струму, і відповідно глибина гартування, залежить від частоти струму:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \quad (8.1)$$

де δ – глибина гартування, мм;

ρ – питомий електричний опір, Ом·м;

μ – відносна магнітна проникність;

f – частота струму, Гц.

У зв'язку з тим, що швидкість нагріву ТВЧ значно вище швидкості нагріву в печі, фазові перетворення в сталі відбуваються при більш високих температурах і температури нагріву під гартування підвищуються. Наприклад, при нагріванні ТВЧ зі швидкістю 400°C/с температура гартування сталі 40 з 840...860°C підвищується до 930...980°C.

Після поверхневого гартування потрібно проводити низький відпуск для часткового зняття внутрішніх напружень без помітного зниження твердості. Часто при індукційному гартуванні замість низького відпуску проводять самовідпуск, який полягає в тому, що охолодження водою переривається при температурі виробу порядку 300°C, після чого деталь повільно охолоджується на повітрі. При такому способі поверхневий загартований шар встигає відпуститися. Поверхневому загартуванню піддаються середньо вуглецеві сталі із вмістом вуглецю в основному 0,40...0,45 %. Приклад таких сталей – сталь 40, 45, 40X, 40XH і ін.

При загартуванні ТВЧ у поверхневому шарі глибиною 1,5...2мм утворюється високодисперсна структура кристалів мартенситу (рис. 8.2), що забезпечує більш високу твердість і міцність сталі, ніж при пічному нагріві.

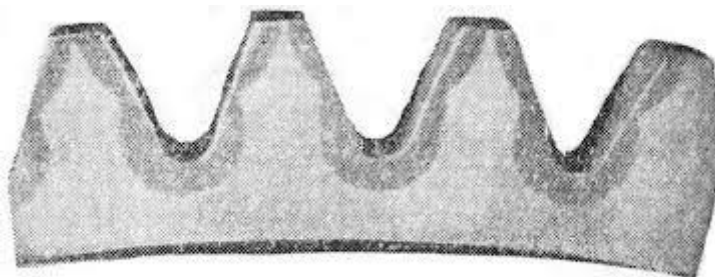


Рисунок 8.2. – Макроструктура поверхневого шару після гартування ТВЧ.

Існують такі різновиди гартування ТВЧ:

1) Одночасне нагрівання та охолодження всієї поверхні; цей метод застосовують для виробів, що мають невелику поверхню (пальці, валики, осьові інструменти).

2) Послідовне нагрівання та охолодження окремих ділянок, використовують при загартуванні шийок колінчастих валів (послідовний нагрів і гартування однієї шийки за одною), зубчастих коліс з модулем більше 6 (гартування «зуб за зубом»), кулачків розподільних валів і т.д.

3) Безперервне послідовне нагрівання та охолодження. Метод застосовують для гартування довгих валів, осей і т.д. При цьому методі виріб переміщається щодо нерухомих індуктора і охолоджуючого пристрою (спрейера) або навпаки. Порівняно з першим методом цей не потребує великої потужності генератора.

8.3 Лазерне гартування.

Лазерна обробка матеріалів – це керований процес теплової обробки різних речовин і матеріалів, у якому лазер, будучи джерелом електромагнітної енергії в ближньому й середньому ІЧ-діапазонах, а також в оптичному діапазоні, фактично діє як джерело теплової енергії, що приводить до нагрівання поверхні оброблюваного матеріалу.

Спрямована зміна стану поверхні матеріалу за допомогою лазерного випромінювання з метою додання йому заданих фізико-механічних властивостей є складним багатофакторним процесом. При опроміненні в поверхневому шарі матеріалу протікають фізико-хімічні процеси, характер яких визначається температурою, тривалістю й швидкістю нагрівання, швидкістю охолодження. Керуючи цими параметрами, можна сформувати поверхневий шар, що має необхідні якісні характеристики: структуру, величину зерна, фазовий склад, пористість, твердість, глибину загартованого шару, характер розподілу мікро- і макронапружень, шорсткість поверхні, які у свою чергу будуть визначати експлуатаційні характеристики матеріалу деталі (зносостійкість, теплостійкість, втомна міцність і ряд інших механічних характеристик).

При нагріванні матеріалу за допомогою лазера можуть розвиватися три основних процеси:

1) лазерне нагрівання поверхневого шару матеріалу до температури, що не перевищує температуру плавлення, витримка при цій температурі й наступне охолодження;

2) нагрівання матеріалу до температур, що перевищують температуру плавлення, кристалізація розплаву й охолодження матеріалу, що закристалізувався;

3) нагрівання матеріалу до температур, що перевищують температуру його випаровування, пластична деформація за рахунок ударної хвилі, нагрівання поверхневого шару плазмою, що утвориться при взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом.

Термічне зміцнення лазерним випромінюванням засновано на локальному нагріванні ділянки поверхні під впливом випромінювання й охолодження цієї ділянки зі швидкістю, що перевищує критичну, після припинення впливу за рахунок тепловідведення у внутрішні шари металу. При цьому не потрібно застосовувати які-небудь охолоджуючі середовища, що спрощує технологію обробки. Лазерне термічне зміцнення характеризується малим часом впливу й забезпечує відсутність деформації деталей. Тепловий вплив при лазерному термозміцненні регулюється в широких межах за рахунок зміни параметрів лазерного випромінювання й режимів обробки. Це забезпечує регулювання швидкостей нагрівання й охолодження металу, часу перебування металу при високих температурах, що дозволяє одержувати необхідну структуру поверхневої ділянки й відповідні властивості. Технологічні можливості лазерного термозміцнення дозволяють використати цей процес як заключну операцію без наступної механічної обробки.

Вплив лазерного випромінювання на поверхню сплавів дозволяє одержати глибину зміцнення до 1,5мм при ширині одиничних смуг 2...15мм. Обробці звичайно піддаються деталі, що працюють в умовах інтенсивного зношування: напрямних верстатів, деталі двигунів, кільця підшипників, вали, барабани, запірні арматури, різальний інструмент, штампове оснащення. Звичайно досягається збільшення стійкості виробів в 1,5...5 разів.

Лазерна поверхнева обробка викликає поліпшення багатьох експлуатаційних характеристик оброблених матеріалів. Специфічна топографія обробленої поверхні, що характеризується утворенням «острівців» знеміцнення, що служать своєрідними демпферами для виникаючих структурних і термічних напруг, а також «кишенями» для втримання мастильного матеріалу, дозволяє істотно підвищити зносостійкість матеріалу внаслідок значного зменшення коефіцієнта тертя (часом до 2 разів).

Серед безлічі факторів, що роблять істотний вплив на характер протікання фізико-хімічних процесів у поверхневому шарі, а тому і на температуру, швидкість нагрівання й охолодження основними є такі: параметри лазерного пучка як інструмента, вид кінематичної схеми обробки, характеристики оброблюваного матеріалу й деталі.

Найбільш важливими параметрами лазерного пучка при поверхневій обробці є: довжина хвилі випромінювання, його потужність, форма й площа плями фокусування, характер розподілу інтенсивності випромінювання в плямі фокусування, час впливу випромінювання на поверхню оброблюваного матеріалу.

Вид кінематичної схеми обробки головним чином визначає шорсткість зміцненої поверхні. Принципово процес лазерного зміцнення може здійснюватися за трьома схемами (рис. 8.3):

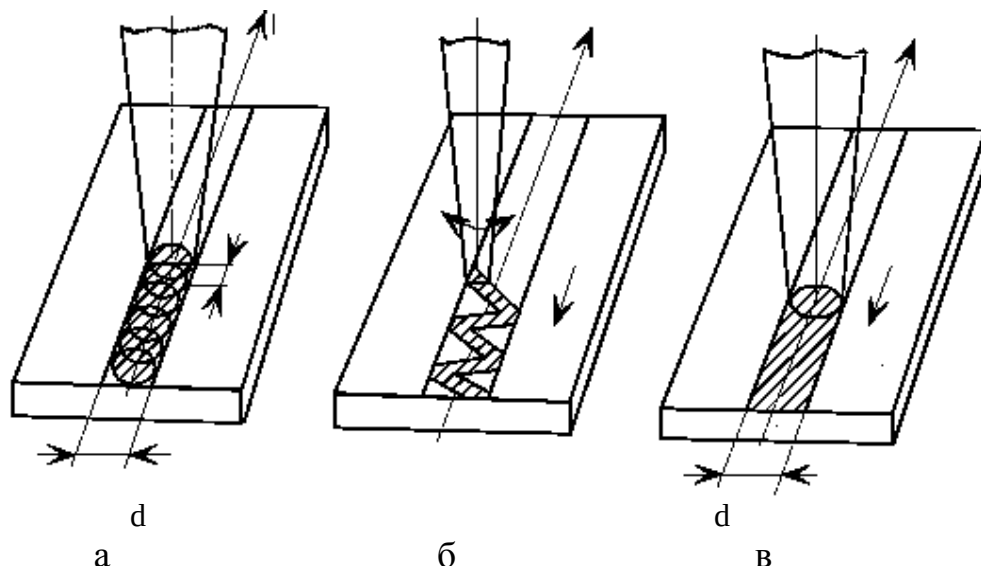


Рисунок 8.3. – Вид кінематичної схеми обробки: а) імпульсно-періодичним випромінюванням; б) безперервним випромінюванням зі скануванням поверхні; в) безперервним випромінюванням.

Характеристиками оброблюваного матеріалу є: склад, структура й властивості матеріалу (теплопровідність, теплоємність, щільність); поглинаюча здатність поверхні, обумовлена хімічним складом матеріалу, його температурою, шорсткістю поверхні, кутом падіння пучка на поверхню, наявністю поглинаючого покриття. При наявності такого покриття на процес поглинання й передачі енергії випромінювання великий вплив робить хімічний склад покриття, його товщина, дисперсність, теплоємність і теплопровідність, електропровідність.

Для поверхневої обробки матеріалів в основному застосовуються твердотільні лазери або газорозрядні CO_2 -лазери потужністю більше 1кВт, надійні в експлуатації, з автоматизованою системою керування технологічного комплексу. Висока вартість таких комплексів і їхня низька продуктивність обмежують застосування лазерного термічного або хіміко-термічного зміцнення. Дана проблема може бути вирішена шляхом використання лазерів нового покоління. На сьогоднішній день найбільш перспективними технологічними інструментами є волоконні лазери. До числа переваг волоконних лазерів варто віднести високу ефективність (до 50%), що веде до більше низьких експлуатаційних витрат; невеликі розміри дозволяють легко вбудовувати їх в існуючі системи виробництва.

8.4 Хіміко-термічна обробка.

Хіміко-термічна обробка (поверхневе легування) – це обробка, яка поєднує термічний та хімічний вплив на метали та сплави з метою зміни хімічного складу, структури та властивостей поверхневого шару.

Хіміко-термічна обробка (ХТО) полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару неметалами (C, N, Si, B та ін.) і металами (Cr, Al, Ni та ін.) у процесі витримки при певній температурі в активному рідкому або

газоподібному середовищі. ХТО застосовують для зміцнення деталей машин. Більшість деталей машин працює в умовах зношування, кавітації, циклічних навантажень, корозії при криогенних та високих температурах, коли максимальні напруження виникають у поверхневому шарі металу. ХТО, підвищуючи твердість, зносостійкість, корозійну стійкість поверхневих шарів, збільшує надійність та довговічність деталей машин.

Процес хіміко-термічної обробки складається із трьох стадій:

- 1) дисоціація – розпад молекул газового середовища та утворення активних атомів елементу, що дифундує;
- 2) абсорбція – поглинання (розчинення) поверхневими шарами металу активних атомів елементу;
- 3) дифузія – проникнення елементу в глибину металу.

В результаті цього процесу утворюється дифузійний шар, на поверхні якого концентрація елементу максимальна та зменшується в глибину металу (рис. 8.4).



Рисунок 8.4. – Зміна концентрації елементу, що продифундував по глибині металу

Глибина проникнення елементу і утворює шар з зміненими властивостями. Глибина дифузійного шару визначається величиною коефіцієнту дифузії, який збільшується з ростом температури. В процесі хіміко-термічної обробки товщина насиченого шару змінюється по параболічному закону: спочатку інтенсивно зростає, а з ростом товщини шару інтенсивність його росту падає. Тривалість процесу хіміко-термічної обробки визначається необхідною товщиною дифузійного шару.

Існує кілька видів хіміко-термічної обробки залежно від того, яким елементом насичується поверхня виробу.

Цементация полягає в насиченні поверхні виробу вуглецем. Як правило, цементацию проводять при температурах існування аустеніту (930...950°), в якому може розчинитися велика кількість вуглецю.

Для цементації використовують вуглецеві та леговані сталі з низьким вмістом вуглецю (0,1...0,25%С). Цементований шар має змінну концентрацію вуглецю по перерізу – від 0,9...1,1% на поверхні до 0,1...0,2% в серцевині (рис.8.5).

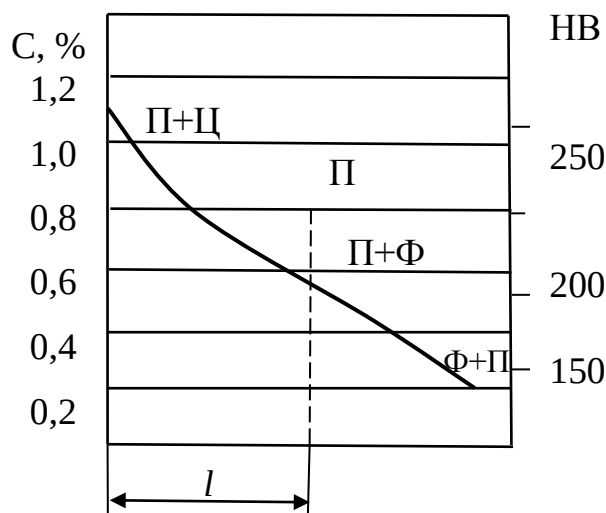


Рисунок 8.5. – Характер розподілу вмісту вуглецю, структурних складових і твердості від поверхні до серцевини після цементації: l – глибина цементованого шару; П – перліт; Ц – цементит; Ф – ферит

Глибина цементованого шару становить 1,0...1,5мм. Насичення вуглецем проводиться, як правило, в спеціальних термічних печах із регульованою подачею метану (CH_4) та пропан-бутанових сумішей (газова цементація). Тривалість процесу цементації 8...12 годин.

Кінцеві властивості цементований виріб набуває після гартування та низького відпуску, які проводяться після цементації. Внаслідок такої обробки поверхневий шар має високу твердість та зносостійкість, а серцевина – високу ударну в'язкість. Твердість на поверхні дорівнює 59...62 HRC, а в серцевині 25...30 HRC.

Азотування полягає в насиченні поверхні виробу азотом в атомарному стані, що виходить при розкладанні аміаку $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$. Азотуванню піддають середньо вуглецеві сталі, головним чином, леговані.

Висока твердість азотованого шару досягається за рахунок таких процесів:

- 1) одержання азотистого фериту,
- 2) утворення нітридів.

Причому високою твердістю відрізняються не нітриди заліза, а нітриди легуючих елементів. Це – Cr_2N , Mo_2N , Al. Тому азотуванню з метою підвищення твердості поверхневого шару має сенс піддавати сталі, що містять відповідні легуючі елементи.

Азотуванню передуює поліпшення. Технологічні параметри азотування такі: температура процесу – 500...600°C, швидкість процесу – 0,01 мм/година. Звичайно проводять азотування на глибину 0,25...0,30 мм. Твердість після азотування становить 800...1200 HV.

Порівнюючи цементацію й азотування, важливо відзначити наступні переваги азотування. Це одержання більше високої твердості й збереження її до температури $\sim 600^{\circ}\text{C}$, у той час як цементований шар зберігає твердість до температури $\sim 200^{\circ}\text{C}$. Після азотування не потрібно проведення термічної обробки. Крім того, азотування проводиться також з метою підвищення втомної міцності конструкційних сталей і з метою підвищення корозійної стійкості вуглецевих сталей. Однак азотування – це тривалий процес і вимагає, як правило, застосування дорогих легуваних сталей. Суттєвого скорочення тривалості процесу при підвищенні його якості можна досягти заміною азотування у печі на іонне азотування (азотування у тліючому розряді).

Ціанування – це одночасне насичення поверхні вуглецем і азотом. Залежно від середовища, у якій його проводять, розрізняють рідке й газове ціанування. Рідке ціанування проводиться у розплавах солей NaCN і Na_2CO_3 , газове – у середовищі CH_4 і NH_3 .

Особливим різновидом ціанування є *нітроцементация*, яка представляє собою високотемпературне газове ціанування, що проводиться при температурі 850°C . Слід зазначити ряд переваг нітроцементатії в порівнянні із цементацією: одержання більше високої твердості, можливість проводити загартування безпосередньо після нітроцементатії, одержання більше дрібного зерна, більше низька температура нагрівання й ін.

Насичення поверхні деталі металами (алюмінієм, хромом, нікелем та ін.) з метою підвищення жаростійкості, корозійної стійкості називається *дифузійною металізацією*. Процеси ці потребують великого часу і застосовуються не дуже часто.

Лазерна хіміко-термічна обробка або *лазерне поверхнєве легування* відрізняється від звичайного лазерного зміцнення тим, що підвищення твердості й інших експлуатаційних показників досягається не тільки за рахунок структурних і фазових перетворень у зоні лазерного впливу, але й шляхом створення нового сплаву з відмінним від матричного матеріалу хімічним складом.

Ці види поверхневої лазерної обробки дуже перспективні внаслідок росту дефіциту чистих металів типу W, Mo, NiCr, Co. V.

Процеси локального легування і наплавлення реалізуються за допомогою як імпульсного, так і безперервного випромінювання по тими ж схемам, що й звичайне лазерне зміцнення. Технологічні закономірності процесу, крім раніше розглянутих, залежать також від способу подачі в зону обробки легуючої сполуки, виду легуючого елемента (елементів), властивостей матричного матеріалу.

Існують такі способи подачі легуючого елемента (середовища) у зону лазерного впливу: нанесення легуючої сполуки у вигляді порошку на оброблювану поверхню; обмазка поверхні спеціальною легуючою сполукою; легування в рідині (рідкому легуючому середовищу); накочування фольги з легуючого матеріалу на оброблювану поверхню; легування в газоподібному легуючому середовищі; утримання феромагнітних легуючих елементів на

матричній поверхні магнітним полем; електроіскрове нанесення легуючої сполуки; плазмове нанесення покриття; детонаційне нанесення легуючої сполуки; електролітичне осадження легуючого покриття; подача легуючої сполуки в зону обробки синхронно з лазерним випромінюванням.

Кожний із цих способів має свої достоїнства й недоліки, які визначають доцільність його використання в конкретному випадку.

Розміри легової зони залежать в основному від енергетичних параметрів випромінювання й товщини покриття з легуючого матеріалу. Як правило, легування імпульсним випромінюванням забезпечує менші розміри легової зони, чим при обробці безперервним випромінюванням. Зокрема, якщо при імпульсній обробці глибина зони досягає 0,3...0,7 мм, то застосування безперервного випромінювання потужних CO₂-лазерів дозволяє збільшити глибини зони до 3 мм.

На ступінь зміцнення впливає як вид легуючого елемента, так і склад матричного матеріалу. Наприклад, при легуванні, алюмінієвого сплаву АЛ 25 залізом, нікелем і марганцем досягається різна твердість поверхневого шару.

Контрольні запитання та завдання.

1. В яких випадках необхідно проводити поверхнєве зміцнення виробів?
2. Як здійснюється індукційне гартування?
3. Як регулюється глибина загартованого шару при індукційному загартуванні?
4. Що являє собою хіміко-термічна обробка?
5. З яких стадій складається будь хіміко-термічна обробка?
6. Охарактеризуйте технологічні параметри цементації: температуру, швидкість, глибину шару.
7. Які властивості забезпечує цементація?
8. Яка термічна обробка проводиться після цементації?
9. У чому полягає азотування?
10. За рахунок чого досягається висока твердість азотованого шару?
11. Яка термічна обробка передуює азотуванню?
12. При якій температурі проводять азотування?
13. Вкажіть швидкість процесу азотування і глибину азотованого шару.
14. Проведіть порівняння азотування і цементації.
15. Охарактеризуйте дифузійну металізацію.
16. Дайте характеристику лазерної термічної та хіміко-термічної обробки.

Розділ 3

ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ ОПТОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

Глава 9

КОНСТРУКЦІЙНІ МЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ.

9.1 Загальні вимоги до конструкційних матеріалів.

Конструкційними називають матеріали, з яких виготовляють деталі машин, механізмів, конструкцій, приладів, що працюють в умовах механічних навантажень.

Сучасна техніка працює при високих динамічних навантаженнях, великих концентраціях напружень, при високих або низьких температурах, у контакті з різними середовищами. Для забезпечення працездатності деталей та вузлів матеріали, із яких вони виготовлені, повинні мати високі експлуатаційні властивості.

Експлуатаційними називаються властивості матеріалів, що роблять вплив на поводження виробу в процесі його експлуатації. Ці властивості можуть бути розділені на загальні, що враховуються для будь-яких виробів незалежно від умов експлуатації, і спеціальні, які виявляються основними для деталей машин лише за певних умов експлуатації.

Для забезпечення працездатності матеріалу необхідно об'єднати досить високі показники міцності, пластичності, ударної в'язкості й низького значення порога холодноламкості. Ці властивості зв'язані неоднозначно: з підвищенням тимчасового опору руйнуванню σ_B показники пластичності (δ і ψ) і ударна в'язкість знижуються, а поріг холодноламкості зростає. У зв'язку із цим у сучасній техніці використовується таке поняття, як конструкційна міцність.

Конструкційна міцність – 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.

До *критеріїв міцності* при статичному навантаженні відносяться границя міцності σ_B та границя текучості $\sigma_{0,2}$ (σ_T), при циклічному - границя витривалості σ_R . Деталі, що повинні зберігати точні розміри та форму, виготовляють з матеріалу, який має високий модуль пружності E , а чутливі пружні елементи приладів – із матеріалу з високою границею пружності $\sigma_{0,05}$. Матеріали сучасних автомобілів, літальних апаратів, деяких видів спеціальної техніки повинні мати високу питому міцність $\sigma_B / (\rho g)$ та питому жорсткість $E / (\rho g)$.

Надійність являє собою здатність виробу працювати короткочасно поза розрахунковою ситуацією без руйнування й характеризує опір раптовій

відмові. До *критеріїв надійності* належать характеристики пластичності (δ , ψ), ударної в'язкості (КСУ, КСВ, КСТ) та температурний поріг холодноламкості.

Довговічність – це здатність виробу працювати протягом тривалого часу без видимої зміни розмірів і властивостей і характеризує властивість виробу пручатися поступовій відмові. Відмова – це порушення працездатності машини, викликана ушкодженнями матеріалу внаслідок деформації, зношування, корозії, руйнування. *Критеріями довговічності* матеріалу є границя витривалості σ_R (при симетричному циклі – σ_{-1}), живучість, зносостійкість та корозійна стійкість.

Живучість – це здатність матеріалу працювати після зародження втомної тріщини. Живучість характеризується числом циклів, що витримує метал до руйнування після зародження тріщини (N_p) або швидкістю її росту. Часто цю величину позначають $N_{ж}$.

Таким чином, конструкційні матеріали повинні мати високі механічні властивості (σ_B ; $\sigma_{0,2}$; $\sigma_{0,05}$; ψ ; δ ; КСУ; $\sigma_B/(\rho g)$; $E/(\rho g)$; σ_R та ін.), високу зносостійкість та достатню корозійну стійкість. Крім того, ці матеріали повинні бути технологічними (мати мінімальну трудомісткість виготовлення деталей) та економічними.

За складом конструкційні матеріали поділяють на металеві, неметалеві та композиційні.

Серед металевих конструкційних матеріалів найбільш поширені сплави на основі заліза – чавуни й особливо сталі.

Сталі мають високий модуль пружності ($E = 210$ ГПа), високу жорсткість поєднують із достатньою статичною та циклічною міцністю, значення яких можна регулювати зміною концентрацій вуглецю, легуванням, термічною та хіміко-термічною обробкою. При відповідній обробці сталь може бути зносостійкою, корозійностійкою, або жаростійкою та жароміцною, а також набуває особливих магнітних, теплових або пружних властивостей. Крім того, сталі технологічні і мають порівняно невисоку вартість.

9.2 Вплив вуглецю та постійних домішок на властивості сталей.

Сталь – це сплав заліза з вуглецем, що містить до 2,14% вуглецю. Вміст вуглецю в конструкційних сталях не перевищує 0,8%.

Як вже було показано, залізо при кімнатній температурі існує в α -модифікації з решіткою об'ємноцентрованого куба. Fe_α з вуглецем утворюють обмежений твердий розчин утілення, який називається ферит. Максимальна розчинність вуглецю у фериті незначна – 0,02%. "Залишковий" вуглець виділяється у вигляді хімічної сполуки Fe_3C (цементит). Кількість цементиту, який має високу твердість та крихкість, зростає пропорційно збільшенню вмісту вуглецю в сталі. Внаслідок цього, із збільшенням у сталі кількості вуглецю зростають твердість і міцність, а пластичність та в'язкість

сталі знижуються (рис. 9.1), збільшуються електричний опір і коерцитивна сила, зменшуються теплопровідність, залишкова індукція та магнітна проникність. Така закономірність спостерігається при підвищенні змісту вуглецю до 0,8 %. Якщо ж вуглецю більше 0,8 %, то твердість сталі буде рости, а межа міцності й плинності почне знижуватися. Це обумовлено тим, що велика кількість цементиту збільшує крихкість сталі.

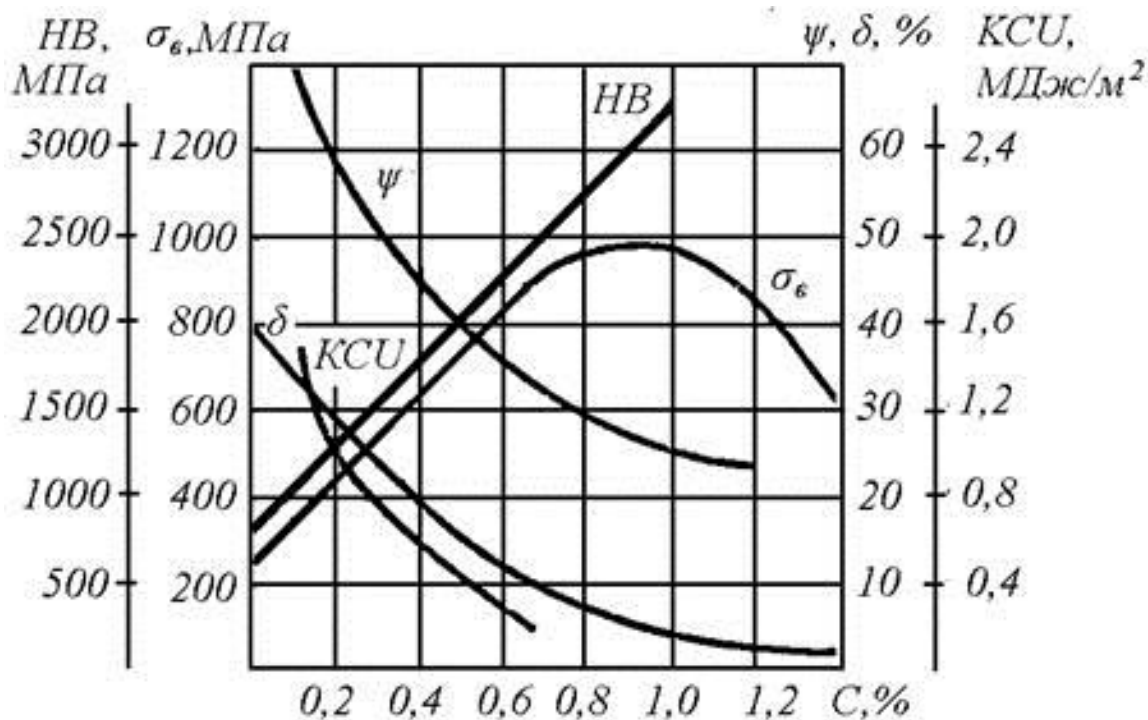


Рисунок 9.1. – Залежність механічних властивостей від змісту вуглецю: HB – твердість за Брінеллем; σ_b – тимчасовий опір руйнуванню; $\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості; δ – відносне подовження; КС – ударна в'язкість

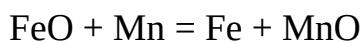
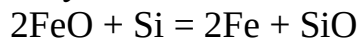
Таким чином, доєвтектоїдні сталі мають досить високу пластичність, але порівняно невисоку твердість. Тому доєвтектоїдні сталі застосовують для виготовлення деталей машин і металоконструкцій, де необхідне сполучення високої пластичності й ударної в'язкості з порівняно високою міцністю. Заєвтектоїдні сталі відрізняються високою твердістю, але невисокою пластичністю, тому їх застосовують для інструмента.

Та як зі збільшенням змісту вуглецю твердість зростає, а пластичність і ударна в'язкість зменшуються, сталі по призначенню діляться на конструкційні й інструментальні. *Конструкційні сталі* – це сталі з низьким і середнім змістом вуглецю, а інструментальні сталі – з високим змістом вуглецю.

Крім заліза та вуглецю (основних компонентів) і можливих легуючих елементів, сталь містить деяку кількість постійних домішок, що також впливають на її властивості.

Постійними домішками в сталі є марганець, кремній, сірка, фосфор, а також гази: водень, кисень, азот.

Марганець і кремній є корисними домішками в сталі, які переходять у сталь при її виплавленні. Вони розкислюють сталь, тобто зменшують кількість кисню, розчиненого в рідкій сталі. Кремній та марганець відновлюють залізо й у вигляді оксидів переходять у шлак:



Процеси розкислення поліпшують властивості сталі. Після розкислення в сталі залишається не більше 0,4% кремнію. Ця домішка підвищує границю текучості $\sigma_{0,2}$, але дещо зменшує здатність сталі до деформації у холодному стані.

Вміст марганцю у вуглецевій сталі не перевищує 0,8%. Марганець значно підвищує міцність сталі, не знижуючи при цьому її пластичності, а також нейтралізує шкідливий вплив сірки.

Сірка та фосфор потрапляють у сталь з шихти при її виплавленні. Це дуже шкідливі домішки, що негативно впливають на властивості сталі. Сірка знаходиться в сталі у вигляді сульфиду FeS , що надходить до складу евтектики, яка утворюється при температурі 988°C . Наявність крихкої та легкоплавкої евтектики, що розташована, як правило, по границях зерен, робить сталь крихкою при температурах вище $800\ldots 850^{\circ}\text{C}$. Це явище називається червоноламкістю. Внаслідок червоноламкості сталь з великим вмістом сірки не піддається гарячій обробці тиском. Сульфідні включення знижують ударну в'язкість, в'язкість і особливо границю витривалості. Вміст сірки в сталі намагаються знижувати, залежно від якості сталі він не повинен перевищувати $0,035\ldots 0,06\%$. Кількість фосфору в сталі не повинна перевищувати $0,025\ldots 0,055\%$. Фосфор розчиняється у фериті і зміцнює його, але викликає холодноламкість – зменшення в'язкості зі зниженням температури. Кожна сота доля відсотка фосфору підвищує поріг холодноламкості t_{50} на $20\ldots 25^{\circ}\text{C}$. Сучасні методи очищення металу не дозволяють повністю видалити фосфор із сталі.

Азот та кисень присутні в сталі у вигляді неметалевих включень (оксидів, нітридів), а також у вільному (газоподібному) стані в тріщинах і порах. Неметалеві включення знижують пластичність сталі, поріг холодноламкості та зменшують опір крихкому руйнуванню.

Дуже шкідливою домішкою є водень, який різко погіршує властивості сталей. Вплив водню тим більше, чим міцніше сталь. Насичення сталі воднем можливе не лише при виплаві, а й при нанесенні гальванічних покриттів, травленні кислотами, зварюванні. При проведенні цих робіт необхідно вживати заходів для запобігання насичення поверхні сталі воднем.

Випадкові домішки – це елементи, що потрапляють у сталь із вторинної сировини або з руд окремих родовищ. З металобрухту в сталь можуть потрапити хром, мідь, нікель, марганець, Руда уральських родовищ містить мідь, керченських – миш'як, запорізьких – марганець. Випадкові домішки, як правило, негативно впливають на в'язкість та пластичність.

Кількість газів у сталі визначити важко, тому основним показником якості сталі, тобто сукупності властивостей, що визначаються металургійним методом її виготовлення, є вміст сірки та фосфору (табл. 9.1).

Таблиця 9.1 Максимальний вміст сірки та фосфору для сталей різної якості

Вид домішки	Сталі звичайної якості	Якісні сталі	Високоякісні сталі	Особовисокоякісні сталі
S,%, не більше	0,05	0,040	0,025	0,015
P,%, не більше	0,045	0,035	0,025	0,025

9.3 Вуглецеві конструкційні сталі

Вуглецеві конструкційні сталі поділяють на сталі звичайної якості та якісні. Марки вуглецевих сталей звичайної якості наведені в табл. 9.2

Таблиця 9.2 Вуглецеві сталі звичайної якості

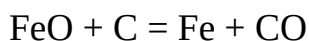
	Марка сталі						
Вміст елементу,%	Ст0	Ст1	Ст2	Ст3	Ст4	Ст5	Ст6
C	0,23	0,06... ..0,12	0,09... ...0,15	0,14... ...0,23	0,18... ...0,27	0,28... ...0,37	0,28... ...0,49
Mn	-	0,25... ...0,50	0,25... ...0,50	0,30... ...0,65	0,40... ...0,70	0,50... ...0,80	0,50... ...0,80

Букви «Ст» у марці сталі позначають слово «сталь», цифри від 0 до 6 – умовний номер сталі, із збільшенням якого зростає кількість вуглецю.

Залежно від умов та ступеня розкислення розрізняють такі групи вуглецевих сталей звичайної якості:

- 1) спокійні сталі «СП» (Ст1сп, Ст2сп, Ст3сп, Ст4сп, Ст5сп, Ст6сп);
- 2) напівспокійні сталі «ПС» (Ст1пс, Ст2пс, Ст3пс, Ст4пс, Ст5пс, Ст6пс);
- 3) киплячі сталі «КП» (Ст1кп, Ст2кп, Ст3кп, Ст4кп).

Спокійні сталі одержують повним розкисленням сталі марганцем, кремнієм та алюмінієм у печі та у ковші. Вони застигають спокійно, без газовиділення. Киплячі сталі розкисляють лише марганцем, в рідкому стані вони містять підвищену кількість FeO. При застиганні оксид заліза взаємодії з вуглецем:



Оксид вуглецю виділяється у вигляді бульбашок і тому здається, що метал кипить. Після застигання киплячі сталі мають велику кількість дрібних пор.

З підвищенням умовного номера марки сталі збільшується міцність (σ_B) і зменшується пластичність. Найбільш поширена сталь Ст3сп має такі властивості: $\sigma_B = 380\ldots490$ МПа, $\sigma_{0,2} = 210\ldots250$ МПа, $\delta = 25\ldots22\%$, а Ст5сп такі: $\sigma_B = 500\ldots640$ МПа, $\sigma_{0,2} = 240\ldots250$ МПа, $\delta = 20\ldots17\%$.

Сталі звичайної якості, особливо киплячі, найбільш дешеві. З них виготовляють гарячекатаний рядовий прокат: балки, швелери, кутники, прутки, а також листи та труби. Ці сталі використовують у будівництві для зварних (крім сталей Ст5 та Ст6), болтових та клепаних конструкцій, рідше - для виготовлення малонавантажених деталей (вали, вісі, зубчаті колеса та ін.). Для більш відповідальних конструкцій використовують тільки спокійні сталі.

Якісні вуглецеві сталі маркують словом «сталь» та цифрами 05, 08, 10, 15, 20,..., 85, що показують середню кількість вуглецю в сотих долях відсотка.

Низьковуглецеві сталі ($<0,25\%C$) мають невисоку міцність та велику пластичність. Сталі 05кп, 08, 10, 10кп ($\sigma_B = 330\ldots340$ МПа, $\sigma_{0,2} = 200\ldots210$ МПа, $\delta = 33\ldots31\%$) використовують у нетермообробленому стані для виготовлення малонавантажених деталей, а також для холодного штампування. Сталі 15, 15кп, 20, 25 ($\sigma_B = 380\ldots460$ МПа, $\sigma_{0,2} = 230\ldots280$ МПа, $\delta = 27\ldots23\%$) використовують для відповідальних зварних конструкцій, а також для деталей, що зміцнюються цементацією.

Середньовуглецеві сталі (0,30...0,60% C) 30, 35, 40, 45, 50, 55 мають більш високу міцність при зниженій пластичності ($\sigma_B=500\ldots610$ МПа, $\sigma_{0,2}=300\ldots360$ МПа, $\delta = 21\ldots16\%$). Використовуються після зміцнюючої термічної обробки для виготовлення невеликих деталей, що працюють в умовах помірних навантажень.

Високовуглецеві сталі (0,6...0,85% C) 60, 65, 70, 75, 80, 85 мають підвищену міцність, зносостійкість та пружні властивості. Їх використовують після термічної обробки для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя та високих статичних і вібраційних навантажень (пружини, ресори, шпинделі, замкові шайби та ін.).

9.4 Леговані конструкційні сталі

Легованими називаються сталі, що містять, крім заліза, вуглецю і постійних домішок, певні легуючі елементи., які впливають на властивості сталей. Метою легування конструкційних сталей є підвищення їх конструкційної міцності. Найчастіше для цього використовують недорогі та недефіцитні легуючі елементи – хром, марганець. Сталі, що містять ці елементи, нерідко додатково легують титаном, ванадієм, та бором. Для виготовлення важконавантажених відповідальних деталей використовують більш дорогі та дефіцитні елементи, такі як нікель, молібден, вольфрам, ніобій. Найбільш ефективно комплексне легування, коли у сталь одночасно додають декілька легуючих елементів. За кількістю легуючих елементів сталі

поділяють на низько-, середньо- та високолеговані. В низьколегованих сталях кількість легуючих елементів не перевищує 5%, в середньолегованих їх кількість від 5% до 10%, в високолегованих - більше 10% (при вмісті заліза не менше 45%).

Леговані конструкційні сталі маркують цифрами та буквами. Двозначні цифри, що стоять на початку марки сталі, позначають середній вміст вуглецю у сотих долях відсотка. Букви вказують, які легуючі елементи містить сталь; цифри, що стоять після букв, позначають кількість відповідного легуючого елемента в цілих відсотках (при відсутності цифри вміст елемента не перевищує 1%). Легуючі елементи позначаються буквами таким чином: А – азот, Б – ніобій, В – вольфрам, Г – марганець, Д – мідь, К – кобальт, Н – нікель, М – молібден, Р – бор, С – кремній, Т – титан, Ф – ванадій, Х – хром, Ц – цирконій, Ю – алюміній.

Леговані сталі поділяються на якісні, високоякісні та особовисокоякісні. Високоякісні сталі позначаються буквою А у кінці марки, особовисокоякісні - буквою Ш.

Приклад. Розшифрувати марки сталі 15ХС, 20Х2Н4А, 03Н12К15М5.

1) 15ХС - сталь легована якісна, містить (у середньому) 0,15% С, ~1% Cr, ~1% Si.

2) 20Х2Н4А - сталь легована високоякісна (буква А у кінці марки), що містить 0,2% С, ~ 2% Cr, 4% Ni.

3) 03Н12К15М5 - сталь високолегована, містить 0,03% С, 12% Ni, 15% Со та 5% Мо.

Застосовують леговані конструкційні сталі тільки після термічної обробки, тому що у нетермообробленому стані вуглецеві та леговані сталі мають приблизно однакові властивості.

За призначенням леговані сталі поділяють на декілька великих груп.

Будівельні низьколеговані сталі (09Г2, 09Г2С, 14Г2, 17ГС, 15ГФ, 10Г2Б, 15ХСНД та ін.) містять невелику кількість вуглецю (до 0,22%) і тому добре піддаються зварюванню. З них виготовляють колони промислових споруд, ферми, підкранові балки, рами, мости, труби, резервуари тощо.

Арматурні сталі (18ГС, 25Г2С, 23Х2Г2Т, 30ГС та ін.) використовують для армування залізобетонних конструкцій.

Сталі для холодного штампування (08Фкп, 08Ю, 09ГС, 09Г2, 16ГФР, 12ХМ та ін.) призначені для виготовлення деталей з листа шляхом деформації у холодному стані. Міцність цих сталей підвищується в процесі деформації за рахунок наклепу. Ця група сталей широко застосовується в автомобільній промисловості.

Леговані сталі, що цементуються, містять невелику кількість вуглецю (0,12...0,25%). Цементацию застосовують для поверхневого зміцнення зубчастих коліс, валів, пальців та ін. деталей. Сталі 15Х, 20Х, 20ХФ призначені для виготовлення невеликих деталей простої форми, сталі 12ХН3А, 12Х2Н4А, 18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА – для великих деталей відповідального призначення. Широко застосовуються також сталі 25ХГМ, 18ХГТ, 20ХГР, 25ХГНМЮА та ін.

Леговані покращувані сталі мають середній вміст вуглецю (0,3...0,5%). Сталі 30Х, 40Х, 40ХР, 40ХФА призначені для виготовлення невеликих деталей. Сталі 40ХГТР, 40ХГ, 30ХГС, 35ХГСНА, які після термічної обробки мають високу міцність ($\sigma_B = 1000...1150$ МПа, $\sigma_{0,2} = 750...850$ МПа) у поєднанні з достатньою пластичністю, призначені для деталей відповідального призначення.

Сталі 30ХН3А, 40ХН2МА, 35Х2Н2МФА, 38ХН3МФА мають ще більшу міцність ($\sigma_B=1100...1200$ МПа, $\sigma_{0,2}=950...1100$ МПа) і використовуються для роторів турбін, деталей редукторів та компресорних машин і ін. відповідальних деталей великого розміру.

Сталі Н18К9М5Т ($\sigma_B = 1900...2100$ МПа, $\delta = 12...8\%$), Н12К8М3Г2 Н10Х11М2Т ($\sigma_B= 1400...1500$ МПа), Н12К8М4Г2, Н9Х12Д2ГБ ($\sigma_B= 1600...1800$ МПа) належать до високоміцних.

Для виготовлення пружних елементів застосовуються сталі 50С2, 55С2А, 70С3А, 60С2ХФА, 65С2ВА, 60С2Н2А.

Сталі 20Х13, 30Х13, 40Х13, 12Х13, 12Х17, 15Х25Т, 12Х18Н9Т, 08Х21Н6М, 95Х18 та ін. відносяться до корозійно-стійких – вони здатні тривалий час працювати у агресивному середовищі.

Жароміцні сталі зберігають свої властивості під час роботи при високій температурі. Для деталей енергетичного устаткування, які тривалий час (10000...200000 годин) працюють при температурах 500...600°C застосовують сталі 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР. Для випускних клапанів двигунів внутрішнього згоряння використовують сталі 40Х9С2 та 40Х10С2М (сильхроми), а для клапанів авіаційних двигунів сталь 45Х14Н14В2М.

Спеціальні сплави ХН77ТЮР, ХН70ВМТЮ, ХН55ВМТКЮ більш жароміцні, ніж сталі.

9.5 Мідь та сплави на її основі.

Мідь (Cu) - це метал червонуватого кольору, із температурою плавлення $t^0 = 1083^0\text{C}$ та густиною 8,94 г/см³. Має кристалічну решітку ГЦК з періодом $a = 0,31607$ нм. Мідь має високі тепло- та електропровідність, добре деформується, але погано обробляється різанням. Механічні властивості міді наведені у табл.9.3.

Таблиця 9.3 Механічні властивості міді М1

Стан міді	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	φ , %	НВ	КСУ, МДж/м ²
Лита	160	35	25	50	400	-
Гарячекатана ($\epsilon=90\%$)	240	95	45	70	600	1,3...2,0
Холоднокатана ($\epsilon=30\%$)	450	400	3	35	1250	-
Відпалена	220	75	50	75	550	1,2...2,8

В залежності від чистоти виготовляють мідь таких марок: МОО (99,99% Cu), МО (99,97% Cu), М1 (99,9% Cu), М2 (99,7% Cu), М3 (99,5% Cu). В електротехніці, електронній та електровакуумній промисловості застосовують безкисневу МОБ ($< 0,001\% \text{ O}_2$) та розкислену М1 ($< 0,01\% \text{ O}_2$) мідь.

Мідні сплави поділяють на дві основні групи:

- 1) латуні – сплави міді з цинком;
- 2) бронзи – сплави міді з іншими компонентами.

Латуні та бронзи по призначенню поділяють на деформівні та ливарні.

Мідні сплави позначаються буквами «Л» (латунь) або «Бр» (бронза), після чого ставляться букви основних елементів, що утворюють сплав. Наприклад, А – алюміній, О – олово, Ц – цинк, Мц – марганець, Ж – залізо, Ф – фосфор, Б – берилій, Х – хром. Кількість того чи іншого елемента вказують цифрами.

В марках деформівних латуней перші цифри після букви "Л" вказують середню кількість міді в цілих відсотках, у випадку легованих латуней додають ще букви та цифри, що позначають назву та кількість легуючих елементів. Кількість цинку не вказується, а визначається за різницею від 100%. В деформівних бронзах кількість основного компоненту (міді) не вказується. У деформівних сплавах спочатку позначають буквами усі легуючі елементи, а потім цифрами, що стоять у тій же послідовності і відділені одна від іншої тире – їх кількість. Наприклад, ЛАЖ 60-1-1 – деформівна латунь, що містить приблизно 60% міді і легована алюмінієм та залізом (по 1%), решта - цинк. БрОЦ4-3 – деформівна бронза, що має такий склад: олова 4%, цинку 3%, решта – мідь.

У ливарних латунях та бронзах середня кількість компонентів сплаву у відсотках вказується одразу ж після букви, що позначає його назву. Наприклад, ЛЦ40Мц1,5 – ливарна латунь, що містить 40% цинку та 1,5% марганцю; БрА10Ж3Мц2 – ливарна бронза, містить 10% алюмінію, 3% заліза та 2% марганцю. Кількість міді визначається за різницею від 100%.

Латуні. За хімічним складом латуні розділяють на прості, леговані тільки цинком, і спеціальні, які крім цинку містять як легуючі елементи свинець, олово, нікель, марганець.

Мідь із цинком утворює ряд фаз. Найбільше значення мають α - і β -фази, що становлять структуру латуней:

α -фаза - твердий розчин цинку в міді із кристалічною решіткою міді ГЦК. Гранична розчинність цинку в міді становить 39 %;

β -фаза - твердий розчин на базі електронної сполуки CuZn з решіткою ОЦК.

На рис. 9.2 показана залежність механічних властивостей латуні від змісту цинку.

В області α -твердого розчину міцність (σ_b) і пластичність (δ) ростуть. З появою в структурі β -кристалів пластичність падає, а міцність продовжує рости приблизно до 45 % Zn. Тому технічні латуні містять цинку до 48...50

%. Латуні Л96, Л80, Л68 добре піддаються холодній та гарячій обробці тиском. З них виготовляють радіаторні трубки, труби, дріт, листовий прокат. Латуні Л59 та Л60 деформуються лише у гарячому стані. Легування значно впливає на властивості сплавів: свинець підвищує здатність до обробки різанням, алюміній, цинк, марганець, олово та нікель збільшують корозійну стійкість.

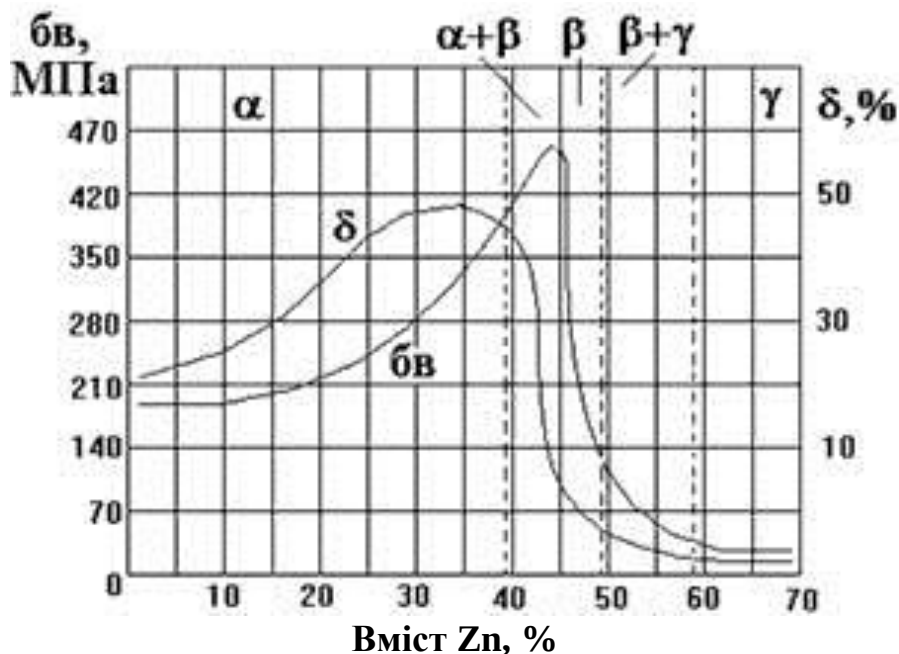


Рисунок 9.2. – Залежність механічних властивостей латуні від вмісту цинку.

Ливарні латуні ЛЦ40С, ЛЦ40МцЗЖ, ЛЦ30А3 призначені для виготовлення деталей складної конфігурації (сепаратори кулькових та роликів підшипників, арматура, гребні гвинти та їх лопасті, деталі приладів) методом виливання. Корозійна стійкість ливарних латуней досить висока.

Бронзи мають назву за основним легуючим компонентом.

Олов'яні бронзи мають міцність та корозійну стійкість вищі, ніж латуні. З деформівних олов'янистих бронз БрОФ6,5-0,4, БрОЦ4-3, БрОСЦ4-4-2,5 виготовляють пружні елементи (пружини, мембрани, барометричні коробки та ін.) та антифрикційні деталі; ливарні бронзи БрОЗЦ12С5, БрОЗЦ4С5, БрО4Ц4С17 призначені для виливання деталей складної форми.

Алюмінієві бронзи БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4, БрА9Ж3, БрА10Ж3Мц2 більш економічні, ніж олов'яні, мають високу корозійну стійкість у морській воді, високі механічні та технологічні властивості. Вони призначені для виготовлення деталей методами глибокого штампування, а також для фасонного виливання.

Кремністі бронзи БрКМц3-1, БрКН1-3 легко піддаються зварюванню, обробці різанням та тиском. Мають досить високі механічні властивості ($\sigma_B = 380$ МПа, $\delta = 35\%$). Завдяки високій пружності та корозійній стійкості застосовуються для виготовлення пружних елементів приладів та

радіоустаткування, що працюють при температурах до 250°C , а також в агресивному середовищі.

Найбільші пружні властивості мають берилієві бронзи (БрБ2; БрБНТ1,7; БрБНТ1,9Мг). Вони мають високу корозійну стійкість, високі механічні властивості, добре піддаються зварюванню та обробці різанням. Берилієві бронзи відносять до числа бронз, що можуть зміцнюватися термічною обробкою. Гранична розчинність берилію при температурі 866°C становить 2,7 %, при евтектоїдній температурі менше 1,5 %, а при температурі 300°C всього 0,2 %. Це вказує на можливість зміцнення берилієвої бронзи термічною обробкою. При нагріванні берилієвої бронзи Брб2 до температури $760\ldots 780^{\circ}\text{C}$ утвориться однорідний γ -розчин, що зберігається в результаті гартування. Після гартування така бронза має малу міцність, високу пластичність і здатність зміцнюватися при старінні. Старіння проводять при температурі $310\ldots 320^{\circ}\text{C}$. З пересиченого α -розчину виділяються дисперсні частки γ -фази, що підвищує міцність бронзи. Після термічної обробки ці бронзи використовують для високоміцних пружин, мембран, пружних контактів, деталей, що працюють в умовах зношування, в електронній техніці тощо.

Свинцева бронза БрС30 має високі антифрикційні властивості. Її використовують для виготовлення вкладок підшипників ковзання, що працюють при високих швидкостях та підвищеному тиску.

9.6 Алюміній і його сплави

Алюміній (Al) – метал сріблясто-білого кольору з температурою плавлення $t^0 = 660^{\circ}\text{C}$. Має кристалічну решітку ГЦК із параметром $a = 0,4041$ нм. Має високу теплову та електричну провідність. Найбільш важливою особливістю алюмінію є його мала густина - $2,7\text{г/см}^3$.

В залежності від кількості домішок випускають алюміній таких марок: особливої чистоти – А999 (99,999% Al);

високої чистоти – А995 (99,995% Al), А99 (99,99% Al), А97 (99,97% Al), А95 (99,95% Al);

технічної чистоти – А85 (99,85% Al), А8 (99,8% Al), А7 (99,7% Al), А6 (99,6% Al), А5 (99,5% Al) та А0 (99% Al).

У відпаленому стані технічний алюміній має такі властивості: ($\sigma_B = 80$ МПа, $\sigma_{0,2} = 30$ МПа, $\delta = 35\%$, $E = 0,71 \cdot 10^4$ МПа).

Пластична деформація підвищує границю міцності до 150 МПа, але пластичність при цьому знижується до 6...7%.

Алюміній має високу корозійну стійкість внаслідок утворення на його поверхні тонкої щільної плівки Al_2O_3 . Він добре піддається обробці тиском, зварюється усіма видами зварювання, але здатність до обробки різанням в алюмінію невисока.

Технічний алюміній використовується для слабонавантажених конструкцій у приладобудуванні, харчовій та легкій промисловості. В оптотехніці з нього виготовляють ктоди активних елементів деяких лазерів.

Сплави алюмінію застосовуються значно ширше, ніж чистий метал. Усі алюмінієві сплави поділяються на деформівні та ливарні, а по здатності зміцнюватися термічною обробкою – на сплави, що можна зміцнити термічною обробкою та сплави, які термічною обробкою не зміцнюються.

Деформівні алюмінієві сплави, що не зміцнюються термічною обробкою – це сплави алюмінію з марганцем (сплав АМц) або з магнієм (сплави АМг). Утворення твердих розчинів Al(Mg) та Al(Mn) сприяє тому, що у порівнянні з технічним алюмінієм ці сплави мають більш високу міцність та меншу пластичність. Ці сплави легко піддаються обробці тиском, добре зварюються, мають високу корозійну стійкість, але низьку оброблюваність тиском. Сплави АМг та АМц застосовують для зварюваних та клепаних елементів конструкцій, що працюють в умовах невеликих напружень і у контакті з агресивним середовищем (трубопроводи, бензобаки, віконні рами, двері, перегородки та палубні деталі морських та річкових суден тощо). Міцність цих сплавів може бути підвищена за рахунок наклепу.

До алюмінієвих деформівних сплавів, що зміцнюються термічною обробкою, належать дуралюміни, сплави авіаль, високоміцні та жароміцні сплави й сплави для кування та штампування. Склад та властивості деяких деформівних сплавів наведені у табл.9.4. Механічні властивості сплавів, що не зміцнюються термічною обробкою, наведені для відпаленого стану, у дужках – для термообробленого; для сплавів, що зміцнюються термічною обробкою – після гартування та старіння.

Таблиця 9.4 Склад та механічні властивості алюмінієвих деформівних сплавів

Сплави	Кількість елементу, %							Механічні властивості		
	Cu	Mn	Mg	Si	Ni	Ti	ін-ші	σ _B	σ _{0,2}	δ, %
								МПа		
АМц	-	1,0... 1,6	-	-	-	-		130 (170)	50 (130)	23 (10)
АМг2	-	0,2... 0,6	1,8... 2,8	-	-	-		200 (250)	100 (200)	23 (10)
АМг3	-	0,3... 0,6	3,2... 3,8	0,5... 0,8	-	-		220	110	20
АМг5	-	0,3... 0,6	4,8... 5,8	-	-	0,02.. .0,1		300	150	20
АМг6	-	0,5... 0,8	0,4... 0,8	-	-	0,02.. .0,1		340 (400)	170 (300)	18 (10)
Д1	3,8... 4,8	0,4... 0,8	1,2... 1,8	-	-	-		490	320	14
Д16	3,8... 4,9	0,3... 0,9	0,5... 0,9	-	-	-		540	400	11
АВ	0,1... 0,5	0,15.. .0,35	1,8... 2,8	0,5... 1,2		-		380	300	12

В95	1,4... 2,0	0,2... 0,6	0,4... 0,8	-	-	-		560... 650	530.. 550	8
АК6	1,8... 2,6	0,4... 0,8	0,4... 0,8	0,7... 1,2	-	-		420	300	12
Д20	6...7	0,4... 0,8	-	-	-	0,1... 0,2	-	400	250	12

Дуралюміни – це сплави системи Al–Cu–Mg–Mn. Маркують їх літерою Д, наприклад, Д1, Д4, Д16, де цифра позначає умовний номер сплаву. У промисловості найчастіше застосовується дуралюмін Д16. Цей сплав задовільно обробляється різанням, зварюється контактним зварюванням, має високу корозійну стійкість. З дуралюмінів виготовляють деталі обшивки літаків, силові каркаси, будівельні конструкції та ін.

Сплави авіаль (АВ) поступаються міцністю дуралюмінам, але мають більш високу пластичність.

До високоміцних алюмінієвих сплавів належать сплав В95. Його застосовують у літакобудуванні для виготовлення навантажених деталей, що тривалий час працюють при температурах до 100...120⁰С (деталі обшивки, шпангоути) та елементів будівельних конструкцій.

Сплав АК6 відноситься до сплавів для кування та штампування. Їх застосовують для виготовлення середньо- та важконавантажених деталей складної форми методами гарячої обробки тиском.

Сплав Д20 – жароміцний сплав. З нього виготовляють деталі, що тривалий час працюють при температурах до 300⁰С (головки циліндрів, поршні, крильчатки, лопатки та диски компресорів турбореактивних двигунів, обшивка надзвукових літаків та ін.).

Властивості сплавів, що піддаються термічній обробці, наведені у термообробленому стані. У дужках наведені дані для нагартованого стану.

Ливарні алюмінієві сплави поєднують високі механічні та технологічні властивості. Високі ливарні властивості мають сплави, до структури яких надходить евтектика. Це сплави систем Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, які додатково леговані магнієм, міддю, марганцем, нікелем, хромом. Склад та механічні властивості деяких ливарних сплавів наведені у табл. 9.5.

Сплави системи Al – Si (АЛ2, АЛ14, АЛ9) називають силумінами. З них виготовляють методом виливання корпуси компресорів, картери та блоки циліндрів двигунів та інші навантажені деталі складної форми. Сплави системи Al – Mg (АЛ8, АЛ27) мають відносно невисокі ливарні властивості, але високу корозійну стійкість. Вони добре зварюються та обробляються різанням. Застосовуються ці сплави у літако- та суднобудуванні.

Сплави Al – Cu (АЛ7, АЛ19) мають високі механічні властивості при нормальних та підвищених температурах, добре обробляються різанням, але мають невисокі ливарні властивості і недостатню стійкість проти корозії. Ці сплави використовують для виливання невеликих деталей простої форми.

Жароміцні сплави (АЛ1, АЛ21, АЛ33) призначені для виготовлення деталей, що працюють при температурах до 350 °С (поршні, головки циліндрів та ін.). Найбільш жароміцний з них сплав АЛ21.

Таблиця 9.5 Хімічний склад та механічні властивості ливарних алюмінієвих сплавів

Сплав	Кількість елементу, %							Механічні властивості		
	Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Be	інші	σ _B	σ _{0.2}	δ, %
								МПа		
АЛ2	-	10...13	-	-	-	-	-	180	90	5
АЛ4	0,17-0,3	8-10,5	2,5-0,5	-	≤0,15	≤0,1	-	260	200	4
АЛ9	0,2...0,4	6...8	-	-	≤0,15	≤0,1	-	220	160	3
АЛ7	-	-	-	4-5	0,2	-	-	240	160	5
АЛ19	-	-	0,6-1	4-5	0,35	-	-	340	220	7
АЛ8	9,5-11,5	-	-	-	≤0,07	≤0,07	-	340	170	10
АЛ27	9,5...11,5	-	-	-	0,05-0,2	0,05-0,15		360	180	18
АЛ1	1,25-1,75	-	-	3,7-4,5	-	-	1,75..0.22 Zr	240	180	1,0
АЛ21	0,8...1,3	-	0,15-0,25	4,6-6,0	-	-	0,1...0,25 Cr,	220	200	1,5
АЛ33	-	-	0,6-1,0	5.5-6,2	-	-	0,8...1,2 Ni, 0,05...0,27 Zr	280	180	2,0

Крім цих сплавів існують дисперсійно-зміцнені матеріали на алюмінієвій основі (сплави САП і САС). У сплавах САП утримується значна кількість дисперсних часток Al_2O_3 , що підвищують їх міцність.

Спечені алюмінієві порошкові сплави САП мають також більш високу жароміцність, ніж металеві алюмінієві сплави.

Контрольні запитання та завдання

1. Що таке конструкційна міцність? Назвіть критерії конструкційної міцності.
2. Які матеріали називають конструкційними?
3. Як класифікуються конструкційні матеріали за складом?
4. Які сплави називаються сталями?
5. Як впливають вуглець та постійні домішки на властивості сталей?
6. Як маркуються вуглецеві сталі?
7. Що таке якість сталі, чим вона визначається?
8. Які сталі називають легованими?

9. Як поділяються леговані сталі за призначенням?
10. Розшифруйте марки залізовуглецевих сплавів: Сталь 45, Ст0, СЧ18, 18ХГТ, Ст3пс, 40Х13, 12Х2Н4А, Сталь 70, 38ХНЗМФА.
11. Охарактеризуйте мідь та її сплави.
12. Як можна зміцнити мідні сплави?
13. Які властивості має алюміній і де він застосовується?
14. Охарактеризуйте склад, властивості та застосування алюмінієвих сплавів.
15. Розшифруйте марки кольорових сплавів: АМг3, ЛАЖ60-1-2, Д4, ЛЦ30А3, АМц, БрАЖН10-4-4, БрКМц3-1, Д16, БрОФ6,5-0,4.

Глава 10

КОМПОЗИЦІЙНІ ТА ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ

10.1. Загальна характеристика та класифікація композиційних матеріалів

Композиційними називають матеріали, до складу яких надходять компоненти, що значно відрізняються за властивостями, не розчиняються один в одному і відокремлюються у матеріалі межею розподілу.

Композиційні матеріали відрізняються від звичайних металів та сплавів більш високими значеннями тимчасового опору, циклічної міцності (на 50...100%), питомої міцності, питомої жорсткості та низькою схильністю до утворення тріщин. Застосування композиційних матеріалів дозволяє підвищити жорсткість конструкцій при одночасному зниженні їх ваги та металоємкості.

Принцип створення композиційних матеріалів запозичений у природи. Стовбури та стеблини рослин, кістки тварин можна вважати природними композиційними матеріалами. В деревині міцні волокна целюлози з'єднані пластичним лінгіном, а у кістках – тверді, але крихкі фосфатні кристали – пластичним колагеном.

Властивості композиційних матеріалів в основному залежать від фізико-хімічних властивостей компонентів та міцності зв'язку між ними. Відміна композитів від інших матеріалів полягає у тому, що в них проявляються позитивні якості компонентів, а не їх недоліки. Разом із тим, матеріал має властивості, що не притаманні кожному компоненту окремо. Для оптимізації композицій вибирають компоненти, властивості яких значно відрізняються, але доповнюють одне одного.

Будь-який композиційний матеріал складається з матриці та наповнювача (рис. 10.1).

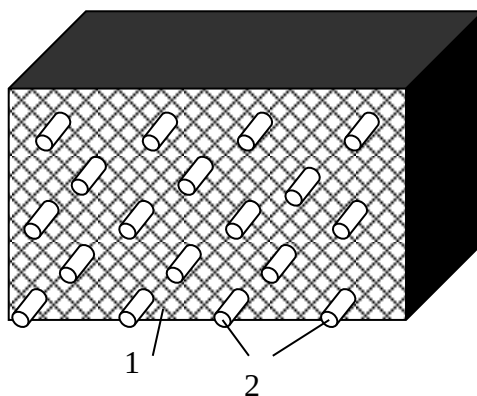


Рисунок 10.1. – Схема композиційного матеріалу: 1 – матриця; 2 – наповнювач.

Матриця служить основою композиції. Матриці можуть бути металевими (композиційні матеріали на металевій основі), полімерними, вуглецевими, керамічними (композиційні матеріали на неметалевій основі), а також складатися з різних речовин (поліматричні матеріали). Від властивостей матриці залежить технологія виготовлення матеріалу та його експлуатаційні характеристики.

В матриці рівномірно розподілені інші компоненти (наповнювачі, армуючі компоненти). Саме вони відіграють основну роль у зміцненні композицій. За значеннями міцності, твердості, модуля пружності наповнювачі значно перевершують матеріал матриць. Властивості композицій залежать також від форми, розмірів, кількості та характеру розміщення наповнювача.

Наповнювач може мати вигляд окремих, дуже дрібних часточок (дисперсно-зміцнені матеріали) або волокон (волокнисті). Волокно може бути дискретним (відношення довжини до діаметра $l/d = 10 \dots 10^3$) та неперервним. Дисперсні частки та дискретні волокна розміщуються у матеріалі хаотично, неперервні – за різними схемами армування (рис. 10.2).

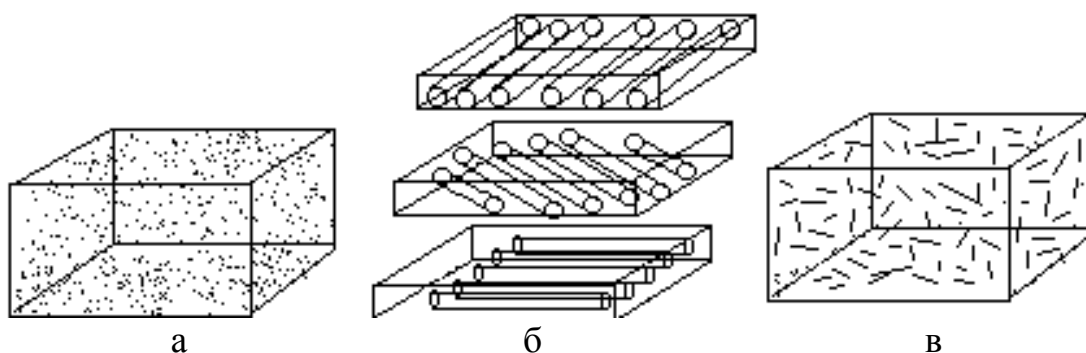


Рисунок 10.2. – Схеми армування композиційних матеріалів: а – дисперсійно-зміцнений матеріал, б – армування неперервним волокном, в – армування дискретним волокном.

При одно- та двоосному розміщенні наповнювача можливе створення багатшарових композиційних матеріалів. Композиційні матеріали, що містять два чи більше різних наповнювача, називаються поліармованими.

10. 2. Композиційні матеріали на металевій основі.

Матеріали на металевій основі мають високу міцність та жароміцність, вони вологостійкі, вогнетривкі, проводять електричний струм. Пластичність таких матеріалів невисока, але армуючи частки зменшують швидкість зростання тріщини і практично повністю виключають раптове крихке руйнування.

В дисперсно-зміцнених матеріалах основні силові навантаження сприймає матриця, а дисперсні частки гальмують переміщення дислокацій у ній. Максимальна міцність досягається при середньому розмірі часток 0,01...0,1 мкм і відстані між ними 0,05...0,5 мкм. Оптимальна кількість зміцнюючої фази не повинна перевищувати 10...15 об. %.

Дисперсні зміцнюючі частки, що мають високу температуру плавлення (Al_2O_3 , SiO_3 , BN, SiC, HfO_2 , ThO_2), дозволяють зберігати міцність матеріалу до високих температур (до $(0,9...0,95)T_{пл}$). Дисперсно-зміцненні композиційні матеріали можуть бути одержані на основі більшості промислових металів та сплавів, але найбільш широко застосовуються композиції на основі алюмінію та нікелю.

Матеріали на алюмінієвій основі САП (спечений алюмінієвий порошок) складаються з алюмінію та дисперсних часток Al_2O_3 , що ефективно гальмують рух дислокацій і підвищують міцність матеріалу. Із збільшенням кількості часток Al_2O_3 підвищується міцність, твердість, жароміцність матеріалу САП та зменшується його пластичність (табл. 10.1).

Густина цих матеріалів дорівнює густині алюмінію, вони не поступаються йому у корозійній стійкості і зберігають високі механічні властивості при роботі до температур 500...560°C (традиційні сплави алюмінію мають жароміцність до 300°C).

Таблиця 10.1 Механічні властивості матеріалів САП

Сплав	Кількість Al_2O_3 , %	σ_B , МПа	$\sigma_B/(\rho g)$, км	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	E, ГПа	$E/(\rho g)$, км
САП-1	6...9	300	11	200	8	67	2400
САП-2	9...13	350	13	280	5	71	2600
САП-3	13...18	400	15	320	3	76	2800
САП-4	18...23	450	17	370	1,5	80	2900

САП добре деформуються у гарячому стані, задовільно – у холодному, легко обробляються різанням, задовільно зварюються. Їх використовують для деталей, що працюють при температурах до 300...500°C та повинні мати високу питому міцність і корозійну стійкість (поршневі штоки, лопатки компресорів, обмотки трансформаторів в електротехніці). Спечені алюмінієві сплави САС мають приблизно такий склад та властивості: 25...30% Si, 5...7% Ni, решта – алюміній; $\sigma_B = 260$ МПа, 1200

НВ, $E = 100$ ГПа, $\delta = 1,5...1\%$. В цих сплавах відсутні ливарні дефекти, структура їх дрібнозерниста. САС застосовують обмежено, в окремих приладах для заміни сталевих деталей.

Для матриць композиційних матеріалів на нікелевій основі використовують чистий нікель або його сплав із хромом – ніхром (Х20Н80). Матеріали з ніхромовою матрицею більш жаростійкі. Зміцнюючі частки – оксиди торію, гафнію та ін. Матеріали на нікелевій основі працюють при температурах до $1200...1250^{\circ}\text{C}$. Властивості деяких з них наведені у табл.10.2.

Таблиця 10. 2 Склад та механічні властивості дисперсно-зміцнених композиційних матеріалів на нікелевій основі

Матеріал	Хімічний склад	Механічні властивості		
		σ_B , МПа	$\sigma_B/(\rho g)$, км	δ , %
ВДУ-1	Ni+ 2...3% ThO ₂	700...780	8...10	10...14
ВДУ-2	Ni+3,5...4% HfO ₂	750...850	9...10	8...12
ВДУ-3	Ni+ 20 Cr + 1...3%ThO ₂	700...750	8...9	12...15

Дисперсно-зміцнені композиційні матеріали найчастіше виготовляють методами порошкової металургії (див. далі).

Волокнисті композиційні матеріали на металевій основі мають більш широке застосування, ніж дисперсно-зміцнені. Найбільш перспективними матеріалами для матриць є метали з невеликою густиною (Al, Mg, Ti, Be) та сплави на їх основі, а також нікель – основний компонент жароміцних сплавів. Для армування матриці використовуються волокна або ниткоподібні кристали чистих елементів та тугоплавких з'єднань (B, C, Al₂O₃, SiC та ін.), а також дріт із металів та сплавів (Mo, W, Be, високоміцна сталь). Розрахунки свідчать, що чим більше відношення довжини волокна до діаметра (l/d), тим вище ступінь зміцнення композиційного матеріалу. Властивості деяких волокнистих композицій наведені у табл. 10.3.

Таблиця 10.3 Склад та механічні властивості волокнистих композиційних матеріалів на металевій основі

Матеріал	Склад	Механічні властивості					
		ρ , кг/м ³	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	E , ГПа	$\sigma_B/\rho g$, км	$E/\rho g$, км
ВК1-А	Al/борне волокно	2650	1200	600	240	45	9000
ВКУ-1	Al/вуглецеве волокно	2250	950	200	270	42	12000
КАС1-А	Al/сталевий дріт	4800	1600	350	120	33	2000
ВКН-1	Ni/вольфрамове волокно	-	700	150	-	-	-
ВКМ-1	Mg/борне волокно	2200	1250	-	200	57	-
ВКН-3	Mg/вуглецеве волокно	1800	750	-	140	46	-
ВКТ	Ti/берилієвий дріт	4050	1050	-	180	23	4000
ВКТ	Ti/молібденовий дріт	6250	1400	-	200	22	3800

Для зміцнення матеріалів на основі алюмінію застосовують борні ($\sigma_B = 2500...3500$ МПа, $E = 380...420$ ГПа) та вуглецеві ($\sigma_B = 1400...3500$ МПа, $E = 160...450$ ГПа) волокна, волокна тугоплавких з'єднань, а також високоміцний сталевий дріт ($\sigma_B = 3800$ МПа, $E = 200$ ГПа). Застосування замість чистого алюмінію сплаву В95, здатного до термічного зміцнення, дає додатковий ефект підвищення міцності композиції. Кількість наповнювача становить 35...50%.

Найбільш економічним є армування алюмінію сталевим дротом (КАС). Властивості таких композицій наближаються до властивостей титанових сплавів. Армування волокнами бору, вуглецю або оксиду алюмінію значно збільшує вартість, але підвищує механічні властивості, в першу чергу тимчасовий опір та модуль пружності. Матеріали, армовані бором (ВКА) зберігають свої властивості до 500° С.

Матеріали, армовані вуглецем (ВКУ), більш економічні і легкі, ніж ВКА, але мають низьку технологічність.

Матеріали на магнієвій основі (ВКМ) мають більш високу питому міцність, ніж сплави магнію. Армування титанового сплаву ВТ6 молібденовим дротом дозволяє підвищити максимальні робочі температури з 450...500°С до 800°С. Композиційні матеріали на нікелевій основі працюють при температурах до 1000...1100°С. Перспективним вважається їх армування нитковидними кристалами з оксиду та нітриду алюмінію, карбіду та нітриду кремнію, карбіду бору, що мають дуже високі механічні властивості ($\sigma_B = 15000...28000$ МПа, $E = 400...600$ ГПа).

10.3. Композиційні матеріали на неметалевій основі.

Композиції на неметалевій основі мають низьку густину, високотехнологічні, мають високу корозійну стійкість, гарні теплоізоляційні та амортизаційні характеристики, а в окремих випадках більш високі значення питомих міцності та жорсткості, ніж композиційні матеріали на металевій основі. До недоліків більшості композицій на неметалевій основі слід віднести низьку міцність зчеплення волокна з матрицею, різке зниження міцності при підвищенні температури до 100...200°С та відсутність здатності до зварювання.

За характером наповнювача композиції поділяють на скловолокніти, карбоволокніти, бороволокніти та органоволокніти. В останніх матеріалах використовують еластичні (лавсан, капрон, нітрон) та жорсткі (ароматичний поліамід, вініл) синтетичні волокна. Властивості деяких матеріалів з полімерною матрицею наведені у табл. 10.4.

Серед неметалевих композиційних матеріалів найбільш часто застосовуються композиції з полімерною матрицею: епоксидною, фенолформальдегідною та поліамідною. Для зміцнення використовуються високоміцні та високомодульні вуглецеві, борні, скляні та органічні волокна

у вигляді ниток, джгутів, стрічок, нетканих матеріалів. Кількість неперервних волокон не повинна перевищувати 60...80% від загального об'єму композиції, дискретних – 20...30%.

Таблиця 10.4 Механічні властивості композиційних матеріалів із полімерною матрицею

Матеріал	ρ , кг/м ³	σ_B , МПа	σ_{-1} , МПа	δ , %	E, ГПа	$\sigma_B/\rho g$, км	E/ ρg , км
Скловолокніти	2200	2100	-	1...3	70	96	3200
Карбоволокніти:							
КМУ-1л	1400	650	300	0,5	120	46	8600
КМУ-1у	1470	1020	500	0,6	180	70	1200
КМУ-1в	1550	1000	350	0,6	180	65	1150
КМУ-2в	1300	380	135	0,4	81	30	6200
Бороволокніти:							
КМБ-1к	2000	900	350	0,4	214	43	10700
КМБ-2к	2000	1000	400	0,3	260	50	13000
КМБ-3к	2000	1300	420	0,3	260	65	12500
Органоволокніти:							
з еластичним зміцнювачем	1150... ...1300	100... ...190	100	10...20	2,5...8	8...15	220... ...600
з жорстким зміцнювачем	1200... ...1400	650... ...700	-	2...5	35	50	2700

Скловолокніти у порівнянні з іншими композиціями на неметалевій основі мають найбільшу міцність. Тимчасовий опір їх підвищується в залежності від кількості наповнювача (скловолокна).

Максимальна міцність досягається за рахунок зменшення діаметру волокон, нанесення на них спеціальних покриттів, додаткового введення у матрицю монокристалів оксиду алюмінію. Матеріали з дискретним волокном зміцнюються менш ефективно, але з них можна виготовляти деталі складної конфігурації зі сталевую арматурою. До таких матеріалів належать АГ-4В, а також ДСВ (дозоване скловолокно), який застосовується для виготовлення силових деталей електротехнічного обладнання. Матеріали з наповнювачем із склотканини використовують для виготовлення простих за формою виробів великого розміру (кузова автомобілів, корпусу човнів, приладів та ін.).

Скловолокніти можуть працювати при температурах від -60⁰ до 200⁰С, а також у тропічних умовах. Вони технологічні, мають невисоку вартість, за величиною питомої жорсткості перевершують леговані сталі, алюмінієві, титанові та магнієві сплави. Іонізуюче випромінювання не впливає на механічні та електричні властивості скловолокнітів.

Карбоволокніти – це композиції, що складаються з полімерної матриці та наповнювача у вигляді вуглецевих волокон (карбоволокон). Карбоволокніти мають низькі тепло- та електропровідність, високу

границю витривалості σ_R , зберігають свої властивості при дуже низьких та підвищених (до 300°C) температурах. Це водо-, хімічно- та радіаційно стійкі матеріали. Карбоволокніти застосовують в авто- та суднобудуванні (кузови спортивних автомобілів, шасі, гребні гвинти), із них виготовляють панелі опалення, спортивний інвентар, частини ЕОМ, деталі авіаційної техніки, рентгенівського устаткування. Карбоволокніти з вуглецевою матрицею застосовуються для теплового захисту, дисків авіаційних гальм, хімічно стійкої апаратури.

Бороволокніти являють собою композиції з полімерною матрицею і наповнювачем – борним волокном та характеризуються високими значеннями міцності, твердості й модуля пружності, низькими тепло- і електропровідністю, здатністю працювати при температурах до 250...300°C. Бороволокніти мають високий опір втоми, стійкі проти дії радіації, вологи, органічних розчинників та паливомастильних матеріалів. Вироби з бороволокон застосовують в авіаційній та космічній техніці (профілі, панелі, ротори та лопатки компресорів, лопаті гвинтів і трансмісійні вали вертольотів).

Органоволокніти мають високу питому міцність у поєднанні з достатньою пластичністю та ударною в'язкістю. Це матеріали, стійкі у агресивному середовищі, із низькими тепло- та електропровідністю. Органоволокніти здатні тривалий час працювати при температурах до 100...150°C, а матеріали з поліімідною матрицею – до 200...300°C. Наповнювачем в органоволокнітах є синтетичні (органічні) волокна.

Органоволокніти застосовуються як електроізоляційні та конструкційні матеріали в електрорадіопромисловості, авіаційній техніці, автомобілебудуванні, із них виготовляють труби, резервуари для хімічних речовин, елементи антикорозійного захисту тощо.

Галузі застосування композиційних матеріалів не обмежені. Перш за все, вони використовуються в авіації, ракетній та космічній техніці, де особливо велике значення мають високі питома міцність та питома жорсткість цих матеріалів. З композиційних матеріалів виготовляють високонавантажені деталі літаків та вертольотів (горизонтальні стабілізатори, закрилки, радіопрозори обтікачі, лонжерони та ін.), двигунів (корпуси та камери згоряння, лопатки компресора та турбін і т.д.), деталі космічної техніки, що піддаються нагріванню. Застосування композиційних матеріалів у конструкціях літальних апаратів зменшує їх масу на 30...40%, збільшує корисне навантаження без зниження швидкості та дальності польоту.

Композиційні матеріали мають електроізоляційні (органоволокніти), антифрикційні (карбоволокніти) властивості, вони використовуються в будівництві, електротехніці, мікроелектроніці та інших галузях техніки.

Використання композиційних матеріалів забезпечує якісний стрибок у збільшенні потужності двигунів, енергетичних та транспортних установок, зменшенні ваги машин та пристроїв.

10.4. Технологія порошкової металургії.

Порошкова металургія – це галузь техніки, що займається одержанням порошків з металів і сплавів та виготовленням виробів з цих порошків без розплавлення. Матеріали та вироби, що одержують таким методом, називають порошковими (застаріла назва – металокерамічними).

Процес одержання виробів із порошкових матеріалів у загальному випадку складається з таких етапів:

- 1) одержання порошку вихідного матеріалу;
- 2) приготування шихти (змішування порошків у певному співвідношенні);
- 3) пресування порошків у вироби потрібної форми та розмірів;
- 4) спікання сформованих виробів.

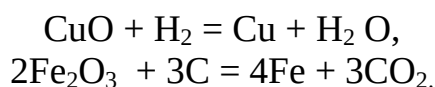
В залежності від виду порошкових виробів можливі такі відхилення від типової схеми: поєднання в одному циклі операцій пресування та спікання (гаряче пресування); спікання вільно насипаного порошку (без операції ущільнювання); проведення додаткової обробки (калібрування, хіміко-термічна або механічна обробка, просочування маслом) та ін.

Металеві порошки складаються з дуже дрібних часточок (0,5...500 мкм) металів, їх оксидів та сплавів. Методи одержання порошків можна поділити на механічні та фізико-хімічні.

Механічні методи (подрібнювання, розмелювання, розпилення, грануляція) характеризуються переробкою матеріалу в порошок практично без зміни його хімічного складу. Ці методи засновані на подрібненні часточок матеріалу шляхом руйнування їх під дією зовнішнього навантаження. Механічне подрібнення (подрібнювання, розмелювання) доцільно застосовувати лише для крихких матеріалів (берилій, сурма, хром, марганець, феросплави та ін.). Розпилення рідкого металу струменем повітря або грануляція розплаву у воді більш універсальні. Механічними методами, як правило, одержують порошки з відходів основного виробництва.

Фізико-хімічні методи (відновлення оксидів, електроліз водних розчинів, термічна дисоціація карбонільних з'єднань та ін.) характеризуються тим, що одержаний порошок за складом суттєво відрізняється від вихідних матеріалів.

Методом відновлення одержують порошки кобальту, вольфраму, молібдену, титану, міді, заліза та ін. металів. Відновниками можуть бути як гази (водень, доменний та конверторний гази), так і тверді речовини (вуглець, магній та ін.):

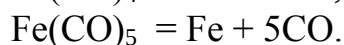
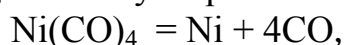


Одержані порошки мають велику схильність до окислення, тому треба передбачати спеціальні заходи по їх зберіганню.

Відновлення оксидів є найбільш продуктивним та економічним з усіх методів одержання металевих порошків. Приблизно 50% порошків, що застосовуються у промисловості, виготовлені саме цим методом.

Електроліз водних розчинів та розплавів солей полягає у розкладі цих речовин при пропусканні через них постійного електричного струму. Таким методом одержують порошки рідкісних металів (танталу, торію, ніобію, цирконію), а також олова, срібла, заліза, міді. Одержані порошки майже не містять домішок, але внаслідок високих енерговитрат та низької продуктивності процесу мають дуже високу вартість.

Метод дисоціації карбонільних з'єднань заснований на здатності металів при певних умовах утворювати з оксидом вуглецю (II) специфічні хімічні сполуки – карбоніли, загальна формула яких $\text{Me}(\text{CO})_n$. При нагріванні карбоніл розкладається з утворенням металу та оксиду вуглецю:



Одержаний таким методом метал являє собою дуже дисперсний порошок, що майже не містить домішок.

Недоліками цього методу є висока вартість та токсичність карбонілів.

Як правило, для виготовлення порошкових виробів використовують багатокомпонентні матеріали. Порошки, взяті у певному процентному співвідношенні, ретельно перемішують. Перемішування запобігає появі термічних напружень, що могли б виникнути при спіканні у хімічно неоднорідному матеріалі.

Для одержання виробів заданої форми та розмірів, а також достатньої міцності, металеві порошки піддають пресуванню. Процес пресування проводять у прес-формах (рис.10.3). Він супроводжується значним зменшенням об'єму порошку. Із зростанням зусилля пресування міцність заготовки збільшується, а пористість зменшується. Після пресування заготовка зберігає форму за рахунок механічного зчеплення часточок.

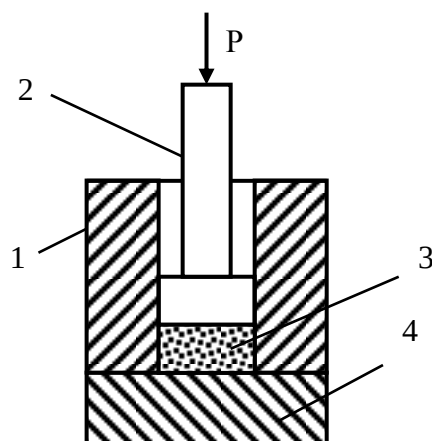


Рисунок 10.3 – Схема прес-форми для пресування циліндричних заготовок: 1 – матриця; 2 – пуансон; 3 – металевий порошок; 4 – піддон.

Для підвищення твердості та міцності заготовки спікають у захисній або відповідній атмосфері при температурі, що не перевищує температуру плавлення основного компоненту:

$$T_{сп} = (0,7...0,8)T_{пл} \quad (10.1)$$

де $T_{сп}$ – температура спікання заготовки, К; $T_{пл}$ – температура плавлення основного компоненту, К.

Як правило, спікання триває 1...2 години.

При спіканні протікають такі складні фізико-хімічні процеси, як дифузія, відновлення поверхневих оксидів, утворення інтерметалідних хімічних сполук. Між частками порошку виникають металеві зв'язки. Спікання супроводжується зменшенням розміру виробів (усадкою). Величина усадки залежить від складу порошку та пористості заготовки і повинна бути врахована при конструюванні прес-форми та порошкового виробу (розмір заготовки повинен відрізнятись від розміру готового виробу на величину усадки).

При необхідності порошкові вироби піддають операціям механічної, термічної або хіміко-термічної обробки, повторному пресуванню та спіканню для одержання виробів складної форми (перше пресування забезпечує лише приблизну форму та розміри), просочуванню маслом та ін.

10.5. Порошкові матеріали та вироби

Методами порошкової металургії можна одержувати вироби з унікальними властивостями, а також вироби, що не можуть бути одержані іншими методами.

Порошкові матеріали поділяють на пористі та компактні. Пористими називають матеріали, в яких після кінцевої обробки зберігається 10...30% залишкової пористості. Ці матеріали використовують, головним чином, для деталей вузлів тертя та фільтрів.

Антифрикційні порошкові матеріали мають низький коефіцієнт тертя, легко приробляються, витримують значні навантаження і мають високу зносостійкість.

Підшипники виготовляють із сплавів заліза і 1...7% графіту (ЖГр1, ЖГр7, ЖГр3) та бронзографіту, що містить 8...10% олова і 2...4% графіту (БрОГр10-20, БрОГр8-4 та ін.). Домішки сірки (0,8...1%) або сульфідів (3,5...4%), що утворюють сульфідні плівки на контактних поверхнях, поліпшують здатність залізографітових матеріалів до прироблення, зменшують їх зношення. Пористі підшипники, просочені маслом, здатні працювати без додаткового змащування протягом декількох років.

Спечені матеріали на основі заліза та міді використовують і для фрикційних виробів (дисків, сегментів) у гальмівних вузлах. Фрикційні деталі повинні мати високий коефіцієнт тертя, достатню механічну міцність, високу зносостійкість. Для підвищення коефіцієнту тертя до складу фрикційних матеріалів додають карбіди кремнію, бора, тугоплавкі оксиди та ін.

Для роботи в умовах сухого тертя (деталі гальмівних вузлів літаків, гальмівні накладки, деталі зчеплення автомобілів, тягачів) застосовують матеріали на залізній основі. Найбільш поширений з них матеріал ФМК-11 (15% міді, 3% азбесту, 3% оксиду кремнію SiO_2 , 6% бариту BaSO_4 , решта – залізо). Фрикційні матеріали виготовляють у вигляді тонких секторів, які для зміцнення закріплюють на сталевій основі.

Широко застосовують порошкові матеріали для виготовлення фільтрів. Фільтри у вигляді втулок, труб, пластин з порошків нікелю, заліза, титану, алюмінію, корозійностійкої сталі, бронзи та інших матеріалів із пористістю 45...50% (розмір пор 2...20 мкм) використовують для очищення рідин та газів від твердих домішок.

Пористість компактних матеріалів, як правило, не перевищує 1...5%. В електро- та радіотехніці застосовуються порошкові магніти на основі Fe-Ni-Al сплаву (типу альніко та ін.), а також магнітні матеріали на основі оксидів заліза та деяких інших металів – ферити. Порошкові магніти властивостями не поступаються литим, а технологічністю перевершують їх. Більш детально властивості магнітних матеріалів будуть розглянуті у III частині посібника, а зараз ми звертаємо увагу на те, що виготовляють ці вироби за технологією порошкової металургії.

У машинах контактного зварювання, приладах зв'язку застосовуються контакти з порошкових матеріалів на основі тугоплавких металів (вольфраму або молібдену) із міддю (МВ20, МВ40, МВ60, МВ80), сріблом (СМ30, СМ60, СМ80, СВ30, СВ85 та ін.) або з оксидом кадмію (ОК8, ОК12, ОК15). Такі контакти мають високу міцність, електропровідність, електроерозійну стійкість.

Жароміцні дисперсно-зміцнені сплави на основі нікелю, алюмінію, титану, хрому, а також карбідів вольфраму, молібдену та цирконію за своїми властивостями значно перевершують литі жароміцні метали та сплави.

Інструментальні тверді сплави мають високу твердість, тепло- та зносостійкість, тому з них виготовляють різальний та буровий інструмент. Основою твердих сплавів є порошки карбідів тугоплавких металів (WC , TaC , TiC), а зв'язкою – металевий кобальт. Температура спікання твердих сплавів перевищує температуру плавлення зв'язки. При спіканні розплавлений кобальт заповнює пори, що сприяє підвищенню ударної в'язкості твердих сплавів.

Застосування методів порошкової металургії при виготовленні деталей та виробів дозволяє збільшити коефіцієнт використання металу та збільшити продуктивність праці.

Економічна ефективність порошкової металургії досягається завдяки скороченню або повному виключенню механічної обробки, а також можливістю використання відходів виробництва. Внаслідок високої вартості прес-форм та порошків виготовлення деталей та інструменту методами порошкової металургії ефективно лише у масовому виробництві.

Контрольні запитання та завдання

1. Які матеріали називають композиційними? В чому полягають особливості композиційних матеріалів?
2. Яку будову мають композиційні матеріали?
3. Охарактеризуйте композиційні матеріали на металевій основі.
4. Як залежить міцність композиційних матеріалів на металевій основі від їх складу?
5. Охарактеризуйте композиційні матеріали на неметалевій основі.
6. Що таке порошкова металургія?
7. Якими методами можуть бути одержані металеві порошки?
8. За якою технологією одержують порошкові вироби?
9. Охарактеризуйте порошкові антифрикційні та фрикційні матеріали.
10. Від чого залежить пористість порошкових виробів? Яким методом знижується пористість в інструментальних порошкових матеріалах?
11. У чому переваги та недоліки порошкової металургії?
12. Як застосовуються композиційні та порошкові матеріали та вироби у виробництві електричних та радіотехнічних приладів?

Глава 11 МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ МАГНІТНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

11.1. 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

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}, \quad (11.1)$$

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. 11.1).

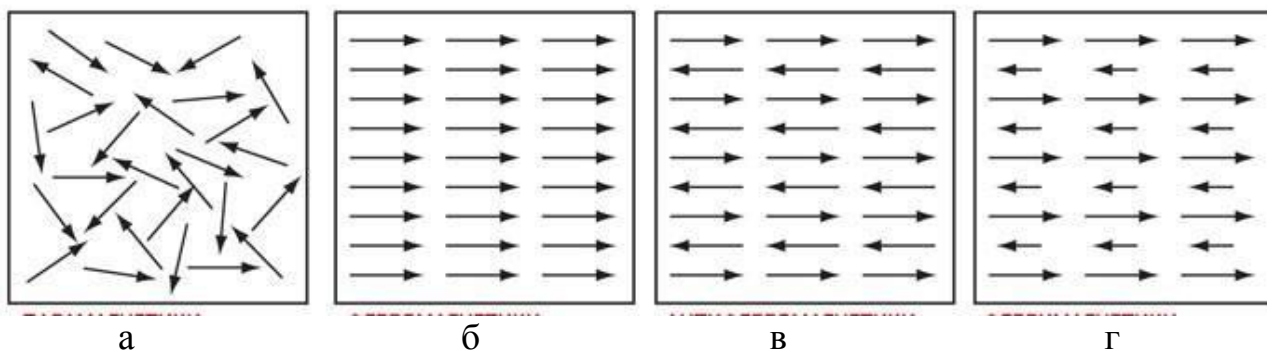


Рисунок 11.1. – Орієнтація магнітних моментів атомів різних речовин

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. 11.1, а) і намагніченість речовини дорівнює нулю. Приклади парамагнетиків: 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. 11.1, б). Для деяких речовин (антиферомагнетиків) енергетично вигідним є антипаралельне розташування спінів сусідніх атомів (рис. 11.1, в). Ферімагнетики являють собою частковий випадок антиферомагнетиків. У цих речовин магнітні моменти сусідніх атомів орієнтовані назустріч один одному, але мають різну величину (рис. 11.1, г).

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

$$\text{Згідно із рівнянням (11.1), } \mu = \frac{0.34}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^4} = 1.327.$$

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. 11.2, а). На рис. 11.2,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. 1.2,в, магнітне поле практично існує тільки в безпосередній близькості від поверхні магнетика й енергія поля ще менша.

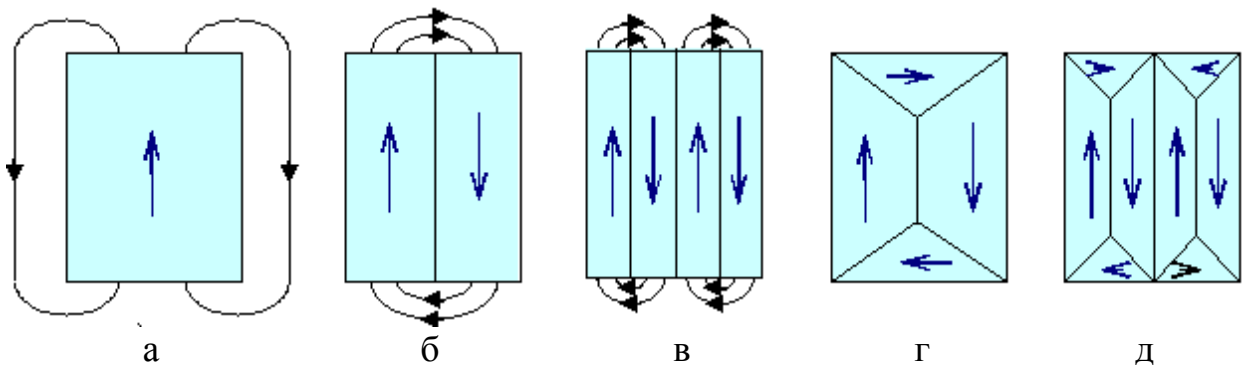


Рисунок 11.2. – Схема утворення магнітних доменів

На рис. 11.2,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. 11.2,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

ферромагнетику на домени приводить до зменшення магнітної енергії. Очевидно, дроблення припиняється, коли повна енергія досягає мінімального значення. Між доменами є перехідні шари (доменні стінки) шириною $10^{-8} \dots 10^{-7} \text{ м}$, усередині яких поступово повертаються магнітні моменти (рис. 11.3).

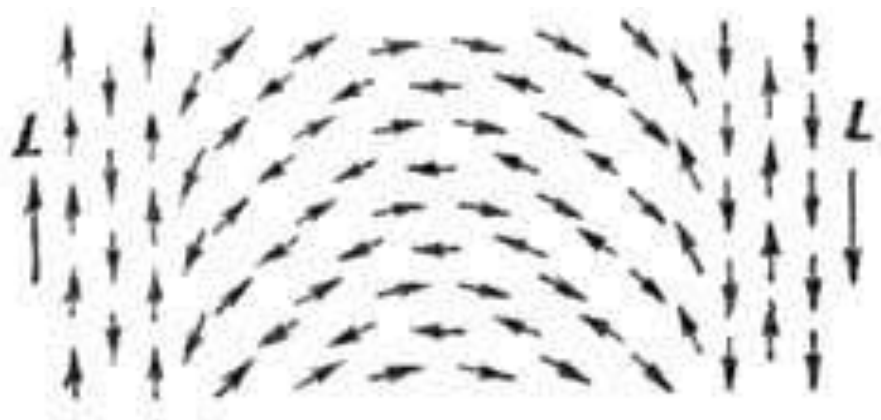


Рисунок 11.3. – Зміна орієнтації магнітних моментів атомів всередині доменної границі

Монокристали ферромагнетиків характеризуються магнітною анізотропією, що проявляється у різній легкості намагнічування вздовж різних осей (рис. 11.4).

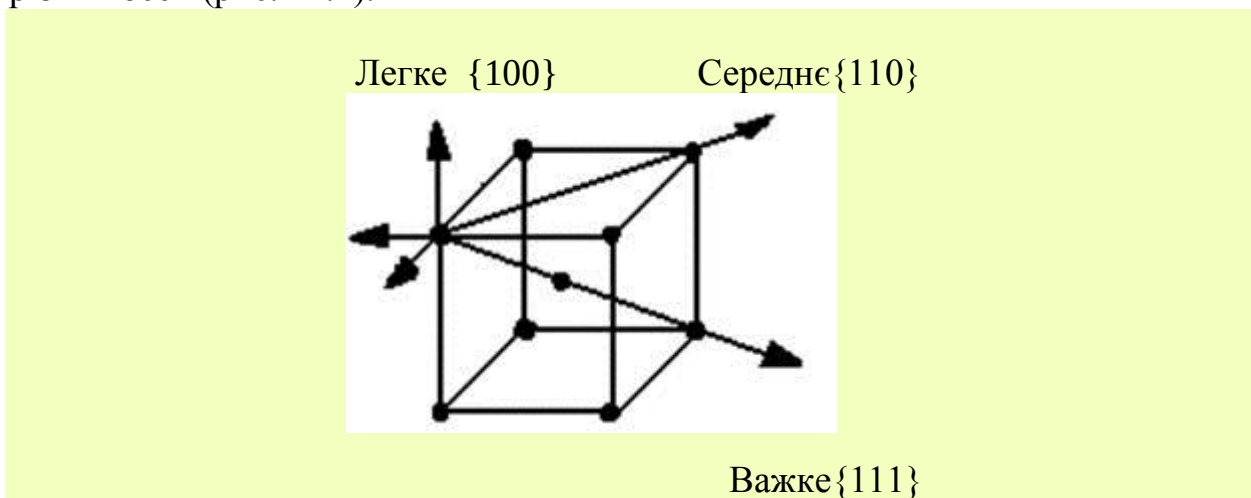


Рисунок 11.4. – Напрямки легкого, середнього й важкого намагнічування в монокристалі заліза

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

11.2. Основні характеристики магнітних властивостей матеріалів

При внесенні ферромагнетику у зовнішнє магнітне поле відбувається його намагнічування, тобто орієнтація векторів намагніченості доменів у

відповідності до напрямку зовнішнього поля (рис. 11.5). Внаслідок цього процесу зростає індукція B . Зростання індукції під дією зовнішнього поля обумовлено двома основними процесами: зсувом доменних границь і поворотом магнітних моментів доменів.

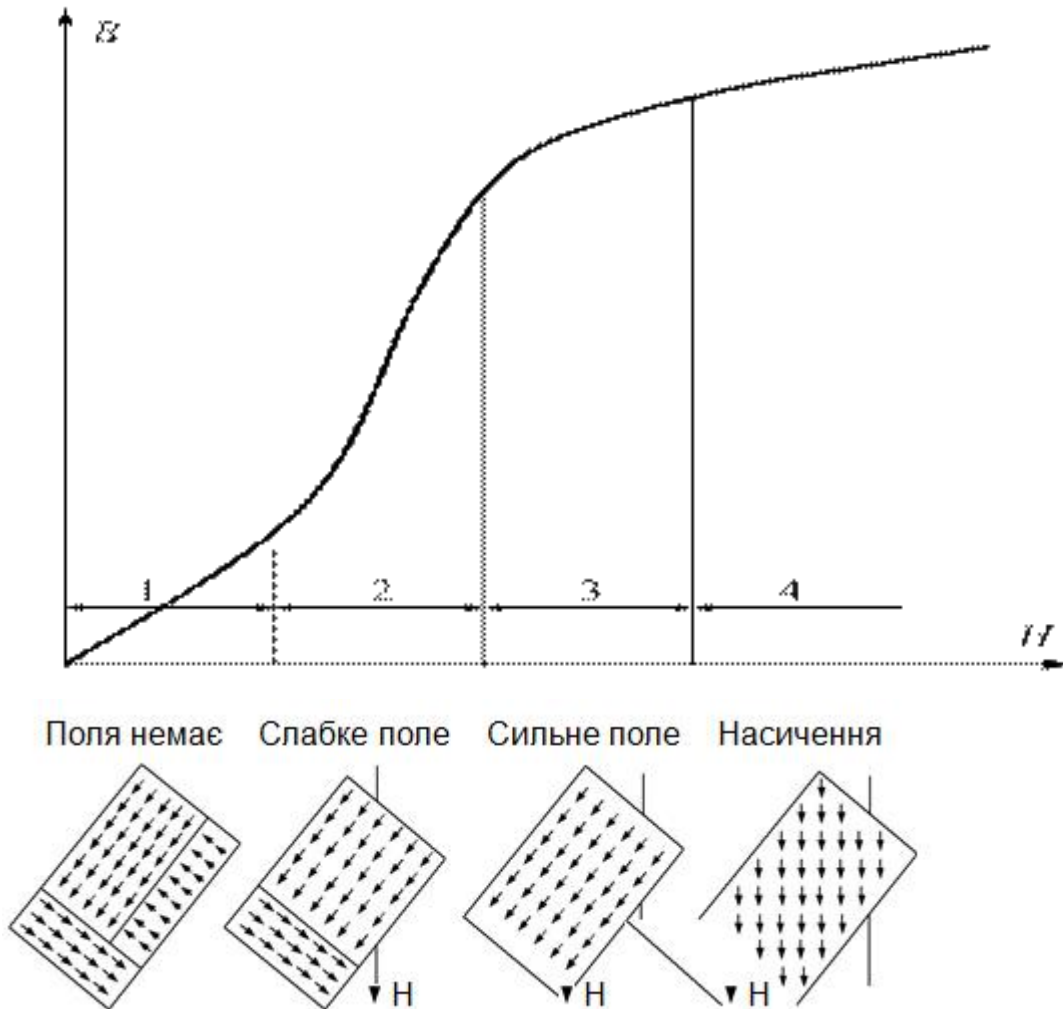


Рисунок 11.5. – Крива намагнічування ферромагнетику

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,

наступає 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 зразка при цьому проводилось до насичення, та така петля називається граничною (рис.11.6).

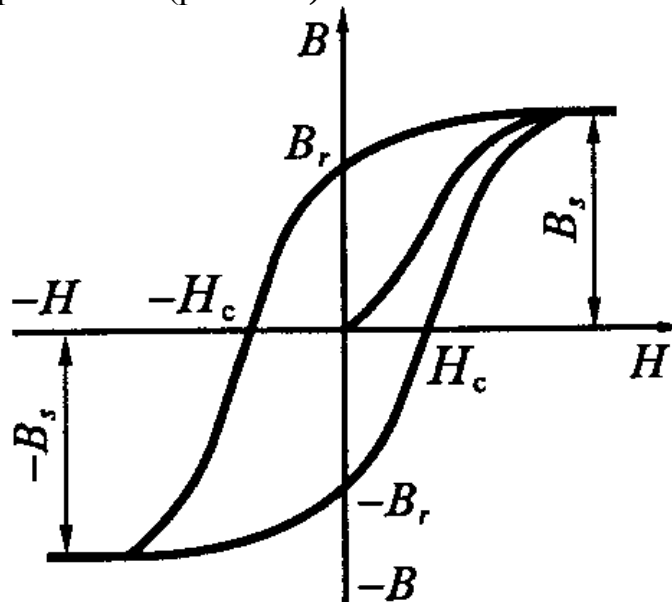


Рисунок 11.6. – Гранична петля гістерезису і основні характеристики магнітних властивостей феромагнетику

До важливих характеристик феромагнітних матеріалів належать:

1) *відносна магнітна проникність* μ . Виходячи із формули (11.1), відносну магнітну проникність визначають як тангенс куту нахилу кривої первинного намагнічування. Використовуючи основну криву намагнічування, можна визначити різні види магнітної проникності (рис. 11.7,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. 11.5). 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.11.7, б.

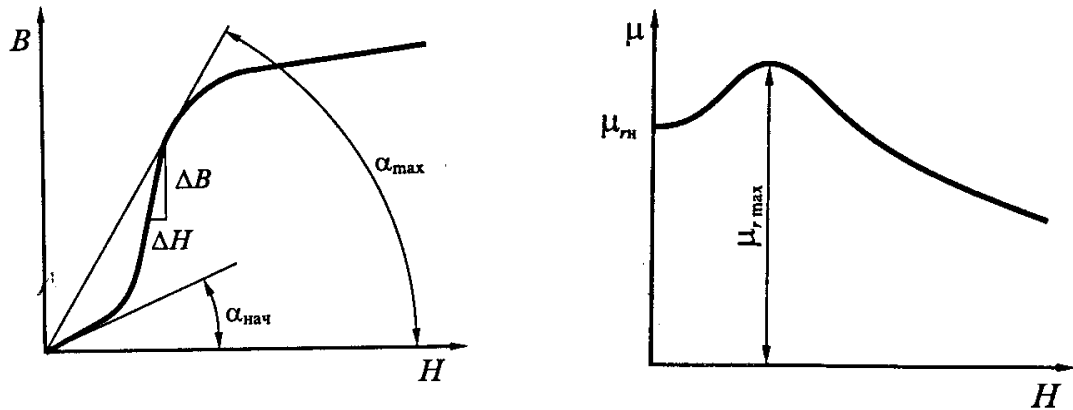


Рисунок 11.7. – Визначення різних видів магнітної проникності (а) та залежність магнітної проникності від напруженості поля (б)

- 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:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma} + P_v, \quad (11.2)$$

де P_{Σ} – сумарні втрати у матеріалі;

P_{Σ} – 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:

$$P_{\Sigma} = af, \quad (11.3)$$

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:

$$P_v = bf^2 = \frac{kd^2B^2}{\rho} f^2, \quad (11.4)$$

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 феромагнетику 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 феромагнітні матеріали поділяються на дві групи: магнітно-м'які та магнітно-тверді матеріали.

11.3. 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-м'які матеріали поділяються на низькочастотні та високочастотні.

У загальному випадку магнітно-м'які матеріали повинні мати такі властивості:

- високе значення магнітної проникності, тобто здатність намагнічуватися та перемагнічуватися у будь яких полях;

- високе значення індукції насичення, що забезпечує високу потужність магнітних пристроїв при зменшенні їх габаритів;
- низькі магнітні втрати;
- високі механічні властивості (велика пластичність, достатня міцність, відсутність старіння та ін.);
- висока технологічність;
- 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.11.1).

Таблиця 11.1 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.11.2.

Таблиця 11.2 Магнітні властивості нелегрованої 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 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 (1 – 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.11.3.

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.

Таблиця 11.3 Магнітні властивості легованої електротехнічної тонколистової сталі.

Сталь	$P_{1,5/50}$, Вт/кг	$B(Tл)$ 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

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: $\mu_n=35500$, $\mu_{max}=120000$, $H_c=1,8\text{А/м}$, $\rho=0,8\text{ мкОм/м}$, тобто не поступається пермалоюм. 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 пермалой 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, $f=10\ldots15\text{ кГц}$; ВЧ – високочастотні, $f=15\ldots150\text{ кГц}$). 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 ($B=0,15 \dots 0,5$ Тл) використання феритів на низьких частотах не доцільне - там вони поступаються компактним матеріалам.

За своїм складом прості ферити відповідають формулі $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{MeO}$, 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 $900 \dots 950$ °C, ретельно розмелюють, змішують з пластифікатором (парафін, сирий каучук, полівініловий спирт) і пресують для одержання заготовок заданої форми. При кінцевому спіканні ($t= 1200 \dots 1400$ °C, 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 ($f_{\text{гр}}$) вважають таку частоту, при якій магнітна проникність починає зменшуватися, а значення $\text{tg } \delta$ (кута діелектричних втрат) досягає 0,1.

У маркуванні феритів на першому місті 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: $\mu_{\text{Н}}=2000$, низькочастотний, марганець-цинковий ферит. Наприклад, 2000нМ: $\mu_{\text{Н}}=2000$, низькочастотний, марганець-цинковий ферит.

11.4. 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 $0,5 \dots 1$ 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

$$W = \frac{H_d B_d}{2}, [\text{Дж/м}^3] \quad (11.5)$$

де H_d – напруженість поля, що відповідає енергії B_d (рис.11.8).

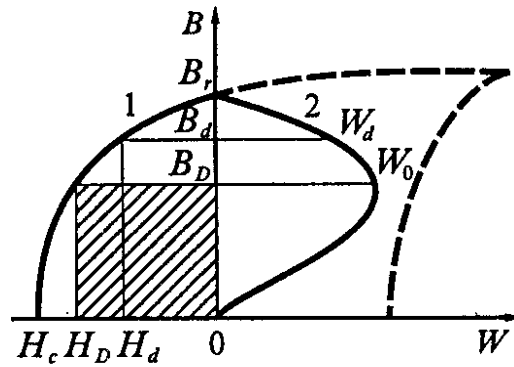


Рисунок 11.8. – Криві розмагнічування та магнітної енергії магнітно-твердого матеріалу

Індукція разомкненого 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 $B_d = 0$. 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:

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{B_r H_c} \quad (11.6)$$

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-нікелі. 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. Перспективними є ферити на основі рідкоземельних металів, магнітна потужність яких $W_{\max}=104$ кДж/м³. Це значення потужності на наш час максимальне для усіх магнітно-твердих матеріалів.

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. Марка матеріалу ВЧ-24. Що це за матеріал? Охарактеризуйте технологію його виготовлення, основні магнітні властивості, галузь застосування.

11. Які основні магнітні характеристики магнітно-твердих матеріалів?

12. Які матеріали відносять до магнітно-твердих? Де вони застосовуються?

13. Який з матеріалів, $A(H_C=47 \text{ кА/м}, W_{\max}=5,4 \text{ кДж/м}^3)$ чи $B(\mu=1700, H_C=0,3 \text{ А/м}, B_{\max}=0,75 \text{ Тл})$ відноситься до магнітно-м'яких? Чому?

14. З переліку матеріалів (додаток А) вибрати матеріал, здатний працювати при частоті перемагнічування 10 МГц.

15. З переліку матеріалів (додаток А) вибрати матеріал, що здатний працювати при низьких частотах і забезпечує максимальну індукцію.

Глава 12

МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

12.1. 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 $10^{-8} \dots 10^{-5} \text{ Ом.м.}$, який збільшується із зростанням температури. Їх використовують для провідників змінного та постійного струму, резисторів, нагрівальних елементів, контактів тощо.

Напівпровідники мають електричний опір $10^{-5} \dots 10^8 \text{ Ом.м.}$, 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 ($10^8 \dots 10^{16} \text{ Ом.м.}$), 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.

12.2. Зонна теорія твердих тіл

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

Згідно з принципом Паулі електрон в ізолюваному 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 ізолюваним атомом є суттєво іншою. Так, при зближенні ізолюваних 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 ізолюваних атомах. На рис. 12.1 схематично наведена картина утворення енергетичних зон в кристалі із дискретних атомних рівнів.

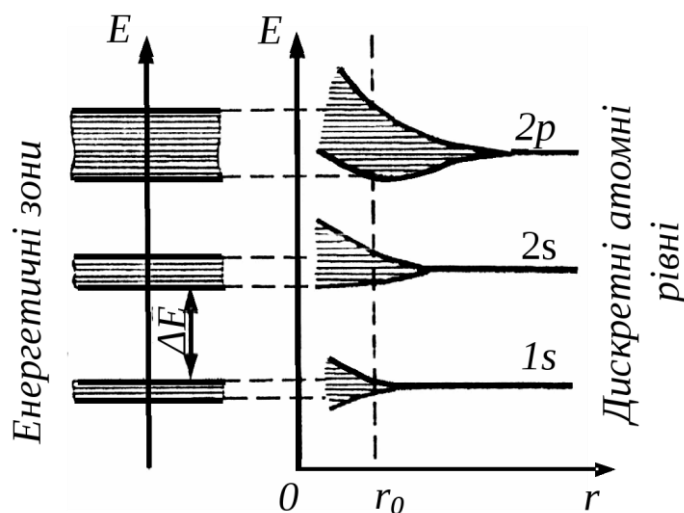


Рисунок 12.1. – Утворення енергетичних зон у кристалі

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 ізолюваному 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 ізолюваного 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. 12.2.

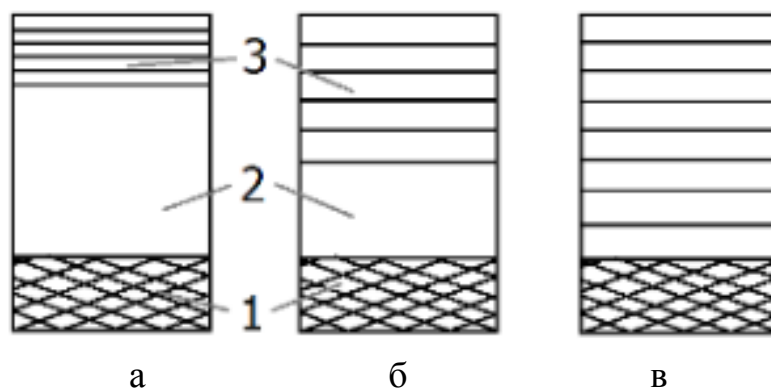


Рисунок 12.2. – Енергетичні діаграми для діелектриків (а), напівпровідників (б) та провідників (в) при абсолютному нулі: 1 – валентна зона; 2 – заборонена зона; 3 – зона провідності.

В кристалах неметалів (рис. 12.2, 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 – $\Delta E = (5 \dots 15) \cdot 10^{-19}$ Дж (рис. 12.2, 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. 12.2, 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. 12.2, 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).

12.3. 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:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_D}{Q_0} = 1 + \frac{Q_D}{Q_0} \quad (12.1)$$

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:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_0} = \frac{C_D U}{C_0 U} = \frac{C_D}{C_0} \quad (12.2)$$

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

Найбільш важливими видами поляризації є електронна, іонна, дипольна та спонтанна (рис. 12.3).

Електронна поляризація являє собою пружне зміщення електронних оболонок під дією поля (рис. 12.3,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 $\varepsilon \approx 2 \dots 3$. При нагріванні об'єм діелектрика збільшується, густина зарядів відповідно знижується і тому із зростанням температури електронна поляризація зменшується.

Іонна поляризація (рис. 12.3. 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.

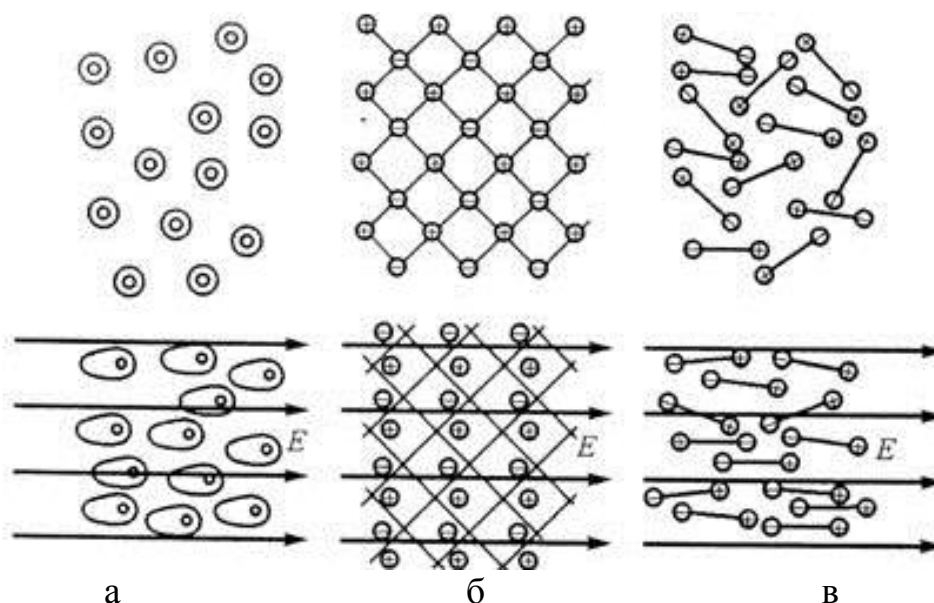


Рисунок 12.3. – Види поляризації діелектриків: електронна (а), іонна (б) та дипольна (в).

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

Дипольна поляризація (рис.12.3, 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 ($10^{-8} \dots 10^{-2}$ 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

$$P = IU = \frac{U^2}{R}, \quad (12.3)$$

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:

$$P = IU \cdot \cos \alpha = IU \cdot \cos 90^\circ = 0, \quad (12.4)$$

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. 12.4).

Формула діелектричних втрат реального діелектрика набуває вид:

$$P = UI_a = UI_c \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (12.5)$$

де U – напруга, В;

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

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

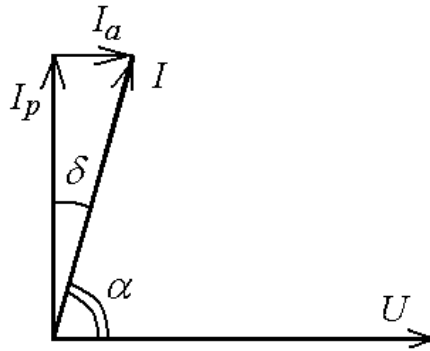


Рисунок 12.4. – Векторна діаграма реального діелектрика: I_a – активний струм, I_p – реактивний струм.

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_{np} називають відношення напруги U_{np} , що викликала пробій, до товщини діелектрика h у місці пробою:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \text{ [В/м]} \quad (12.6)$$

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

12.4. Активні діелектрики

Сегнетоелектрики – це кристалічні речовини іонної будови із спонтанною поляризацією. 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 має один чи декілька максимумів.

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

$$k = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{\min}}, \quad (12.7)$$

де $\varepsilon_{\min}$ – діелектрична проникність матеріалу, що визначається у слабких полях ($E=2...5$ В/м);

$\varepsilon_{\max}$ – максимальне значення діелектричної проникності при підвищенні температури.

Температурні залежності діелектричної проникності для матеріалів з великою та малою нелінійністю ε наведені на рис. 12.5.

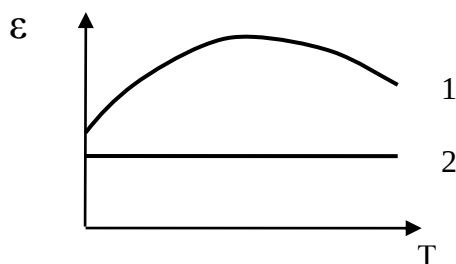


Рисунок 12.5. – Залежність діелектричної проникності від температури для матеріалів з великою (1) та малою (2) нелінійністю

Матеріали з високою нелінійністю ($k>1,3$) використовуються у варікондах – конденсаторах змінної ємкості.

П'єзоелектрики — речовини, у яких під дією механічних напруг виникає поляризація (прямий п'єзоефект) або під дією електричного поля змінюються розміри (зворотний п'єзоефект). До п'єзоелектриків відносяться поляризовані сегнетоелектрики із залишковою поляризацією, а також кристали, що не мають центра симетрії. В основі п'єзоефекту лежить зсув іонів у кристалічних ґратах при пружній деформації. П'єзоефект є анізотропним і характеризується п'єзомодулем – зарядом, що з'являється на поверхні пластин п'єзоелектрика під дією одиничної сили. Звичайно вимірюють так званий поздовжній п'єзомодуль d_{33} по заряду на поверхні, перпендикулярній напрямку поляризації, коли навантаження прикладене перпендикулярно цієї ж поверхні. П'єзоелектрики повинні мати високі значення п'єзомодуля і малі втрати.

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.

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).

12.5. 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 ТКР (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

$$\gamma = \frac{1}{\rho_v}, \quad (12.8)$$

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

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha_p T), \quad (12.9)$$

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 :

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, \quad (12.10)$$

Для більшості технічних металів $\alpha_\rho = 0,004 \text{ K}^{-1}$, у феромагнетиків, наприклад, у заліза він дещо більший ($0,006 \text{ K}^{-1}$).

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 :

$$U = k(T_1 - T_2) = k\Delta T, \quad (12.10)$$

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 $0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ (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.

12.6. Електричні властивості напівпровідників

Велику групу матеріалів з електронним типом провідності, що мають питомий опір $10^{-5} \dots 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, 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

термордисторів (термісторів), фоторезисторів, нелінійних резисторів (варисторів), тензорезисторів та ін.

Напівпровідникові властивості мають 12 елементів, що утворюють групу простих напівпровідників (табл.12.1), а також багато хімічних з'єднань.

Таблиця 12.1. – 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

Напівпровідникові хімічними з'єднаннями є з'єднання елементів різних груп таблиці Менделєєва, що відповідають загальним формулам A^NB^M (табл. 12.2), де N та M – номери груп, а також складні сполуки і деякі органічні речовини.

Таблиця 12.2. – Властивості напівпровідникових простих з'єднань

Група	З'єднання	Тип	Ширина забороненої зони, $\cdot 10^{-19}$ Дж	Рухомість електронів, $m^2/(B \cdot c)$	Рухомість дірок, $m^2/(B \cdot c)$
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		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. 12.6).

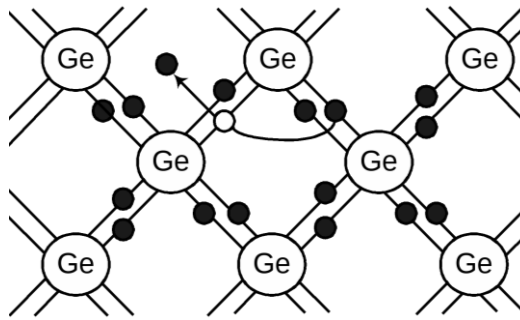


Рисунок 12.6. – Схема ковалентного зв'язку у хімічно чистому германії

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. 12.7).

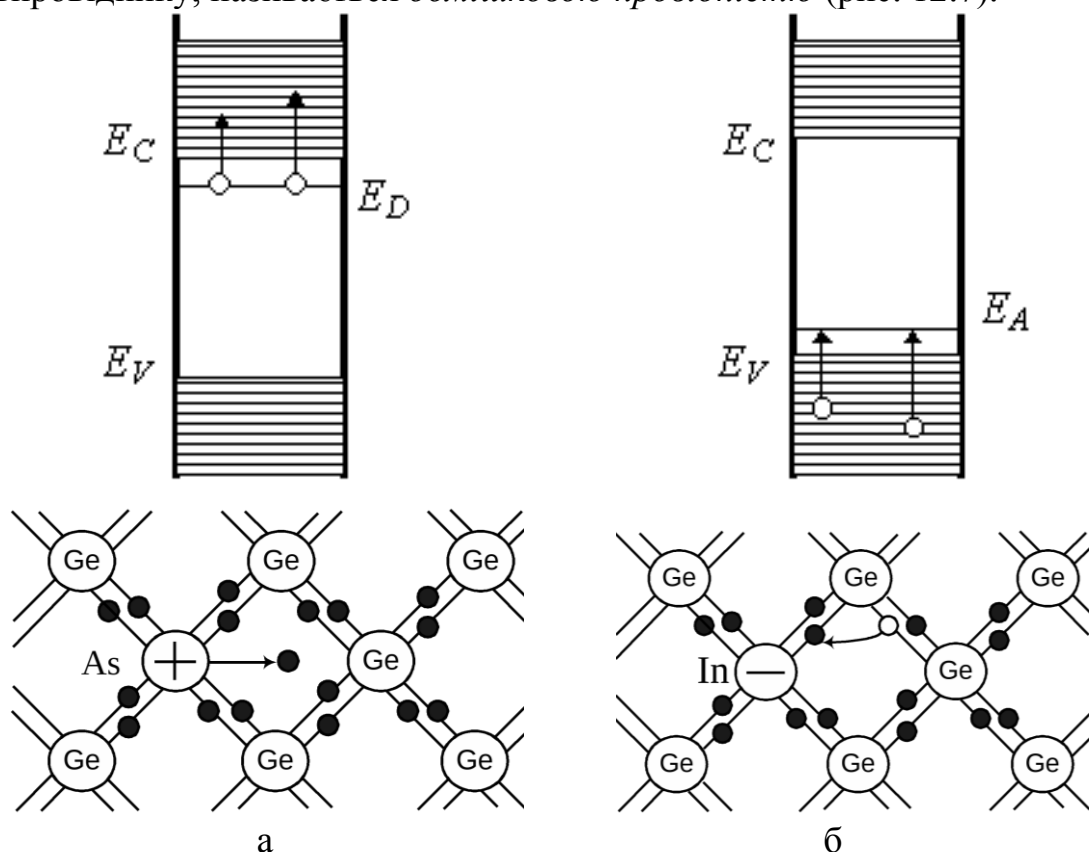


Рисунок 12.7. – Зонні діаграми та схеми ковалентного зв'язку у германії, легованому донорною (а) та акцепторною (б) домішками: E_C – нижня границя зони провідності, E_V – верхня границя валентної зони, E_D – рівень активації донорної домішки, E_A – рівень активації акцепторної домішки

Домішки 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. 12.7, 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. 12.7, 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 p-типу.

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 p-n – 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) $\rho=10^{14}\text{Ом.м}$; $\epsilon=14$; $\text{tg}\delta=0,0001$; $E_{\text{пр}}=4\text{МВ/м}$.
 - 2) $\rho=10^{20}\text{Ом.м}$; $\epsilon=2,4$; $\text{tg}\delta=0,1$; $E_{\text{пр}}=2,5\text{МВ/м}$.
 - 3) $\rho=10^{16}\text{Ом.м}$; $\epsilon=7,3$; $\text{tg}\delta=0,0003$; $E_{\text{пр}}=125\text{МВ/м}$.
- Відповідь поясніть.
7. З переліку матеріалів (додаток А) вибрати низькочастотний конденсаторний діелектрик. Відповідь поясніть.
 8. Які матеріали називаються провідниковими?
 9. Охарактеризуйте властивості провідникових матеріалів.
 10. З переліку матеріалів (додаток А) вибрати матеріал для виготовлення нагрівального елемента. Відповідь поясніть.
 11. Які матеріали називають напівпровідниками?
 12. Де застосовуються напівпровідникові матеріали? У чому їх переваги?
 13. Які елементи мають властивості напівпровідників?
 14. Що називається власною та домішковою провідністю напівпровідників?

Глава 13 МАТЕРІАЛИ З ОСОБЛИВИМИ ТЕПЛОВИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

13.1. 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 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. 13.1).

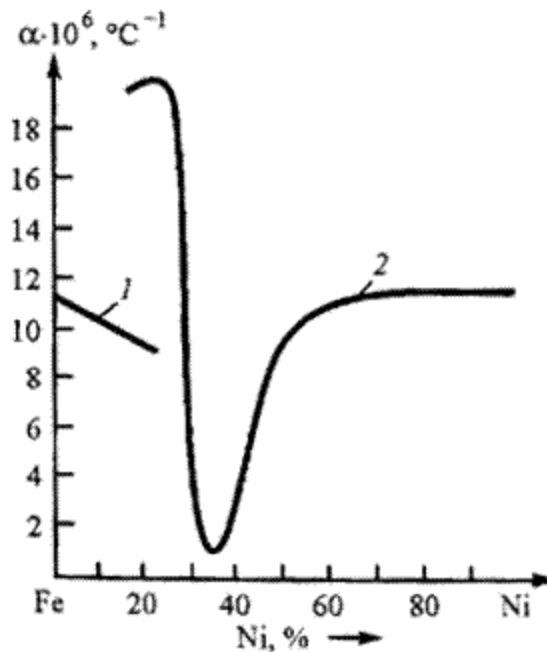


Рисунок 13.1. — Залежність температурного коефіцієнту лінійного розширення від вмісту нікелю у залізо-нікелевих сплавах: 1 — α -фаза, 2 — γ -фаза

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 феромагнетика 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 феромагнетика: 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. 13.2). 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.

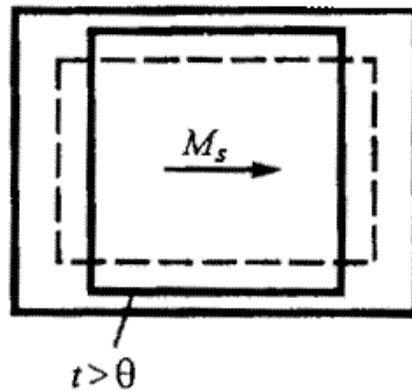


Рисунок 13.2. – Схема зміни форми та розмірів домену під впливом внутрішнього магнітного поля.

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:

$$\alpha = \alpha_0 - \Delta \quad (13.1)$$

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

$$A_t = A_{20}(1 + \alpha \Delta t), \quad (13.2)$$

і показана схематично на рис. 13.3.

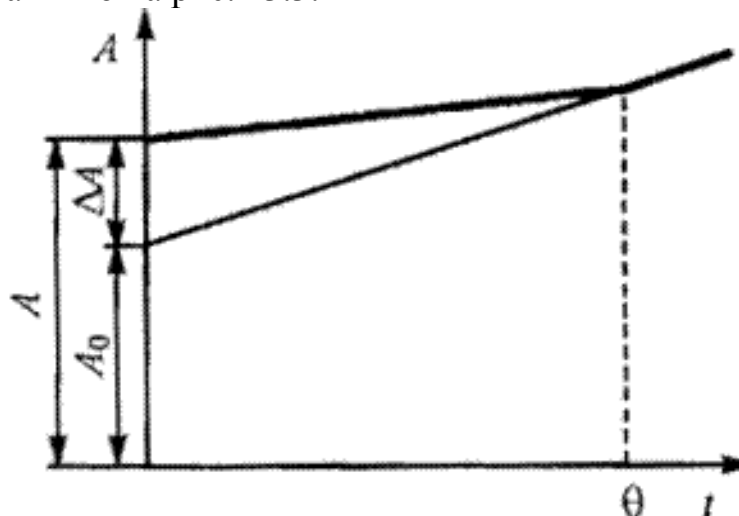


Рис. 13.3. – Схема зміни розміру кристала інварного сплаву при нагріванні

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 феромагнетика 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.

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 36Ni, 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. 13.1). Особливу групу становлять сплави для паяння і зварювання із склом. 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.

Таблиця 13.1 Властивості сплавів інварного типу

Сплав	Масова доля елементів, %			$\alpha \cdot 10^6$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$	Температурний інтервал вимірювання, $^{\circ}\text{C}$
	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

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 $^{\circ}\text{C}$. 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 коvara, але з підвищеним вмістом нікелю. Для такої пайки не потрібно дуже точного збігу коефіцієнтів α , що спрощує технологію виготовлення цього сплаву.

Як терморегулятори у приладобудуванні використовують біметалічні пластинки, зварені із двох матеріалів з різним значенням коефіцієнта α . Для цих цілей звичайно використовують інвар 36Н, що має мінімальне значення коефіцієнта α , і сплав з 25 % Ni, у якого коефіцієнт α дуже великий ($20 \cdot 10^{-6} ^{\circ}\text{C}^{-1}$). При нагріванні пластинка біметалу сильно викривляється й замикає (або розмикає) електричне коло.

13.2 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 магнітострикцію (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:

$$E = \frac{\sigma}{\delta_0 + \delta_m} \quad (13.3)$$

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. 13.4 показана діаграма пружної деформації феромагнетика.

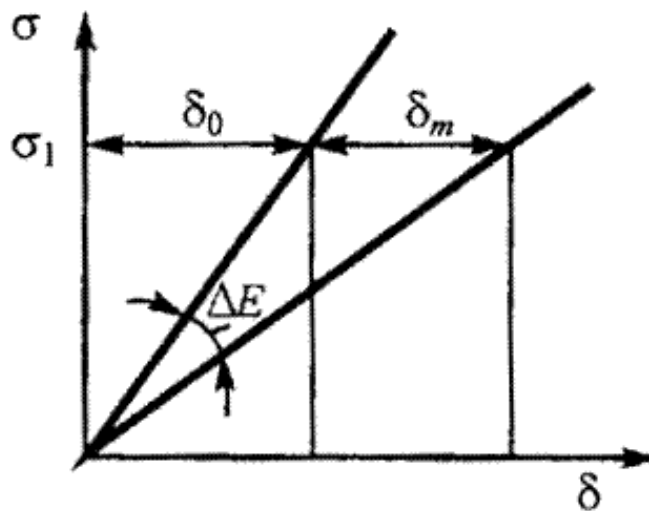


Рисунок 13.4. – Пружна частина діаграми деформації феромагнетика

Якщо до навантаження накласти дуже велике, зовнішнє магнітне поле вичерпає магнітострикційну деформацію, і модуль пружності феромагнетика

буде визначатися тільки пружно-механічної деформацією і значення його будуть великими:

$$E = \frac{\sigma}{\delta_0} \quad (13.4)$$

Таким чином, у всіх феромагнітних матеріалах модуль нормальної пружності дещо занижений через наявність деформації феромагнітної природи:

$$E = E_0 - \Delta E \quad (13.5)$$

У елінварних сплавах на відміну від решти феромагнетиків, внаслідок великої об'ємної механострікції парапроцесу ΔE -ефект набуває великого значення і викликає аномальне змінювання модуля пружності при нагріванні.

Можливий характер залежності модуля пружності E феромагнітного матеріалу від температури нагріву показаний на рис. 13.5.

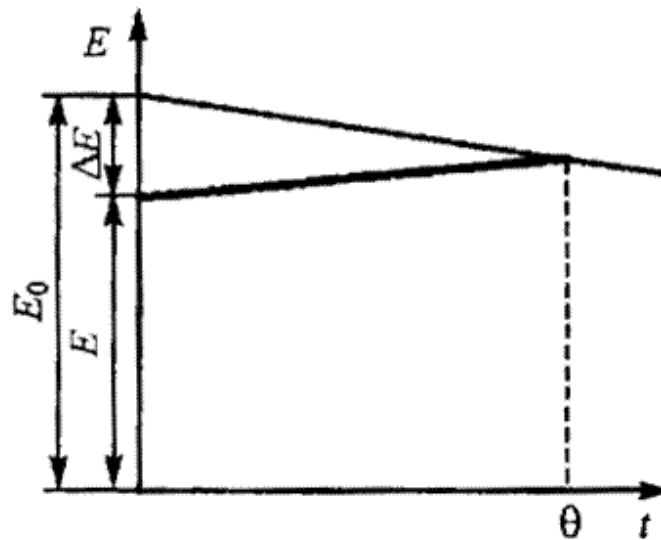


Рисунок 13.5. — Схема зміни модуля нормальної пружності феромагнетика при нагріванні

Зменшення E_0 при нагріванні обумовлено ослабленням сил міжатомної взаємодії. Зниження ΔE з підвищенням температури, викликане зменшенням намагніченості феромагнетика, призводить не до зниження, а, навпаки, до зростання модуля нормальної пружності E . З цієї ж схеми випливає, що модуль пружності феромагнетика може також зберігатися постійним до температури точки Кюрі.

Температурний коефіцієнт модуля нормальної пружності, називаний для стислості термopужним 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:

$$E_t = E_{20}(1 + \gamma \Delta t) \quad (13.6)$$

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 плавов 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 сплав 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. 13.2). Вміст вуглецю в цих сплавах повинний бути мінімальним.

Таблиця 13.2 Хімічний склад та робочі температури елінварних сплавів

Сплав	Кількість елементу, % (інше - залізо);				Робочі температури, $^{\circ}\text{C}$
	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

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 °С 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 магнітострикція?
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 феромагнетику при нагріванні?
9. Які значення може мати температурний коефіцієнт лінійного розширення інварних сплавів?
10. Дайте характеристику елінварних сплавів.

Глава 14

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.

14.1. Загальна характеристика і класифікація неорганічного скла

Неорганічне скло варто розглядати як особливого виду затверділий розчин – складний розплав високої в'язкості кислотних і лужних оксидів.

Основу скла утворить об'ємна сітка з однорідних структурних елементів. У найбільш простому по сполуці кварцовому склі такими елементами є тетраедри Si_4 , які з'єднуються своїми вершинами (рис. 14.1). З таких же тетраедрів утворена структура кристалічного кварцу. Розходження між двома речовинами однакового хімічного складу пояснюється розміщенням Si_4 . Кути між зв'язками кремній - кисень у сусідніх тетраедрах у кварцовому склі міняється в широких межах ($120 - 180^\circ$), чим і пояснюється неупорядковане розташування тетраедрів Si_4 . В кристалічному кварці тетраедри Si_4 розміщені упорядковано і утворюють кристалічну решітку, у цьому випадку значення кутів перебувають у більше вузькому інтервалі. Структура аморфного скла виникає, коли підвищення в'язкості скляної маси перешкоджає її кристалізації.

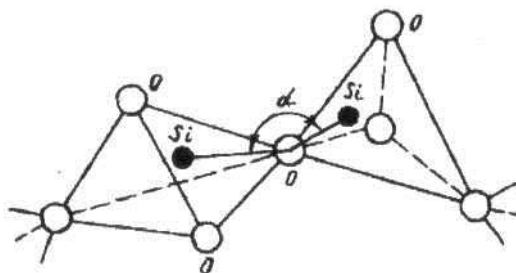


Рисунок 14. 1. – Розташування тетраедрів SiO_4 у склі, α – кут між тетраедрами.

Скляні вироби одержують у результаті розплавлювання здрібнених речовин певного хімічного складу з наступною переробкою розплавленої скломаси.

Для цього використовують склоутворюючі, модифікуючі і проміжні оксиди.

До склоутворюючих відносять оксиди Si, B, P, Ge, As.

Модифікуючими є оксиди Na, K, Li, Ca, Mg, Zn, Ba та інші, які надають виробам різні фізико-хімічні властивості.

До проміжних відносять оксиди Al, Pb, Fe, Ti, Be, які можуть заміщати деяку частину скло утворюючих оксидів у структурі скла.

Залежно від хімічної природи скло утворюючої речовини стекла підрозділяють на:

- силікатні (SiO_2);
- алюмосилікатні ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$);
- боросилікатні ($\text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$);
- алюмоборосилікатні ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$);
- алюмофосфатні ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{P}_2\text{O}_5$);
- борофторалюмосилікатні ($\text{B}_2\text{O}_3 - \text{F} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$);
- алюмосиликофосфатні ($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5$);
- силікотитанатні ($\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$);
- силікоцирконатні ($\text{SiO}_2 - \text{ZrO}_2$).

По вмісту модифікаторів стекла бувають:

- лужними (містять оксиди Na_2O , K_2O);
- безлужними;
- кварцевими.

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 і т.п.).

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

14.2. Загальні властивості скла.

При нагріванні скло плавиться в деякому температурному інтервалі, що залежить від складу. Для промислових силікатних стекол температура стекловання $t_c = 425 \dots 600^\circ\text{C}$, температура розм'якшення t_p лежить у межах $600 \dots 800^\circ\text{C}$. В інтервалі температур між t_c і t_p скла перебувають у високов'язкому пластичному стані. При температурі вище t_p ($1000 \dots 1100^\circ\text{C}$) 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 г/см³ (для скла з оксидами свинцю або барію вона може досягати 8,0 г/см³).

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 тиску. Оксиди, що збільшують хімічну стійкість: Si₂, Zr₂, Ti₂, Al₂O₃, B₂O₃, CaO, MgO, ZnO. Оксиди, що зменшують хімічну стійкість: LiO₂, Na₂O, K₂O, BaO, PbO.

Стекло розчиняється під впливом HF, H₃PO₄, 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 цього складу та методів переробки. Так стекла, що містять окисли Al і Fe, краще проводять тепло, а ті, що містять оксиди 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.

14.3. Оптичне скло

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.

14.4. Органічне скло (плексиглас)

Органічне скло (табл.14.1) 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 14.1 Оптичні властивості органічного скла

Марка скла	Показник заломлення n_D при температурі в $^{\circ}\text{C}$			Оптичне перекручування, хв	Світлорозсіювання, сб/фот
	20	45	60		
СОЛ	1,492	1,488	1,486	3-9	$0,40 \cdot 10^{-3}$
СТ-1	1,489	1,486	1,484		$0,25 \cdot 10^{-3}$

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

14.5. Оптичні кристали

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

Характерною особливістю оптичних кристалів є їхнє вибіркове пропущення 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.

Найпоширенішими й характерними оптичними кристалами є: германій полікристалічний, ісландський шпат, кварц, рубін, 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 890°C), 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 спричиняється наявністю 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 $0,15 \dots 4$ 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).

Рубін, сапфір, лейкосапфір і корунд є різновидами кристалічного оксиду алюмінію, які відрізняються фарбуванням. Ці дорогі кристали одержують штучним шляхом. Кристалічний оксид алюмінію має високу механічну міцність і твердість, термічною й хімічною стійкістю. Ці кристали застосовують для виготовлення оптичних деталей, які працюють в інфрачервоній області спектра, і різних деталей спеціального призначення.

Хлористий натрій, фтористий літій, йодисто-бромистий талій і інші іонні кристали мають кубічну решітку й тому ізотропні. Їхні оптичні властивості наведені в табл. 14.2.

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 заготівлі 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 14.2 Характеристика оптичних іонних кристалів

Найменування кристала	Хімічна формула	Показник заломлення n	Коефіцієнт дисперсії v	Густина, г/см ³
Хлористий натрій	NaCl	1,54432	42,7	2,17
Хлористий калій	KCl	1,49038	43,9	1,98
Фтористий літій	Li	1,3920	9,3	2,64
Фтористий натрій	Na	1,3250	85,3	2,81
Фтористий кальцій (флюорит або плавииковий шпат)	Ca ₂	1,4338	5,3	3,18
Бромистий калій	KBr	1,5599	33,5	2,76
Йодисто-бромистий талій (KPC-5)	TlBr і Tl	2,6316	-	7,4
Алюмокалієві галуни	KAl(SO ₄) ₂ · 12H ₂ O	1,45620	58,5	1,75

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 віконець 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 віконець 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 віконець 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 віконець 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 віконців 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. Отрутний. 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'який, однорідний, дешевий кристал, добре розчинний у воді, гігроскопічний. Застосовується в основному як лінзи для апохроматичних об'єктивів мікроскопа, призначених для видимої області спектра.

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 оптичного органічного скла.
6. В чому особливості оптичного скла?
7. Дайте характеристику кварцового скла.
8. Які кристали застосовуються у сучасній оптиці?
9. В чому полягають особливості оптичних іонних кристалів?

Глосарій фахових термінів

А

Абсорбція (абсорбция, absorption) – поглинання однієї речовини іншою в усьому об'ємі сорбенту.

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

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.

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 %.

Д

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.

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 $10^{-6} \dots 10^{-4}$ м, де магнітні моменти атомів орієнтовані паралельно певному кристалографічному напрямку.

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.

К

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.

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.

М

Магнітострикція (магнитострикция, magnetostriction) — зміна розмірів феромагнетику 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 (прочність, 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.

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.

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.

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.

Показник заломлення (показатель преломления, refractive index) – відношення швидкості світла у вакуумі до швидкості світла у даному середовищі.

Р

Рекристалізація (рекристаллизация, recrystallization) – процес утворення та зростання зерен з меншою кількістю дефектів будови. Внаслідок рекристалізації утворюються зовсім нові зерна рівноважної форми.

С

Система (система, system) – сукупність речовин, елементів або хімічних сполук, в який можливі ті чи інші перетворення.

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.

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.

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.

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.Головки, 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. Тимошук 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.