

Державний заклад «Південноукраїнський національний педагогічний
університет імені К.Д. Ушинського»

В. В. Усов

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА ТЕХНОЛОГІЇ

Навчальний посібник

Одеса 2019

Рецензенти: **В. Г. Шевчук**, доктор фізико-математичних наук, професор.
І. М. Вікулін, доктор фізико-математичних наук, професор.

Друкується за рішенням Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського від 26 грудня 2019р., протокол № 4

В. В. Усов

УДК: 378.62-4

Матеріалознавство та технології: навчальний посібник для самостійного вивчення дисципліни. – Одеса: Університет Ушинського, 2019. – 227 с.

У посібнику викладено основні відомості про загальні властивості та галузі використання конструкційних матеріалів у різних сферах промисловості та електронній апаратурі, кристалізацію та будову реальних металів, загальну теорію сплавів, механічні властивості та визначення їх кількісних характеристик, залізобуглецеві сплави, сплави кольорових металів та неметалічні матеріали. Навчальний посібник дозволить скласти уявлення про процеси і закономірності, що визначають формування структури і різних властивостей металів і сплавів, технологічні прийоми, які використовуються на практиці для додання матеріалам певних властивостей, а також набути певних практичних навичок аналізу структури конструкційних матеріалів, виконуючи практичні завдання.

Навчальний посібник призначений для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 014 Середня освіта (Трудове навчання та технології) для самостійного поглибленого вивчення курсу.

© Університет Ушинського, 2019

© В.В. Усов

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	6
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ГАЛУЗІ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ	7
1.1. Класифікація матеріалів	7
1.2. Загальні властивості матеріалів	9
1.3. Основні параметри, що характеризують матеріали	21
1.4. Конструкційні матеріали, метали, металічні сплави та їх класифікація	22
1.5. Кристалічна будова, анізотропія, алотропія.....	25
1.6. Контрольні завдання	33
РОЗДІЛ 2. КРИСТАЛІЗАЦІЯ І БУДОВА РЕАЛЬНИХ МЕТАЛІ.....	34
2.1. Дефекти кристалічної будови та їх класифікація	34
2.2. Механізм і закономірності кристалізації металів	41
2.3. Отримання дрібнозернистої структури. Будова металевого злитка	47
2.4. Визначення хімічного складу, металографічні та фізичні методи дослідження структури	50
2.5. Контрольні завдання	53
РОЗДІЛ 3. ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ СПЛАВІВ	56
3.1. Основні поняття в теорії сплавів: компоненти, фази, варіантність, правило фаз Гіббса	56
3.2. Класифікація сплавів: механічні суміші, тверді розчини, хімічні сполуки. Діаграма стану	59
3.3. Діаграми стану двохкомпонентних сплавів	64
3.4. Кількісний структурно-фазовий аналіз	74
3.5. Зв'язок між властивостями сплавів і типом діаграми стану. Правила Курнікова	75
РОЗДІЛ 4. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ КІЛЬКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК	77
4.1. Закон Гука. Деформації та напруження	77
4.2. Механізми пластичної деформації: ковзання та двійникування Руйнування металів	80

4.3. Визначення міцності, пружності, пластичності	84
4.4. Визначення твердості, в'язкості, втоми	89
4.5. Технологічні та експлуатаційні властивості (рідко текучість, усадка, ліквіація, здатність до обробки, тиском, різанням, зварюваність	99
4.6. Вплив пластичної деформації та нагріву на структуру і властивості металу: наклеп, повернення та рекристалізація...	101
4.7. Контрольні запитання	108
РОЗДІЛ 5. ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ	113
5.1. Діаграма стану залізо – вуглець. Критичні точки... Компоненти і фази. Сталі та чавуни	113
5.2. Рівноважні структури та класифікація вуглецевих сталей.....	120
5.3. Чавуни: білі, кувальні, сірі, високоміцні, застосування	127
5.4. Термічна та хіміко-термічна обробка сталей	131
5.5. Леговані сталі: маркування, структури, призначення.....	147
5.6. Контрольні запитання.....	157
РОЗДІЛ 6. СПЛАВИ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ	166
6.1. Мідь та її сплави.....	166
6.2. Латуні та бронзи.....	166
6.3. Мідно-нікелеві сплави	170
6.4. Антифрикційні (підшипникові) мідні сплави	172
6.5. Алюміній та його сплави. Дисперсне твердіння та модифікування.....	172
6.6. Контрольні запитання.....	176
РОЗДІЛ 7. НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ.....	180
7.1. Класифікація хімічних зв'язків: іонний, ковалентний, металевий, молекулярний.....	180
7.2. Елементи зонної теорії. Генерація і рекомбінація носіїв заряду, власна та домішкова провідність у напівпровідниках.....	182

7.3. Вплив електричного поля і світла на провідність та ефекти в напівпровідниках (Гана, Зеєбека, Холла)...	190
7.4. Поляризація діелектриків.....	201
7.5. Неметалеві матеріали і вибір матеріалу для конкретного призначення.....	208
7.6 Контрольні запитання	211
РОЗДІЛ 8. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ	217
8.1. Аналіз фазових діаграм двокомпонентних систем	217
8.1.1. Мета завдання	217
8.1.2. Початкові вхідні дані для виконання завдання	217
8.1.3. Порядок виконання завдання	219
8.1.4. Оформлення результатів виконання завдання	219
8.1.5. Контрольні запитання	219
8.2. Аналіз залізовуглецевих сплавів та їх складових залежно від вмісту вуглецю	221
8.2.1. Мета завдання	221
8.2.2. Початкові вхідні дані для виконання завдання.....	221
8.2.3. Порядок виконання завдання	222
8.2.4. Оформлення результатів виконання завдання.....	222
8.2.5. Контрольні запитання	222
8.3. Визначення технології термічної обробки виробів основних залізовуглецевих сплавів.....	223
8.3.1. Мета завдання	223
8.3.2. Початкові вхідні дані для виконання завдання.....	224
8.3.3. Порядок виконання завдання	225
8.3.4. Оформлення результатів виконання завдання.....	225
8.3.5. Контрольні запитання	225
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	227

ПЕРЕДМОВА

Курс «Матеріалознавство та технології» разом з іншими загальнотехнічними дисциплінами спрямований на забезпечення самостійної поглибленої підготовки здобувачів вищої освіти за другим (магістерським) рівням за спеціальністю 014 Середня освіта (Трудове навчання та технології).

У основу посібника покладено модульний курс, складений відповідно до ОПП Трудове навчання та технології і включає такі етапи: вивчення теоретичного матеріалу, його осмислення і закріплення, набуття та розвиток відповідних компетентностей.

Для реалізації поставлених завдань у посібнику викладені основи теоретичного і технічного металознавства з таких розділів: загальні властивості та галузі використання матеріалів у різних сферах промисловості та електронній апаратурі, кристалізація та будова реальних металів, загальна теорія сплавів, механічні властивості та визначення їх кількісних характеристик, залізовуглецеві сплави, сплави кольорових металів та неметалічні матеріали.

У посібнику запропоновано виконання студентами практичних завдань. Ці завдання супроводжуються детальними настановами, а також контрольними питаннями, що сприятиме більш ретельному самостійному вивченню відповідних навчальних тем.

РОЗДІЛ 1.

ЗАГАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ОБЛАСТІ ВИКОРИСТАННЯ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Класифікація матеріалів

Всі матеріали діляться на електричні радіоматеріали і конструкційні матеріали.

Електричними радіоматеріалами (ЕРМ) називаються матеріали і компоненти, що несуть електричне навантаження або електричне навантаження спільно з механічним.

Конструкційними матеріалами називається решта матеріалів, що несуть тільки механічне навантаження.

Звичайно, інженер радіоелектронної апаратури (РЕА) повинен знати як ЕРМ, так і конструкційні матеріали. Деякі ЕРМ, наприклад, пластмаси, є одночасно і конструкційними матеріалами.

Всі матеріали діляться на однорідні та неоднорідні: ізотропні та анізотропні: лінійні та нелінійні.

Однорідні – це такі, що мають однакову густину та хімічний склад по всьому об'єму. Інакше матеріал є *неоднорідним*.

Ізотропні – це матеріали, властивості яких не залежать від обраного напрямку виміру (грец. *ізо* – рівний, *тропос* – шлях, напрямок). Тобто в ізотропних матеріалах всі напрямки рівноправні.

Анізотропні – це матеріали, властивості яких залежать від обраного напрямку виміру.

Лінійними електрорадіоматеріалами називають матеріали, у яких, наприклад, електричний опір не залежить ані від електричного струму, ані від напруги, тобто є постійним.

Нелінійними електричними елементами називають такі, що не володіють постійним електричним опором. Прикладами нелінійних елементів є лампи розжарювання, електронні, напівпровідникові та іонні прилади. У нелінійному ланцюзі між електричним струмом і напругою немає

лінійної пропорційної залежності, отже закон Ома непридатний для розрахунку таких ланцюгів. У *нелінійних магнітних* матеріалів, наприклад, у феромагнетиків, магнітна проникність μ , a , отже, й намагніченість, залежать від напруженості зовнішнього магнітного поля нелінійно.

За агрегатним станом матеріали ділять на *тверді, рідкі, газоподібні*. За структурою – на монокристалічні, полікристалічні, аморфні і змішані.

Монокристали складаються з однакових кристалічних комірок, розташованих в правильному порядку (кубічних, ромбічних, тетрагонів, тригональних, гексагональних, орторомбічних і ін.), створюючи кристалічну ґратку. Атоми або іони розташовуються у вузлах ґратки, в її центрі, в центрі грані. Монокристали є анізотропними, тобто їх властивості різні у різних напрямках.

Полікристалічні матеріали складаються з великого числа дрібних кристалів, в ідеалі хаотично орієнтованих в полікристалі. Ідеальні полікристали ізотропні, тобто їх властивості однакові в будь-якому напрямі. Проте реальні полікристалічні матеріали піддаються різним зовнішнім діям, починаючи з процесу їх отримання (литво, кування, вальцювання, термічна обробка і т.д.). В результаті кристали, з яких вони складаються, змінюють свою форму (наприклад, подовжуються при волочінні дроту), а також отримують певну переважну орієнтацію по відношенню до зовнішніх осей полікристала, тобто розташовуються вже не хаотично. Такий переважний розподіл кристалів по орієнтації в полікристалі називається *текстурою*. Текстурований полікристалічний матеріал за своїми властивостями наближається до монокристалічного і є певною мірою анізотропним.

Аморфні матеріали характеризуються хаотичним розташуванням атомів або іонів.

Змішані матеріали складаються з аморфного середовища – матриці, в яку вкраплені кристали.

1.2. Загальні властивості матеріалів

Електрорадіоматеріали діляться на активні і пасивні.

Пасивні ЕРМ використовуються для виготовлення резисторів, конденсаторів, котушок індуктивності і т.д., тобто елементів, *не пов'язаних з перетворенням інформації*.

Активними називаються ЕРМ, які використовуються для виготовлення транзисторів, діодів, лазерів і т.д., тобто *елементів, пов'язаних з перетворенням інформації*.

ЕРМ працюють в електричних і магнітних полях.

За поведінкою в електричному полі ЕРМ ділять на **провідники, напівпровідники, діелектрики**.

До *провідникових* матеріалів відносяться матеріали з питомим електричним опором $\rho < 10^{-5}$ Ом·м, до діелектриків - $\rho > 10^9$ Ом·м, до напівпровідників – із $\rho = 10^{-6} - 10^9$ Ом·м. Ряд матеріалів одночасно є і діелектриками, і напівпровідниками залежно від температури навколишнього середовища та агрегатного стану. Матеріали розрізняються по ширині забороненої зони ΔE : у провідників $\Delta E = 0$, у напівпровідників $\Delta E < (2-3) eV$, у діелектриків $\Delta E > (2-3) eV$.

Класифікація провідників показана на рис. 1.1.

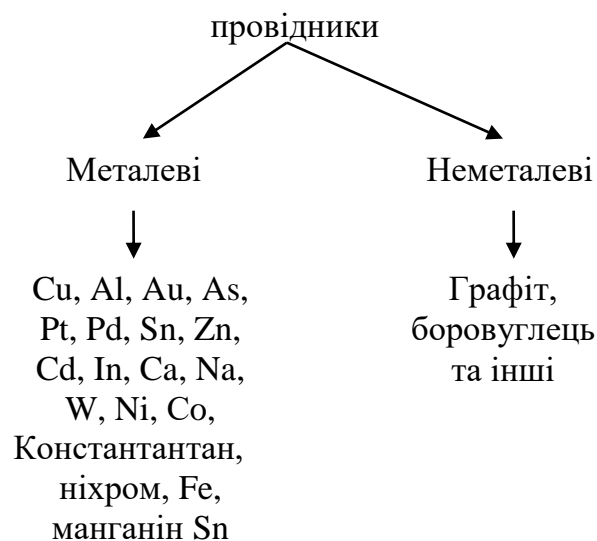


Рис. 1.1. Класифікація провідників.

Класифікація надпровідників приведена на рис. 1.2.

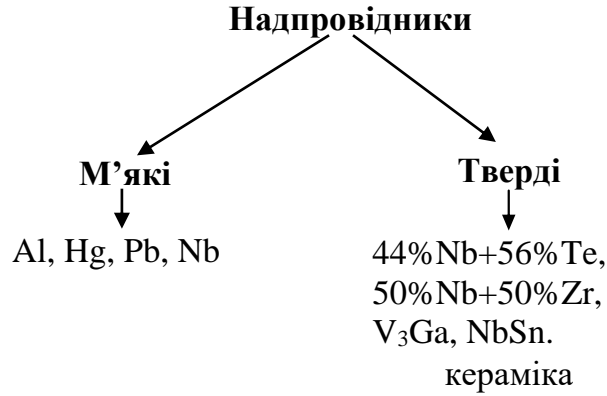


Рис. 1.2. Класифікація надпровідників.

Класифікація напівпровідників приведена на рис. 1.3.

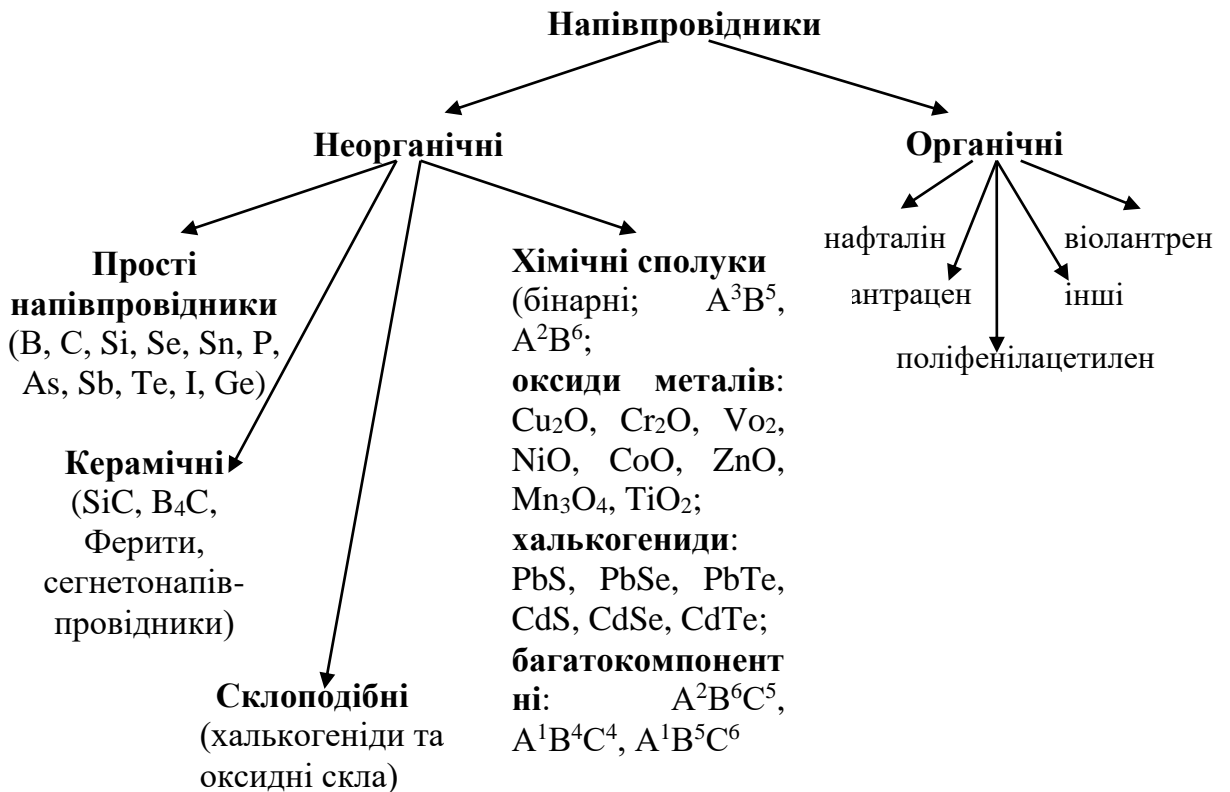


Рис. 1.3. Класифікація напівпровідників.

Діелектрики діляться на неполярні (нейтральні) і полярні. У неполярних діелектриків молекула симетрична і електричний момент молекул (*електричний момент* – добуток заряду на відстань між зарядами протилежного знаку) рівний нулю.

У полярних діелектриків молекула асиметрична, електричний момент високий. Класифікація пасивних діелектриків приведена на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Класифікація діелектриків

Класифікація активних діелектриків представлена на рис. 1.5.

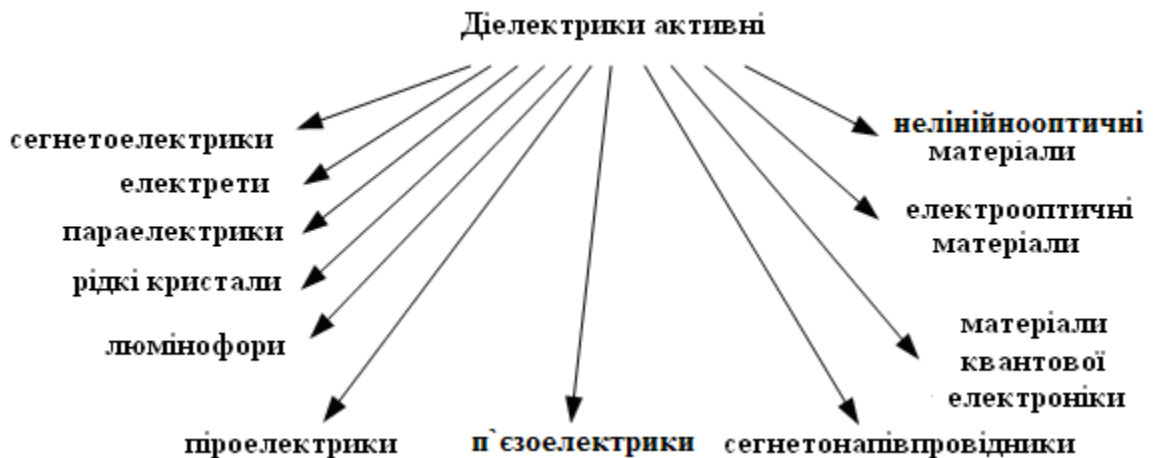


Рис. 1.5. Класифікація активних діелектриків.

Сегнетоелектриками називають кристалічні речовини, що володіють спроможністю до мимовільної поляризації, що може виникати навіть при відсутності зовнішнього електричного поля. Вперше ці властивості були виявлені радянськими фізиками І.В. Курчатовим і П.П. Кобеко при дослідженні кристалів сегнетової солі ($\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) – звідси й виникла назва для цього класу діелектриків. У подальшому було знайдено, що подібними властивостями володіють і інші кристали (рис. 1.6, 1.7).



Рис. 1.6. Класифікація сегнетоелектриків.

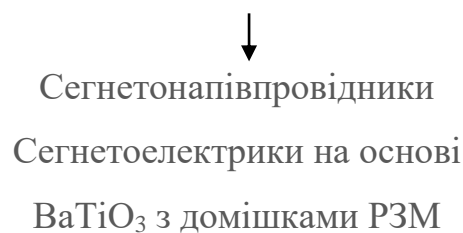


Рис. 1.7. Класифікація сегнетонапівпровідників.

Сегнетоелектрики володіють нелінійною залежністю поляризації P від напруженості зовнішнього електричного поля E . Ця залежність являє собою гістерезисну петлю (ABCDGF) (рис. 1.8), що зв'язано з наявністю мікроскопічних областей, де дипольні моменти мають однаковий напрям.

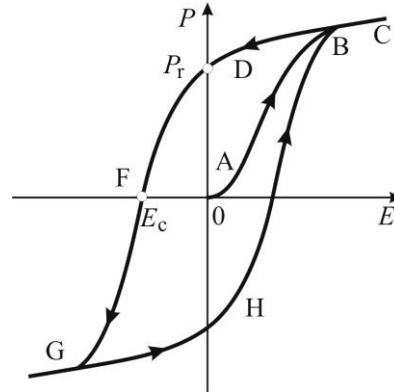


Рис. 1.8. Гістерезисна петля залежності поляризації P сегнетоелектрика від напруженості E зовнішнього електричного поля.

Сегнетоелектрики характеризуються анізотропією діелектричної проникності ε (тобто неоднаковістю ε по різним напрямкам всередині цих речовин). Так, у визначених напрямках ε визначається попереднім станом електризації і сильно залежить від напруженості зовнішнього електричного поля і досягає величезних значень $\varepsilon \sim 10000$. Але названі властивості виявляються лише у визначеному температурному інтервалі. Температура, що обмежує існування сегнетоелектричних властивостей діелектрика, називається точкою Кюрі. При більш високих температурах сегнетоелектричні властивості зникають. В цілому поведінка сегнетоелектриків у зовнішньому електричному полі подібна поведінці феромагнетиків у зовнішньому магнітному полі. Тому іноді сегнетоелектрики називають *фероелектриками*.

Електрети – це речовини (необов'язково кристалічні) з великою залишковою поляризацією, що зберігається тривалий час, тобто електрет є формальним аналогом постійного магніту. В даний час електретний стан спостерігається у більш, ніж 70 діелектриків (рис. 1.9).

Вони використовуються для виготовлення мікрофонів, як пиловловлювачі, дозиметри радіації, вимірники атмосферного тиску і вологості, в обчислювальних машинах, для вимірювання механічних вібрацій.



Рис. 1.9. Класифікація електретів.

Параелектрики – кристалічні речовини, в яких відбувається параелектричний резонанс – резонансне поглинання електромагнітних хвиль, обумовлене квантовими переходами частинок між енергетичними станами з різною орієнтацією дипольних електричних моментів частинок відносно зовнішнього електричного поля. Параелектричний резонанс спостерігається в твердих тілах у міліметровому та субміліметровому діапазонах довжин хвиль. Класифікація параелектриків приведена на (рис. 1.10).

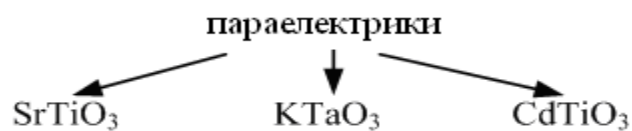


Рис. 1.10. Класифікація параелектриків.

Рідкими кристалами називають рідини, які складаються з молекул анізотропної форми, розташованих у певному порядку відносно один одного. Молекули рідких кристалів мають вигляд або стрижнів, або дисків. У рідких кристалів, подібно твердим, є напрями, вздовж яких орієнтуються довгі осі молекул або площини молекул. Особливі напрями в рідких кристалах, як і в твердих, називаються оптичними осями, так як з їхнім існуванням пов'язані *надзвичайні оптичні властивості* цих матеріалів: *подвійне променезаломлення, поворот площини поляризації світла* та інші.

На відміну від твердих кристалів, де оптичні осі жорстко закріплені, в рідких кристалах напрями оптичних осей можна легко змінювати за допомогою різноманітних зовнішніх дій, зокрема електричним полем. Для управління оптичними властивостями рідких кристалів потрібні невеликі електричні напруги (біля 1 В). Завдяки таким електронно-оптичним властивостям рідкі кристали набули велике практичне значення. Тонкі шари таких кристалів (товщиною 0,01 частку мікрометра) застосовують при виготовленні табло електронних годинників, калькуляторів, екранів телевізійних приймачів та моніторів комп'ютерів. Класифікація рідких кристалів дана на рис. 1.11.

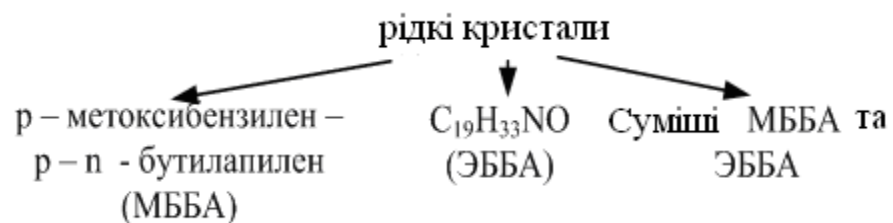


Рис. 1.11. Рідкі кристали.

Піроелектрики (від грецького *пiр* – вогонь) – кристалічні діелектрики, на поверхні яких при зміні температури з'являються електричні заряди. Всі піроелектрики є п'єзоелектриками (але не навпаки). Деякі піроелектрики володіють сегнетоелектричними властивостями. Типовий піроелектрик – турмалін.

Люмінофори (від грецького – *люмен* – світло, *форос* – той, що несе) органічні та неорганічні речовини, спроможні світитися (люмінесціювати) під дією зовнішніх дій (світла, радіоактивного та рентгенівського випромінювання, електричного поля, при хімічних реакціях, механічній дії). **Приклади люмінесценції** – свічення дерева, що гниє, деяких комах, екрана телевізора. За механізмами розрізняють резонансну, спонтанну, вимушену та рекомбінаційну люмінесценцію. За тривалістю розрізняють флуоресценцію (короткочасну) і фосфоресценцію (довготривалу) люмінесценцію. Приклади піроелектриків та люмінофорів показані на рис. 1.13.



Рис. 1.12. Піроелектрики та люмінофори.

П'єзоелектрики (від грецького – *п'єзо* – давлю і електрика) – кристалічні речовини, в яких при деформації виникають електричні заряди (прямий п'єзоелектричний ефект) або навпаки, виникнення деформації під дією зовнішнього електричного поля (зворотній п'єзоелектричний ефект). Класифікація п'єзоелектричних матеріалів показана на рис. 1.13.

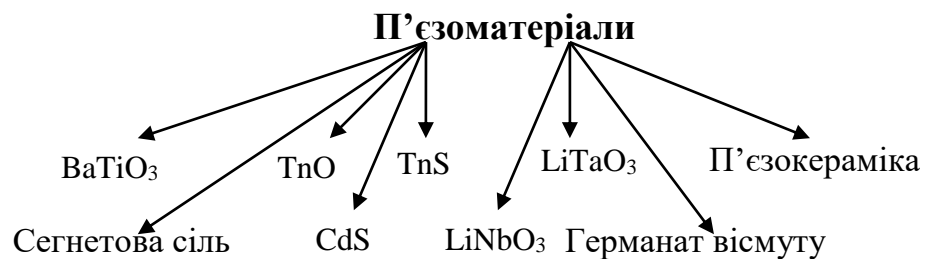


Рис. 1.13. П'єзоелектрики.

Класифікація матеріалів квантової електроніки та електронно-оптичних матеріалів показана на рис. 1.14, 1.15.



Рис. 1.14. Матеріали квантової електроніки.



Рис. 1.15. Електронно-оптичні матеріали.

Нелінійно-оптичні матеріали – це речовини, що під дією інтенсивних світлових полів змінюють свої оптичні властивості, зокрема, поляризація середовища починає нелінійно залежати від напруженості електричного поля світлової хвилі. На основі нелінійно оптичних матеріалів створені параметричні генератори світла (лазери з перебудованою частотою), оптичні модулятори світла та інші. У перших дослідках С.І. Вавілова по вивченню оптичних характеристик середовища при великій інтенсивності світла було використано уранове скло. *Уранове скло* – уранова жовта фарба, саме ураново-кислий натрій $\text{Na}_2\text{U}_2\text{O}_7$, сплавлений зі склом, додає йому жовтий колір із зеленим відтінком. Класичні нелінійно-оптичні матеріали – монокристали ніобата літію LiNbO_3 і танталату літію LiTaO_3 . Останніми роками спеціально для нелінійно-оптичних застосувань були вдосконалені методи вирощування кристалів ніобіту літію та танталату літію зі складом, близьким до стехіометричного, а також ніобата літію, легovanого магнієм.

Синтезовані різні типи нелінійно-оптичних полімерів на основі органічних фарбників (хромофорів), наприклад, **поліпарафеніленвінілен (ППВ)**.

Методом імплантації іонів Au^+ з енергією 160 кеВ і дозами близько 10^{16} - 10^{17} іон/см² в сапфір (Al_2O_3) з подальшим високотемпературним термічним відпалом синтезований новий нелінійно-оптичний композиційний матеріал $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Au}$, а також гібридні матеріали скло/сегнетоелектрик в системах $\text{Li}_2\text{O}-\text{Nb}_2\text{O}_5-\text{XO}_2$ (X= Si, Ge) і $\text{La}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{GeO}_2$ за допомогою керованого гомогенного і гетерогенного зародкоутворення сегнетоелектричних кристалів в об'ємі скла. Класифікація показана на рис. 1.16.



Рис. 1.17. Нелінійно-оптичні матеріали.

По поведінці в магнітному полі ЕРМ поділяються на магнітні і немагнітні. По магнітних властивостях матеріали діляться на діамагнетики (магнітна проникність $\mu < 1$, але $\mu \approx 1$), парамагнетики ($\mu > 1$, але $\mu \approx 1$), феромагнетики та феримагнетики ($\mu \gg 1$).

Феромагнетики володіють нелінійною залежністю намагніченості M від напруженості H зовнішнього магнітного поля. Ця залежність являє собою гістерезисну петлю (ABCDFG) (рис. 1.18), що зв'язано з існуванням мікроскопічних областей (доменів), де магнітні моменти мають однаковий напрям. У зовнішньому магнітному полі магнітні моменти сусідніх однакових кристалічних ґраток (доменів) шикуються в одному напрямі (рис. 1.19).

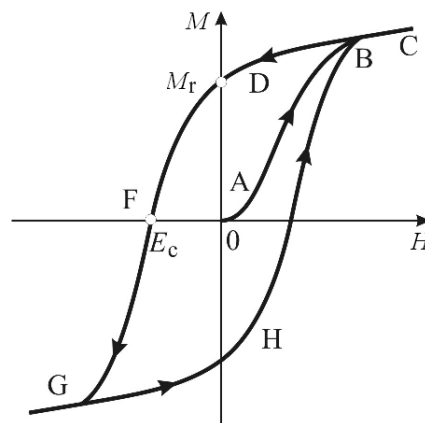


Рис. 1.18. Гістерезисна петля M_r залежності намагніченості M від напруженості H зовнішнього магнітного поля.

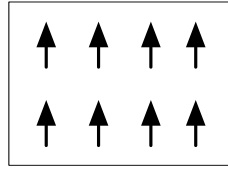


Рис. 1.19. Вплив магнітного поля на орієнтування доменів.

Феримагнетики мають дві підгратки, магнітні моменти їх протилежні, при цьому, якщо вони однакові (рис. 1.20, а), то матеріали називаються компенсованими феримагнетиками або антиферомагнетиками).

Якщо магнітні моменти сусідніх підграток різні (рис. 1.20, б), то такі матеріали називаються некомпенсованими феримагнетиками. Саме останні мають $\mu \gg 1$.

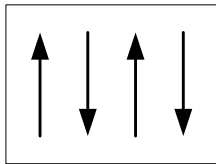


Рис. 1.20, а. Схема намагніченості антиферомагнетика

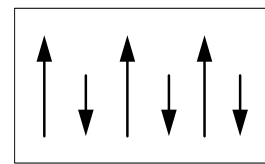


Рис. 1.20, б. Схема намагніченості некомпенсованого феримагнетика

Властивості феро- та феримагнетиків виявляються лише при температурах, нижчих за певне значення, що називається точкою Кюрі. При більш високих температурах феромагнітні властивості зникають.

Магнітні матеріали можуть бути провідниками, напів-провідниками, діелектриками. Класифікація магнітних матеріалів представлена на рис. 1.21.



Рис. 1.21. Магнітні матеріали.

На основі ЕРМ випускаються радіотехнічні конструкції (РК), класифікація яких показана на рис. 1.22.



Рис. 1.22. Класифікація радіоконструкцій.

При побудові РК відбувся розвиток особливих напрямів в науці, які одержали наступні назви: акустоелектроніка, магнітоелектроніка, кріотроніка, оптоелектроніка, хемотроніка, фононіка, прилади з поверхневим перенесенням заряду (ППЗ), напівпровідникова і діелектрична негатроніка. Деякі області знань посилено розвиваються і сьогодні, інші, розвинувшись, відійшли на задній план (хемотроніка). З часом картина розвитку міняється, з'являються нові галузі знань.

Однією з цікавих галузей науки, є мікросхемотехніка, пов'язана з побудовою еквівалентів РК, аналогів приладів з S- і N-подібними ВАХ.

Безумовно, розвиток науки про *РК* супроводжується дослідженнями їх якості.

Всі *РК* поділяться на *РК* широкого застосування, які у великих кількостях випускаються заводами, і *РК* приватного застосування, які проектуються і виготовляються на приватні вимоги. Їх конструкція залежить від конструкції і призначення виробу, в якому вони застосовуються, від освоєних процесів на заданому виробництві.

1.3. Основні параметри, що характеризують матеріали ЕА.

До *РК* пред'являється багато вимог, головними з яких є *надійність*, *економічність* і *технологічність*.

Надійність характеризується інтенсивністю відмов λ_i , причому

$$\lambda_i = \frac{\Delta N}{N_{\text{вд}} \cdot \Delta t} \quad (1.1),$$

де ΔN – кількість *РК*, що вийшли з ладу за час випробування Δt ;

$N_{\text{вд}}$ – кількість *РК* у випробовуваній партії.

Інтенсивність відмов пристрою

$$\lambda_y = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (1.2)$$

Економічність пов'язана з дешевизною вживаних матеріалів і устаткування технічних процесів.

Технологічність – здатність *РК* виготовлятися за простими і дешевими технологіями. Зрозуміло, що основні якості *РК* залежать від якості вживаних матеріалів, правильності їх вибору. Прогрес в радіоелектроніці йде за схемою:

нові матеріали і технічні процеси → *нові активні елементи* →
нова схемотехніка, а іноді і системотехніка.

Так, розвиток мікроелектроніки дозволив не тільки підвищити надійність систем, підвищити їх складність, але й зменшити габарити і споживану потужність.

1.4. Конструкційні матеріали, метали, металічні сплави та їх класифікація

Як вже згадувалось, конструкційні матеріали несуть лише механічне навантаження. Конструкційні матеріали є основою будівництва корпусів електронної апаратури. Від властивостей використаних конструкційних матеріалів залежить надійність роботи і міцність електронного апарату в цілому.

Основні конструкційні матеріали – це метали та їх сплави. Тому одним з головних розділів матеріалознавства є металознавство. Тому ми спочатку докладніше зупинимось на металознавстві.

Уперше існування зв'язку між будовою сталі та її властивостями було встановлене П.П. Аносовим (1799-1839). Аносов П.П. вперше застосував мікроскоп для дослідження структури металів. Йому належить пріоритет в створенні легованих сталей. Він розробив теорію і технологію виготовлення клинків з булатної сталі. З його робіт стало відомо, що так званий булатний узор на поверхні сталі безпосередньо залежить від її внутрішньої структури.

Основи наукового металознавства були створені видатним російським металургом Д.К. Черновим (1839-1921), який за свої праці був названий у літературі «батьком металографії». Чернов Д.К. встановив критичні температури фазових перетворень в сталях і їх зв'язок з кількістю вуглецю в сталях. Цим були закладені основи для найважливішої в металознавстві діаграми стану залізвуглецевих сплавів. Відкриттям алотропічних перетворень в сталі Д.К. Чернов заклав фундамент термічної обробки сталі. Критичні точки в сталі дозволили раціонально вибирати температуру її гарту, відпустку і пластичної деформації у виробничих умовах. У своїх роботах з кристалізації сталі і будові злитка Чернов виклав основні положення теорії литва, що не втратили свого наукового і практичного значення в даний час.

На початку 20-го століття велику роль для розвитку металознавства зіграли роботи Н.С. Курнакова, який застосував для дослідження металів методи фізико-хімічного аналізу.

У 1873-1876 рр. Гіббс виклав основні закони фазової рівноваги і, зокрема, правило фаз, ґрунтуючись на законах термодинаміки.

Визначення атомної будови фаз стало можливим після відкриття Лауе (1912 р), яке показало, що атоми в кристалі регулярно заповнюють простір, утворюючи просторові дифракційні ґратки, і що рентгенівські промені мають хвильову природу. Дифракція рентгенівських променів на таких ґратках дає можливість досліджувати будову кристалів.

Останнім часом для структурного аналізу, окрім рентгенівських променів, використовують електрони і нейтрони. Відповідні методи дослідження називаються електронною графією і нейтронною графією. Електронна оптика дозволила удосконалити мікроскопію. В даний час на електронних мікроскопах корисне максимальне збільшення доведено до 100000 разів.

Велике значення у розвитку металознавства та термічної обробки мали роботи Осмонда (Франція), Юм-Розері і Н. Мотта (Англія), Ф. Зейтца, Е. Бейна і Р. Мейла (США), Таммана і Ганемана (Німеччина) і інші.

Великий внесок у розвиток вітчизняного металознавства внесли С.С. Штейнберг, Н.А. Мінкевич, Г.В. Курдюмов, А.М. Бочвар, А.А. Бочвар, С.Т. Кишкин, В.Д. Садовський, И.И. Сидорін, А.П. Гуляєв та їх школи.

Особливо інтенсивно розвивається металознавство в останні десятиліття. Це пояснюється потребою в нових матеріалах для дослідження космосу, розвитку електроніки, атомної енергетики.

Основними напрямками в розвитку металознавства є розробка способів виробництва чистих і надчистих металів, властивості яких дуже відрізняються від властивостей металів технічної чистоти, з якими переважно працюють. Генеральним завданням матеріалознавства є створення матеріалів з наперед розрахованими властивостями стосовно заданих параметрів і умов роботи. Велика увага приділяється вивченню металів в екстремальних умовах (низькі та високі температури і тиск).

До теперішнього часу основною матеріальною базою машинобудування служить чорна металургія, що виробляє сталі і чавуни. Ці матеріали мають

багато позитивних якостей і в першу чергу забезпечують високу конструкційну міцність деталей машин. Проте ці класичні матеріали мають такі недоліки, як велика густина, низька корозійна стійкість. Втрати від корозії складають 20% річного виробництва сталі і чавуну. Тому, за даними наукових досліджень, через 20...40 років всі розвинені країни перебудуються на масове використання металевих сплавів на базі титану, магнію, алюмінію. Ці легкі та міцні сплави дозволяють в 2–3рази полегшити верстати і машини, в 10 разів зменшити витрати на ремонт.

Але важливе значення має використання нових матеріалів натомість традиційних (металевих) – пластмас, кераміки, матеріалів порошкової металургії, особливо композиційних матеріалів, що економить дефіцитні метали, знижує витрати енергії на виробництво матеріалів, зменшує масу виробів.

Розрахунками встановлено, що заміна ряду металевих деталей легкового автомобіля на пластики з епоксидної смоли, армованої вуглецевими волокнами, дозволить зменшити масу машини на 40%; вона стане міцнішою; зменшиться витрата палива, різко зросте стійкість проти корозії.

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

Найбільше застосування знайшли чорні метали. На основі заліза виготовляється не менш, ніж 90 % усіх конструкційних і інструментальних матеріалів. Порівняно з кольоровими металами, вартість заліза та його сплавів невелика.

Кольорові метали за схожими властивостями поділяють на:

- легкі метали (*Be, Mg, Al, Ti*), які володіють малою густиною;
- легкоплавкі метали (*Zn, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi*);
- тугоплавкі метали (*Ti, Cr, Ni, Mo, W, V* і інші) з температурою плавлення вище, ніж у заліза (1539⁰ C);

- благородні метали (*Pt, Pb, Ag, Os, Au* та інші), які володіють хімічною інертністю;
- уранові метали (*U, Th, Ra*) – актиноїди, які використовують в атомній техніці;
- рідкоземельні метали (*PЗМ*) – лантаноїди (*Ce, Pr, Nd, Sm* та інші) і схожі ними ітрій і скандій, які застосовують як присадки до різних сплавів. Такі метали розповсюджені в земній корі порівняно рідко, утворюють нерозчинні оксиди чи, застарілою мовою, – землі. Звідси й виникла назва – рідкоземельні;
- лужні метали (*Li, Na, K*), які використовують у якості теплоносіїв у атомних реакторах.

1.5. Кристалічна будова, анізотропія, алотропія

У величезному ряду матеріалів, з незапам'ятних часів відомих людині і широко використовуваних ними в своєму житті і діяльності, метали завжди займали особливе місце.

Підтвердження цьому і в назвах епох (золоте, срібне, бронзове, залізне століття), на які греки ділили історію людства, і в археологічних знахідках металевих виробів (ковані мідні прикраси, сільськогосподарські знаряддя), і в повсякденному використанні металів і сплавів в сучасній техніці.

Причина цього – в особливих властивостях металів, що вигідно відрізняють їх від інших матеріалів і роблять у багатьох випадках незамінними.

Метали – один з класів конструкційних матеріалів, що характеризується визначеним набором властивостей:

- «металевий блиск» (хороша відбивна здатність);
- пластичність;
- висока теплопровідність;
- висока електропровідність.

Дані властивості обумовлені особливостями будови металів. Згідно теорії металевого стану, атоми металічних елементів складаються з позитивних ядер, навколо яких по орбітам, подібно планетам сонячної системи, обертаються електрони. Позитивний заряд ядра рівний негативному зарядові електронів. На зовнішній орбіті число електронів невелике і вони слабо пов'язані з ядром.

При об'єднанні таких атомів у метал зовнішні електрони відриваються від своїх ядер і мають можливість переміщатися по всьому об'єму металу, подібно молекулам газу, тобто належати цілій сукупності атомів. Таким чином, пластичність, теплопровідність і електропровідність забезпечуються наявністю «електронного газу».

В металах атоми розташовуються закономірно, утворюючи правильну кристалічну ґратку, що відповідає мінімальній енергії взаємодії атомів. Кристалічну ґратку слід представляти як проведені в просторі у напрямі трьох осей координат уявні прямі лінії, що сполучають найближчі атоми і проходять через їх центри, біля яких вони здійснюють коливальні рухи. Проведені лінії утворюють об'ємні фігури правильної геометричної форми. Іншими словами, кристалічна решітка – це уявні просторові ґрати, у вузлах яких розташовуються частинки, створюючи тверде тіло.

Найменший об'єм кристала, що дає уявлення про атомну структуру металу у всьому об'ємі, називається ***елементарною кристалічною коміркою***.

Елементарна комірка – елемент об'єму з мінімального числа атомів, багатократним перенесенням якого в просторі можна побудувати весь кристал. Елементарна комірка (рис. 1.23) характеризує особливості будови кристала.

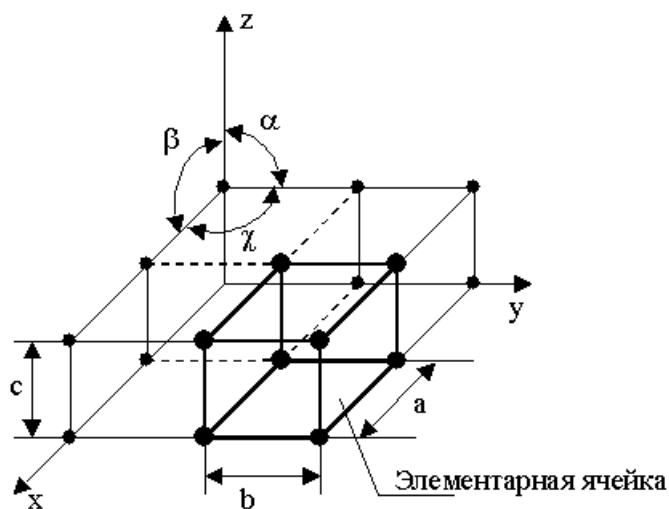


Рис. 1.23. Схема кристалічної решітки

Математик Браве виділив 14 типів кристалічних решіток, але для металів характерні три (рис. 1.24):

1. кубічна об'ємноцентрована (ОЦК);
2. кубічна гранецентрована (ГЦК);
3. гексагональна щільно упакована (ГЩУ).

Основними характеристиками кристалічних ґраток є:

1) *період ґратки* a і c - відстані між центрами найближчих атомів. Вимірюється ангстремами ($1\text{Å} = 10^{-10}$ м), кілоїксами ($1\text{kX} = 1,00202 \text{Å}$) і нанометрами ($1\text{нм} = 10^{-9}$ м). Для більшості металів період ґратки складає 0,1 - 0,7 нм;

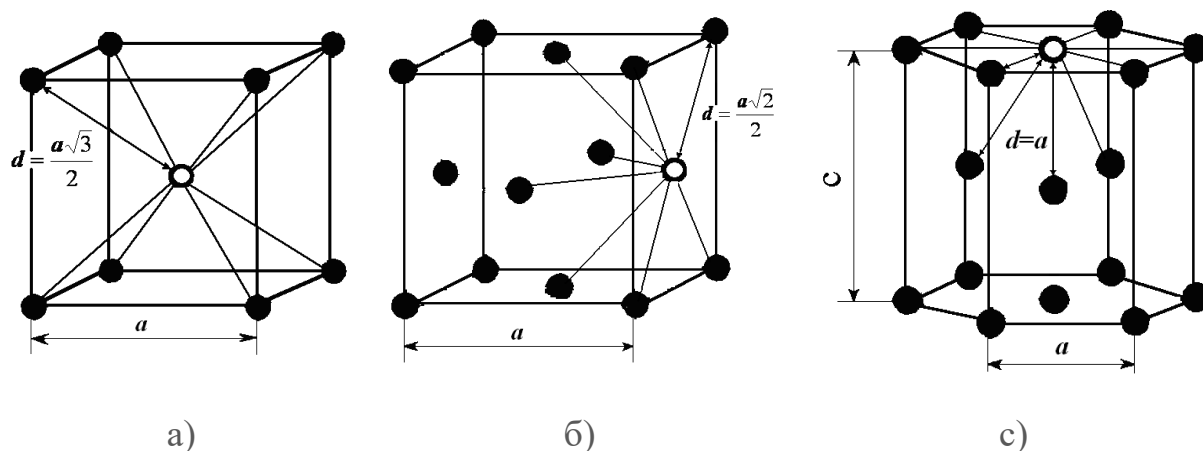


Рис. 1.24. Елементарні кристалічні комірки: а - ОЦК; б - ГЦК; с - ГЩУ

2) **координаційне число** - число атомів, що знаходяться на найближчій і рівній відстані від даного (базового) атома. Чим воно вище, тим більше щільність упаковки атомів. Для кубічної комірки координаційне число позначається буквою **K**, а гексагональної - **G**.

На рис. 1.24 базовий атом висвітлений. Як видно (рис. 1.24), для **ОЦК** гратки мінімальна відстань між атомами $d = \frac{a\sqrt{3}}{2}$ (іншими словами d є діаметр атома). На такій відстані знаходиться 8 атомів, тобто координаційне число **ОЦК** гратки рівне 8. Воно позначається **K8**.

Для **ГЦК**-гратки (рис. 1.24, б) мінімальна відстань між атомами $d = \frac{a\sqrt{2}}{2}$.

На такій відстані знаходяться 12 атомів, тобто координаційне число для **ГЦК** - гратки - **K12**.

Для **ГШУ**-гратки (рис. 1.24, в) її періоди по осям a й c не дорівнюють один одному. Тому відношення не дорівнює 1. Ідеальне відношення $c/a = 1,633$. Як видно з рис. 1.24 в – мінімальна відстань між атомами, тобто діаметр атома d , дорівнює періоду гратки по осі a : $d = a$. Як видно з мал. 2.2, в, на такій відстані знаходяться 12 атомів, тобто координаційне число гексагональної щільно упакованої гратки – **G12**;

3) **базис** – це кількість атомів, що доводиться на одну елементарну комірку, позначається буквою n .

На одну елементарну комірку **ОЦК**-гратки припадає 2 атоми ($n=2$): один в центрі куба, а інший вносять атоми, розташовані у вершинах куба. Кожен атом у вершині куба одночасно належить восьми елементарним коміркам, що примикають до нього, і на одну елементарну комірку доводиться лише $1/8$ частина атома. В цілому на кожну елементарну комірку доводиться $n=(1/8)*8=1$ атом. Координаційне число розраховується для базового центрального атома і відповідає **K8** (рис. 1.24, а).

На одну елементарну комірку **ГЦК** припадає 4 атоми ($n=4$), з них один вносять атоми у вершинах куба, а три сумарно вносять атоми, що

знаходяться на середині грані, оскільки кожен з таких атомів належить двом коміркам $(1/2)*6=3$. Координаційне число розраховується для базового атома, розташованого в центрі грані, і відповідає $K12$ (рис. 1.24, б).

На одну елементарну комірку $\GammaЦУ$ -гратки доводиться шість атомів ($n=6$), з них три знаходяться усередині комірки. Два атоми в центрі граней дають один атом $((1/2)*2 = 1)$, а дванадцять вершинних атомів – два атоми $((1/6)*12 = 2)$. Координаційне число розраховується для базового атома, розташованого усередині грані, і відповідає $\Gamma12$ (рис. 1.24, в).

4) **щільність упакування** або коефіцієнт компактності Q атомів в кристалічній гратці – об'єм, зайнятий атомами, які умовно розглядаються як жорсткі кулі. Щільність упаковки визначають як відношення об'єму, зайнятого атомами, до об'єму елементарної комірки

$$Q = (V_{am}/V_{e.k.}). \quad (1.3)$$

Приклад. Знайдемо коефіцієнт компактності для $ОЦК$ -гратки. Радіус R атома, рівний половині діаметра, дорівнює (рис. 1.24, а):

$$R = \frac{a\sqrt{3}}{4}. \quad (1.4)$$

Об'єм атома, який вважаємо кулею, дорівнює

$$V = \frac{4\pi R^3}{3}. \quad (1.5)$$

Пам'ятаємо, що базис $ОЦК$ -гратки $n = 2$, тобто в елементарній комірці знаходяться 2 атоми. Тому об'єм зайнятий атомами V_{am} складає $2V$:

$$V_{am} = 2V. \quad (1.6)$$

Комбінуючи формули (1.4) – (1.6), отримаємо:

$$V_{am.} = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{a\sqrt{3}}{4} \right)^3 = \frac{8 \cdot 3,14}{3} \frac{3\sqrt{3}a^3}{64} \cong 0,679a^3. \quad (1.7)$$

Об'єм елементарної кубічної комірки

$$V_{e.k.} = a^3. \quad (1.8)$$

З формул (1.7) і (1.8) маємо

$$Q = \frac{V_{am.}}{V_{e.k.}} = \frac{0,679a^3}{a^3} \cong 0,68. \quad (1.9)$$

Тобто щільність упаковки атомів в *ОЦК*-гратці складає 0,68 або 68%.

Аналогічні розрахунки для *ГЦК* і *ГЦУ*-граток показують, що щільність упаковки атомів вищезгаданих граток складає 0,74 або 74%. Таким чином, *ГЦК* і *ГЦУ*-гратки є найбільш упакованими.

Поняття про анізотропію. Властивості тіла залежать від природи атомів, з яких воно складається, і від сили взаємодії між цими атомами. Сили взаємодії між атомами в значній мірі визначаються відстанями між ними. У аморфних тілах з хаотичним розташуванням атомів в просторі відстані між атомами в різних напрямках рівні, отже, властивості будуть однакові, тобто аморфні тіла *ізотропні*.

У кристалічних тілах атоми правильно розташовуються в просторі, причому по різних напрямках відстані між атомами неоднакові, що зумовлює істотні відмінності в силах взаємодії між ними, і в кінцевому результаті, різні властивості. Залежність властивостей від напрямку називається *анізотропією*.

Щоб зрозуміти явище анізотропії, необхідно виділити кристалографічні площини і кристалографічні напрями в кристалі.

Площина, що проходить через вузли кристалічної решітки, називається *кристалографічною площиною*.

Пряма, що проходить через вузли кристалічної решітки, називається *кристалографічним напрямом*.

Для позначення кристалографічних площин і напрямів користуються *індексами Міллера*. Щоб встановити індекси Міллера, елементарну комірку вписують в просторову систему координат (осі *X*, *Y*, *Z* – кристалографічні осі). За одиницю вимірювання береться період гратки. Для визначення індексів кристалографічної площини необхідно:

- встановити координати точок перетину площини з осями координат в одиницях періоду гратки;

- взяти обернені значення цих величин;
- привести їх до найменшого цілого кратного.

Набуті значення простих цілих чисел, що не мають загального множника, є індексами Міллера для площини та вказуються в круглих дужках. Іншими словами, індекс по осі показує, на скільки частин площина ділить осьову одиницю по даній осі. Площини, паралельні осі, мають по ній індекс 0. Приклади позначення кристалографічних площин показано на рис. 1.25, а.

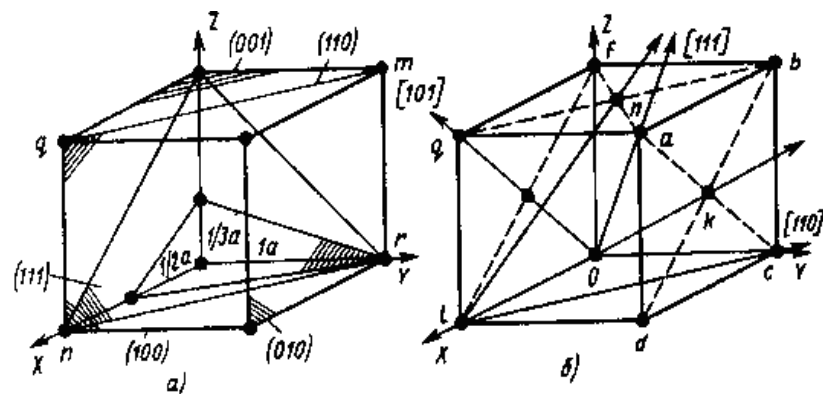


Рис. 1.25. Приклади позначення кристалографічних площин (а) і кристалографічних напрямів (б)

Орієнтація прямої визначається координатами двох точок. Для визначення індексів кристалографічного напрямку необхідно:

- одну точку напрямку сумістити з початком координат;
- встановити координати будь-якої іншої точки, лежачої на прямій, в одиницях періоду ґрати;
- привести відношення цих координат до відношення трьох найменших цілих чисел.

Індекси кристалографічних напрямів вказуються в квадратних дужках, наприклад, – $[111]$. У кубічних ґратах індекси напрямку, перпендикулярного площині (hkl) мають ті ж індекси $[hkl]$. Приклади позначення кристалографічних напрямів показані на рис. 1.25, б.

Алотропія або поліморфні перетворення. Здатність деяких металів існувати в різних кристалічних формах залежно від зовнішніх умов (тиск, температура) називається *алотропією або поліморфізмом*.

Кожен вид ґратки є *алотропічною видозміною* або *модифікацією*.

Прикладом алотропічної видозміни залежно від температури є залізо (Fe).

$Fe: t < 911^{\circ} C - \text{ОЦК} - Fe_{\alpha};$

$911^{\circ} C < t < 1392^{\circ} C \text{ ГЦК} - Fe_{\gamma};$

$1392^{\circ} C < t < 1539^{\circ} C - \text{ОЦК} - Fe_{\delta}$ (високотемпературне Fe_{α})

Перетворення однієї модифікації в іншу протікає при постійній температурі і супроводжується тепловим ефектом. Видозміни елементу позначається буквами грецького алфавіту у вигляді індексу біля основного позначення металу.

Прикладом алотропічної видозміни, обумовленої зміною тиску, є вуглець: при низькому тиску утворюється графіт, а при високому – алмаз.

Використовуючи явище поліморфізму, можна зміцнювати і послаблювати сплави за допомогою термічної обробки.

Магнітні перетворення. Деякі метали намагнічуються під дією магнітного поля. Після видалення магнітного поля вони володіють залишковим магнетизмом. Це явище вперше виявлене на залізі і одержало назву феромагнетизму. До феромагнетиків відносяться залізо, кобальт, нікель і деякі інші метали.

При нагріві феромагнітні властивості металу зменшуються поступово: спочатку слабо, потім різко, і при визначеній температурі (точка Кюрі) зникають (точка Кюрі для заліза складає $768^{\circ} C$). Вище за цю температуру метали стають парамагнетиками. Магнітні перетворення не пов'язані із зміною кристалічної решітки або мікроструктури, вони обумовлені змінами в характері між-електронної взаємодії.

1.6 Контрольні завдання

1. Проаналізуйте елементарні комірки різних типів кристалічних ґраток і розташування в них атомів (рисунок 1.24). Намалювати ОЦК, ГЦК, і гексагональних металів.
2. Визначити базис, координаційне число і коефіцієнт компактності для кожної з указаних вище ґраток. При обчисленні об'єму атомів вважати їх кульками. Атомний радіус дорівнює половині найменшій відстані між атомами в їх кристалічній ґратці (рисунок 1.24).
3. Результати обчислень занести в таблицю. Зробити висновки.

Кристалічна ґратка	Період	Базис (n)	Координаційне число	Коефіцієнт компактності
ОЦК				
ГЦК				
ГПУ				
Гексагональна				

Рекомендована література

1. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник. Херсон: Олді-плюс. Київ: Видавництво Ліра- К. 2013. 612 с.
<https://www.yakaboo.ua/materialoznavstvo-pidruchnik.html#tab-description>
2. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали. Навчальний посібник. Львів: «Магнолія-2006». 242 с.
3. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єрьоменко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій. Х.: УЦЗУ. 2008. 136 с.
4. Леонт'єв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ. 2013. 122 с.

РОЗДІЛ 2. КРИСТАЛІЗАЦІЯ І БУДОВА РЕАЛЬНИХ МЕТАЛІВ.

2.1. Дефекти кристалічної будови та їх класифікація.

З рідкого розплаву можна виростити монокристали. Їх, зазвичай, використовують в лабораторіях для вивчення властивостей тієї чи іншої речовини. Metали і сплави, одержані в звичайних умовах, складаються з великої кількості кристалів, тобто, мають полікристалічну будову. Ці кристали називаються зернами. Вони мають неправильну форму, різноманітно орієнтовані в просторі. Кожне зерно має своє орієнтування кристалічної ґратки, відмінне від орієнтування сусідніх зерен, внаслідок чого властивості реальних металів усереднюються і явища анізотропії не спостерігається.

У кристалічній ґратці реальних металів є різні дефекти (недосконалість), які порушують зв'язки між атомами і роблять вплив на властивості металів. Розрізняють такі структурні недосконалості:

- точкові – малі у всіх трьох вимірюваннях;
- лінійні – малі в двох вимірюваннях і скільки завгодно протяжні в третьому;
- поверхневі – малі в одному вимірюванні;
- об'ємні – великі у всіх трьох напрямках.

Точкові дефекти. Однією з поширеної недосконалості кристалічної будови є наявність точкових дефектів: вакансій, дислокованих атомів і домішок (рис. 2.1).

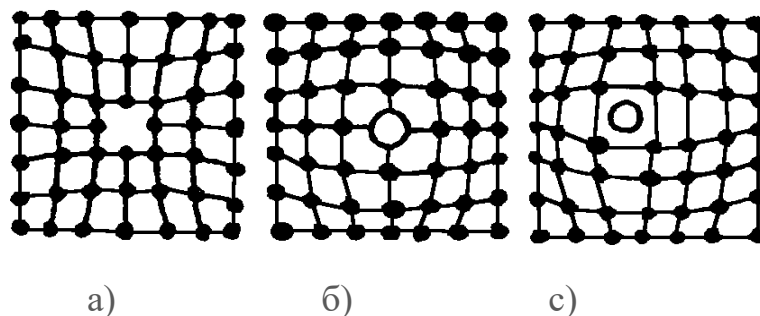


Рис. 2.1. Точкові дефекти

Вакансія – відсутність атомів у вузлах кристалічної решітки, «дірки», які утворилися в результаті різних причин. Утворюються під час переходу атомів з поверхні в навколишнє середовище або з вузлів ґратки на поверхню (межі зерен, порожнечі, тріщини і т.д.), в результаті пластичної деформації, при бомбардуванні тіла атомами або частинками високих енергій (опромінювання в циклотроні або нейтронного опромінювання в ядерному реакторі). Концентрація вакансій в значній мірі визначається температурою тіла. Переміщуючись по кристалу, одиночні вакансії можуть зустрічатися і об'єднуватися в дивакансії.

Дислокований атом – це атом, що вийшов з вузла ґратки і зайняв місце в міжвузловині. Концентрація дислокованих атомів значно менша, ніж вакансій, оскільки для їх утворення потрібні істотні витрати енергії. При цьому на місці атома, що перемістився, утворюється вакансія.

Домішкові атоми завжди присутні в металі, оскільки практично неможливо виплавити хімічно чистий метал. Вони можуть мати розміри більші або менші від розмірів основних атомів і розташовуються у вузлах ґрат або міжвузлах.

Точкові дефекти викликають незначні перекручування ґратки, що може привести до зміни властивостей тіла (електропровідність, магнітні властивості), їх наявність сприяє процесам дифузії і протіканню фазових перетворень в твердому стані. При переміщенні у матеріалі дефекти можуть взаємодіяти.

Лінійні дефекти.

Основними лінійними дефектами є дислокації. Априорне уявлення про дислокації вперше використане в 1934 році Орованам і Тейлором при дослідженні пластичної деформації кристалічних матеріалів для пояснення великої різниці між практичною і теоретичною міцністю металу.

Дислокації – це дефекти кристалічної будови, що є лініями, уподовж і поблизу яких порушене характерне для кристала правильне розташування атомних площин.

Прості види дислокацій – краєві і гвинтові.

Крайова дислокація є лінією, уздовж якої обривається усередині кристала край «зайвої» напівплощини (рис. 2.2)

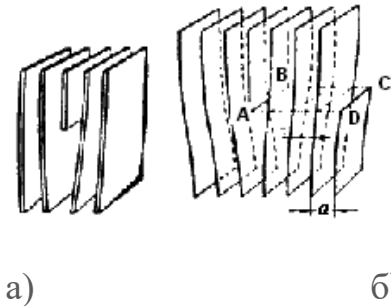


Рис. 2.2. Крайова дислокація (а) і механізм її утворення (б)

Неповна площина називається **екстраплощиною**.

Більшість дислокацій утворюються шляхом зсувного механізму. Її створення можна описати за допомогою наступної операції. Надрізати кристал по площині $ABCD$, зрушити нижню частину щодо верхніх на один період ґрати в напрямі, перпендикулярному AB , а потім знов зближувати атоми на краях розрізу внизу (рис. 2.2).

Найбільші спотворення в розташуванні атомів в кристалі мають місце поблизу нижнього краю екстраплощини. Управо і ліворуч від краю екстраплощини ці спотворення малі (декілька періодів ґратки), а уздовж краю екстраплощини спотворення тягнуться через весь кристал і можуть бути дуже великі (тисячі періодів ґратки) (рис. 2.3).

Якщо екстраплощина знаходиться у верхній частині кристала, то крайова дислокація позитивна (\perp), якщо в нижній – то негативна (\top). Дислокації одного знаку відштовхуються, а протилежні притягуються.

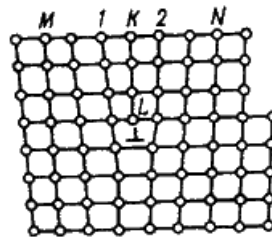


Рис. 2.3. Перекручування в кристалічній ґратці за наявності крайової

дислокації

Інший тип дислокацій був описаний Бюргерсом і одержав назву *гвинтова дислокація*.

Гвинтова дислокація одержана за допомогою часткового зсуву по площині Q навколо лінії EF (рис. 2.4) На поверхні кристала утворюється сходинка, що проходить від точки E до краю кристала. Таке часткове зрушення порушує паралельність атомних шарів, кристал перетворюється на одну атомну площину, закручену по гвинту у вигляді порожнистого гелікоїда навколо лінії EF , яка представляє межу, що відокремлює частину площини ковзання, де зрушення вже відбулося, від частини, де зрушення не починалося. Уздовж лінії EF спостерігається макроскопічний характер області недосконалості, в інших напрямках її розміри складають декілька періодів.

Якщо перехід від верхніх горизонтів до нижніх здійснюється поворотом за годинниковою стрілкою, то дислокація *права*, а якщо поворотом проти годинникової стрілки – *ліва*.

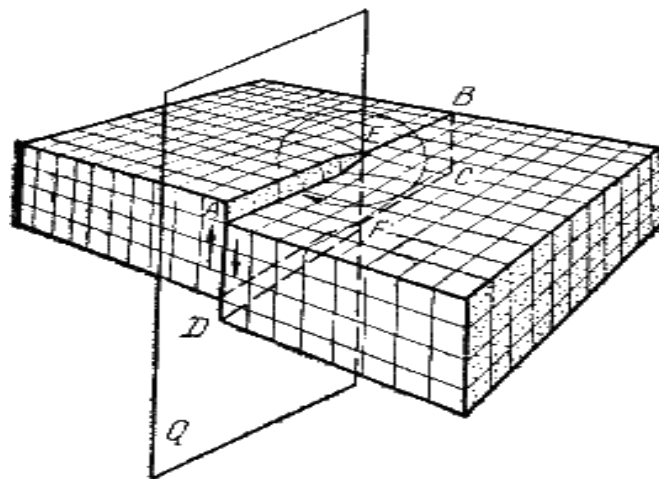


Рис. 2.4. Механізм утворення гвинтової дислокації

Гвинтова дислокація не пов'язана з якою-небудь площиною ковзання, вона може переміщатися по будь-якій площині, що проходить через лінію дислокації. Вакансії і дислоковані атоми до гвинтової дислокації не стікають. В процесі кристалізації атоми речовини, що випали з пари або розчину, легко

приєднуються до сходинки, що приводить до спірального механізму зростання кристала. Лінії дислокацій не можуть обриватися усередині кристала, вони повинні або бути замкнутими, утворюючи петлю, або розгалужуватися на декілька дислокацій, або виходити на поверхню кристала. Структура дислокацій матеріалу характеризується **щільністю дислокацій**. Щільність дислокацій у кристалі визначається як середнє число ліній дислокацій, що перетинають усередині тіла майданчик площею 1 м^2 , або як сумарна довжина ліній дислокацій в об'ємі 1 м^3

$$\rho = \frac{\sum l}{V} (\text{см}^{-2}; \text{м}^{-2}) \quad (2.1.)$$

Щільність дислокацій змінюється в широких межах і залежить від стану матеріалу. Після ретельного відпалу щільність дислокацій складає 10^5 - 10^7 м^{-2} у кристалах з сильно деформованою кристалічною ґраткою щільність дислокацій досягає 10^{15} - 10^{16} м^{-2} . Щільність дислокації значною мірою визначає пластичність і міцність матеріалу (рис. 2.5)

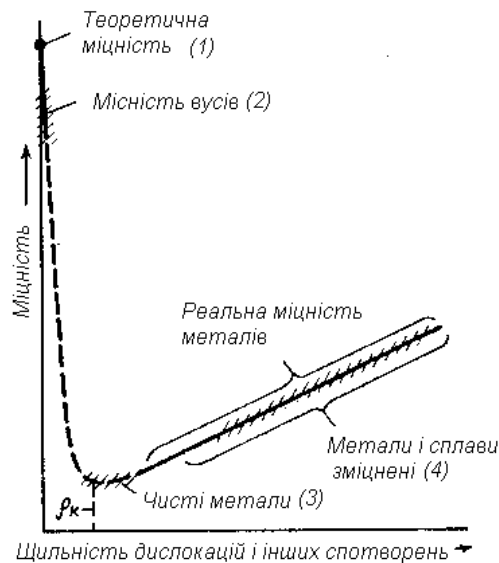


Рис. 2.5. Вплив щільності дислокацій на міцність

Мінімальна міцність визначається критичною ρ_k щільністю дислокацій $\rho_k = 10^5 \dots 10^7 \text{ м}^{-2}$.

Якщо щільність менше значення ρ_k , то й опір деформації різко зростає, а міцність наближається до теоретичної. Підвищення міцності досягається створенням металу з бездефектною структурою, а також підвищенням

щільності дислокацій, що затрудняє їх рух. В даний час створені кристали без дефектів – ниткоподібні кристали завдовжки до 2 мм, товщиною 0,5...20 мкм – “вуса“ з міцністю, близькою до теоретичної: для заліза $\sigma_B=13000$ МПа, для міді $\sigma_B = 30000$ МПа. При зміцненні металів збільшенням щільності дислокацій, вона не повинна перевищувати значень $\rho=10^{15}\dots10^{16}$ м⁻². Інакше утворюються тріщини.

Дислокації впливають не тільки на міцність і пластичність, але і на інші властивості кристалів. Із збільшенням щільності дислокацій зростає внутрішнє тертя, змінюються оптичні властивості, підвищується електроопір металу. Дислокації збільшують середню швидкість дифузії в кристалі, прискорюють старіння і інші процеси. Дислокації зменшують хімічну стійкість, тому в результаті обробки поверхні кристала спеціальними речовинами в місцях виходу дислокацій утворюються ямки.

Дислокації утворюються при твердінні кристалів з розплаву або газоподібної фази, при зрощенні блоків з малими кутами розорієнтування. При переміщенні всередині кристала вакансій вони концентруються, утворюючи порожнини у вигляді дисків. Якщо такі диски великі, то енергетично вигідно “закриття” їх з утворенням по краю диска краєвої дислокації. Утворюються дислокації при пластичній деформації, в процесі кристалізації, при термічній обробці.

Поверхневі, або двовимірні, дефекти відносяться вже до розряду макроскопічних – це межі розділу і дефекти упаковки. Межі розділу є перехідною областю шириною до декількох десятків міжатомних відстаней. У цій області ґратка одного зерна, що має певну кристалографічну орієнтацію, переходить в ґратку іншого зерна, що має іншу кристалографічну орієнтацію (рис. 2.6). Тому на межі зерна спостерігається перекручена кристалічна будова і більш високий енергетичний стан. Крім того, по межах зерен в технічних металах скупчуються домішки, що ще більше порушує правильний порядок розташування атомів.

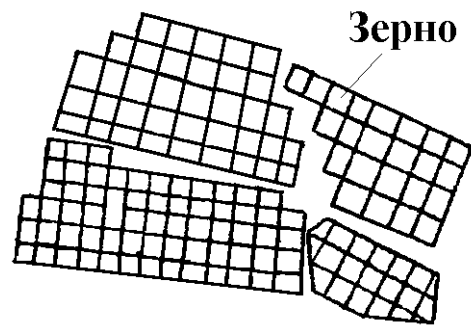


Рис. 2.6. *Схема полікристалічної будови кристала*

Межі між зернами називають великокутовими, оскільки кристалографічні напрями в сусідніх зернах утворюють кути, що досягають декількох десятків градусів.

Існує ще одне джерело поверхневого спотворення кристалічної будови кристала. Якщо розглянути зерно при великому збільшенні, то виявляється, що всередині нього є ділянки з розмірами 0,1-1 мкм (їх називають субзернами), які розорієнтовані один відносно одного на кут $15-30^{\circ}$ (малокутові межі). Така структура називається блоковою або мозаїчною (рис. 2.7).

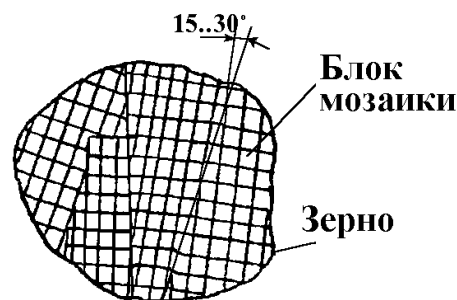


Рис. 2.7. *Схема блокової (мозаїчної) структури зерна*

Властивості металів залежатимуть як від розмірів блоків і зерен, так і від їх взаємної орієнтації.

Тривимірні або об'ємні дефекти – це тріщини, дендрити, включення інших кристалів, газів, рідин і т.д., а також порожнечі. Об'ємні дефекти – це макродефекти, які є ізольованими в кристалі ділянками об'єму, що істотно перевищують об'єм елементарної комірки.

Дендрити – це деревовидні кристалічні утворення, що виявляються в монокристалах і злитках металів, напівметалів, напівпровідників і їх сплавів (рис 2.8).

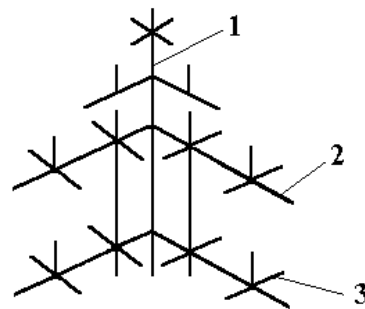


Рис. 2.8. Схема будови дендриту: 1, 2, 3 - осі першого, другого і третього порядку

Максимальна швидкість росту кристалів спостерігається по тих площинах і напрямках, що мають найбільшу щільність упаковки атомів. В результаті зростають довгі гілки, які називають осями першого порядку. На осях першого порядку з'являються і починають рости гілки другого порядку, від яких відгалужуються осі третього порядку. В останню чергу йде кристалізація в ділянках між осями дендриту.

Включення – це об'єм, геометрично ізольований в кристалі, заповнений речовиною, що відрізняється від речовини основного кристала. Включенням може бути бульбашка газу або рідини, частинка іншого кристала, відмінного від основного по речовинному або фазовому складу.

До утворення пор і порожнеч може привести скупчення багатьох вакансій.

2.2. Механізм і закономірності кристалізації металів.

Будь-яка речовина може знаходитися в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому, газоподібному. Речовина може переходити з одного стану в інший, якщо їй передати певну кількість теплоти. При цьому згідно до другого закону термодинаміки, певна частина теплоти іде на зростання

ентропії речовини і тому не може бути використана для здійснення корисної роботи. Таку частку теплоти часто називають *зв'язаною енергією*. Інша частина теплоти може бути використана для здійснення роботи. Тому цю частку теплоти називають *вільною енергією* або енергією Гіббса G . Енергія Гіббса названа на честь одного із засновників термодинаміки, американського фізика-теоретика Джозайя Уїлларда Гіббса. Характер зміни енергії Гіббса дозволяє судити про принципову можливість здійснення процесу. При $\Delta G < 0$ процес може протікати, при $\Delta G > 0$ процес протікати не може (іншими словами, якщо енергія Гіббса в початковому стані системи більша за енергію в кінцевому, то процес принципово може протікати, якщо навпаки – не може). Якщо ж $\Delta G = 0$, то система знаходиться в стані хімічної рівноваги.

Часто використовують замість вільної енергії G хімічний потенціал μ . *Хімічним потенціалом* μ називається відношення вільної енергії до числа Авогадро N_A :

$$\mu = \frac{G}{N_A}.$$

Із зміною зовнішніх умов вільна енергія змінюється по складному закону, різному для рідкого і кристалічного станів. Характер зміни вільної енергії рідкого і твердого станів із зміною температури показаний на рис. 2.9.

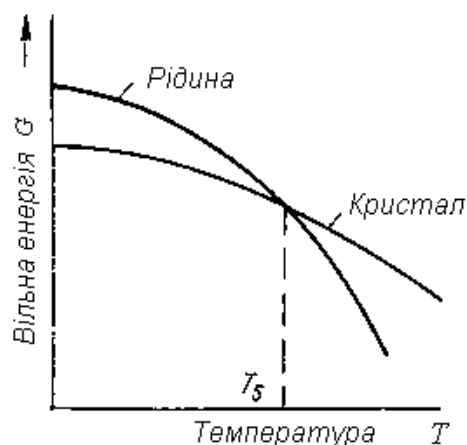


Рис. 2.9. Зміна вільної енергії залежно від температури

Відповідно до цієї схеми, вище за температуру T_S речовина повинна знаходитися в рідкому стані, а нижче за T_S – в твердому.

При температурі рівній T_S рідка і тверда фаза володіють однаковою енергією, метал в обох станах знаходиться в рівновазі, тому дві фази можуть існувати одночасно нескінченно довго. Температура T_S – **рівноважна** або **теоретична температура кристалізації**.

Для початку процесу кристалізації необхідно, щоб процес був термодинамічно вигідний системі і супроводжувався зменшенням вільної енергії системи. Це можливо при охолодженні рідини нижче за температуру T_S . Температура, при якій практично починається кристалізація, називається **фактичною температурою кристалізації**.

Охолодження рідини нижче за рівноважну температуру кристалізації називається **переохолодженням**, яке характеризується **ступенем переохолодження (ΔT)**:

$$\Delta T = T_{теор} - T_{кр.}$$

Ступінь переохолодження залежить від природи металу, від ступеня його забрудненості (чим чистіший метал, тим більша ступінь переохолодження), від швидкості охолодження (чим вища швидкість охолодження, тим більша ступінь переохолодження); зазвичай, ступінь переохолодження не перевищує 10-30⁰С.

Розглянемо перехід металу з рідкого стану в твердий.

При нагріванні всіх кристалічних тіл спостерігається чітка межа переходу з твердого стану в рідкий. Така ж межа існує при переході з рідкого стану в твердий.

Кристалізація – це процес переходу речовини з рідкого стану в твердий при постійній температурі. Кристалізація протікає в умовах, коли система переходить до термодинамічно стійкішого стану з мінімумом вільної енергії. Процес переходу металу з рідкого стану в кристалічний можна зобразити кривими в координатах час – температура. Крива охолодження чистого металу представлена на рис. 2.10.

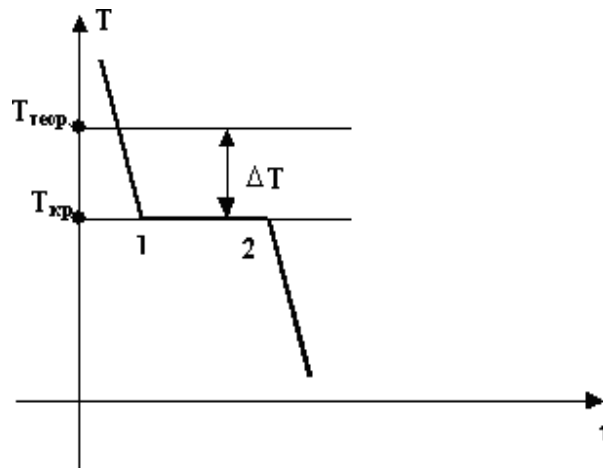


Рис. 2.10. Крива охолодження чистого металу.

$T_{теор.}$ – теоретична температура кристалізації;

$T_{кр.}$ – фактична температура кристалізації.

Процес кристалізації чистого металу. До точки 1 охолоджується метал в рідкому стані, процес супроводжується плавним зниженням температури. На ділянці 1 – 2 йде процес кристалізації, що супроводжується виділенням тепла, яке називається *прихованою теплотою кристалізації*. Воно компенсує розсіювання теплоти в простір, і тому температура залишається постійною. Після закінчення кристалізації в точці 2 температура знову починає знижуватися, метал охолоджується в твердому стані.

Як вперше встановив Д.К. Чернов, процес кристалізації починається з утворення кристалічних зародків – *центрів кристалізації* і продовжується при їх рості. Для початку їх зростання необхідне зменшення вільної енергії металу, інакше зародок розчиняється. Мінімальний розмір здатного до зростання зародка називається *критичним розміром*, а зародок – стійким.

Перехід з рідкого стану в кристалічний вимагає витрати енергії на утворення поверхні розділу рідина – кристал. Процес кристалізації здійснюватиметься, коли вигащ від переходу в твердий стан більше втрати енергії на утворення поверхні розділу. Залежність вільної енергії системи від розміру зародка твердої фази представлена на рис. 2.11.

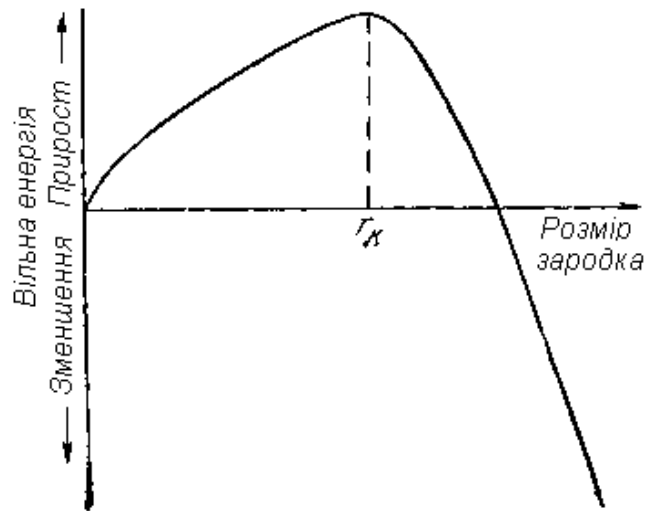


Рис. 2.11. Залежність енергії системи від розміру зародка твердої фази

Зародки з розмірами рівними та більшими за критичний ростуть із зменшенням енергії і тому здатні до існування.

Механізм кристалізації представлений на рис. 2.12.

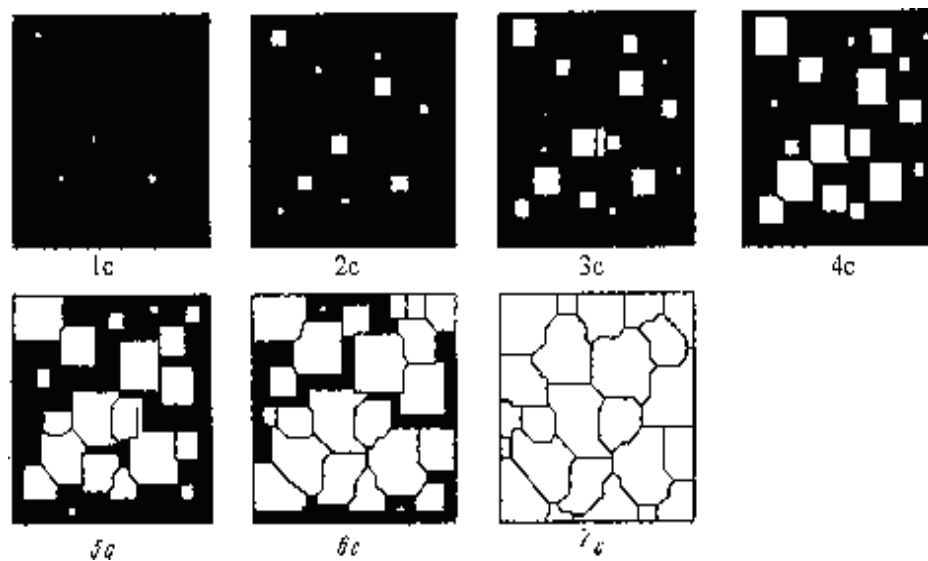


Рис. 2.12. Модель процесу кристалізації

Центри кристалізації утворюються в початковій фазі незалежно один від одного у випадкових місцях. Спочатку кристали мають правильну форму, але по мірі зіткнення і зрощення з іншими кристалами форма порушується. Такі кристали неправильної форми називаються зернами. Зростання зерен продовжується в напрямках, де є вільний доступ живлячого середовища. Після закінчення кристалізації маємо полікристалічне тіло.

Якісна схема процесу кристалізації може бути кількісно представлена кінетичною кривою (рис. 2.13).

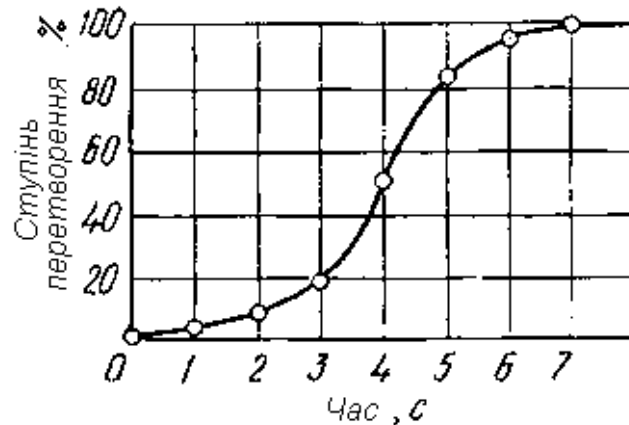


Рис. 2.13. Кінетична крива процесу кристалізації

Процес спочатку прискорюється, доки зіткнення кристалів не починає перешкоджати їх зростанню. Об'єм рідкої фази, в якій утворюються кристали, зменшується. Після кристалізації 50-ти відсотків об'єму металу, швидкість кристалізації зменшується.

Таким чином, процес кристалізації складається з утворення центрів кристалізації і зростання кристалів з цих центрів.

У свою чергу, число центрів кристалізації (ч.ц.) і швидкість росту кристалів (ш.р.) залежать від ступеня переохолодження (рис. 2.14).

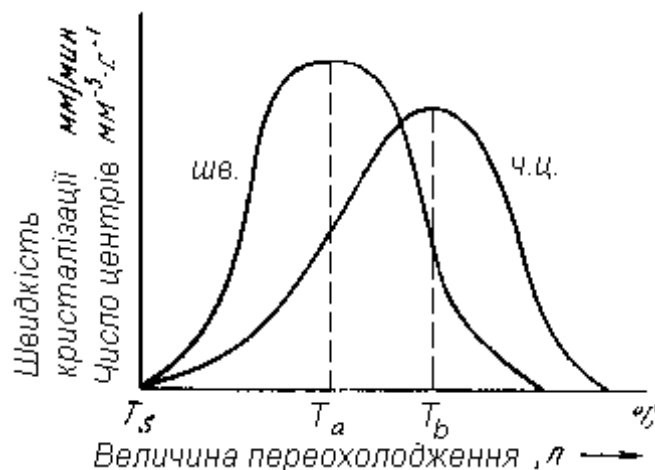


Рис. 2.14. Залежність числа центрів кристалізації (а) і швидкості росту кристалів (б) від ступеня переохолодження

Розміри кристалів, що утворилися, залежать від співвідношення при температурі кристалізації числа центрів кристалізації і швидкості росту кристалів.

При рівноважній температурі кристалізації T_S число центрів кристалізації, що утворилися, і швидкість їх росту дорівнюють нулю, тому процесу кристалізації не відбувається.

Якщо рідину переохолоджувати до температури, що відповідає T_a , то утворюються великі зерна (число центрів, що утворилися, невелике, а швидкість росту – велика).

При переохолодженні до температури, що відповідає T_b , – дрібне зерно (утворюється велике число центрів кристалізації, а швидкість їх росту невелика).

Якщо метал дуже сильно переохолоджувати, то число центрів і швидкість росту кристалів рівні нулю, рідина не кристалізується, утворюється аморфне тіло. Для металів, які володіють малою схильністю до переохолодження, експериментально виявляються тільки висхідні гілки кривих.

2.3. Отримання дрібнозернистої структури.

Будова металевого злитка.

Отримання дрібнозернистої структури. Прагнуть до отримання дрібнозернистої структури, тому що така структура забезпечує більш високі значення механічних характеристик, таких як міцність, пластичність, корозійна стійкість. Оптимальними умовами для цього є:

- 1) *максимальне число центрів кристалізації;*
- 2) *мала швидкість росту кристалів.*

Розмір зерен при кристалізації залежить і від числа частинок нерозчинних домішок, які грають роль готових центрів кристалізації – оксиди, нітриди, сульфіди.

Чим більше частинок, тим дрібніше зерно металу, що кристалізувався.

Стінки виливниць мають нерівності, шорсткості, які збільшують швидкість кристалізації.

Дрібнозернисту структуру можна одержати в результаті *модифікації*, коли в рідкі метали додаються сторонні речовини – *модифікатори*. Модифікатори практично не змінюють хімічного складу сплаву, але при кристалізації викликають подрібнення зерна і тим самим сприяють покращенню механічних властивостей.

При литві злитків і фасонних відливань, наприклад, у якості модифікаторів найчастіше використовують добавки, що утворюють тугоплавкі сполуки (карбіди, нітриди, оксиди), які кристалізуються в першу чергу. Виділяючись у вигляді найдрібніших частинок, вони служать зародками кристалізації.

Інший механізм модифікації діє при застосуванні поверхнево-активних речовин, які розчиняються в металі, і, осідаючи на поверхні кристалів, що ростуть, перешкоджають їх зростанню.

Будова сталевих злитків. Схема сталевих злитків, дана Черновим Д.К., представлена на рис. 2.15.

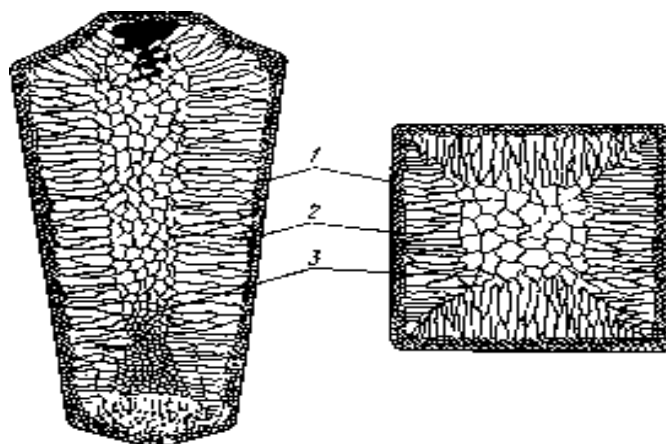


Рис. 2.15. Схема сталевих злитків

Злиток складається з трьох зон:

1. дрібнокристалічна кіркова зона;
2. зона стовпових кристалів;
3. внутрішня зона крупних рівно осьових кристалів.

Кристалізація кіркової зони йде в умовах максимального переохолодження. Швидкість кристалізації визначається великим числом центрів кристалізації. Утворюється дрібнозерниста структура.

Рідкий метал під кірковою зоною знаходиться в умовах меншого переохолодження. Число центрів обмежене і процес кристалізації реалізується за рахунок їх інтенсивного зростання до великого розміру. Зростання кристалів в другій зоні має направлений характер. Вони ростуть перпендикулярно стінкам виливниці, утворюючи деревовидні кристали – дендрити (рис. 2.16). Ростуть дендрити за напрямом, що відповідає найбільшому відводу тепла.

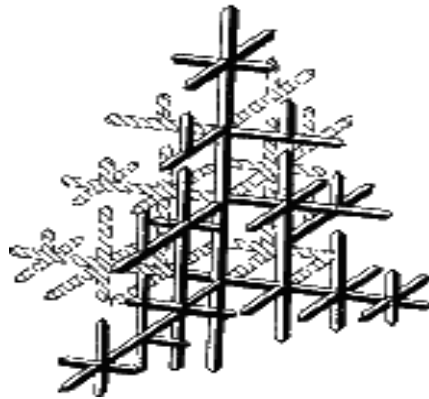


Рис. 2.16. Схема дендриту по Чернову Д.К.

Оскільки відвід тепла від металу, який ще не встиг кристалізуватися, у середині зливка в різні боки вирівнюється, то в центральній зоні утворюються великі дендрити з випадковою орієнтацією.

Зони стовпових кристалів в процесі кристалізації стикаються, це явище називається *транскристалізацією*. Для малопластичних металів і для сталей це явище небажане, оскільки при подальшому вальцюванні, куванні можуть утворюватися тріщини в зоні стику.

У верхній частині зливка утворюється усадкова раковина, яка підлягає відрізу і переплавленню, оскільки метал тут більш рихлий (близько 15...20 % від довжини зливка).

2.4. Визначення хімічного складу, металографічні та фізичні методи дослідження структури

Метали і сплави володіють різноманітними властивостями. Використовуючи один метод дослідження металів, неможливо одержати інформацію про всі властивості.

Використовують декілька методів аналізу.

Визначення хімічного складу.

Використовуються методи кількісного аналізу.

1. Якщо не вимагається великої точності, то використовують *спектральний аналіз*. Спектральний аналіз заснований на розкладанні і дослідженні оптичного спектру електричної дуги або іскри, що штучно порушується між мідним електродом і досліджуваним металом. Запалюється дуга, промінь світла через призми потрапляє в окуляр для аналізу спектру. Колір і концентрація ліній спектру дозволяють визначити вміст хімічних елементів.

Використовуються стаціонарні і переносні стилоскопи.

2. Точніші відомості про склад дає *рентгеноспектральний аналіз*. Він проводиться на мікроаналізаторах. Дозволяє визначити склад фаз сплаву, характеристики дифузійної рухливості атомів. При цьому аналізують інтенсивність і положення рентгенівського випромінювання, яке порушується у рентгенівській трубці, на анод якої наносять досліджувану речовину.

Вивчення структури.

Розрізняють макроструктуру, мікроструктуру і тонку структуру.

1. Макроструктурний аналіз – вивчення будови металів і сплавів неозброєним оком або при невеликому збільшенні, за допомогою лупи. Це здійснюється після попередньої підготовки досліджуваної поверхні (шліфування і травлення спеціальними реактивами).

Макроструктурний аналіз дозволяє виявити і визначити дефекти, що виникли на різних етапах виробництва литих, кованих, штампованих і

вальцьованих заготовок, а також причини руйнування деталей. При цьому встановлюють: вид зламу (в'язкий, крихкий); величину, форму і розташування зерен і дендритів литого металу; дефекти, що порушують суцільність металу (усадкову пористість, газові міхури, раковини, тріщини); хімічну неоднорідність металу, викликану процесами кристалізації або створену термічною і хіміко-термічною обробкою; волокна в деформованому металі.

2. Мікроструктурний аналіз – вивчення поверхні за допомогою світлових мікроскопів при збільшенні – в 50...2000 раз. Дозволяє виявити елементи структури розміром до 0,2 мкм.

Зразки – мікрошліфи з блискучою полірованою поверхнею, оскільки структура розглядається у відображеному світлі. Спостерігаються мікротріщини і неметалічні включення.

Для виявлення мікроструктури поверхню протравлюють реактивами, залежними від складу сплаву. Різні фази протравлюються неоднаково і забарвлюються по різному. Можна виявити форму, розміри і орієнтування зерен, окремі фази і структурні складові.

Окрім світлових мікроскопів використовують електронні мікроскопи з великою розрізнявальною здатністю. При цьому зображення формується за допомогою потоку електронів, що швидко летять. Електронні промені з довжиною хвилі $(0,04...0,12) \cdot 10^{-10}$ м дають можливість розрізняти деталі об'єкту, що за своїми розмірами відповідає міжатомним відстаням.

Просвітлювальні мікроскопи.

Потік електронів проходить крізь об'єкт, що вивчається. Зображення є результатом неоднакового розсіювання електронів на об'єкті. Розрізняють *непрямі* і *прямі* методи дослідження.

При *непрямому* методі вивчають не сам об'єкт, а його відбиток – кварцовий або вугільний зліпок (репліку), що відображає рельєф мікрошліфа, для попередження вторинного випромінювання, що створює картину.

При *прямому* методі вивчають тонку металеву фольгу, товщиною до 300 нм, на просвіт. Фольга одержується безпосередньо з металу, що вивчається.

Растрові мікроскопи. Зображення створюється за рахунок вторинної емісії електронів, що випромінюються поверхнею, на яку падає потік первинних електронів, що безперервно переміщається по цій поверхні. Вивчається безпосередньо поверхня металу. Розрізнявальна здатність дещо нижче, ніж у мікроскопів, що просвічують.

3. Рентгенографічні методи використовуються для вивчення атомно-кристалічної будови твердих тіл (тонка будова), що дозволяють встановлювати зв'язок між хімічним складом, структурою і властивостями тіла, тип твердих розчинів, мікронапружень, концентрацію дефектів, щільність дислокацій.

Фізичні методи дослідження.

1. Термічний аналіз заснований на явищі теплового ефекту. Фазові перетворення в сплавах супроводжуються тепловим ефектом, в результаті на кривих охолодження сплавів при температурах фазових перетворень спостерігаються точки перегину або температурні зупинки. Даний метод дозволяє визначити критичні точки.

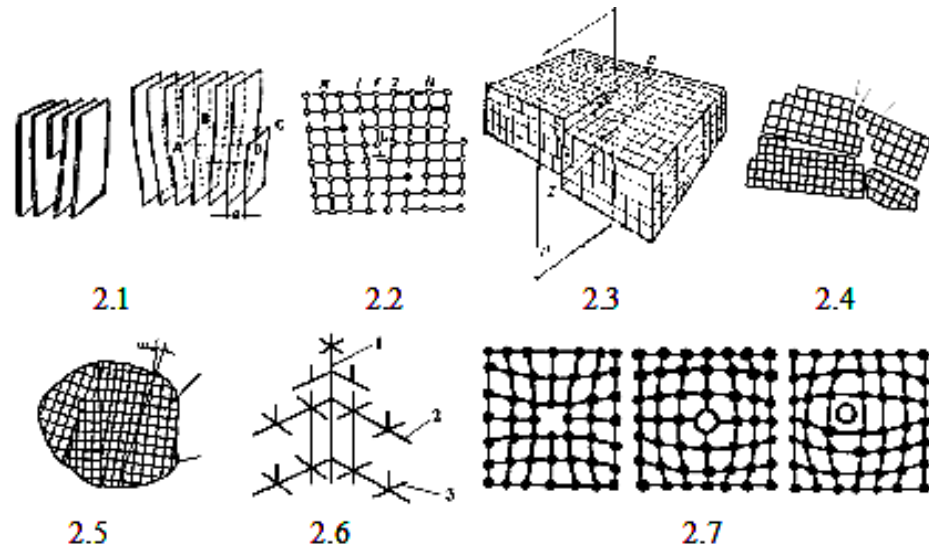
2. Дилатометричний метод. При нагріві металів і сплавів відбувається зміна об'єму і лінійних розмірів – теплове розширення. Якщо зміни обумовлені тільки збільшенням енергії коливань атомів, то при охолодженні розміри відновлюються. При фазових перетвореннях зміни розмірів – незворотні.

Метод дозволяє визначити критичні точки сплавів, температурні інтервали існування фаз, а також вивчати процеси розпаду твердих розчинів.

3. Магнітний аналіз. Використовується для дослідження процесів, пов'язаних з переходом з парамагнітного стану у феромагнітний (або навпаки), причому можлива кількісна оцінка цих процесів.

2.5. Контрольні запитання

1. Вивчити різні види кристалічних дефектів та їх вплив на властивості кристалів.
2. Проаналізувати малюнки від 2.1 до 2.7 і вказати до яких видів дефектів вони відносяться, вкажіть кутові характеристики відповідних дефектів.



Поясніть, як утворюються дислокації, як вони впливають на міцність кристалів, які є способи зміцнення.

3. Розрахуйте задачі.

3.1. Для утворення вакансії в алюмінії потрібна енергія $\approx 0,75$ еВ. Скільки існує вакансій при кімнатній температурі в стану термодинамічної рівноваги? При 550°C ?

Рішення.

Рівноважна кількість вакансій n_v на N атомних вузлів виражається формулою:

$$n_v = N \cdot e^{-E_v/kT}, \quad (1)$$

где E_v – енергія утворення вакансій;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура.

1). Знайдемо кількість вакансій при кімнатній температурі (≈ 300 K).
Відомо, що $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1\text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. З формули (1) знайдемо, що

$$\frac{n_v}{N} = e^{-\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,75}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 310^2}} = e^{-29} = \frac{1}{e^{29}}.$$

Логарифмуючи останню рівність, одержимо

$$\ln \frac{n_v}{N} = -29 \text{ або } 2,4 \cdot \lg \frac{n_v}{N} \approx -29, \text{ або } \lg \frac{n_v}{N} = -12.$$

Звідси одержимо,

$$\text{що } n_v/N \approx 1 \cdot 10^{-12},$$

тобто одна вакансія припадає на 10^{12} атомів.

2). Знайдемо кількість вакансій при температурі

$$550^\circ\text{C} = 550 + 273 = 823\text{K}.$$

Підставимо у формулу (1) відповідні чисельні дані.

Одержимо, що

$$\frac{n_v}{N} = e^{-\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,75}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 823}} = e^{-10,6} = \frac{1}{e^{10,6}}$$

Логарифмуючи останню рівність, одержимо

$$\ln \frac{n_v}{N} = -10,6 \text{ або } 2,4 \cdot \lg \frac{n_v}{N} \approx -10,6, \text{ або } \lg \frac{n_v}{N} = -4,4 \approx -4.$$

Звідси одержимо, що $n_v/N \approx 1 \cdot 10^{-4}$, тобто одна вакансія припадає на 10^4 атомів

3.2. Для утворення дефекту впровадження в алюмінії потрібна енергія E_i біля 3 eВ.

Розрахувати відношення концентрації n_i дефектів впровадження до концентрації n_v вакансій при кімнатній температурі і при 550°C .

3.3. Припустимо, що алюмінієвий зразок швидко охолоджений від температури, близької до точки плавлення (660°C), і всі вакансії, що були при високій температурі, збереглися при кімнатній температурі.

Кількість вакансій при кімнатній температурі перевищує їх рівноважну кількість при кімнатній температурі.

Допустимо, що вакансії «відпалюють» з часом, і у результаті досягається концентрація, рівноважна при кімнатній температурі.

Якщо «відпал» відбувається адіабатично, чи нагріватиметься або охолоджуватиметься тверде тіло? Якщо буде, то наскільки?

3.4. Утворення або зникнення вакансій в твердому тілі викликає зміну його густини. Чи підвищуватиметься або зменшуватиметься густина алюмінію в процесі відпалу при кімнатній температурі? Чи можна зміряти цю зміну за допомогою існуючої експериментальної техніки?

3.5. Через 1 см^2 кристала проходить 10^6 прямолінійних крайових дислокацій ($\rho = 10^6$). На яку відстань переповзе кожна дислокація, якщо нагрівати кристал від 0 до 1000 K? Прийняти $E_v = 1 \text{ eV}$, $a = 2 \text{ ангстрема}$.

Рекомендована література

1. Афтандіянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник. Херсон: Олді-плюс. Київ: Видавництво Ліра- К. 2013. 612 с.
<https://www.yakaboo.ua/materialoznavstvo-pidruchnik.html#tab-description>
2. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали. Навчальний посібник. Львів: «Магнолія-2006». 242 с.
3. Леонт'єв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ. 2013. 122 с.

РОЗДІЛ 3. ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ СПЛАВІВ.

3.1. Основні поняття в теорії сплавів: компоненти, фази, варіантність, правило фаз Гіббса

В техніці використовують, як правило, не чисті метали, а сплави. До найбільш розповсюджених сплавів відносяться сталі, чавуни, силуміни, латуні, бронзи, бабити, дюралюміній. Їх міцність вище міцності чистих металів. Але пластичність металів при додаванні атомів інших елементів, як правило, знижується.

Найпростішим способом отримання сплавів є процес, коли в рідкий метал додаються інші матеріали в твердому або рідкому стані. Інший спосіб отримання сплавів – це спікання порошків різних матеріалів, в процесі якого відбувається взаємна дифузія атомів.

Основні поняття в теорії сплавів.

Система – група тіл, що виділяються для спостереження і вивчення. У металознавстві системами є метали і металеві сплави. Чистий метал є простою однокомпонентною системою, сплав – складною системою, що складається з двох і більш компонентів.

Компоненти – речовини, що створюють фазу системи. У якості компонентів виступають чисті речовини і хімічні сполуки, якщо вони не дисоціюють на складові частини в досліджуваному інтервалі температур.

Фаза – однорідна частина системи, відокремлена від інших частин системи поверхнею розділу, під час переходу через яку структура і властивості різко, стрибкоподібно міняються. Фаза в сплавах може складатися з одного або декількох компонентів. Під *складом фази* мають на увазі відносний зміст компонентів. Тверда фаза має певну атомну будову, ідеальна тверда фаза повинна бути фізично і хімічно однорідною. У сплавах можливі такі фази: рідкі й тверді розчини, хімічні (проміжні) сполуки.

Варіантність (C) (число ступенів свободи) – це число внутрішніх і зовнішніх чинників (температура, тиск, концентрація), які можна змінювати без зміни кількості фаз в системі.

Правило фаз Гіббса. Існує математичний зв'язок між числом компонентів (K), числом фаз (Φ) і варіантністю системи (C). Це *правило фаз* або *закон Гіббса*.

$$C=K-\Phi+2 \quad (5.1.)$$

де C – число ступенів свободи,

K – число компонентів,

Φ – число фаз,

2 – враховує можливість зміни температури й тиску.

Невеликі коливання тиску, що спостерігаються на практиці, не впливають на стан системи. Тому можна прийняти, що всі перетворення відбуваються при постійному тиску. Тоді число змінних у формулі (5.1) зменшиться

$$C=K-\Phi+1 \quad (5.2)$$

де C – число ступенів свободи,

K – число компонентів,

Φ – число фаз,

1 – враховує можливість зміни температури.

Для передбачення поведінки систем за допомогою правила фаз необхідно точно знати число фаз і число незалежних хімічних компонентів, з яких ці фази утворились.

Визначення кількості фаз (Φ). Розглянемо приклади. У системі

$\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$ три фази ($\Phi = 3$). Одну складають всі кристали CaO , другу – всі кристали CaCO_3 , третю – газова фаза CO_2 (або суміш CO_2 з повітрям тощо). У системі $\text{H}_2\text{O}_{\text{лід}} = \text{H}_2\text{O}_{\text{вода}} = \text{H}_2\text{O}_{\text{пара}}$ три фази ($\Phi = 3$): тверда, рідка і газоподібна.

Підрахунок кількості незалежних компонентів (K). Як згадувалось вище, речовини, що складають фази систему, називаються компонентами. Але під *незалежними* компонентами в правилі фаз розуміються не всі компоненти, а лише ті, які необхідні й достатні для охарактеризування системи.

У системі $CaO + CO_2 = CaCO_3$ всього дві (а не три) незалежні компоненти ($K = 2$), так як двох компонентів (наприклад, $CaO + CO_2$) достатньо, щоб зумовити утворення третього – $CaCO_3$. У системі $H_2O_{лід} = H_2O_{вода} = H_2O_{пара}$ – один незалежний компонент – H_2O .

Знайдемо число ступенів свободи C . Наприклад, у точці танення льоду співіснують три фази $H_2O_{лід}$, $H_2O_{вода}$, $H_2O_{пара}$ (потрійна точка для води відповідає температурі $+ 0,0076^0$ С і тиску $4,58$ мм рт. ст.). Число ступенів свободи $C = K + 2 - \Phi = 1 + 2 - 3 = 0$. Це означає, що ми не можемо міняти ані температуру, ані тиск, без того, щоб одна з фаз не зникла. Рівновага при $C=0$ називається *інваріантним (нонваріантним)*, тобто безваріантним.

При нормальному атмосферному тиску 760 мм рт. ст. і температурі 0^0 С одночасно співіснують дві фази: вода і лід. Ми не можемо підвищити температуру льоду, без того, щоб він не розтанув. При цьому число фаз зменшиться на одиницю, і число ступенів свободи стане рівним 1:

$$C=K+2-\Phi=1+2-2=1.$$

Рівновага при $C=1$ називається *моноваріантним*.

Перейдемо до двокомпонентних систем.

Як згадувалось вище, в системі $CaO+CO_2=CaCO_3$ три фази постійного складу ($\Phi=3$) CaO , CO_2 , $CaCO_3$; число незалежних компонентів $K=2$. Згідно правила Гіббса (5.1), $C=2+2-3=1$, тобто рівновага моноваріантна. Це означає, що кожній фіксованій температурі відповідає строго визначений рівноважний тиск (і постійний склад фаз).

3.2. Класифікація сплавів: механічні суміші, тверді розчини, хімічні сполуки. Діаграма стану.

Будова металевого сплаву залежить від того, в які взаємодії вступають компоненти, що складають сплав. Майже всі метали в рідкому стані розчиняються один в одному в будь-яких співвідношеннях. При утворенні сплавів в процесі їх твердіння можлива різна взаємодія компонентів.

Залежно від характеру взаємодії компонентів розрізняють сплави:

1. механічні суміші;
2. хімічні сполуки;
3. тверді розчини.

Сплави *механічні суміші* утворюються, коли компоненти не здатні до взаємного розчинення в твердому стані і не вступають в хімічну реакцію з утворенням з'єднання.

Утворюються між елементами, що значно різняться за будовою і властивостями, коли сила взаємодії між однорідними атомами більша, ніж між різнорідними. Сплав складається з кристалів вхідних в нього компонентів (рис. 3.1). У сплавах зберігаються кристалічні решітки компонентів.

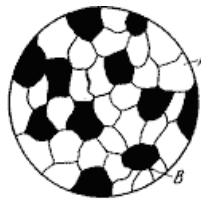


Рис. 3.1. Схема мікроструктури механічної суміші

Сплави *хімічні сполуки* утворюються між елементами, що значно різняться за будовою і властивостями, якщо сила взаємодії між різнорідними атомами більша, ніж між однорідними.

Особливості цих сплавів:

1. Постійність складу, тобто сплав утворюється при певному співвідношенні компонентів, хімічна сполука позначається A_nB_m .

2. Утворюється специфічна гратка, що відрізняється від ґраток елементів, що складають хімічну сполуку. Кристалічна гратка сполуки характеризується правильним впорядкованим розташуванням атомів (рис. 3.2)
3. Яскраво виражені індивідуальні властивості.
4. Постійність температури кристалізації, як у чистих компонентів

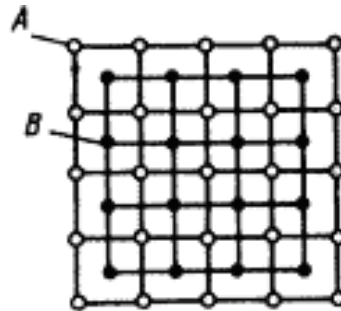


Рис.3.2. Кристалічна решітка хімічної сполуки

Сплави *тверді розчини* – це тверді фази, в яких співвідношення між компонентами можуть змінюватися. Є кристалічними речовинами.

Характерною особливістю твердих розчинів є: наявність в їх кристалічній решітці різнорідних атомів при збереженні типу ґратки розчинника.

Твердий розчин складається з однорідних зерен (рис. 3.3).

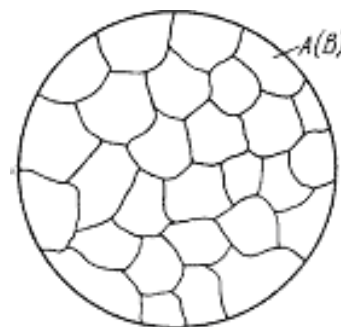


Рис. 3.3. Схема мікроструктури твердого розчину.

По ступенях розчинності компонентів розрізняють тверді розчини:

- з необмеженою розчинністю компонентів;
- з обмеженою розчинністю компонентів.

При необмеженій розчинності компонентів кристалічна решітка компоненту розчинника у міру збільшення концентрації розчиненого компоненту плавно переходить в кристалічну решітку розчиненого компоненту.

Для утворення розчинів з необмеженою розчинністю необхідні:

1. ізоморфність (однотипність) кристалічних решіток компонентів;
2. близькість атомних радіусів компонентів, які не повинні відрізнятися більш, ніж на 8...13 %.
3. близькість фізико-хімічних властивостей подібних за будовою валентних оболонок атомів.

При обмеженій розчинності компонентів можлива концентрація розчиненої речовини до певної межі. При подальшому збільшенні концентрації однорідний твердий розчин розпадається з утворенням двофазної суміші.

По характеру розподілу атомів розчиненої речовини в кристалічній ґратці розчинника *розрізняють тверді розчини:*

- заміщення;
- впровадження;
- віднімання.

У розчинах заміщення в кристалічній ґратці розчинника частина його атомів заміщена атомами розчиненого елементу (рис.3.4, а). Заміщення здійснюється у випадкових місцях, тому такі розчини називають нерегульованими твердими розчинами.

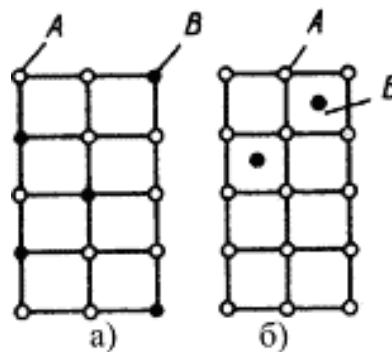


Рис. 3.4. Кристалічна решітка твердих розчинів заміщення (а), впровадження (б)

При утворенні розчинів заміщення періоди ґратки змінюються залежно від різниці атомних діаметрів розчиненого елемента і розчинника. Якщо атом розчиненого елемента більший за атом розчинника, то елементарні комірки збільшуються, якщо менший – скорочуються. У першому наближенні ця зміна пропорційна концентрації розчиненого компонента. Зміна параметрів ґратки при утворенні твердих розчинів – важливий момент, що визначає зміну властивостей. Зменшення параметра веде до більшого зміцнення, ніж його збільшення.

Тверді розчини впровадження утворюються впровадженням атомів розчиненого компонента в пори кристалічної решітки розчинника (рис. 3.4, б).

Утворення таких розчинів можливе, якщо атоми розчиненого елемента мають малі розміри. Такими є елементи, що знаходяться на початку періодичної системи Менделєєва, вуглець, водень, азот, бор. Розміри атомів перевищують розміри міжатомних проміжків в кристалічній ґратці металу, це викликає перекручування ґратки і в ній виникають напруженості. Концентрація таких розчинів не перевищує 2...2,5%

Тверді розчини віднімання або *розчини з дефектними ґратками* утворюються на базі хімічних сполук. При цьому можлива не тільки заміна одних атомів у вузлах кристалічної ґратки іншими, але і утворення порожніх, не зайнятих атомами, вузлів в ґратці.

До хімічної сполуки додають один з вхідних у формулу елементів. Його атоми займають нормальне положення в ґратці з'єднання, а місця атомів іншого елемента залишаються незайнятими.

Кристалізація сплавів. Кристалізація сплавів підпорядковується тим же закономірностям, що і кристалізація чистих металів.

Необхідною умовою є прагнення системи в стан з мінімумом вільної енергії.

Основною відмінністю є велика роль дифузійних процесів між рідиною і фазою, що кристалізується. Ці процеси необхідні для перерозподілу

різнорідних атомів, рівномірно розподілених в рідкій фазі.

У сплавах в твердих станах мають місце процеси перекристалізації, обумовлені алотропічними перетвореннями компонентів сплаву, розпадом твердих розчинів, виділенням з твердих розчинів вторинних фаз, коли розчинність компонентів в твердому стані міняється із зміною температури.

Ці перетворення називають фазовими перетвореннями в твердому стані.

При перекристалізації в твердому стані утворюються центри кристалізації і відбувається їх ріст.

Звичайно, центри кристалізації виникають по межах зерен старої фази, де гратка має найбільш дефектну будову, і де є домішки, які можуть стати центрами нових кристалів. У старої і нової фази протягом деякого часу є загальні площини. Такий зв'язок граток називається когерентним зв'язком. При відмінності будови старої і нової фаз перетворення протікає з утворенням проміжних фаз.

Порушення когерентності і відособлення кристалів наступає, коли вони набувають певних розмірів.

Процеси кристалізації сплавів вивчаються по діаграмах стану.

Діаграма стану є графічним зображенням стану будь-якого сплаву системи, що вивчається, залежно від концентрації і температури (рис. 3.5)

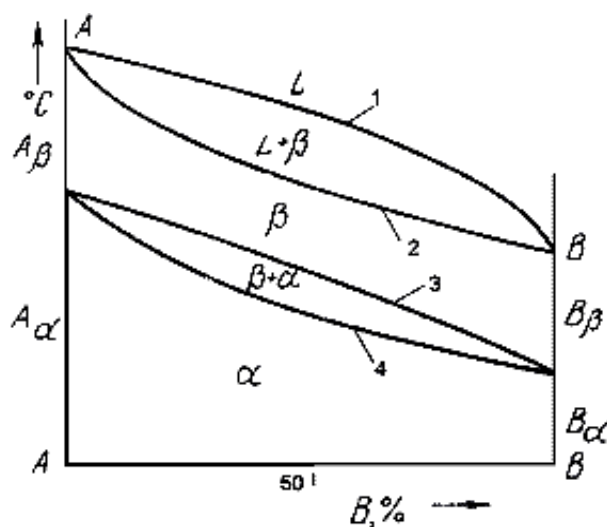


Рис. 3.5. Діаграма стану

Діаграми стану показують стійкі стани, тобто стани, які за даних умов володіють мінімумом вільної енергії, і тому її також називають діаграмою рівноваги, оскільки вона показує, які за даних умов існують рівноважні фази.

Побудова діаграм стану найчастіше здійснюється за допомогою термічного аналізу.

В результаті одержують серію кривих охолодження, на яких при температурах фазових перетворень спостерігаються точки перегину і температурні зупинки.

Температури, відповідні фазовим перетворенням, називають критичними точками. Деякі критичні точки мають назви, наприклад, точки, що відповідають початку кристалізації, називають точками *ліквідус*, а кінцю кристалізації – точками *солідус*.

По кривих охолодження будують діаграму складу в координатах: по осі абсцис – концентрація компонентів, по осі ординат – температура.

Шкала концентрацій показує зміст компоненту *B*. Основними лініями є лінії ліквідус (1) і солідус (2), а також лінії відповідні фазовим перетворенням в твердому стані (3, 4).

По діаграмі стану можна визначити температури фазових перетворень, зміну фазового складу, приблизно властивості сплаву, види обробки, які можна застосовувати для сплаву.

3.3. Діаграми стану двохкомпонентних сплавів.

Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів в твердому стані (сплави тверді розчини з необмеженою розчинністю). Спочатку одержують термічні криві. Одержані точки переносять на діаграму, з'єднавши точки початку кристалізації сплавів і точки кінця кристалізації, одержують діаграму стану. Діаграма стану і криві охолодження сплавів системи представлені на рис. 3.6.

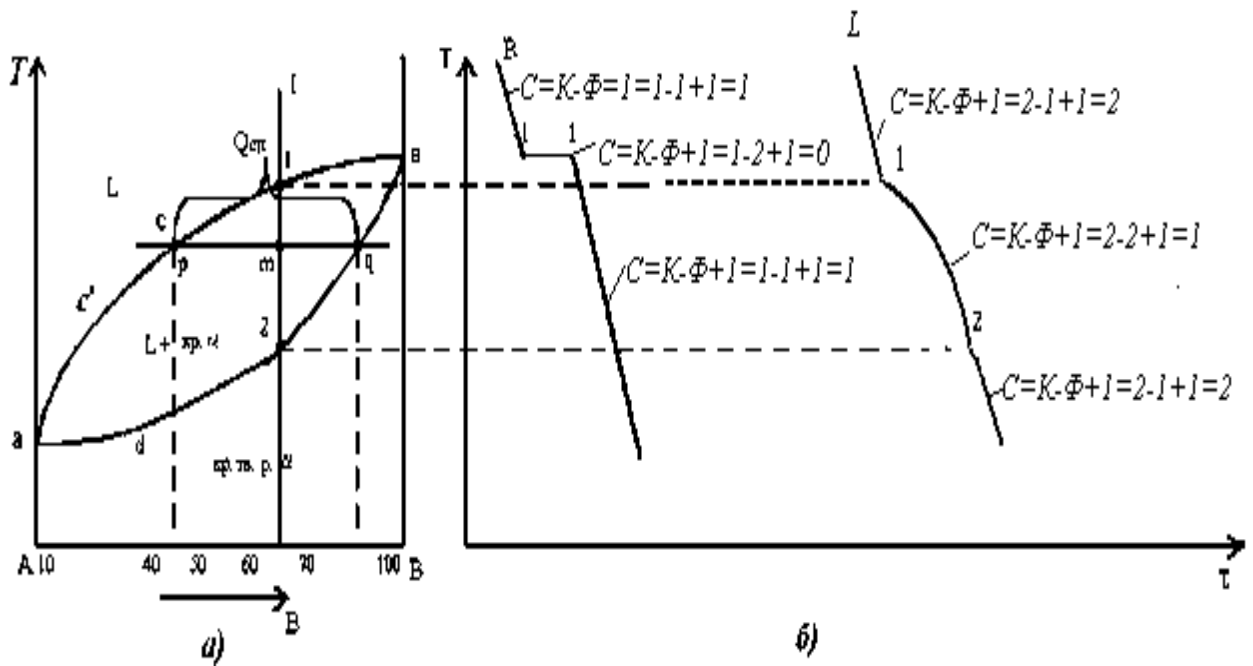


Рис. 3.6. Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів в твердому стані (а); криві охолодження типових сплавів (б)

Застосуємо правило фаз до аналізу процесу охолодження розплавленого чистого металу, наприклад, компоненту B . Дана система складається з одного компоненту – чистого металу ($K=1$). У розплавленому стані метал є однофазною рідиною ($\Phi=1$).

Тоді вище за температуру кристалізації:

$$C = K - \Phi + 1 = 1 - 1 + 1 = 1.$$

Тобто, число мір свободи рівне одиниці. Отже, як завгодно можна міняти температуру в інтервалі від будь-якої більш високої температури до початку кристалізації. При цьому стан системи не зміниться. На мал. 3.6, б зліва показаний процес охолодження сплаву до температури початку його затвердіння на ділянці $B-1$. Температура зменшується з постійної швидкістю. При температурі, що відповідає точці 1 , з'являються перші металеві кристали.

В системі, як і раніше, зберігається один компонент (метал), але число фаз стає рівним двом: $\Phi=2$ (рідина + кристали). Тоді:

$$C = K - \Phi + 1 = 1 - 2 + 1 = 0.$$

Тобто, з моменту початку і до кінця затвердіння число мір свободи стає рівним нулю. Це означає, що жодна змінна, в тому числі й температура, змінюватись не може. Наприклад, як показано на рис. 3.6, б зліва горизонтальною лінією $1 - 1$.

У момент затвердіння останніх порцій рідкого металу число фаз зменшується до 1 (твердий метал).

$$C = K - \Phi + 1 = 1 - 1 + 1 = 1.$$

Отже, як завгодно можна міняти температуру в інтервалі від температури початку кристалізації до будь-якої більш низької. При цьому стан системи не зміниться. Застосовуючи правило фаз до розглядання експериментально побудованої діаграми з утворенням неперервного ряду твердих розчинів, можна без експериментальних досліджень отримати криві охолодження чи нагріву, які якісно відповідають дослідним даним.

Діаграма стану показана на рис. 3.6, а. Чисті компоненти A і B кристалізуються при постійній температурі, крива охолодження компоненту B , представлена на рис. 3.6, б, була розглянута вище.

Тепер розглянемо поведінку типових сплавів. Решта сплавів кристалізується аналогічно сплаву I , крива охолодження якого представлена на рис. 3.6, б справа.

Процес кристалізації сплаву I : до точки 1 охолоджується сплав в рідкому стані (крива $L - 1$). Тобто до точки 1 сплав являє собою однофазний рідкий розчин металів A і B . ($\Phi = 1$). Число компонентів дорівнює 2 (метали A і B ; тобто $K = 2$). Тоді на ділянці $L - 1$

$$C = K - \Phi + 1 = 2 - 1 + 1 = 2.$$

Число мір свободи дорівнює 2. Це означає, що в однофазній області рідкого стану можна змінювати дві змінні (у даному випадку температуру й концентрацію одного з металів) без зміни фазового складу системи (рідкий розплав). Задаючи склад розплаву й знижуючи температуру, ми використаємо дві міри свободи.

При температурі, що відповідає точці 1, починають утворюватися центри кристалізації твердого розчину α . При цьому число компонентів $K=2$ (метали A і B). Число фаз також дорівнює 2 ($\Phi=2$) (рідина й твердий розчин). Тоді при температурі, що відповідає точці 1:

$$C=2-2+1=1.$$

У зв'язку з наявністю одного ступеню свободи можливо охолодження сплаву в двофазному стані до температури, що відповідає точці 2. У зв'язку з кристалізацією і виділенням прихованої теплоти затвердіння крива на ділянці 1 – 2 (рис. 3.6, б, справа) повинна опускатися повільніше, так як виділення прихованої теплоти кристалізації діє подібно внутрішньому підігріву. На кривій охолодження намічається перегин (критична точка 1).

При температурі, що відповідає точці 2, кристалізація закінчується: сплав складається з однієї фази (твердий розчин). Тоді:

$$C=K-\Phi+1=2-1+1=2.$$

Число мір свободи рівне 2. Можливо понижати температуру і міняти склад твердого розчину (дві змінні) без зміни фазового складу (твердий розчин).

Схема мікроструктури сплаву представлена на рис. 3.7.

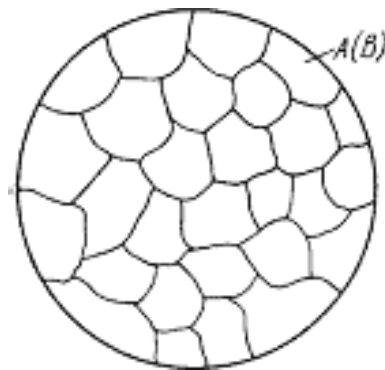


Рис. 3.7. Схема мікроструктури сплаву – однорідного твердого розчину.

Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів в компоненті в твердому стані (механічні суміші). Діаграма стану і криві охолодження типових сплавів системи представлені на рис. 3.8.

Проведемо аналіз діаграми стану.

1. Кількість компонентів: $K = 2$ (компоненти A і B);
2. Число фаз: $\Phi = 3$ (кристали компоненту A , кристали компоненту B , рідка фаза).
3. Основні лінії діаграми:
 - лінія ліквідус $асв$, складається з двох гілок, що сходяться в одній точці;
 - лінія солідус $есф$, паралельна осі концентрацій прагне до осей компонентів, але не досягає їх;

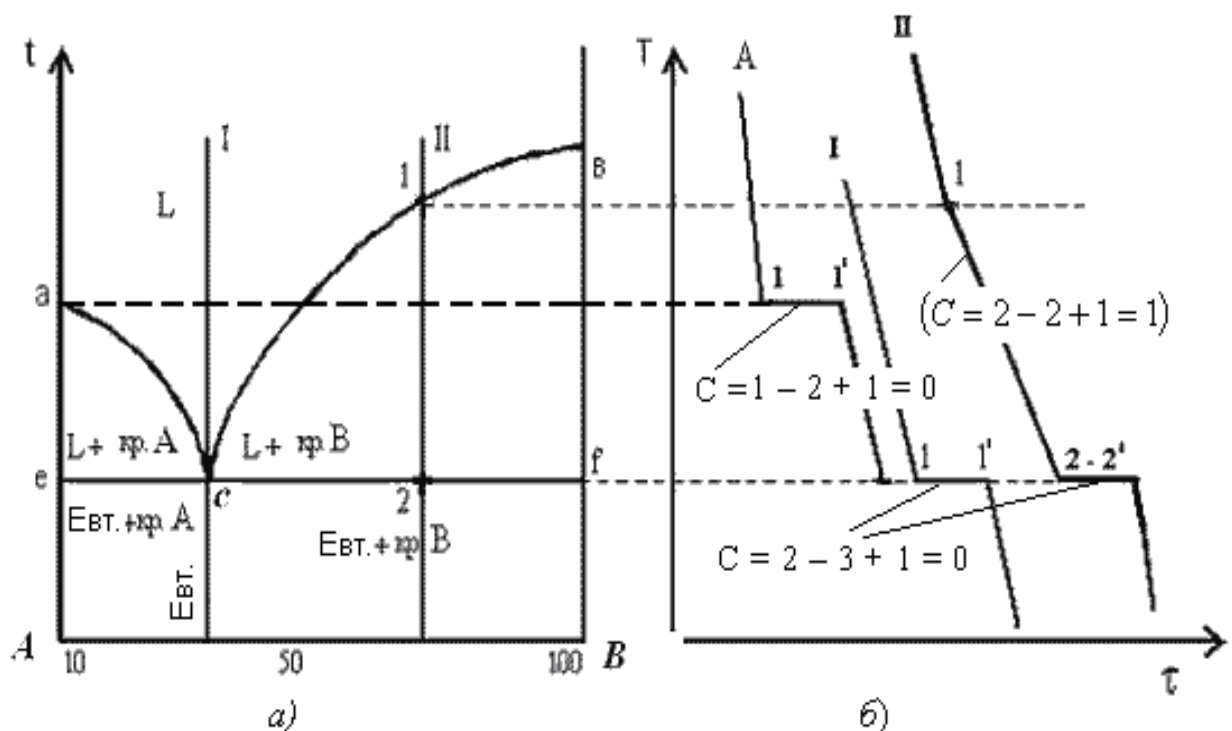


Рис. 3.8. Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів в твердому стані (а) і криві охолодження сплавів (б)

4. Типові сплави системи.

- а) Чисті компоненти, кристалізуються при постійній температурі. На рис. 3.8, б показана крива охолодження компоненту A .
- б) **Евтектичний сплав** – сплав, відповідний концентрації компонентів в точці c (сплав I). Крива охолодження цього сплаву аналогічна кривим охолодження чистих металів (рис. 3.8, б)

Евтектика – дрібнодисперсна механічна суміш різнорідних кристалів, що кристалізуються одночасно при постійній, найнижчій для даної системи, температурі.

При утворенні сплавів механічних сумішей евтектика складається з кристалів компонентів А і В: Евт. (кр. А + кр. В)

Процес кристалізації евтектичного сплаву 1: До точки 1 охолоджується сплав в рідкому стані. При температурі, відповідній точці 1, починається одночасна кристалізація двох різнорідних компонентів. На кривій охолодження утворюється температурна зупинка, тобто процес йде при постійній температурі, оскільки згідно правила фаз в двокомпонентній системі за наявності трьох фаз (рідкої і кристалів компонентів А і В) число мір свободи буде рівне нулю ($C=2-3+1=0$). У точці 1' процес кристалізації завершується. Нижче за точку 1' охолоджується сплав, що складається з дисперсних різнорідних кристалів компонентів А і В.

в) Інші сплави системи аналогічні сплаву II, криву охолодження сплаву див. на рис 3.8, б.

Процес кристалізації сплаву II: до точки 1 охолоджується сплав в рідкому стані. При температурі, відповідній точці 1, починають утворюватися центри кристалізації надмірного компоненту В. На кривій охолодження намічається перегин (критична точка), пов'язаний із зменшенням швидкості охолодження внаслідок виділення прихованої теплоти кристалізації. На ділянці 1–2 йде процес кристалізації, який протікає при температурі, що знижується, оскільки згідно правила фаз в двокомпонентній системі за наявності двох фаз (рідкої і кристалів компоненту В) число мір свободи буде рівне одиниці ($C=2-2+1=1$). При охолодженні склад рідкої фази змінюється по лінії ліквідус до евтектичного. На ділянці 2–2' кристалізується евтектика (див. кристалізацію евтектичного сплаву). Нижче за точку 2' охолоджується сплав, який складається з кристалів надмірного компоненту В, що закристалізувався спочатку, і евтектики.

Схема мікроструктури сплаву представлена на рис. 3.9.

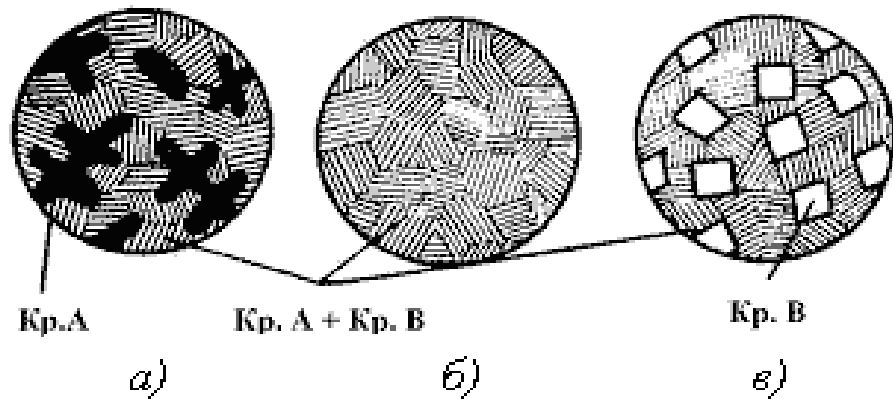


Рис. 3.9. Схема мікроструктур сплавів: *а* – доевтектичного, *б* – евтектичного, *в* – заевтектичного

Для проведення структурно-кількісного аналізу, наприклад, сплаву II після закінчення кристалізації при температурі, що відповідає точці *e* (рис. 3.8, *а*), конода довжиною *cf* проводиться через точку 2 до складу евтектики (вліво) і осі кристалів *B* (вправо).

Кількість кристалів *B*: $Q_B = \frac{c2}{cf} 100\%$, а кількість евтектики:

$$Q_E = \frac{2f}{cf} 100\%.$$

Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів в твердому стані. Діаграма стану і криві охолодження типових сплавів системи представлені на рис. 3.10.

1. Кількість компонентів: $K = 2$ (компоненти *A* і *B*);
2. Число фаз: $\Phi = 3$ (рідка фаза і кристали твердих розчинів α (розчин компоненту *B* в компоненті *A*) і β (розчин компоненту *A* в компоненті *B*));

3. Основні лінії діаграми:

- лінія ліквідус acb , складається з двох гілок, що сходяться в одній точці;
- лінія солідус $adcfb$, складається з трьох ділянок;
- dm – лінія граничної концентрації компоненту B в компоненті A ;
- fn – лінія граничної концентрації компоненту A в компоненті B .

4. Типові сплави системи.

При концентрації компонентів, що не перевищує граничних значень (на ділянках Am і nB), сплави кристалізуються аналогічно сплавам твердим розчинам з необмеженою розчинністю (див. криву охолодження сплаву I на *рис. 3.10, б*). При концентрації компонентів, що перевищує граничні значення (на ділянці mn), сплави кристалізуються аналогічно сплавам механічним сумішам (див. криву охолодження сплаву II на *рис. 3.10, б*).

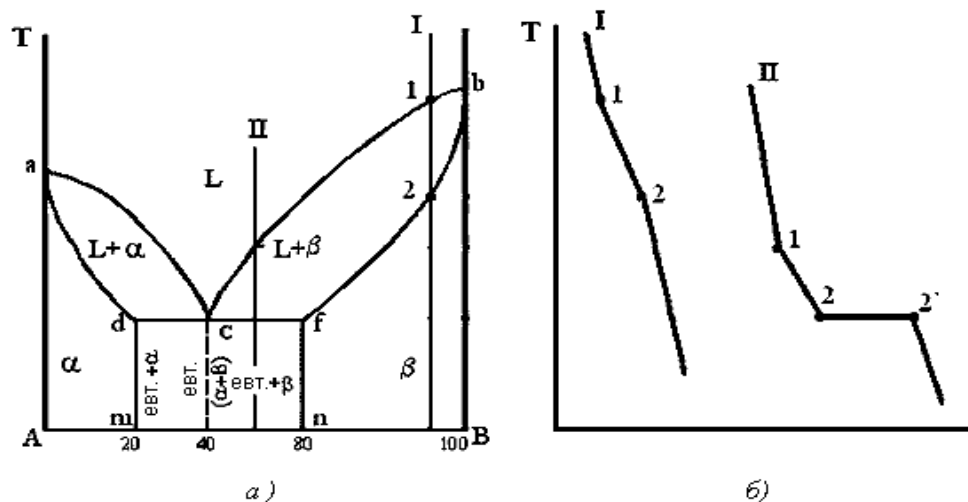


Рис. 3.10. Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів в твердому стані (а) і криві охолодження типових сплавів (б)

Сплав із концентрацією компонентів, відповідній точці c , є евтектичним сплавом. Сплав складається з дрібнодисперсних кристалів твердих розчинів α і β евтектики (кристали твердого розчину α + кристали твердого розчину β).

Кристали компонентів в чистому вигляді ні в одному із сплавів не присутні.

Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічні сполуки.

Діаграма стану сплавів представлена на рис. 3.11. Діаграма стану складається з декількох простих діаграм. Число компонентів і кількість діаграм залежить від того, скільки хімічних сполук утворюють основні компоненти системи.

Число фаз і вид простих діаграм визначаються характером взаємодії між компонентами:

$Eвт_1$ (кристали A + кристали A_mB_n);

$Eвт_2$ (кристали B + кристали A_mB_n).

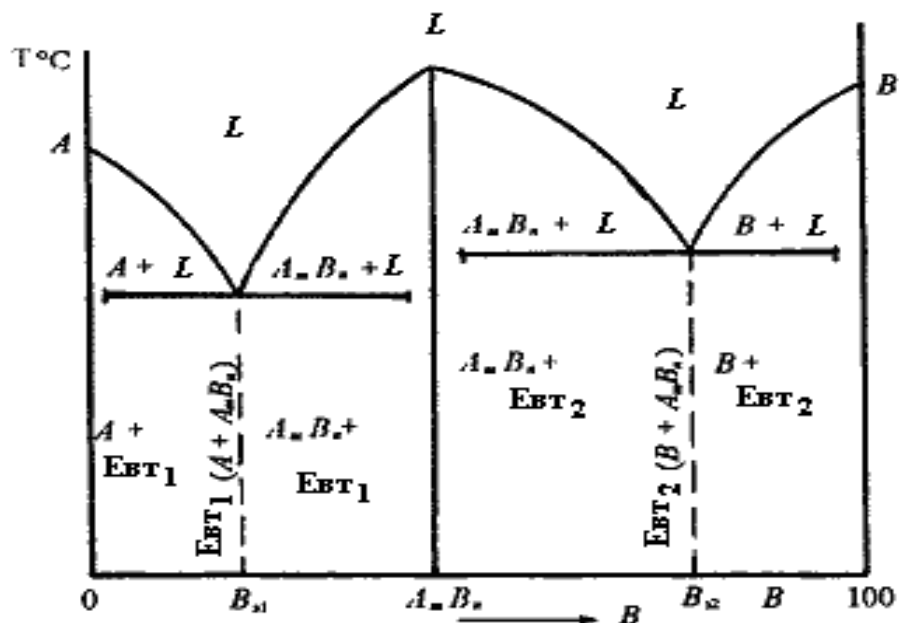


Рис. 3.11. Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічні сполуки

Діаграма стану сплавів, що випробовують фазові перетворення в твердому стані (змінна розчинність). Діаграма стану представлена на рис. 3.12. На вигляд діаграма схожа на діаграму стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів в твердому стані. Відмінність в тому, що лінії граничної розчинності компонентів не перпендикулярні осі концентрації. З'являються області, в яких з однорідних твердих розчинів при пониженні температури виділяються вторинні фази.

На діаграмі:

- df – лінія змінної граничної розчинності компоненту B в компоненті A ;
- ck – лінія змінної граничної розчинності компоненту A в компоненті B .

Крива охолодження сплаву I представлена на рис. 3.12, б.

Процес кристалізації сплаву I:

до точки 1 охолоджується сплав в рідкому стані. При температурі, відповідній точці 1, починають утворюватися центри кристалізації твердого розчину α . На ділянці 1–2 йде процес кристалізації, що протікає при температурі, що знижується.

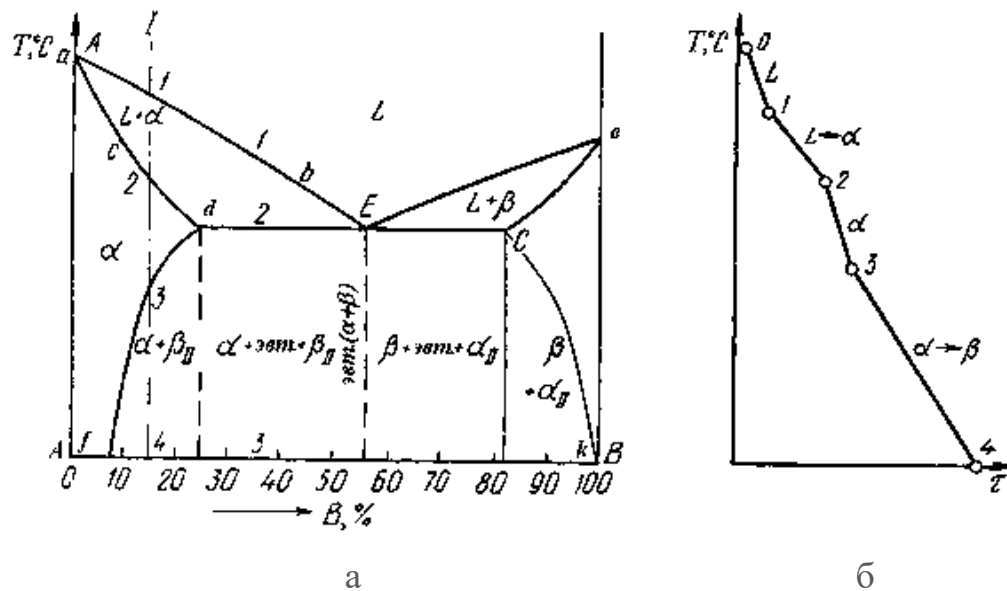


Рис. 3.12. Діаграма стану сплавів, що випробовують фазові перетворення в твердому стані (а) і крива охолодження сплаву (б).

Досягнувши температури, що відповідає точці 2, сплав твердне, при подальшому пониженні температури охолоджується сплав в твердому стані, що складається з однорідних кристалів твердого розчину α .

Досягнувши температури, що відповідає точці 3, твердий розчин α виявляється насиченим компонентом B , при нижчих температурах розчинність другого компоненту зменшується, тому з α – розчину починає виділятися надмірний компонент у вигляді кристалів β_{II} . За точкою 3 сплав складається з двох фаз: кристалів твердого розчину α і вторинних кристалів твердого розчину β_{II} .

3.4. Кількісний структурно-фазовий аналіз.

Користуючись діаграмою, стану можна для будь-якого сплаву при будь-якій температурі визначити не тільки число фаз, але і їх склад та кількісне співвідношення.

Для цього використовується *правило відрізків*. Для проведення кількісного структурно-фазового аналізу через задану точку проводять горизонталь (коноду) до перетину з найближчими лініями діаграми (ліквідус, солідус або осі компонентів).

а) визначення складу фаз в точці t (на прикладі рис. 3.6):

Для його визначення через точку t проводять горизонталь (коноду) до перетину з найближчими лініями діаграми: ліквідус і солідус.

Склад рідкої фази визначається проекцією точки перетину горизонталі з лінією ліквідус p на вісь концентрації.

Склад твердої фази визначається проекцією точки перетину горизонталі з лінією солідусу q (або віссю компоненту) на вісь концентрації.

Склад рідкої фази змінюється по лінії ліквідусу, а склад твердої фази – по лінії солідуса.

З пониженням температури склад фаз змінюється у бік зменшення змісту компоненту В.

б) визначення кількісного співвідношення рідкої і твердої фази при заданій температурі (у точці t):

Кількісна маса фаз обернено пропорційна відрізкам проведеної коноди. Розглянемо проведеною через точку t коноду і її відрізки.

Кількість всього сплаву (Q_{cn}) визначається відрізком pq .

Відрізок, прилеглий до лінії ліквідусу pt , визначає кількість твердої фази.

$$Q_{тв} = \frac{pt}{pq} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

Відрізок, прилеглий до лінії солідус (або до осі компоненту) mq , визначає кількість рідкої фази.

$$Q_{ж} = \frac{pt}{pq} \cdot 100\% \quad (3.2.)$$

3.5. Зв'язок між властивостями сплавів і типом діаграми стану.

Правила Курнакова

Оскільки вид діаграми, як і властивості сплаву, залежить від того, які сполуки або які фази утворили компоненти сплаву, то між ними повинен існувати певний зв'язок. Ця залежність встановлена Курнаковим (див. рис. 3.12).

а) При утворенні механічних сумішей властивості змінюються по лінійному закону. Значення характеристик властивостей сплаву знаходяться в інтервалі між характеристиками чистих компонентів.

б) При утворенні твердих розчинів з необмеженою розчинністю властивості сплавів змінюються по криволінійній залежності, причому деякі властивості, наприклад, електроопір, можуть значно відрізнитися від властивостей компонентів.

в) При утворенні твердих розчинів з обмеженою розчинністю властивості в інтервалі концентрацій, що відповідають однофазним твердим розчинам, змінюються по криволінійному закону, а в двофазній області – по лінійному закону.

Причому крайні точки на прямій є властивостями чистих фаз, гранично насичених твердих розчинів, утворюючих дану суміш.

г) При утворенні хімічних сполук концентрація хімічної сполуки відповідає максимуму на кривій. Ця точка перелому, що відповідає хімічній сполуці, називається сингулярною точкою.

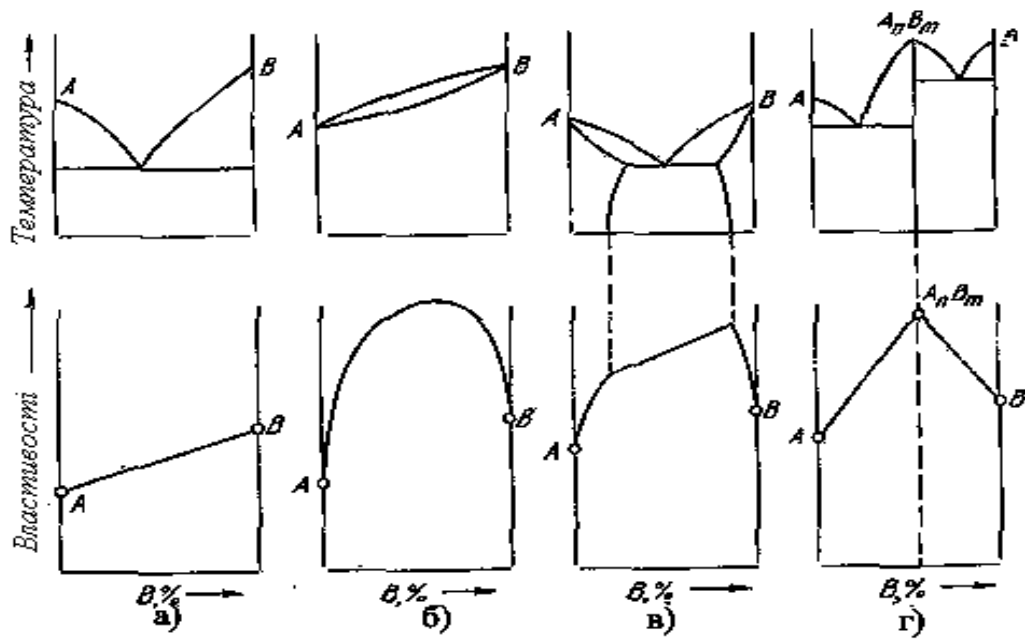


Рис. 3.12. Зв'язок між властивостями сплавів і типом діаграми стану.

Рекомендована література

1. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник. Херсон: Олді-плюс. Київ: Видавництво Ліра-К. 2013. 612 с.
<https://www.yakaboo.ua/materialoznavstvo-pidruchnik.html#tab-description>
2. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали. Навчальний посібник. Львів: «Магнолія-2006». 242 с.
3. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єрмоменко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій. Х.: УЦЗУ. 2008. 136 с.

РОЗДІЛ 4. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ КІЛЬКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.

4.1. Закон Гука. Деформації та напруження.

Деформацією називається зміна форми і розмірів тіла під дією напружень.

Напруження – сила, що діє на одиницю площі перетину деталі.

Напруження і викликані ними деформації можуть виникати при дії на тіло зовнішніх сил розтягування, стиснення, зсуву, кручення тощо, а також в результаті фазових (структурних) перетворень, усадки (тобто зменшення розмірів) і інших фізико-хімічних процесів, що протікають в металах, пов'язаних із зміною об'єму. Метал, що знаходиться в напруженому стані, при будь-якому виді навантаження завжди випробовує напруги нормальні і дотичні (рис. 4.1).

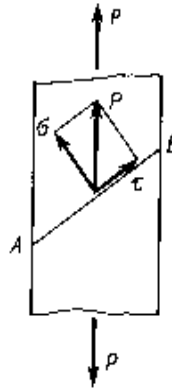


Рис. 4.1. *Схема виникнення нормальних і дотичних напружень у металі при його навантаженні.*

Зростання нормальних і дотичних напружень приводить до різних наслідків. Зростання нормальних напружень приводить до крихкого руйнування. Пластичну деформацію викликають дотичні напруження.

Деформація металу під дією напружень може бути пружною і пластичною.

Пружною називається деформація, повністю зникаюча після зняття напружень, що її викликали. При пружній деформації змінюються відстані між атомами металу в кристалічній ґратці. Зняття навантаження усуває причину, що викликала зміну міжатомної відстані, атоми стають на колишні місця, і деформація зникає.

Пружна деформація на діаграмі напруження (σ) – відносна деформація (ε) характеризується лінією ОА (рис. 4.2).

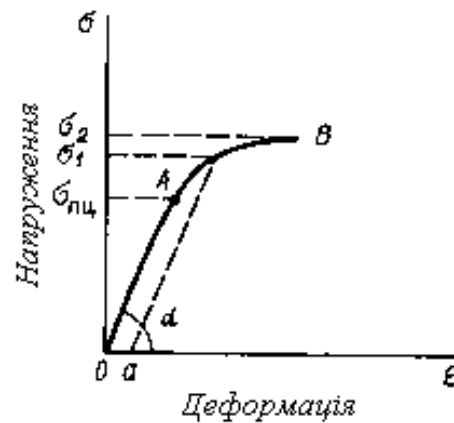


Рис. 4.2. Діаграма залежності деформації металу від діючих напружень.

Якщо нормальні напруження досягають значення сил міжатомних зв'язків, то спостерігається крихке руйнування шляхом відриву (рис. 4.3.)

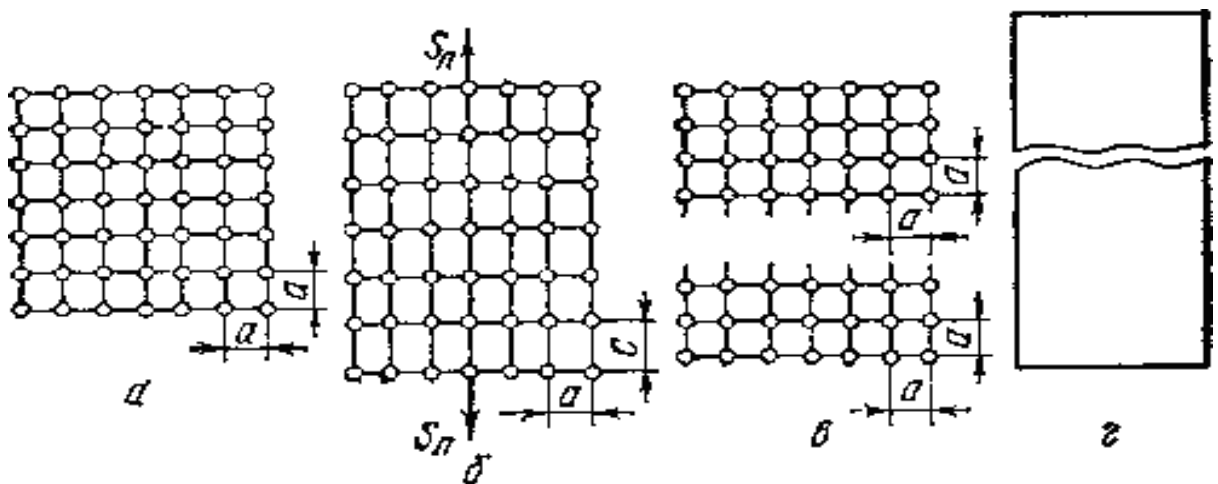


Рис. 4.3. Схема пружної деформації і крихкого руйнування під дією пружних напружень: а – ненапружена ґратка металу; б – пружна деформація; в, г – крихке руйнування в результаті відриву.

Залежність між пружною деформацією і напруженістю виражається законом Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (4.1)$$

де σ – напруження,

ε – відносна деформація,

E – модуль пружності.

Модуль пружності є найважливішою характеристикою пружних властивостей металу.

За фізичною природою модуль пружності розглядається як міра міцності зв'язків між атомами в твердому тілі. Вважається, що ця механічна характеристика структурно нечутлива, тобто термічна обробка або інші способи зміни структури не змінюють модуля пружності. У реальних матеріалах це не справедливо.

Пластичною називається деформація, яка не зникає після припинення дії напружень, що викликали її. При пластичній деформації одна частина кристала переміщається по відношенню до іншої під дією дотичних напружень. Після зняття навантажень зсув залишається, тобто відбувається пластична деформація. В результаті розвитку пластичної деформації може відбутися в'язке руйнування шляхом зрізу (рис. 4.4).

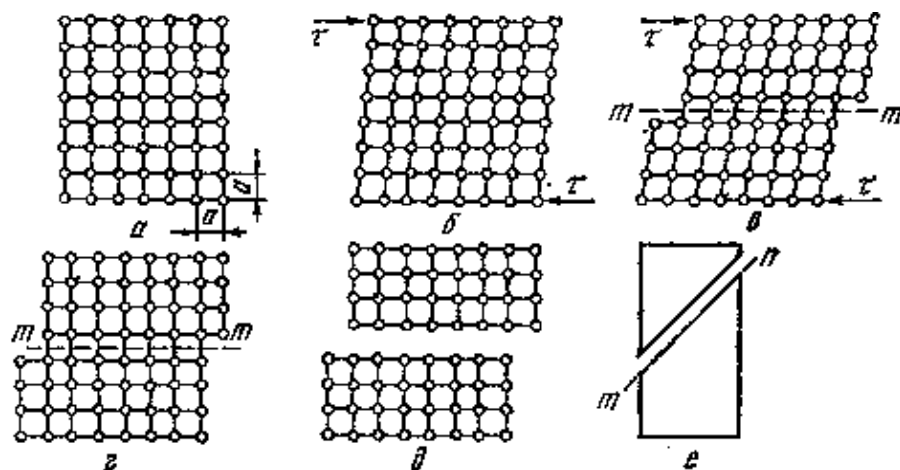


Рис. 4.4. Схема пластичної деформації і в'язкого руйнування під дією дотичних напружень: а – ненапружена гратка; б – пружна деформація; в – пружна і пластична деформація; д, е – пластичне (в'язке) руйнування в результаті зрізу.

4.2. Механізми пластичної деформації: ковзання та двійникування.

Руйнування металів.

Метали і сплави в твердому стані мають кристалічну будову і характер їх деформації залежить від типу кристалічної структури і від наявності недосконалості в цій структурі.

Розглянемо пластичну деформацію в монокристалі.

Пластична деформація протікає під дією дотичних напружень і може здійснюватися двома способами.

1. Трансляційне ковзання по площинах (рис. 4.5).

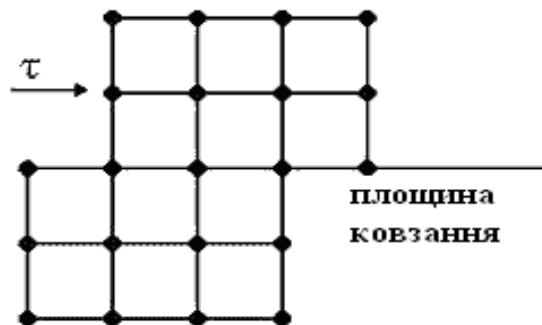


Рис. 4.5. Схема пластичної деформації ковзанням.

Одні шари атомів кристала ковзають по інших шарах вздовж так званих площин ковзання у напрямку ковзання, причому вони переміщуються на дискретну величину, рівну цілому числу міжатомних відстаней. У проміжках між смугами ковзання деформація не відбувається. Тверде тіло не змінює своєї кристалічної будови під час пластичної деформації. Розташування атомів в елементарних комірках зберігається. Ковзання – найбільш характерний вид деформації при обробці тиском. Площинами та напрямками ковзання є кристалографічні площини і напрями з найбільш щільною упаковкою атомів.

2. *Двійникування* – поворот однієї частини кристала в положення, симетричне іншій його частині. Площиною симетрії є площина двійникування (рис. 4.6).

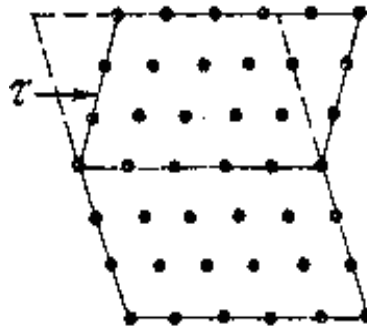


Рис. 4.6. *Схема пластичної деформації двійникуванням.*

Двійникування найчастіше виникає при пластичній деформації кристалів з об'ємноцентрованими і гексагональними ґратками, причому з підвищенням швидкості деформації і пониженням температури схильність до двійникування зростає. Двійникування може виникати не тільки в результаті дії зовнішніх сил, але і в результаті відпалу пластично деформованого тіла. Це характерно для металів з гранецентрованими кубічними ґратками (мідь, латунь). Двійникуванням можна досягти лише незначного ступеня деформації.

Дислокаційний механізм пластичної деформації. Пластична деформація відбувається в результаті ковзання або двійникування. Раніше припускали, що при ковзанні одна частина кристала зсувається відносно іншої частини на ціле число періодів як єдине ціле. Необхідне для цього напруження на декілька порядків вище за дійсне зсувне напруження. Наприклад, для заліза теоретичне значення зсувного напруження $\tau_{теор.}=13300$ МПа, реальне значення $\tau_{реал.}=20$ МПа.

У основу сучасної теорії пластичної деформації узяті такі положення:

- ковзання розповсюджується по площині зсуву послідовно, подібно зсуву гральних карт у колоді, а не одночасно;
- ковзання починається від місць порушень кристалічної ґратки, які виникають в кристалі при його навантаженні.

Схема механізму деформації представлена на рис. 4.6. У рівноважному стані дислокація нерухома (рис, 4.6, а). Під дією напруги екстра - площина

зміщується справа наліво при незначному переміщенні атомів. Нижня частина площини $P'S$ (SR) зміститься управо і поєднається з нижнім краєм екстра - площини PQ (QR - залишкова деформація). При подальшому русі дислокація пройде всю площину ковзання і вийде на поверхню зерна. При цьому верхня частина зерна буде зсунута відносно нижньої на один міжатомний період ґратки (рис. 4.6, б). При кожному переміщенні дислокації на один крок необхідно розірвати зв'язок тільки між двома рядами атомів в площині $P'S$, а не між всіма атомами, розташованими вище і нижче за площину ковзання. Необхідне зсувне напруження при цьому відносно мале, практично рівне дійсному.

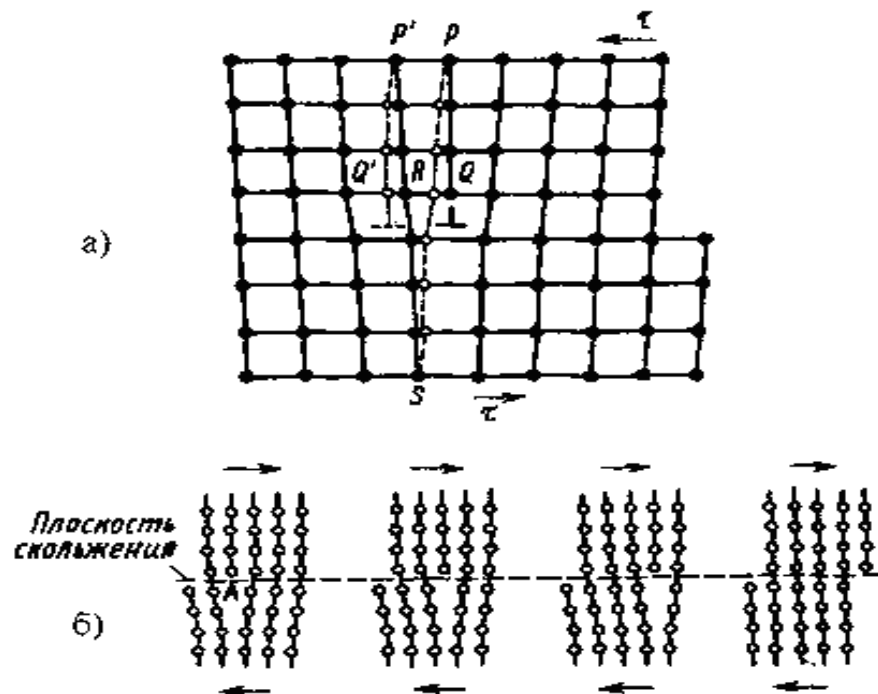


Рис. 4.6. Схема дислокаційного механізму пластичної деформації:

а – переміщення атомів при русі крайової дислокації на одну міжатомну відстань; *б* – переміщення дислокації через увесь кристал

Руйнування металів. Процес деформації при досягненні високих напружень завершується руйнуванням. Тіла руйнуються по перетину не одночасно, а унаслідок розвитку тріщин. Руйнування включає три стадії: зародження тріщини, її розповсюдження через перетин, остаточне руйнування.

Розрізняють *крихке і в'язке, транскристалітне і інтеркристалітне* руйнування.

Крихке руйнування – відрив одних шарів атомів від інших під дією нормальних напружень, що розтягують. Крихке руйнування відривом не супроводжується попередньою деформацією.

Механізм зародження тріщини такий. Скупчення рухомих дислокацій перед перешкодою (межі субзерен, фазові межі) приводить до концентрації напружень, достатньої для утворення тріщини. Якщо розмір тріщини рівний чи більш за критичний, то тріщина зростатиме. Коли напруження досягають певного значення, розмір тріщини стає критичним і подальше зростання здійснюється довільно.

Для крихкого руйнування характерна гостра тріщина, що часто гілкується. Величина зони пластичної деформації в гирлі тріщини мала. Швидкість розповсюдження крихкої тріщини велика. Наприклад, при раптовому, катастрофічному руйнуванню його швидкість близька до швидкості звуку. Енергоємність крихкого руйнування мала, а робота розповсюдження тріщини близька до нуля.

Результатом крихкого руйнування є блискучий світлий кристалічний злам із струмковою будовою. Крихка тріщина розповсюджується по декількох паралельних площинах. Площина зламу перпендикулярна нормальним напруженням.

В'язке руйнування відбувається шляхом зрізу під дією дотичних напружень. Йому завжди передує значна пластична деформація. При в'язкому руйнуванні утворюється тупа тріщина, що розкривається. Величина пластичної зони попереду тріщини велика.

Швидкість розповсюдження такої тріщини мала. Енергоємність значна, енергія витрачається на утворення поверхонь розділу і на пластичну деформацію. Велика робота витрачається на розповсюдження тріщини. Поверхня зламу нерівна, розсіює світлові промені, матова. Так виглядає волокнистий злам. Площина зламу розташовується під кутом.

При *транскристалітному* руйнуванні тріщина розповсюджується по тілу зерна. При *інтеркристалітному* руйнуванні тріщина розповсюджується по межах зерен. Інтеркристалітне руйнування завжди крихке. По зламу можна визначити характер руйнування.

4.3. Визначення міцності, пружності, пластичності.

Основними механічними властивостями є *міцність, пружність, пластичність, в'язкість, твердість*. Знаючи механічні властивості, конструктор обґрунтовано вибирає відповідний матеріал, що забезпечує надійність і довговічність конструкцій при їх мінімальній масі. Механічні властивості визначають поведінку матеріалу при деформації і руйнуванні від дії зовнішніх навантажень.

Залежно від умов навантаження механічні властивості можуть визначатися при таких випробуваннях:

1. *статичному* навантаженні – навантаження на зразок зростає поволі і плавно.
2. *динамічному* навантаженні – навантаження зростає з великою швидкістю, має ударний характер.
3. *повторному, змінному* або *циклічному* навантаженні. При циклічному випробуванні навантаження неодноразово змінюється по величині або по величині і напрямку.

Для того, щоб можна було співставляти результати випробувань, зразки і методика проведення механічних випробувань регламентовані Держстандартами.

Міцність – здатність матеріалу чинити опір деформаціям і руйнуванню. Випробування проводяться на спеціальних розривних машинах, які записують діаграму розтягування стандартних чи пропорційних зразків. Діаграма розтягування показує залежність діючого навантаження P (H) від подовження зразка Δl (м), тобто $P = f(\Delta l)$.

Але для отримання даних по механічних властивостях діаграми перебудовують і отримують залежність напруженості σ (Н/м²) від відносного подовження δ $\left(\delta = \frac{l-l_0}{l_0}\right)$ (рис 4.7).

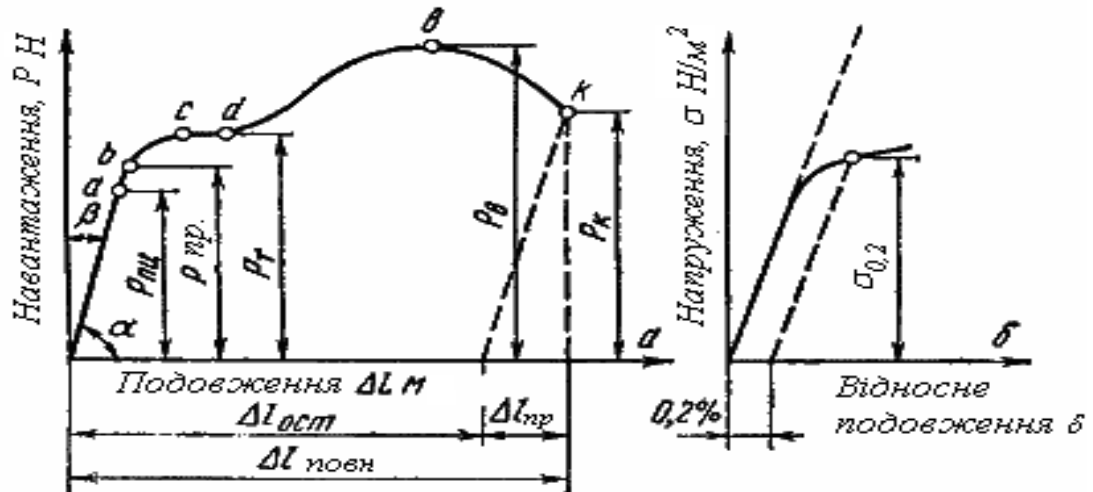


Рис. 4.7. Діаграма розтягування: а – абсолютна, б – відносна, показано схему визначення умовної межі текучості

Проаналізуємо процеси, які відбуваються в матеріалі зразка при збільшенні навантаження.

Ділянка *oa* на діаграмі (рис. 4.7) відповідає пружній деформації матеріалу, коли виконується закон Гука. Напруження, відповідне пружній граничній деформації в точці *a*, називається **межею пропорційності**.

Межа пропорційності (σ_{ip}) – максимальна напруга, до якої зберігається лінійна залежність між напруженням і деформацією.

$$\sigma_{пц} = \frac{P_{пц}}{F_0} \quad (4.2)$$

де F_0 – площа поперечного перетину зразка до початку випробувань.

При напруженнях вище за межу пропорційності відбувається рівномірна пластична деформація (подовження або звуження перетину).

Кожному напруженню відповідає залишкове подовження, яке одержуємо як відстань між початком координат діаграми і точкою перетину

лінії, проведеної з відповідної точки діаграми розтягування паралельно oa , з віссю подовження.

Оскільки практично неможливо встановити точку переходу в непружний стан, то встановлюють *умовну межу пружності* – максимальне напруження, до якого зразок одержує тільки пружну деформацію. Рахують напруження, при якому залишкова деформація дуже мала (0,005...0,05%).

У позначенні вказується значення залишкової деформації ($\sigma_{0,05}$).

$$\sigma_{0,05} = \frac{P_{0,05}}{F_0}, \quad (4.3)$$

де F_0 – площа поперечного перетину зразка.

Межа текучості характеризує опір матеріалу невеликим пластичним деформаціям. Залежно від природи матеріалу використовують фізичну або умовну межу текучості.

Фізична межа текучості – це напруження, при якому відбувається збільшення деформації при постійному навантаженні (наявність горизонтального майданчика на діаграмі розтягування). Використовується для дуже пластичних матеріалів.

$$\sigma_m = \frac{P_m}{F_0}, \quad (7.4.)$$

де F_0 – площа поперечного перетину зразка.

Але основна частина металів і сплавів не має майданчика текучості.

Умовна межа текучості – це напруження, що викликає залишкову деформацію $\delta = 0,2\%$:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}, \quad (4.5.)$$

де F_0 – площа поперечного перетину зразка.

Фізична або умовна межа текучості є важливими розрахунковими характеристиками матеріалу. Діючі в деталі напруження повинні бути нижчими за межу текучості.

Рівномірна за всім об'ємом пластична деформація триває до значення межі міцності. Коли навантаження досягає значення, відповідного точці *в* (рис. 4.7), то в найбільш слабкому місці зразка починає утворюватися шийка. При цьому спостерігається помітне зменшення площі поперечного перетину зразка – його стоншування. Утворення шийки є характерним для пластичних матеріалів, які мають діаграму розтягування з максимумом.

Межа міцності – напруження, що відповідає максимальному навантаженню, яке витримує зразок до руйнування (тимчасовий опір розриву або σ_b).

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0}, \quad (7.6)$$

де F_0 – площа поперечного перетину зразка.

Межа міцності характеризує міцність як опір значної рівномірної пластичної деформації. За точкою *в*, внаслідок розвитку шийки, навантаження падає і в точці *к* відбувається руйнування.

Наступна характеристика міцності – **істинний опір** руйнуванню

Істинний опір руйнуванню S_b – це максимальне напруження, яке витримує матеріал в момент, що передує руйнуванню зразка, визначений відносно кінцевої площі F_k поперечного перетину зразка після руйнування. Істинний опір руйнуванню значно більше межі міцності σ_b (рис. 4.8).

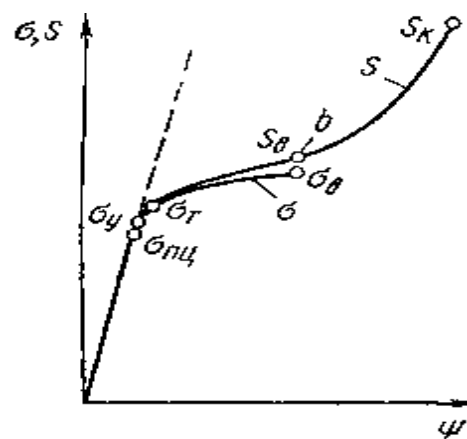


Рис. 4.8. Істинна діаграма розтягування

Істинні напруження S_i визначають як відношення навантаження до площі поперечного перетину в даний момент часу.

$$S_i = \frac{P_i}{F_i}, \quad (4.7)$$

де F_i – площа поперечного перетину зразка у даний момент часу.

При випробуванні на розтягування визначаються і характеристики пластичності.

Пластичність – здатність матеріалу до пластичної деформації, тобто здатність одержувати залишкову зміну форми і розмірів без порушення суцільності.

Пластичність використовують при обробці металів тиском.

Характеристики пластичності:

- відносне подовження δ :

$$\delta = \frac{l_x - l_0}{l_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%, \quad (4.8)$$

де l_0 і l_k – відповідно початкова і кінцева довжина зразка;

Δl – абсолютне подовження зразка, визначається вимірюванням зразка після розриву.

- відносне звуження Ψ :

$$\Psi = \frac{F_0 - F_x}{F_0} \cdot 100\%, \quad (4.9)$$

де F_0 – початкова площа поперечного перетину;

F_x – площа поперечного перетину в шийці після розриву.

Відносне звуження точніше характеризує пластичність і служить технологічною характеристикою при листовому штампуванні.

Пластичні матеріали надійніші в роботі, ніж крихкі, оскільки для них менша імовірність небезпечного крихкого руйнування.

4.4. Визначення твердості, в'язкості, втоми.

Твердість – це опір матеріалу проникненню в його поверхню стандартного тіла (індентора), що не деформується при випробуванні. Про твердість судять або по глибині проникнення індентора (метод Роквелла), або по величині відбитку від втискування (методи Брінелля, Віккерса, мікротвердості).

У всіх випадках відбувається пластична деформація матеріалу. Чим більший опір матеріалу пластичної деформації, тим вище твердість. Широке розповсюдження випробувань на твердість пояснюється низкою їх переваг перед іншими видами випробувань:

- простота вимірювань, які не вимагають спеціального зразка і можуть бути виконані безпосередньо на деталях, що перевіряються;
- вимірювання твердості звичайно не спричиняє за собою руйнування деталі, і після вимірювання її можна використовувати за своїм призначенням;
- можливість орієнтовно оцінити по твердості інші характеристики металу, в першу чергу, межу міцності.

Так, наприклад, знаючи твердість по Брінеллю (HB), можна визначити межу міцності на розтягування σ_B (тимчасовий опір):

$$\sigma_B = k \cdot HB, \quad (4.10)$$

де k – коефіцієнт, залежний від матеріалу:

- $k = 0,35$ – сталь, алюміній і його сплави;
- $k = 0,55$ – мідь, латунь і бронза відпалені;
- $k = 0,4$ – мідь, латунь і бронза після наклепу.

Найбільшого поширення набули методи Брінелля, Роквелла, Віккерса і мікротвердості.

Схеми випробувань представлені на рис. 4.9.

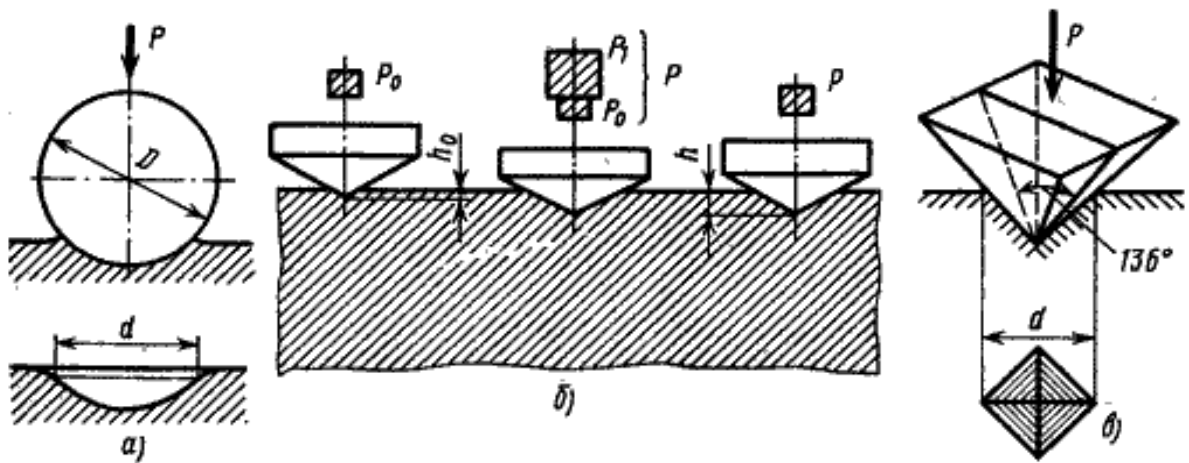


Рис. 4.9. Схеми визначення твердості:

а – по Брінеллю; б – по Роквеллу; у – по Віккерсу

Твердість по Брінеллю (ГОСТ 9012). Випробування проводять на твердомірі Брінелля (рис. 4.10).

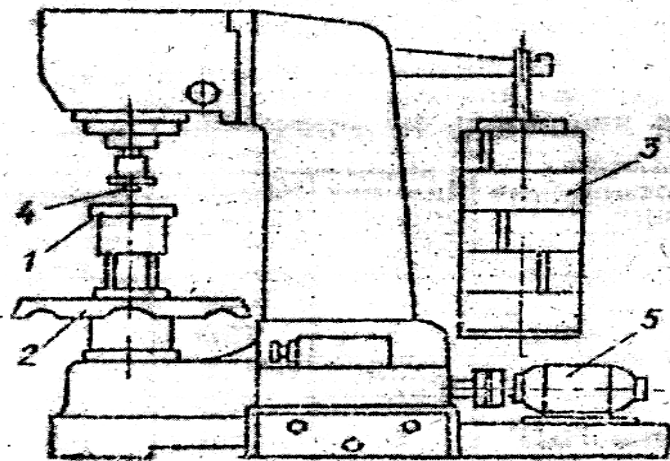


Рис. 4.10. Схема приладу для вимірювання твердості по методу Брінелля

Визначення твердості HB проводиться на пресі Брінелля (твердомір типу $TШ$) в наступному порядку. Випробовуваний зразок (деталь) встановлюють на столику 1 (рис. 4.10) шліфованою поверхнею догори. Поворотом маховика 2 за годинниковою стрілкою столик приладу піднімають так, щоб кулька 4 могла втиснутися у випробовувану поверхню. Маховик 2 обертають до упору, і натисненням кнопки вмикають електродвигун 6. Двигун переміщає коромисло і поступово навантажує шток із закріпленою в ньому кулькою.

Кулька під дією навантаження 3, що передається приведеним до коромисла вантажем, вдавлюється у випробовуваний матеріал. Навантаження діє протягом певного часу (10...60с), що задається за допомогою реле часу. Після чого вал двигуна, обертаючись у зворотний бік, відповідно переміщає коромисло і знімає навантаження. Після автоматичного виключення двигуна, повертаючи маховик 2 проти годинникової стрілки, опускають столик приладу і знімають зразок.

Діаметр відбитку вимірюють за допомогою відлікового мікроскопа (лупи Брінелля), на окулярі якого є шкала з діленнями, що відповідають десятим долям міліметра. Вимірювання проводять з точністю до 0,05 мм в двох взаємно перпендикулярних напрямках; для визначення твердості слід приймати середню з одержаних величин.

Як індентор використовується сталева загартована кулька діаметром D 2,5; 5; 10 мм, залежно від товщини виробу.

Навантаження P залежить від діаметру кульки і вимірюваної твердості:

- для термічно оброблених сталі і чавуну – $P=30D^2$;
- литої бронзи і латуні – $P=10D^2$;
- алюмінію і інших дуже м'яких металів – $P=2,5D^2$.

Тривалість витримки τ : для сталі і чавуну – 10с, для латуні і бронзи – 30с. Твердість визначається як відношення прикладеного навантаження P до сферичної поверхні відбитку F :

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4.11)$$

де D – діаметр кульки, м (мм);

d – діаметр відбитка, м (мм),

P – навантаження на кульку, Н.

Стандартними умовами є $D=10$ мм; $P=30000$ Н; $\tau=10$ с. В цьому випадку твердість по Брінеллю позначається, наприклад, твердість HB 250. В інших випадках вказуються умови в такій послідовності: число твердості HB , діаметр індентора, величину навантаження, час навантаження ($HB D/P/\tau$),

число твердості. Наприклад, число твердості 230 і випробування відбувалось кулькою діаметром 5 мм, при навантаженні 2500 Н з витримкою під навантаженням 30 с позначається таким чином: 230 *HB* 5/250/30. Для розрахунку твердості за Брінеллем вимірюють діаметр лунки і по ньому знаходять твердості по таблицях, що додаються до приладу.

Метод Роквелла ГОСТ 9013. Заснований на втискуванні в поверхню наконечника під певним навантаженням (рис. 4.11). У нижній частині приладу встановлений столик 6. У верхній частині розташовані індикатор 4, масляний регулятор 2 і шток 5, в якому встановлюється наконечник з алмазним конусом (що має кут при вершині 120° і радіус закруглення 0,2 мм) або сталеву кулькою діаметром $1/16''$ (\varnothing 1,588 мм). Індикатор 4 є циферблатом, на якому нанесені шкали (чорна і червона) і є дві стрілки – велика (показчик твердості) і маленька – для контролю величини попереднього навантаження, що передається обертанням маховика 7.

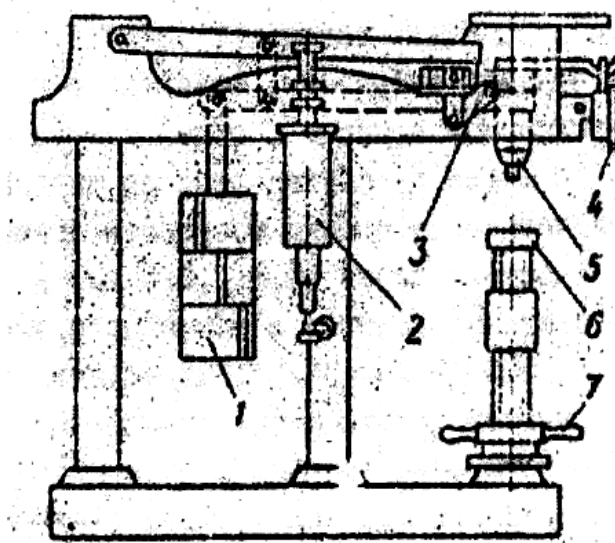


Рис. 4.11. Схема приладу для вимірювання твердості по методу Роквелла.

Столик зі встановленим на ньому зразком для вимірювань піднімають обертанням маховика до тих пір, поки мала стрілка не опиниться проти червоної крапки на шкалі. Це означає, що наконечник вдавлюється в зразок під дією попереднього навантаження, рівного 100 Н (10 кгс). Після цього повертають шкалу індикатора (круг циферблату) до збігу цифри 0 на чорній

шкалі з великою стрілкою. Потім включають основне навантаження, визначуване вантажем 1, і після зупинки стрільці прочитують значення твердості по Роквеллу, що є цифрою. Столик із зразком опускають, обертаючи маховик проти годинникової стрілки. Твердомер Роквеллу вимірює різницю між глибиною відбитків, одержаних від втискування наконечника під дією основного і попереднього навантажень. Кожен тиск (одиниця шкали) індикатора відповідає глибині втискування 2 мкм.

Проте умовне число твердості по Роквеллу (HR) є не вказаною глибиною втискування h , а величиною $100 - h$ за чорною шкалою при вимірюванні конусом і величину $130 - h$ за червоною шкалою при вимірюванні кулькою. Залежно від природи матеріалу використовують три шкали твердості (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Шкали для визначення твердості по Роквеллу

Шкала	Позначення	Індентор	Навантаження, Н (кгс)			Область застосування, число твердості за Роквеллом
			P_0	P_1	P_2	
А	HRA	Алмазний конус, 120°	98 (10)	490 (50)	588 (60)	Для особливо твердих матеріалів, 25-100
В	HRB	Сталева кулька, $\varnothing 1/16''$	98 (10)	883 (90)	981 (100)	Для відносно м'яких матеріалів, 20-67
С	HRC	Алмазний конус, 120°	98 (10)	1373 (140)	1471 (150)	Для відносно Твердих матеріалів, 70-85

Метод Віккерса.

Твердість визначається по величині відбитку (рис. 4.9, в).

Як індентор використовується алмазна чотиригранна піраміда с кутом при вершині 136° .

Твердість за Віккерсом позначається HV і розраховується як відношення прикладеного навантаження P (H) до площі поверхні відбитку F :

$$HV = \frac{P}{F} = 1,8544 \frac{P}{d^2} \cdot 10^{-6}, \text{ Н/м}^2, \quad (4.12)$$

де d – середнє арифметичне значення довжини двох діагоналей відбитку, м, що вимірюється після зняття навантаження.

Навантаження P складає 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 1200 H . Діагональ відбитку d вимірюється за допомогою мікроскопа, встановленого на приладі.

Спосіб мікротвердості застосовується для визначення твердості окремих структурних складових і фаз сплаву, дуже тонких поверхневих шарів (соті долі міліметра). Цей спосіб аналогічний способу Віккерса. **Індентор** – піраміда менших розмірів, навантаження P при втискуванні складають 0,05...5 H . Мікротвердість визначають за формулою для способу Віккерсу (4.12)

Метод дряпання.

Алмазним конусом, пірамідою або кулькою наноситься подряпина, яка є мірою. При нанесенні подряпин на інші матеріали і порівнянні їх з мірою судять про твердість матеріалу.

Можна нанести подряпину шириною 10 мм під дією певного навантаження. Спостерігають за величиною навантаження, яка дає цю ширину.

Динамічний метод (по Шору).

Кульку кидають на поверхню із заданої висоти, він відскакує на певну величину. Чим більша величина відскоку, тим твердіший матеріал.

Способи оцінки в'язкості. В результаті проведення динамічних випробувань на ударний вигин спеціальних зразків з надрізом (ГОСТ 9454) оцінюється в'язкість матеріалів і встановлюється їх схильність до переходу з в'язкого стану в крихкий.

В'язкість – здатність матеріалу поглинати механічну енергію зовнішніх сил за рахунок пластичної деформації. В'язкість є енергетичною характеристикою матеріалу, виражається в одиницях роботи. В'язкість металів і сплавів визначається їх хімічним складом, термічною обробкою і іншими внутрішніми чинниками. Також в'язкість залежить від умов, в яких працює метал (температури, швидкості навантаження, наявності концентраторів напруги).

Ударна в'язкість характеризує надійність матеріалу, його здатність чинити опір крихкому руйнуванню. Випробування проводять на зразках з надрізами певної форми і розмірів (рис. 4.12).

Зразок встановлюють на опорах копра надрізом у бік, протилежний удару ножа маятника, який піднімають на певну висоту. На руйнування зразка витрачається робота:

$$A = P(H - h), \quad (4.13)$$

де P – вага маятника (H) H – висота підйому маятника до удару (м),
 h – висота підйому маятника після удару (м).

Характеристикою в'язкості є **ударна в'язкість** (a_H), – питома робота руйнування, що вимірюється у Дж/м²:

$$a_H = \frac{A}{F_0}, \quad (4.14)$$

де F_0 – площа поперечного перетину в місці надрізу.

Держстандарт ударну в'язкість позначає KCV ; KCU ; KCT . KC – символ ударної в'язкості, третій символ показує вид надрізу: гострий (V), з радіусом закруглення (U), тріщина (T) (рис. 4.12, в).

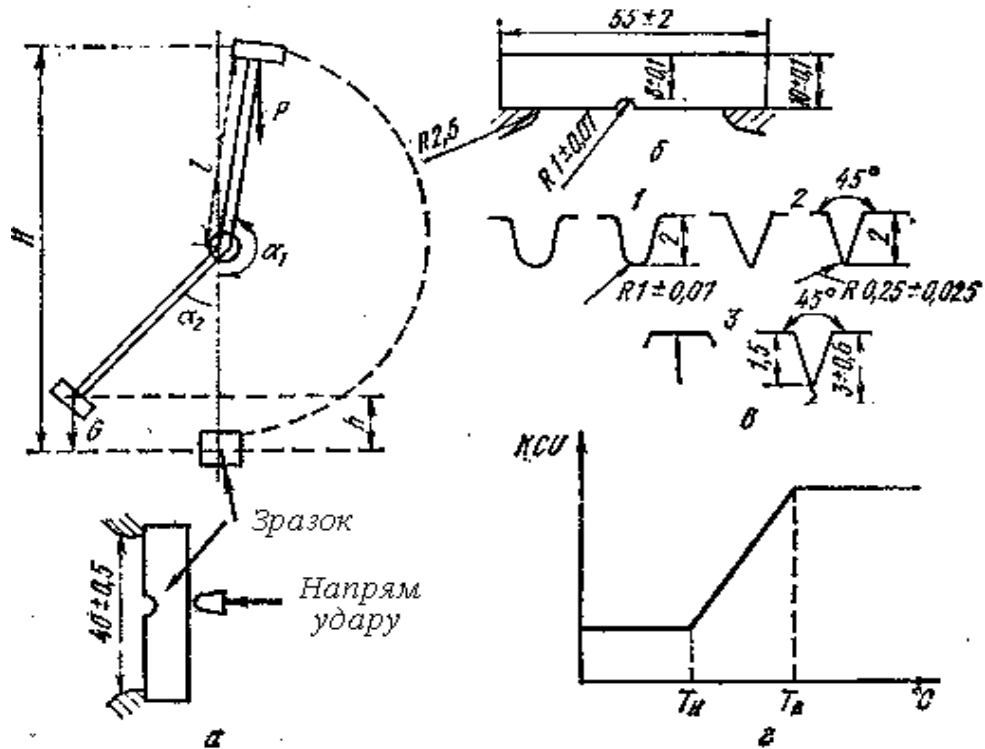


Рис. 4.12. Схема випробування на ударну в'язкість:

а – схема маятникового копра; б – стандартний зразок з надрізом; в – види концентраторів напружень; г – залежність в'язкості від температури

Вплив температури на в'язкість. З підвищенням температури в'язкість збільшується. Межа текучості S_T істотно змінюється із зміною температури, а опір відриву $S_{від}$ не залежить від температури. При температурі вище за T_B межа текучості менше опору відриву. При навантаженні спочатку має місце пластична деформація, а потім – руйнування. Метал знаходиться у в'язкому стані (див. рис. 4.13).

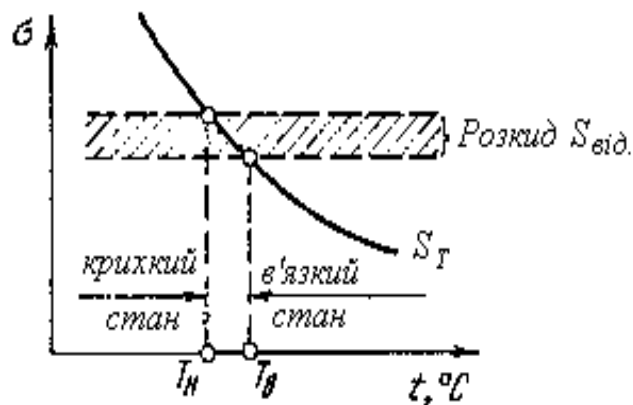


Рис. 4.13. Вплив температури на пластичний і крихкий стан.

При температурі нижче за T_n опір відриву менше межі текучості. В цьому випадку метал руйнується без попередньої деформації, тобто знаходиться в крихкому стані. Перехід з в'язкого стану в крихкий здійснюється в інтервалі температур $T_n - T_b$.

Оцінка схильності металу до холодноламкості.

Холодноламкістю називається схильність металу до переходу в крихкий стан з пониженням температури. Для оцінки схильності металу до холодноламкості випробовують серію зразків при різних температурах і будують криві ударна в'язкість – температура ($a_n - T$) (рис. 4.12, з), визначаючи пороги холодноламкості. Поріг холодноламкості – температурний інтервал зміни характеру руйнування, є важливим параметром конструкційної міцності. Чим нижчий поріг холодноламкості, тим менш чутливий метал до концентраторів напруженості (різкі переходи, отвори, ризики), до швидкості деформації.

Холодноламкими є залізо, вольфрам, цинк і інші метали, що мають об'ємноцентровану кубічну і гексагональну щільно упаковану кристалічну решітку.

Оцінка в'язкості по вигляду зламу.

При в'язкому стані металу в зламі зразка після випробувань більше 90% волокон, за верхній поріг холодноламкості T_b приймається температура, що забезпечує такий стан. При крихкому стані металу в зламі 10% волокон, за нижній поріг холодноламкості T_n приймається температура, що забезпечує такий стан. У техніці за поріг холодноламкості приймають температуру, при якій в зламі 50% в'язкої складової. Причому ця температура повинна бути нижче за температуру експлуатації виробів не менше ніж на 40°C.

Основні характеристики втому.

Випробування на втому (ГОСТ 2860) дають характеристики втомної міцності.

Втома – руйнування матеріалу при повторних знакозмінних напруженнях, величина яких не перевищує межі текучості.

Втомна міцність – здатність матеріалу чинити опір втомі.

Процес втоми складається з трьох етапів, відповідні цим етапам зони в зламі показані на рис. 4.14.

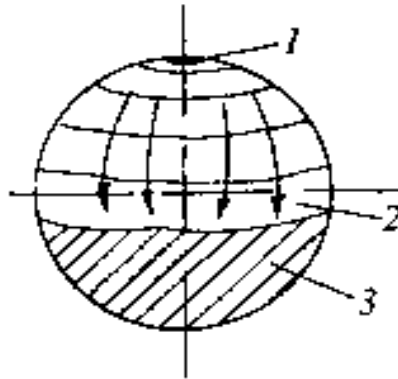


Рис 4.14. Схема зародження і розвитку тріщини при змінному вигині круглого зразка:

1 – утворення тріщини в найбільш навантаженій частині перетину, яка піддавалася мікродформаціям і одержала максимальне зміцнення; 2 – поступове розповсюдження тріщини, гладка поверхня; 3 – остаточне руйнування, зона “доламу“, живий перетин зменшується, а дійсна напруга збільшується, поки не відбувається руйнування крихке або в'язке.

Характеристики втомної міцності визначаються при циклічних випробуваннях “вигин при обертанні“. Схема представлена на рис. 4.15.

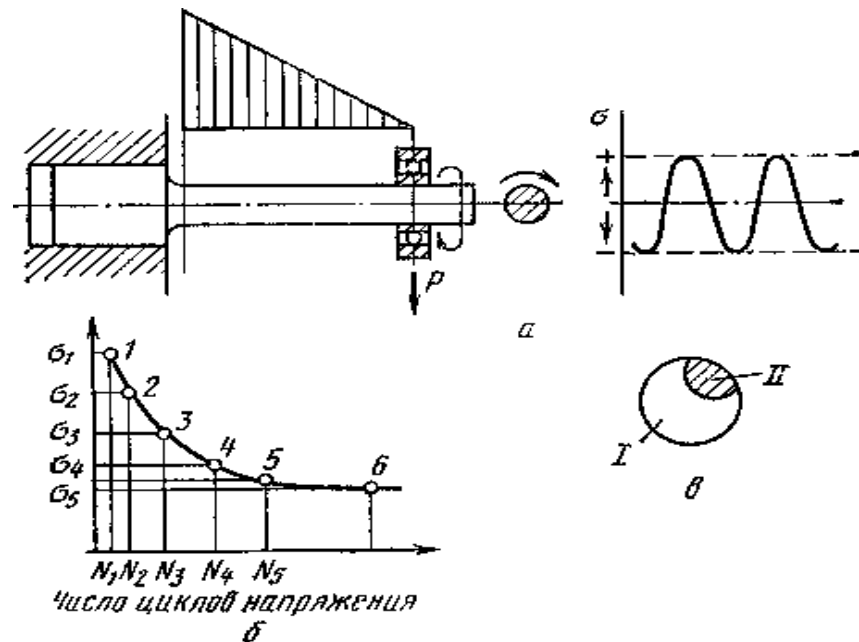


Рис. 4.15. Випробування на втому (а), крива втоми (б).

Межа витривалості (σ_{-1} – при симетричній зміні навантаження, σ_R – при несиметричній зміні навантаження) – максимальне напруження, яке матеріал витримує за доволіно велике число циклів навантаження N .

Обмежена межа витривалості – максимальне напруження, що матеріал витримує за певне число циклів навантаження або час.

Живучість – різниця між числом циклів до повного руйнування і числом циклів до появи втомної тріщини.

4.5. Технологічні та експлуатаційні властивості (рідкотекучість, усадка, ліквіація, здатність до обробки тиском, різанням, зварюваність)

Технологічні властивості характеризують здатність матеріалу піддаватися різним способам холодної і гарячої обробки.

1. Ливарні властивості.

Характеризують здібність матеріалу до отримання з нього якісних відливань.

Рідкотекучість – характеризує здатність розплавленого металу заповнювати ливарну форму.

Усадка (лінійна і об'ємна) – характеризує здатність матеріалу змінювати свої лінійні розміри і об'єм в процесі твердіння і охолодження. Для попередження лінійної усадки при створенні моделей використовують нестандартні метри.

Ліквіація – неоднорідність хімічного складу за об'ємом.

2. Здатність матеріалу до обробки тиском.

Це здатність матеріалу змінювати розміри і форму під впливом зовнішніх навантажень не руйнуючись. Вона контролюється в результаті технологічних випробувань, що проводяться в умовах, максимально наближених до виробничих. *Листовий* матеріал випробовують на перегин і витяжку сферичної лунки. *Дріт* випробовують на перегин, скручування, на навивання.

Труби випробовують на роздачу, сплющення до певної висоти і вигин. Критерієм придатності матеріалу є відсутність дефектів після випробування.

3. Зварюваність.

Це здатність матеріалу утворювати нероз'ємні з'єднання необхідної якості. Оцінюється за якістю зварного шва.

4. Здібність до обробки різанням.

Характеризує здатність матеріалу піддаватися обробці різним ріжучим інструментом. Оцінюється по стійкості інструменту і за якістю поверхневого шару.

Експлуатаційні властивості.

Експлуатаційні властивості характеризують здатність матеріалу працювати в конкретних умовах.

1. ***Зносостійкість*** – здатність матеріалу чинити опір поверхневому руйнуванню під дією зовнішнього тертя.
2. ***Корозійна стійкість*** – здатність матеріалу чинити опір дії агресивних кислотних, лужних середовищ.
3. ***Жаростійкість*** – це здатність матеріалу чинити опір окисленню в газовому середовищі при високій температурі.
4. ***Жароміцність*** – це здатність матеріалу зберігати свої властивості при високих температурах.
5. ***Холодостійкість*** – здатність матеріалу зберігати пластичні властивості при негативних температурах.
6. ***Антифрикційність*** – здатність матеріалу прироблятися до іншого матеріалу.

Ці властивості визначаються спеціальними випробуваннями залежно від умов роботи виробів.

При виборі матеріалу для створення конструкції необхідно повністю враховувати механічні, технологічні і експлуатаційні властивості.

4.6. Вплив пластичної деформації та нагріву на структуру і властивості металу: наклеп, повернення та рекристалізація

Конструкційна міцність матеріалів.

В результаті випробувань одержують характеристики:

- силові (межа пропорційності, межа пружності, межа текучості, межа міцності, межа витривалості);
- деформаційні (відносне подовження, відносне звуження);
- енергетичні (ударна в'язкість).
- Всі вони характеризують загальну міцність матеріалу незалежно від призначення, конструкції і умов експлуатації і визначають її *конструкційну міцність*.

На конструкційну міцність впливають наступні чинники:

- конструкційні особливості деталі (форма і розміри);
- механізми різних видів руйнування деталі;
- стан матеріалу в поверхневому шарі деталі;
- процеси, що відбуваються в поверхневому шарі деталі, що приводять до відмов при роботі.

Необхідною умовою створення якісних конструкцій при економному використанні матеріалу є облік додаткових критеріїв, що впливають на конструкційну міцність. Цими критеріями є *надійність* і *довговічність*.

Надійність – властивість виробів, виконувати задані функції, зберігаючи експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного часу або опір матеріалу крихкому руйнуванню.

Розвиток крихкого руйнування відбувається при низьких температурах, за наявності тріщин, при підвищених залишкових напруженнях, а також при розвитку втомних процесів і корозії.

Критеріями, що визначають надійність, є температурні пороги холодноламкості, опір розповсюдженню тріщин, ударна в'язкість, характеристики пластичності, живучість.

Довговічність – здатність деталі зберігати працездатність до певного стану.

Довговічність визначається втомою металу, процесами зносу, корозії і іншими факторами, які викликають поступове руйнування але не спричиняють аварійних наслідків.

Критеріями, що визначають довговічність, є втомна міцність, зносостійкість, опір корозії, контактна міцність.

Загальними принципами вибору критеріїв для оцінки конструкційної міцності є:

- аналогія виду напруженого стану у випробовуваних зразках і виробих;
- аналогія умов випробування зразків і умов експлуатації (температура, середовище, порядок навантаження);
- аналогія характеру руйнування і виду зламу в зразку і виробі.

Особливості деформації полікристалічних тіл.

Розглянемо холодну пластичну деформацію полікристалу. Пластична деформація металів і сплавів, як тіл полікристалічних, має деякі особливості в порівнянні з пластичною деформацією монокристала.

Деформація полікристалічного тіла складається з деформації окремих зерен і деформації в прикордонних об'ємах. Окремі зерна деформуються ковзанням і двійникуванням, проте взаємний зв'язок зерен і їх множинність в полікристалі вносять свої особливості в механізм деформації.

Площини ковзання зерен довільно орієнтовані в просторі, тому під впливом зовнішніх сил напруження в площинах ковзання окремих зерен будуть різні. Деформація починається в окремих зернах, в площинах ковзання яких виникають максимальні дотичні напруги. Сусідні зерна будуть обертатися і поступово залучатися до процесу деформації. Деформація приводить до зміни форми зерен: зерна одержують форму, витягнуту у напрямі найбільш інтенсивної течії металу (повертаються осями найбільшої міцності уздовж напрямку деформації). Зміна структури при деформації показана на 4.16.

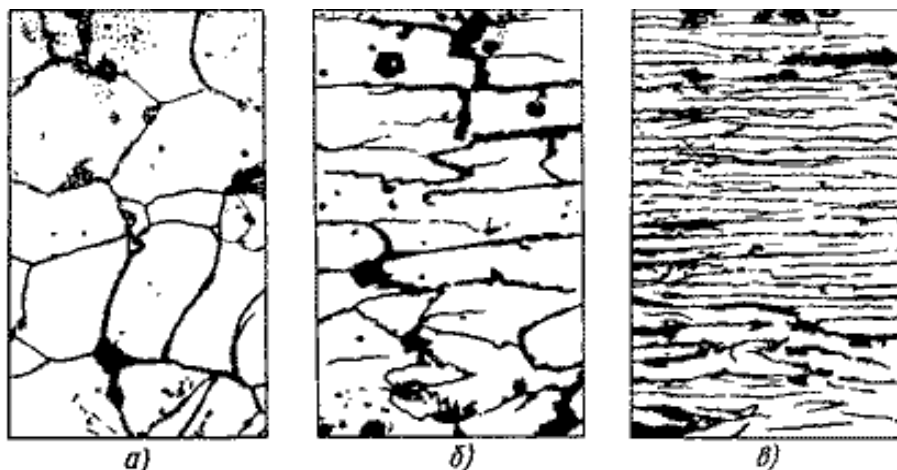


Рис. 4.16. Зміна структури при деформації: а) до деформації; б) після обжимання на 35%; в) після обжимання на 90%.

Метал набуває волокнистої будови. Волокна з витягнутими уздовж них неметалічними включеннями є причиною неоднаковості властивостей вздовж і поперек волокон. Одночасно зі зміною форми зерен в процесі пластичної деформації відбувається зміна орієнтування в просторі їх кристалічної решітки.

Коли кристалічні решітки більшості зерен одержують однакове орієнтування, виникає *текстура деформації*.

Вплив пластичної деформації на структуру і властивості металу: наклеп.

Текстура деформації створює кристалічну анізотропію, при якій найбільша різниця властивостей виявляється для напрямів, розташованих під кутом 45° один до одного. Із збільшенням ступеня деформації характеристики пластичності (відносне подовження, відносне звуження) і в'язкості (ударна в'язкість) зменшуються, а характеристики міцності (межа пружності, межа текучості, межа міцності) і твердість збільшуються (рис. 4.17). Також підвищується електроопір, знижуються опір корозії, теплопровідність, магнітна проникність.

Сукупність явищ, пов'язаних із зміною механічних, фізичних і інших властивостей металів в процесі пластичної деформації називають

деформаційним *зміцненням* або *наклепом*. Зміцнення при наклепі пояснюється зростанням на декілька порядків щільності дислокацій:

$$P=10^6 \rightarrow 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^2$$

Вільному переміщенню дислокацій заважає взаємний вплив, а також гальмування дислокацій у зв'язку з подрібненням блоків і зерен, перекрученням ґратки металів, виникненням напруженостей.



Рис.4.17. Вплив холодної пластичної деформації на механічні властивості металу

Вплив нагріву на структуру і властивості деформованого металу: повернення і рекристалізація.

Деформований метал знаходиться в нерівноважному стані. Перехід до рівноважного стану пов'язаний із зменшенням перекручень кристалічної ґратки, зняттям напруженості, що визначається можливістю переміщення атомів.

При низьких температурах рухливість атомів мала, тому стан наклепу може зберігатися необмежено довго.

При підвищенні температури металу в процесі нагріву після пластичної деформації дифузія атомів збільшується і починають діяти процеси знеміцнення, що приводять метал в більш рівноважний стан – *повернення і рекристалізація*.

Повернення. Невеликий нагрів викликає прискорення руху атомів, зниження щільності дислокацій, усунення внутрішніх напруженості і відновлення кристалічної решітки.

Процес часткового знеміцнення і відновлення властивостей називається **відпочинком** (перша стадія повернення). Має місце при температурі

$$T = (0,25 \dots 0,3) T_{пл}.$$

Повернення зменшує перекручення кристалічної ґратки, але не впливає на розміри і форму зерен і не перешкоджає утворенню текстури деформації.

Полігонізація – процес ділення зерен на частини: фрагменти, полігони в результаті ковзання і переповзання дислокацій. При температурах повернення можливе угруповання дислокацій однакового знаку в стінки, ділення зерна малокутовими межами (рис. 4.18).

У полігонізованому стані кристал володіє меншою енергією, тому утворення полігонів — процес енергетично вигідний. Процес протікає при невеликих ступенях пластичної деформації. В результаті знижується міцність на (10...15)% і підвищується пластичність (рис. 4.19).

Межі полігонів мігрують у бік більшої об'ємної щільності дислокацій, приєднуючи нові дислокації, завдяки чому кути розорієнтування зерен збільшуються (зерна аналогічні зернам, що утворюються при кристалізації). Змін в мікроструктурі не спостерігається (рис. 4.20, а).

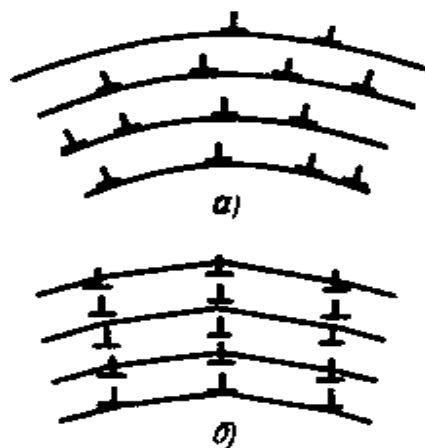


Рис. 4.18. Схема полігонізації:

а – хаотичне розташування крайових дислокацій в деформованому металі;

б – стінки дислокацій, після полігонізації.

Температура початку полігонізації не є постійною. Швидкість процесу залежить від природи металу, змісту домішок, ступеня попередньої деформації.

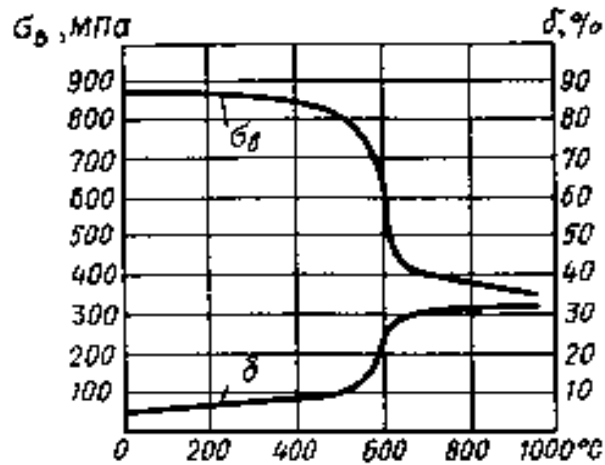


Рис. 4.19. Вплив нагріву деформованого металу на механічні властивості

При нагріві до достатньо високих температур рухливість атомів зростає і відбувається **рекристалізація** (рис. 4.20, б, в). **Рекристалізація** – процес зародження і зростання нових недеформованих зерен при нагріві наклепаного металу до певної температури.

Рекристалізація складається з таких стадій: **перша стадія** називається первинною рекристалізацією і полягає в утворенні центрів рекристалізації і зростанні нових рівноважних зерен з неспотвореною кристалічною ґраткою. Нові зерна виникають біля кордонів старих зерен і блоків, де ґратка була найбільш спотворена.

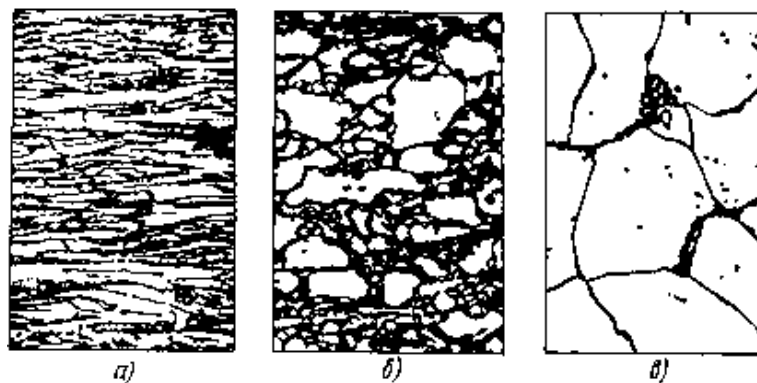


Рис. 4.20. Зміна структури деформованого металу при нагріві:
а) – полігонізована; б) – частково рекристалізована;
в) – повністю рекристалізована.

Кількість нових зерен поступово збільшується і в структурі не залишається старих деформованих зерен. Рушійною силою первинної рекристалізації є енергія, акумульована в наклепаному металі. Система прагне перейти в стійкий стан з неспотвореною кристалічною ґраткою.

Друга стадія називається збірною рекристалізацією і полягає в зростанні нових зерен, що утворилися. Рушійною силою збірної рекристалізації поверхнева енергія зерен. При дрібних зернах поверхня розділу велика, тому є великий запас поверхневої енергії.

При укрупненні зерен загальна протяжність меж зменшується, і система переходить в більш рівноважний стан. Температура початку рекристалізації пов'язана з температурою плавлення

$$T_{рек} = \alpha \cdot T_{пл}, \quad (4.15)$$

для металів $\alpha = 0,4$; для твердих розчинів $\alpha = 0,5...0,8$; для металів високої чистоти $\alpha = 0,1...0,2$. Нагрів металу до температур рекристалізації супроводжується різкою зміною мікроструктури і властивостей. Нагрів призводить до різкого зниження міцності при одночасному зростанні пластичності (рис. 4.19). Також знижується електроопір і підвищується теплопровідність.

На властивості металу значно впливає розмір рекристалізованих зерен. В результаті утворення крупних зерен при нагріві до температури t_1 починає знижуватися міцність і, особливо значно, пластичність металу. Основними чинниками, що визначають величину зерен металу при рекристалізації, є температура, тривалість витримки при нагріві і ступінь попередньої деформації (рис. 4.21).

Укрупнення зерен відбувається як при підвищенні температури, так і зі збільшенням часу витримки наклепаного металу при даній температурі. Найбільш крупні зерна утворюються після незначної попередньої деформації 3...10%. Таку деформацію називають *критичною*. І така деформація небажана перед проведенням відпалу, рекристалізації.

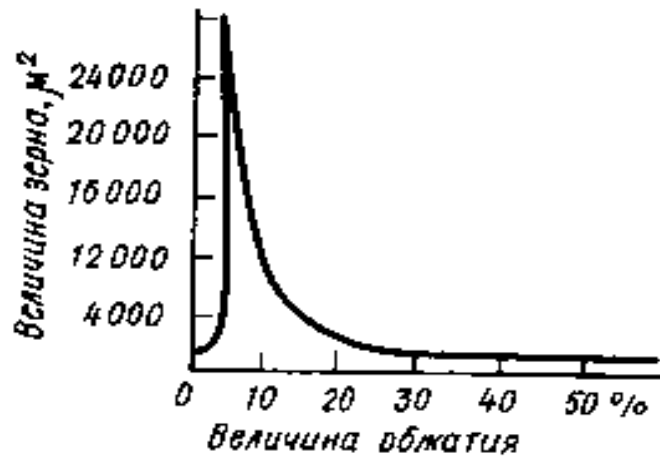


Рис. 4.21. Вплив попереднього ступеня деформації металу на величину зерна після рекристалізації.

Практично рекристалізаційний відпал для маловуглецевих сталей проводять при температурі $600\dots700^{\circ}\text{C}$, для латуні і бронзи – $560\dots700^{\circ}\text{C}$, для алюмінієвих сплавів – $350\dots450^{\circ}\text{C}$, для титанових сплавів – $550\dots750^{\circ}\text{C}$.

4.7. Контрольні запитання

1. Якого виду деформації випробовує: а) ніжка лавки; б) сидіння лавки; в) натягнута струна гітари; г) гвинт м'ясорубки; д) свердло; е) зуби пили?
2. Якого виду деформації виникають в стрижні, на якому кріпляться дверні петлі? Якого виду деформації виникають в щабліні, коли гімнаст здійснює повний оборот («сонце»)?
3. Для чого рама велосипеда робиться з порожнистих трубок, а не з суцільних стрижнів?
4. До закріпленого одним кінцем дроту діаметром 2 мм підвішений вантаж масою 10 кг. Знайти механічну напругу в дроті.
5. На два дроти, діаметри яких відрізняються в 3 рази, діють дві однакові розтягуючі сили. Порівняти виникаючі в них напруги.
6. Балка завдовжки 5 м з площею поперечного перетину 100 см^2 під дією сил по 10 кН, прикладених до її кінців, стиснулася на 1 см. Знайти відносне стиснення і механічне напруження.

7. При розтягуванні алюмінієвого дроту завдовжки 2 м в ній виникла механічна напруга 35 МПа. Знайти відносне і абсолютне подовження.
8. Знайти напруження, що виникає в сталевому тросі, при його відносному подовженні 0,001.
9. У скільки абсолютне подовження мідного дроту більше, ніж сталевого (такої ж довжини і такого ж поперечного перетину), при дії на них однакових сил розтягу?
10. До кінців сталевого дроту завдовжки 3 м і перетином 1 мм² прикладені розтягуючі сили по 200 Н кожна. Знайти абсолютне і відносне подовження.

11. На рис. 4.22 представлений графік залежності пружної напруги, що виникає в бетонній палі, від її відносного стиснення. Знайти модуль пружності бетону.

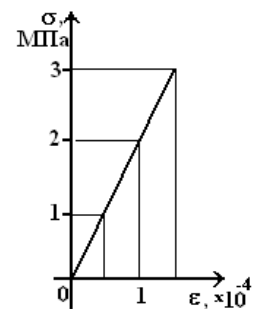


Рис. 4.22

12. Які сили треба прикласти до кінців сталевого дроту завдовжки 4 м і перетином 0,5 мм² для подовження її на 2 мм?
13. У скільки разів відносне подовження риболовецької леси діаметром 0,2 мм більше, ніж леси діаметром 0,4 мм, якщо до кінців леси прикладені однакові сили?
14. До дроту був підвішений вантаж. Потім дріт зігнули навпіл і підвісили той же вантаж. Порівняти абсолютне і відносне подовження дроту в обох випадках.
15. У скільки разів зміниться абсолютне подовження дроту, якщо, не міняючи навантаження, замінити дріт іншої з того ж матеріалу, але велику довжину, що має удвічі, і в 2 рази більший діаметр?
16. На капроновій риболовецькій волосіні написано: \varnothing 0,12 мм, розривне навантаження 0,75 кг. Знайти межу міцності на розрив даного сорту капрону.
17. Зі скількох сталевих проволікав діаметром 2 мм повинен полягати трос, розрахований на підйом вантажу 2 т?

18. При океанологічних дослідженнях для узяття проби ґрунту з дна океану на сталевому тросі опускають особливий прилад. Яка гранична глибина занурення? Масою приладу нехтувати.
19. Яку силу треба прикласти до кінців сталевго стрижня з площею поперечного перетину 10 см^2 , щоб не дати йому розширитися при нагріванні від 0 до 30°C .
20. До сталевго дроту радіусом 1 мм підвішений вантаж. Під дією цього вантажу дріт одержав таке ж подовження, як при нагріванні на 20°C . Знайти масу вантажу.
21. Мідний дріт натягнутий гарячіше при температурі 150°C між двома міцними нерухожими стінками. При якій температурі, остигаючи, розірветься дріт? Вважати, що закон Гука справедливий аж до розриву дроту.
22. При розтягуванні мідного дроту, поперечний перетин якого $1,5 \text{ мм}^2$, початок залишковій деформації спостерігалось при навантаженні $44,1 \text{ Н}$. Якою є межа пружності матеріалу дроту?
23. Яким повинен бути граничний діаметр сталевго троса, щоб він витримав навантаження $9,8 \text{ кН}$?
24. Знайти довжину мідного дроту, який, будучи підвішений вертикально, починає рватися під дією власної сили тяжіння.
25. Для вимірювання глибини моря з пароплава спустили гирю на сталевому тросі. Яку найбільшу глибину можна зміряти у такий спосіб? Щільність морської води 1000 кг/м^3 . Масою гирі в порівнянні з масою троса нехтувати.
26. З даху хати звішується сталевий дріт завдовжки 40 м і діаметром 2 мм . Яке навантаження може витримати цей дріт? На скільки подовжиться цей дріт, якщо на ньому повисне людина масою 70 кг ? Чи спостерігатиметься залишкова деформація, коли людина відпустить дріт? Межа пружності стали 294 Мпа .

27. До сталевому дроту радіусом 1мм підвішений вантаж масою 100 кг. На який найбільший кут можна відхилити дріт з вантажем, щоб він не розірвався при проходженні цим вантажем положення рівноваги?
28. До залізного дроту завдовжки 50см і діаметром 1мм прив'язана гиря масою 1 кг. З якою частотою можна рівномірно обертати у вертикальній площині такий дріт з вантажем, щоб він не розірвався?
29. Однорідний мідний стрижень завдовжки 1м рівномірно обертається навколо вертикальної осі, що проходить через один з його кінців. При якій частоті (швидкості) обертання стрижень розірветься?
30. Однорідний стрижень рівномірно обертається навколо вертикальної осі, що проходить через його середину. Стрижень розривається, коли лінійна швидкість кінця стрижня досягає 380 м/с. Знайти межу міцності матеріалу стрижня. Густина матеріалу стрижня $7,9 \cdot 10^3 \text{кг/м}^3$.
31. До сталевому дроту завдовжки 1 м і радіусом 1мм підвісили вантаж масою 100 кг. Чому рівна робота розтягування дроту?
32. З гумового шнура завдовжки 42 см радіусом 3 мм зроблена рогатка. Хлопчик, стріляючи з рогатки, розтягнув гумовий шнур на $\Delta l = 20$ см. Знайти чому рівний модуль Юнга для цієї гуми, якщо відомо, що камінь масою 0,02 кг, пущений з рогатки, полетів із швидкістю 20 м/с. Зміною перетину шнура при розтягуванні нехтувати.
33. Є гумовий шланг завдовжки 50 см і внутрішнім діаметром 1 см. Шланг натягнули так, що його довжина стала на $\Delta l = 10$ см більше. Знайти внутрішній діаметр натягнутого шланга, якщо коефіцієнт Пуассона для гуми $\sigma = 0,5$.
34. Знайти момент пари сил M , необхідний для закручування дроту завдовжки 10 см і радіусом 0,1 мм на кут $\varphi = 10'$. Модуль зсуву матеріалу дроту $G = 4,9 \cdot 10^{10}$ Па.
35. Люстерко гальванометра підвішене на дроті завдовжки 10 см і діаметром 0,01 мм. Знайти M , що закручує момент, відповідний

- відхиленню зайчика на величину $a=1\text{мм}$ за шкалою, видаленою на відстань 1 м від люстерка. Модуль зсуву матеріалу дроту $G=4\cdot 10^{10}\text{ Па}$.
36. Знайти потенційну енергію дроту завдовжки 5см і діаметром $0,04\text{мм}$, закрученої на кут $10'$. Модуль зсуву матеріалу дроту $5,9\cdot 10^{10}\text{ Па}$.
37. При протіканні електричного струму через обмотку гальванометра на його рамку з укріпленим в ній люстерком діє момент, що закручує, $M=2\cdot 10^{-13}\text{Нм}$. Рамка при цьому повертається на малий кут φ . На це закручування йде робота $A=8,7\cdot 10^{16}\text{Дж}$. На яку відстань a переміститься зайчик від люстерка за шкалою, видаленою на відстань рівну 1м від гальванометра?
38. Знайти коефіцієнт Пуассона, при якому об'єм дроту при розтягуванні не міняється.
39. Знайти відносну зміну густини циліндрового мідного стрижня при стисненні його тиском $9,8\cdot 10^7\text{Па}$. Коефіцієнт Пуассона для міді прийняти рівним $\sigma=0,34$.
40. Залізний дріт завдовжки 5м висить вертикально. На скільки зміниться об'єм дроту, якщо до неї прив'язати гирю масою 10 кг ? Коефіцієнт Пуассона для заліза $\sigma=0,3$.

Рекомендована література

1. Косенко В. А. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство. Київ: Видавництво Університет «Україна». 2012. 252 с.
2. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єрмоменко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій. Х.: УЦЗУ. 2008. 136 с.

РОЗДІЛ 5. ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ.

5.1. Діаграма стану залізо – вуглець. Критичні точки.

Компоненти і фази. Сталі та чавуни.

Залізовуглецеві сплави – *сталі і чавуни* – найважливіші металеві сплави сучасної техніки. Виробництво чавуну і сталі за об'ємом перевершує виробництво всіх інших металів разом узятих більш, ніж вдесятеро.

Діаграма стану залізо – вуглець дає основне уявлення про будову залізовуглецевих сплавів – сталей і чавунів.

Початок вивченню діаграми залізо – вуглець поклав Чернов Д. К. в 1868 році. Чернов вперше вказав на існування в сталі критичних точок і на залежність їх положення від вмісту вуглецю.

Діаграма залізо – вуглець повинна розповсюджуватися від заліза до вуглецю. Залізо утворює з вуглецем хімічну сполуку: цементит – Fe_3C . Кожну стійку хімічну сполуку можна розглядати як компонент, а діаграму – по частинах. Оскільки на практиці застосовують металеві сплави із змістом вуглецю до 5%, то розглядаємо частину діаграми стану від заліза до хімічної сполуки – цементиту, що містить 6,67% вуглецю.

Діаграма стану залізо – цементит представлена на рис. 5.1. Компонентами залізовуглецевих сплавів є залізо, вуглець і цементит.

1. **Залізо** – перехідний метал сріблясто-світлого кольору. Має високу температуру плавлення – $1539^{\circ}C \pm 5^{\circ}C$.

У твердому стані залізо може знаходитися в двох модифікаціях. Поліморфні перетворення відбуваються при температурах $911^{\circ}C$ і $1392^{\circ}C$. При температурі нижче $911^{\circ}C$ існує Fe_{α} з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою. У інтервалі температур $911...1392^{\circ}C$ стійким є Fe_{γ} з гранецентрованою кубічною ґраткою. Вище $1392^{\circ}C$ залізо має об'ємноцентровану кубічну ґратку і називається Fe_{δ} або високотемпературне Fe_{α} .

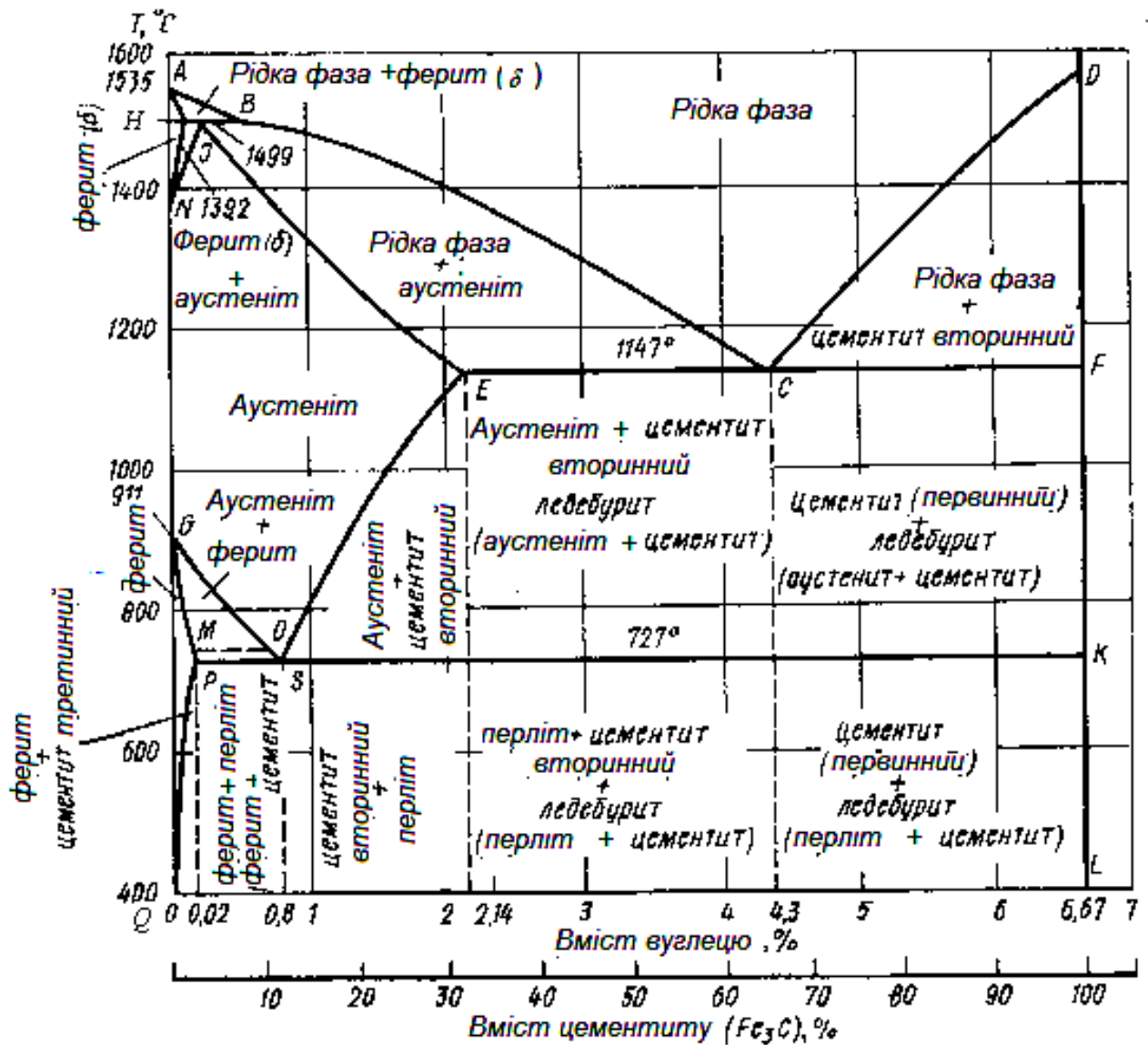


Рис. 5.1. Діаграма стану залізо – цементит.

Високотемпературна модифікація Fe_{α} не є новою алотропічною формою. При 768°C (точка Кюрі) залізо має магнітне перетворення. Нижче 768°C залізо феромагнітне, позначається Fe_{α} , а вище 768°C – парамагнітне, позначається Fe_{β} . Вона, як і Fe_{α} , має ОЦК-гратку і не є новою алотропною модифікацією заліза.

Залізо технічної чистоти володіє невисокою твердістю (80 HB) і міцністю (межа міцності – $\sigma_B = 250\text{ МПа}$ межа текучості – $\sigma_T = 120\text{ МПа}$) і високими характеристиками пластичності (відносне подовження – $\delta = 50\%$, а відносне звуження – $\psi = 80\%$).

Властивості можуть змінюватися в деяких межах залежно від величини зерна.

Залізо та сплави на його основі характеризуються високим модулем пружності, що забезпечує високу жорсткість деталей з цих сплавів.

Залізо з багатьма елементами утворює розчини: з металами – розчини заміщення, з вуглецем, азотом і воднем – розчини впровадження.

2. **Вуглець** відноситься до неметалів. Володіє поліморфним перетворенням: залежно від умов утворення існує у формі графіту з гексагональною кристалічною ґраткою (температура плавлення – 3500°C , густина – 2500 кг/м^3) або у формі алмазу зі складною кубічною ґраткою з координаційним числом рівним чотирьом (температура плавлення – 5000°C).

У сплавах заліза з вуглецем вуглець знаходиться в стані твердого розчину із залізом і у вигляді хімічної сполуки – цементиту (Fe_3C), а також у вільному стані у вигляді графіту (у сірих чавунах).

Залізо і вуглець в сплавах взаємодіють і утворюють такі фази.

Ферит (Φ) – твердий розчин впровадження вуглецю в α – залізо. Вуглець розташовується в дефектах ґратки. У α – залізі може розчинитися до $0,02\% \text{ C}$ (точка P на діаграмі $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$), що відповідає температурі 727°C . З пониженням температури розчинність вуглецю в α - залізі зменшується і при кімнатній температурі кількість вуглецю в α - залізі складає $0,006\%$ (лінія PQ на діаграмі – лінія граничної розчинності вуглецю в α – залізі).

Ферит інакше зветься технічним залізом.

Аустеніт (A) – твердий розчин впровадження вуглецю в γ – залізо. γ – Fe розчиняє максимально $2,14\% \text{ C}$ (точка E на діаграмі), що відповідає температурі 1147°C . З пониженням температури розчинність вуглецю в γ - залізі зменшується і при температурі 727° C складає $0,8\% \text{ C}$. Лінія ES на діаграмі – лінія граничної розчинності вуглецю в γ - залізі. При температурах нижче температур лінії ES через те, що зменшується розчинність C в $\gamma - \text{Fe}$, із $\gamma - \text{Fe}$ виділяється вуглець у вигляді хімічної сполуки Fe_3C , яке має назву

цементит (Ц). Цементит, який виділяється з аустеніту, це цементит вторинний (Ц_{II}), на відміну від цементиту первинного (Ц_I), що кристалізується при первинній кристалізації з рідини. Аустеніт має твердість 200...250 HB пластичний (відносне подовження – $\delta=40\text{...}50\%$), парамагнітний.

3. **Цементит (Fe_3C)** – хімічна сполука заліза з вуглецем (карбід заліза), містить 6,67 % вуглецю.

Алотропічних перетворень не відбувається. Цементит має ромбічну кристалічну ґратку.

Температура плавлення цементиту точно не встановлена (1250, 1550 $^{\circ}\text{C}$). При низьких температурах цементит слабо феромагнітний, магнітні властивості втрачає при температурі близько 217 $^{\circ}\text{C}$.

Цементит має високу твердість (більше 800 HB легко дряпає скло), але надзвичайно низьку, практично нульову, пластичність. Такі властивості є наслідком складної будови кристалічної решітки.

У залізовуглецевих сплавах присутні фази: цементит первинний (Ц_I), цементит вторинний (Ц_{II}), цементит третинний (Ц_{III}). Хімічні і фізичні властивості цих фаз однакові. Вплив на механічні властивості сплавів надає відмінності в розмірах, кількості і розташуванні цих виділень.

Цементит первинний виділяється з рідкої фази у вигляді великих пластинчастих кристалів.

Цементит вторинний виділяється з аустеніту і розташовується у вигляді сітки навколо зерен аустеніту (при охолодженні – навколо зерен перліту).

Цементит третинний виділяється з фериту і у вигляді дрібних включень розташовується біля кордонів феритних зерен.

Цементит здатний утворювати тверді розчини заміщення.

Атоми вуглецю можуть заміщатися атомами неметалів: азотом, киснем; атоми заліза – металами: марганцем, хромом, вольфрамом і ін. Такий твердий розчин на базі ґратки цементиту називається **легованим цементитом**.

Цементит – з'єднання нестійке і при високих температурах розпадається на аустеніт і графіт. На цьому явищі заснований відпал білого чавуну з метою одержання ковкого чавуну.

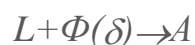
Процеси структуроутворення залізовуглецевих сплавів.

Лінія $ABCD$ – ліквідус системи (рис.5.1). Вище температур цієї лінії усі сплави залізо вуглець знаходяться в стані рідини («Ж» – від російського слова «жидкость»). При температурах лінії BC із рідини кристалізується аустеніт ($Ж \rightarrow A$), при температурах лінії CD із рідини кристалізується цементит первинний ($Ж \rightarrow C_I$). Для сплаву з 4,3%С із рідини кристалізуються одночасно аустеніт і цементит ($Ж \rightarrow A + C_I$), тобто сплав з 4.3 % С – евтектика.

Суміш ($A + C$) має назву *ледебурит* (L) на ім'я німецького ученого Ледебура. Лінія ECF – лінія евтектичного перетворення. Усі сплави, які містять більше 2,14%С, мають евтектичне перетворення. Сплав з 4,3%С, як було сказано, – евтектика. Його структура – ледебурит. Сплави від 2,14%С – доевтектичні. Їх структура ($L + A + C_{II}$). Сплави з кількістю вуглецю більше 4,4%С – заевтектичні. Їх структура – ($L + C_I$). Сплав з 6,67%С – чиста хімічна сполука Fe_3C .

При температурі нижче $727^{\circ}C$ до складу ледебуриту входять цементит первинний і перліт, його називають ледебурит перетворений (L_{III}).

Лінія $ANIECF$ – лінія солідус. На ділянці AN закінчується кристалізація фериту (δ). На лінії HJB при постійній температурі $1499^{\circ}C$ йде перитектичне перетворення, яке полягає в тому, що рідка фаза реагує з кристалами фериту, які утворилися раніше (δ), внаслідок чого утворюється аустеніт:



Подивимось на ліву частину діаграми (рис. 5.1). Лінія IE – частина лінії солідус, геометричне місце температур кінця кристалізації аустеніту ($Ж \rightarrow A$).

Температури $910^{\circ}C$ и $1392^{\circ}C$ – температури поліморфного перетворення у чистому залізі. Лінії HN , IN і GS , GP – лінії поліморфного перетворення. Між температурами цих ліній структура сплавів аустеніт + ферит. Таким чином, у сплавах, які мають вуглецю менше 0,8%, аустеніт при температурах

лінії GS перетворюється у ферит. У сплавах, які мають вуглецю більше 0,8%, при температурах лінії SE із аустеніту виділяється $Ц_{II}$ ($A \rightarrow Ц_{II}$). Для сплаву з 0,8% C аустеніт розпадається на суміш ($\Phi + Ц$). Розпад твердого розчину на механічну суміш кристалів має назву евтектоїдного перетворення (на відміну від евтектичного перетворення – одночасної кристалізації суміші кристалів із рідини).

По лінії HN починається перетворення фериту (δ) в аустеніт, обумовлене поліморфним перетворенням заліза. По лінії NI перетворення фериту (δ) в аустеніт закінчується.

По лінії GS починається перетворення аустеніту у ферит, обумовлене поліморфним перетворенням заліза. По лінії PG перетворення аустеніту у ферит закінчується.

По лінії ES починається виділення цементиту вторинного з аустеніту, обумовлене зниженням розчинності вуглецю в аустеніті при пониженні температури.

По лінії MO при постійній температурі $768^{\circ}C$ мають місце магнітні перетворення.

По лінії PSK при постійній температурі $727^{\circ}C$ йде евтектоїдне перетворення. Точка S , що відповідає концентрації вуглецю 0,8% – евтектоїдна точка. Температура $727^{\circ}C$ називається температурою евтектоїдного перетворення. Як вже говорилося, в цій точці аустеніт, який містить 0,8% вуглецю, перетворюється на евтектику (механічну суміш фериту і цементиту вторинного):



По механізму дане перетворення схоже на евтектичне, але протікає в твердому стані. Евтектоїд (ферит + цементит вторинний) називається перлітом ($П$) = $\text{Евт.}(\Phi + Ц_{II})$, містить 0,8% вуглецю. Назву одержав за те, що на полірованому і протравленому шліфі спостерігається перламутровий блиск. Перліт може існувати в зернистій і пластинчастій формі, залежно від умов утворення. Всі сплави, які містять більше 0,02% вуглецю мають

евтектоїдне перетворення. Сплав з $0,8\%C$ – евтектоїдний, сплави з кількістю вуглецю менше $0,8\%$ – доевтектоїдні, якщо вуглецю більше $0,8\%$ – заевтектоїдні.

По лінії PQ починається виділення цементиту третинного з фериту, обумовлене зниженням розчинності вуглецю у фериті при пониженні температури. Температури, при яких відбуваються фазові і структурні перетворення в сплавах системи залізо – цементит, тобто критичні точки, мають умовні позначення. Критичні точки позначаються буквою A (від французького *arret* – зупинка):

A_1 – лінія PSK ($727^{\circ}C$) – перетворення $P \leftrightarrow A$;

A_2 – лінія MO ($768^{\circ}C$, т. Кюрі) – магнітні перетворення;

A_3 – лінія GOS (змінна температура, залежна від вмісту вуглецю в сплаві) – перетворення $\Phi \leftrightarrow A$;

A_4 – лінія NJ (змінна температура, залежна від вмісту вуглецю в сплаві) – перетворення $A \leftrightarrow \Phi(\delta)$;

A_{cm} – лінія SE (змінна температура, залежна від вмісту вуглецю в сплаві) – початок виділення цементиту вторинного (іноді позначається A_3).

Оскільки при нагріві і охолодженні перетворення здійснюються при різних температурах, щоб відрізнити ці процеси вводяться додаткові позначення. При нагріві додають букву s , тобто, наприклад, A_{cl} , а при охолодженні – букву r , тобто A_{rl} .

Всі сплави заліза з вуглецем носять назву **сталі і чавуни**.

Сталями називаються сплави заліза з вуглецем при вмісті вуглецю від $0,02$ до $2,14\%$ (від $0,02$ до $0,8\%$ – доевтектоїдні сталі, від $0,8$ до $2,14\%$ – заевтектоїдні сталі).

Чавунами називаються сплави заліза з вуглецем, що містять від $2,14$ до $6,67\%C$ (від $2,14$ до $4,3\%C$ – доевтектичні, при $4,3\%C$ – евтектичні; від $4,3$ до $6,67\%C$ – заевтектичні чавуни).

Таким чином, частина діаграми до $2,14\%C$ – «сталена частина». Інша частина діаграми, коли вуглецю більш ніж $2,14\%$, – «частина білих чавунів».

5.2. Рівноважні структури вуглецевих сталей та їх класифікація.

Структура технічного (армко) заліза.

Особливу групу складають сплави із змістом вуглецю менше 0,02% (точка *P* на діаграмі стану залізо – цементит, рис.5.1), їх називають технічне або армко залізо. Мікроструктури технічного заліза представлені на рис. 5.2. Структура технічного заліза після закінчення кристалізації складається або із зерен фериту (рис. 5.2, а), при вмісті вуглецю менше 0,006%, або із зерен фериту і кристалів цементиту третинного, розташованих по межах зерен фериту (рис. 5.2, б), якщо вміст вуглецю від 0,006 до 0,02 %.

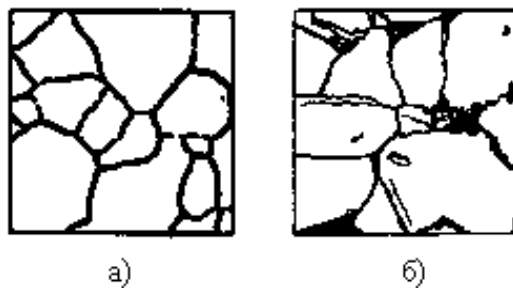


Рис. 5.2. Мікроструктури технічного заліза: а) – вміст вуглецю менше 0,006%; б) – вміст вуглецю 0,006...0,02%.

Структура вуглецевих сталей.

Вуглецевими сталями називають сплави заліза з вуглецем, які містять 0,02...2,14 % вуглецю, що закінчують кристалізацію утворенням аустеніту. Вони володіють високою пластичністю, особливо в аустенітному стані. Структура сталей формується в результаті перекристалізації аустеніту. Мікроструктури вуглецевих сталей представлені на рис. 5.3 – 5.4. На рис. 5.4 справа структури показані схематично (замальовані).

За змістом вуглецю і по структурі сталі підрозділяються на:

1. **Доевтектоїдні** ($0,02\% < C < 0,8\%$). Структури доевтектоїдних сталей у рівноважному стані складається з фериту (світлі зерна) і перліту (темні зерна) – структура ферит + перліт ($\Phi + \Pi$) (рис. 5.3, а). При збільшенні вуглецю в доевтектоїдних сталях пропорційно росте частка перліту, в якому знаходиться весь вуглець сталі, оскільки у фериті при кімнатній температурі вуглецю дуже мало (0,006 %).

2. *Евтектоїдні* ($C=0,8\%$), структура перліт (Π). *Перліт* (перламутр) – евтектоїдна суміш фериту і цементиту, що утворюється при 727^0C при повільному охолодженні з аустенітного стану $A_{0,8\%C} \rightarrow \Pi_{0,8\%C} (\Phi + \text{Ц})$. Перліт може бути пластинчастий (смугастий) (рис. 5.3, б) або зернистий (рис. 5.3, в). При мікроскопічному дослідженні цементит виглядає світлим і блискучим; ферит – затіненим, тьмяним і темним. Оскільки в перліті міститься мало цементиту ($\cong 12\%$), то перліт в сталях і чавунах при мікроскопічному дослідженні виглядає темним.

3. *Заевтектоїдні* ($0,8\% < C < 2,14\%$), структура перліт + цементит вторинний ($\Pi + \text{Ц}_{\Pi}$), сітка цементиту розташовується навколо зерен перліту.

Якщо припустити, що густини фериту і цементиту в сталі співрозмірні, то по рівноваговій мікроструктурі сплавів можна приблизно визначити кількість вуглецю у складі сплаву, враховуючи наступне: кількість вуглецю в перліті складає $0,8\%$, у цементиті – $6,67\%$. Зважаючи на малу розчинність вуглецю у фериті, приймається, що в ньому вуглецю немає. Для цього на мікрофотографії структури сталі визначають площину, зайняту перлітом. Наприклад, вона становить 30% . Знаючи, що в перліті міститься $0,8\% \text{C}$, із пропорції

$$100\% \Pi - 0,8\% \text{C}$$

$$30\% \Pi - X\% \text{C}$$

можна визначити кількість вуглецю:

$$X = \frac{30 \cdot 0,8}{100} = 0,24\%.$$

Далі визначається марка сталі. Сталь, яка містить $0,24\% \text{C}$, – це конструкційна сталь марки 25.

Кількість вуглецю в заевтектоїдних сталях можна визначити за формулою:

$$\%C = \frac{\% \Pi \cdot 0,8\% + \% \text{Ц}_{\Pi} \cdot 6,67\%}{100},$$

де $\% \Pi$ і $\% \text{Ц}_{\Pi}$ – площі мікрознімку, зайняті відповідно перлітом і цементитом вторинним; $0,8\% \text{C}$ і $6,67\% \text{C}$ – кількість вуглецю в перліті і цементиті.

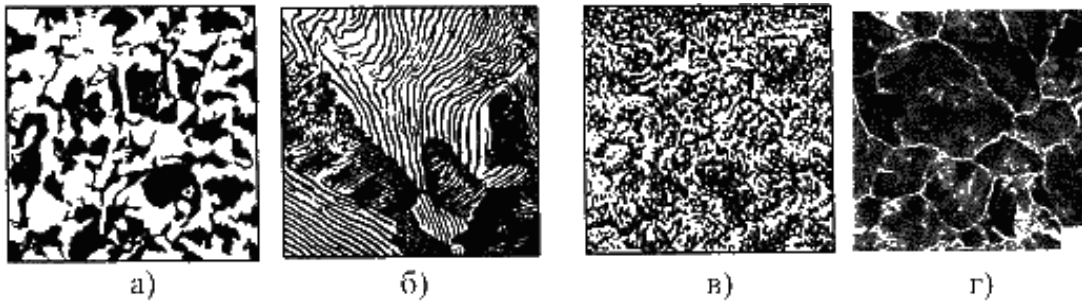


Рис. 5.3. Мікроструктури сталей:

а – доевтектоїдна сталь ($\Phi + \Pi$) ферит – світлі зерна, перліт – темні зерна;
б – евтектоїдна сталь (пластинчастий перліт); *в* – евтектоїдна сталь (зернистий перліт); *г* – заевтектоїдна сталь ($\Pi + \text{Ц}_{\text{II}}$) – темні перлітні зерна оточені сіткою цементиту вторинного, товщина сітки збільшується при збільшенні вуглецю в сталі.

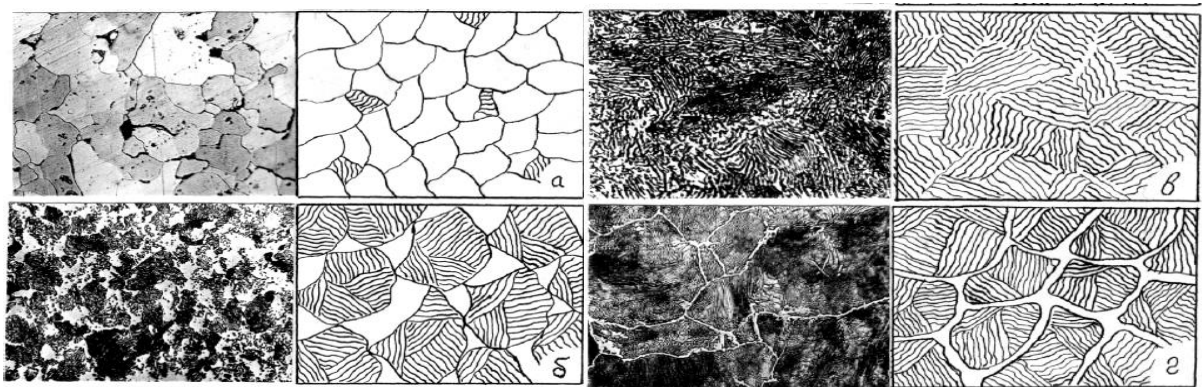


Рис. 5.4. Мікроструктури сталей:

а – доевтектоїдна сталь (0,1 % C); *б* - доевтектоїдна сталь (0,6 % C); *в* – евтектоїдна сталь (0,8 % C); *г* – заевтектоїдна сталь (1,2 % C).

Вплив вуглецю і постійних домішок на властивості сталей.

Вуглець – основний легуючий елемент, що оказує визначний вплив на властивості і структуру сталі. Збільшення змісту вуглецю в сталі до 0,8% приводить до підвищення властивостей міцності, твердості і зниження пластичності за рахунок заміни м'якого фериту на міцніший перліт (рис. 5.5). Зниження міцності при змісті вуглецю понад 0,8% в сталях, не підданих термічній обробці, пов'язано з появою крихкої сітки цементиту по межах перлітних зерен.

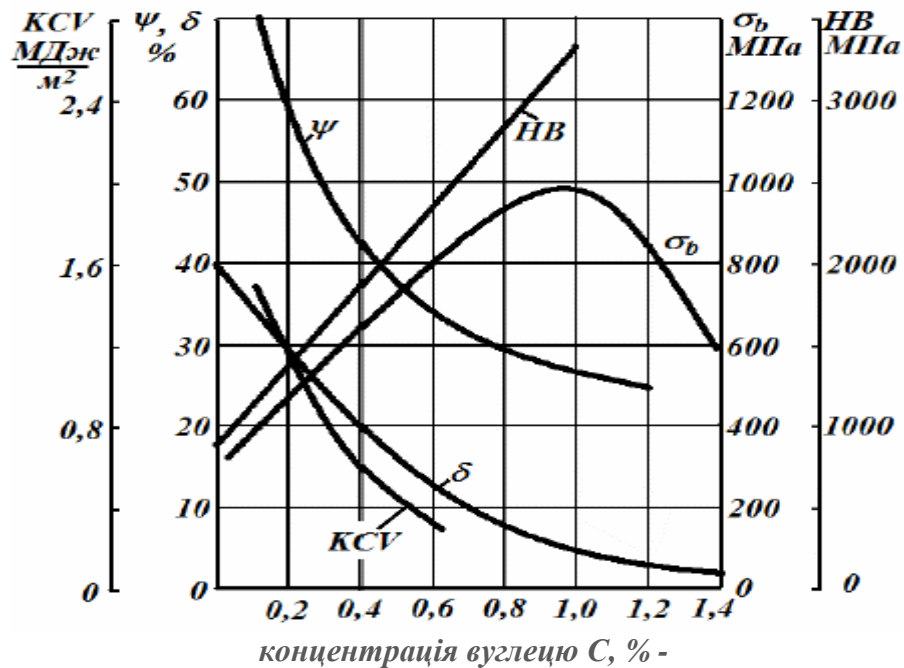


Рис. 5.5. Вплив вуглецю на механічні властивості сталей.

σ_b – тимчасовий опір розриву; HB – твердість по Брінеллю; KCV – ударна в'язкість (характеристика надійності); δ – відносне подовження; Ψ – відносне звуження

Постійними домішками в сталях вважають марганець, кремній, фосфор, сірку, а також гази (водень, азот, кисень). Звичайно максимальний їх зміст: % 0,8 Mn; 0,5 Si; 0,05 S; 0,05 P.

Марганець вводиться в сталь для розкислювання (видалення кисню) і усунення шкідливого впливу сірчистих з'єднань заліза. Марганець підвищує міцність гарячекатаної сталі. Звичайно вміст марганцю в сталі 0,3 - 0,8%.

Кремній розкислює сталь і зберігається в ній до 0,4%.

Шкідливими домішками в сталі являються сірка і фосфор.

Фосфор – шкідлива домішка, що міститься в рудах заліза і паливі. Розчиняючись у фериті, фосфор викликає холодноламкість сталі, тобто крихкість при низьких температурах.

Сірка – шкідлива домішка, що потрапляє в метал з руди і палива, яка викликає червоноламкість – крихкість при 800°C і вище, що перешкоджає гарячій обробці тиском.

Водень, азот, кисень можуть розчинятися в металі або утворювати неметалічні включення (нітриди, оксиди). І в тому, і в іншому випадку сталі стають більш крихкими.

Класифікація вуглецевих сталей

Вуглецеві сталі класифікуються по хімічному складу, якості, ступеню розкислювання, структурі і призначенню.

По хімічному складу виділяють низьковуглецеві ($\leq 0,3\%C$), середньовуглецеві ($0,3-0,7\%C$) і високовуглецеві ($> 0,7\%C$) сталі.

За якістю сталі класифікують на сталі звичайної якості і якісні. Під якістю сталі мають на увазі сукупність властивостей, які визначаються металургійним процесом її виробництва.

По ступеню розкислювання і характеру твердіння сталі класифікують на *спокійні, напівспокійні і киплячі* (відповідно в кінці марки сталі ставиться індекс сп, пс і кп). Розкислювання – процес видалення з рідкого металу кисню, що проводиться для запобігання крихкому руйнуванню сталі при гарячій деформації. *Спокійні* сталі розкислюють марганцем, кремнієм і алюмінієм. Вони містять мало кисню, тверднуть спокійно, без газовиділення. *Киплячі* сталі розкислюють тільки марганцем. Перед розливанням вони містять підвищену кількість кисню, який при твердінні рідкого металу частково взаємодіє з вуглецем з утворенням чадного газу CO . Виділення CO створює враження кипіння стали. Киплячі сталі дешевші, низьковуглецеві, практично без кремнію, але з підвищеною кількістю газоподібних домішок. *Напівспокійні сталі* по ступеню розкислення займають проміжне становище між спокійними і киплячими.

За призначенням вуглецеві сталі діляться на *конструкційні*, які використовуються для виготовлення деталей машин, і *інструментальні*.

Сталі конструкційні звичайної якості містять шкідливих домішок до $0,055\%S$ і $0,045\%P$. Залежно від властивостей, що гарантуються, їх поставляють трьох груп – *A, B і B*.

Сталі групи «А» поставляються з гарантованими механічними властивостями без уточнення їх хімічного складу. Група «А» в позначенні сталі не вказується. Такі сталі маркуються поєднанням букв *Ст*, цифрою (від 0 до 6), що показує номер марки, і індексами, що вказують ступінь розкислення сталі (тобто ступені виведення із сталі кисню): спокійна (*сп*) – кисень виведений найбільшою мірою, напівспокійна (*пс*), кипляча (*кп*). Із збільшенням номера марки підвищується міцність, і знижується пластичність сталі.

Приклади позначення: *Ст0, Ст1кп, Ст3пс, Ст4, Ст5сп, Ст6*. Сталі цієї групи призначені для використання в стані постачання у вигляді листів і різних профілів (прутки, листи, швелери, труби і ін.) і поковок без подальшої зварки або термічної обробки, оскільки їх хімічний склад, що визначає режими обробки, не регламентується і може сильно коливатися.

Сталі групи «Б» поставляються з гарантованим хімічним складом і призначені для виробів, що виготовляються із застосуванням гарячої деформації або термічної обробки. Високотемпературна обробка приводить до зміни первинних механічних властивостей, а для вибору режимів нагріву необхідне знання вмісту вуглецю. Позначаються з вказівкою літери «Б», поєднанням букв *Ст*, цифрою від 0 до 6 і індексом розкислення – *кп, пс, сп*.
Приклади позначення: *БСт1кп, БСт2пс, БСт3, БСт4сп, БСт5, БСт6*. Вміст вуглецю в сталі підвищується при збільшенні номера сталі.

Сталі групи «В» поставляються з гарантованими механічними властивостями і хімічним складом для виробництва зварних конструкцій. Механічні властивості сталей цієї групи відповідають нормам для сталей групи «А», а хімічний склад – нормам для тих же марок сталі групи «Б». Знання хімічного складу необхідне для підбору зварювальних матеріалів і режимів зварки, а гарантовані механічні властивості сталі зберігаються на ділянках, що не нагріваються. Групу сталі вказує буква В на початку марки сталі, а далі – також як і в позначеннях сталей «А» і «Б».

Приклад позначення – *ВСт4 сп*.

Відповідно до ГОСТ 380-94 сталі вуглецеві звичайної якості на групи не підрозділяються і маркуються тільки відповідно до вмісту вуглецю. Вуглецеві сталі звичайної якості призначені для виготовлення різних металоконструкцій, а також слабо навантажених деталей машин і приладів.

Сталі якісні конструкційні містять не більше 0,04% S і 0,035% P. Ці сталі характеризуються нижчим змістом шкідливих домішок і неметалічних включень. Сталі маркуються двозначними числами 05, 08, 10, 15, 20 ...85, що позначають середній вміст вуглецю в сотих долях відсотка (ГОСТ 1050-74). Спокійні вуглецеві якісні сталі маркуються без індексу, напівспокійні і киплячі з додаванням відповідно «пс» і «кп». Наприклад, сталь 20кп. Вони поставляються у вигляді прокату, поковок з гарантованим хімічним складом і механічними властивостями.

Низьковуглецеві сталі типу 05, 08, 10 – маломіцні, високопластичні, застосовуються для холодного штампування різних виробів.

Сталі 10, 20, 25 – пластичні, добре штамнуються і зварюються, застосовуються для виготовлення кріпильних деталей, втулок, осей, кулачків і ін. Низьковуглецеві сталі можуть насичатися з поверхні вуглецем (цементация).

Середньовуглецеві сталі 30, 35, 45, 50 мають підвищену міцність, але меншу в'язкість і пластичність. Застосовують ці сталі для виготовлення невеликих валів, шатунів, зубчатих коліс і ін. Вироби після механічної обробки піддають гарту і високому відпуску (термічному поліпшенню). Сталі 60, 65, 70, 75, 80 і 85 застосовують для виготовлення ресорно-пружинних виробів.

Інструментальні вуглецеві сталі. Інструментальні вуглецеві сталі містять більше 0,7 % С і відрізняються високою твердістю і міцністю. Ці сталі діляться на **якісні** і **високоякісні**.

Марки якісної сталі по ГОСТ 1437-74 наступні: У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13. Цифри в марці показують середній вміст вуглецю в десятих долях відсотка. Сталі У7, У8, У9 мають достатньо високу в'язкість і застосовуються

для інструментів, що піддаються ударам: столярного, слюсарного, ковальського інструменту, матриць, пуансонів і ін. Сталі *У10, У11, У12* застосовують для інструменту з високою твердістю на робочих гранях (*HRC 62.64*). Це напилки, пили, мітчики, різці, калібри і т.д. Сталь *У13* використовують для інструментів, що вимагають найвищої твердості: шаберів, інструменту, гравіювання.

Марки високоякісної сталі: *У7А, У8А, У13А*. Буква *А* в кінці марки – високоякісна. Високоякісні сталі мають те ж призначення, що і якісні, але із-за більшої в'язкості їх застосовують для інструментів з тонкою ріжучою кромкою.

5.3. Чавуни: білі, ковкі, сірі, високоміцні та їх застосування

Чавунами називають сплави заліза з вуглецем, що містять вуглецю більше 2,14 % (до 6,67 %), які закінчують кристалізацію утворенням евтектики (ледебуриту). Наявність легкоплавкого ледебуриту в структурі чавунів підвищує їх ливарні властивості.

Чавуни, що кристалізуються відповідно до діаграми стану залізо – цементит у рівноважних умовах, відрізняються високою крихкістю. Колір їх зламу – сріблясто-білий. Такі чавуни називаються **білими чавунами**.

Мікроструктури **білих чавунів** представлені на рис. 5.6.

Білі чавуни підрозділяються по кількості вуглецю і по структурі на:

доевтектичний ($2,14\% < C < 4,3\%$), структура перліт + ледебурит + цементит вторинний ($П+Л+Ц_{II}$) (рис. 5.6, а);

евтектичний ($C=4,3\%$), структура ледебурит ($Л$) (рис. 5.6, б), (пам'ятаємо, що ледебурит – це евтектична суміш аустеніту і цементиту, яка одночасно кристалізується із рідини при $1147^{\circ}C$);

заевтектичний ($4,3\% < C < 6,67\%$), структура ледебурит + цементит первинний ($Л+Ц_I$) (рис. 5.6, в).

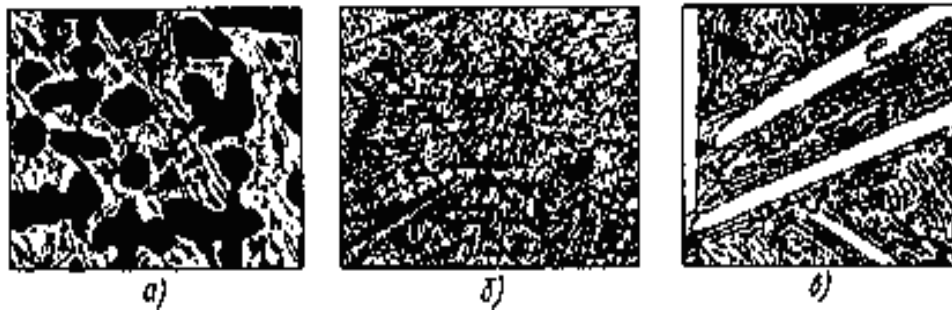


Рис. 5.6. Мікроструктури білих чавунів:

а – доевтектичний білий чавун($\Pi+Л+Ц_{II}$); б – евтектичний білий чавун ($Л$);
в – заевтектичний білий чавун($Л+Ц_I$).

Білі чавуни мають високу твердість і не піддаються обробці різанням. Оскільки в структурі білих чавунів багато твердого і крихкого цементиту, білі чавуни використовують лише для вироблення деталей, які працюють в умовах підвищеного зносу (наприклад, валки прокатних станів, деталей гідромашин). Термічною обробкою білий чавун переробляють на **ковкий чавун**. Якщо білий чавун піддати спеціальному графітуючому відпалу, то при високих температурах цементит, що міститься в білому чавуні, розпадається з утворенням графіту. Такий відпалений чавун зветься **ковкий чавун**. На рис. 5.7 зображена схема відпалу білого чавуну для одержання ковкого.

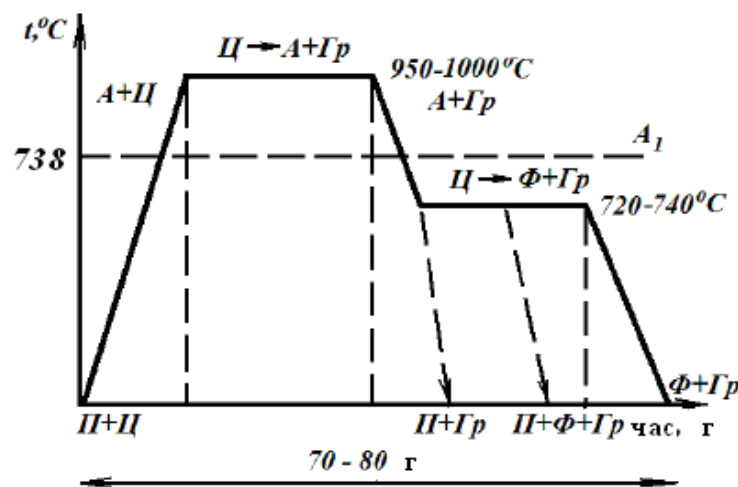


Рис. 5.7. Схема утворення структур при графітації

Графітізуючий відпал звичайно складається з двох стадій. Першу стадію проводять при $950...1050^{\circ}\text{C}$ протягом 10-15 годин. Цементит, який є в структурі, розпадається на аустеніт + графіт. Якщо після витримки при цій температурі проводити безперервне охолодження, то аустеніт перетвориться у перліт, і кінцева структура чавуна буде перліт + графіт у вигляді пластівців (ковкий чавун на перлітній металічній основі). Такий чавун має високу твердість ($\approx 200\text{ HB}$) і міцність ($\sigma_{\text{в}} \approx 650...800\text{ МПа}$) і невелику пластичність ($\delta=3,0...1,5\%$).

Для того, щоб одержати ковкий чавун на феритній металічній основі, проводять другу стадію графітізації. З температури $950...1050^{\circ}\text{C}$ чавун охолоджують до $720...700^{\circ}\text{C}$. Аустеніт перетворюється у перліт. Час відпалу при цій температурі приблизно 15...25 годин. За цей час цементит, який входить у склад перліту, розпадається на ферит + графіт у вигляді пластівців (рис. 5.8), тобто утворюється ковкий чавун на феритній основі, який характеризується високою пластичністю ($\delta=10...12\%$) і невеликою міцністю ($\sigma_{\text{в}} \approx 370...300\text{ МПа}$).

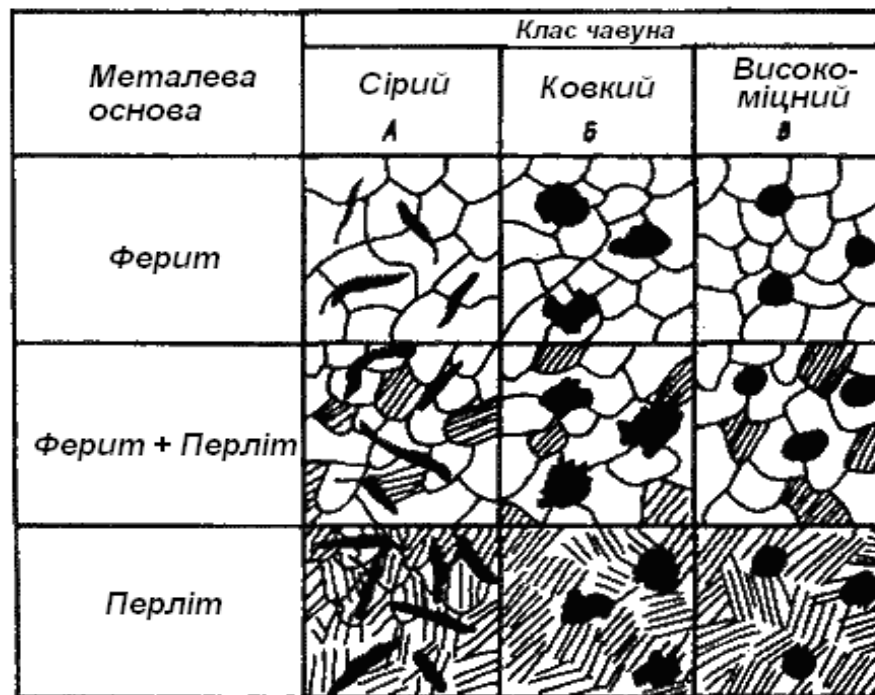


Рис. 5.8. Схеми мікроструктур чавуна залежно від металевої основи і форми графітових включень

Промисловість випускає ковкі чавуни таких марок: *КЧ 30-6; КЧ 33-8; КЧ35-10; КЧ 37-12; КЧ 45-7; КЧ 50-5; КЧ 55-4; КЧ 60-3; КЧ 65-4; КЧ 70-2; КЧ 80-1,5*. *КЧ* – ковкий чавун. Перше число у марці відповідає мінімальній міцності у вигляді $\sigma_b/10$, друге число відповідає відносному подовженню при розтягуванні (δ , %).

Залежно від форми графіту і умов його утворення розрізняють такі групи чавунів:

- **ковкий** – з графітом у формі пластівців;
- **сірий** – з графітом у формі пластин;
- **високоміцний** – з графітом кулястої форми.

Схеми мікроструктур чавуну залежно від металевої основи і форми графітових включень представлені на рис. 5.8.

Структури **сірих чавунів** (рис. 5.8) утворюються при кристалізації із рідини і залежить від кількості вуглецю і кремнію (графітизуюча домішка) у сплаві, а також від швидкості охолодження.

Встановлено, що чим більше вуглецю і кремнію у сплаві і чим нижче швидкість охолодження, тим більше вуглецю буде у формі графіту. Сірі чавуни мають графіт у формі пластин. Металічні основи сірих чавунів – феритна, перлітна і ферито-перлітна.

Промисловість виробляє сірі чавуни таких марок: *СЧ 10; СЧ 15; СЧ 20; СЧ 25; СЧ 30; СЧ 35*. *СЧ* – сірий чавун. Число у марці відповідає мінімальній міцності у вигляді $\sigma_b/10$.

Високоміцні чавуни мають графіт кулястої форми (рис. 5.8). Металічні основи високоміцних чавунів – феритна, перлітна і ферито-перлітна.

Високоміцні чавуни одержують модифікуванням (тобто мікро легуванням) рідини магнієм (0,1...0,5%).

Марки високоміцних чавунів *ВЧ 35; ВЧ 40; ВЧ 45; ВЧ 50; ВЧ 60; ВЧ 70; ВЧ 80; ВЧ 100*. *ВЧ* – високоміцний чавун. Числа у марках відповідають мінімальній міцності у вигляді $\sigma_b/10$.

Застосують високоміцні чавуни, завдяки добрим ливарним і технологічним властивостям, часто замість сталей при виробленні колінчастих та розподільних валів, деталей зубчатих передач тощо. Відливання колінчастих валів масою до 2...3 тон замість кованих валів із сталі, володіють вищою циклічною в'язкістю, малочутливі до зовнішніх концентраторів напруги, володіють кращими антифрикційними властивостями і значно дешевші. З високоміцного чавуну виготовляють тонкостінні відливання (поршневі кільця), шаботи кувальних молотів, станини і рами пресів і прокатних станів, виливниці, тримачі різців, планшайби.

Сірі чавуни застосовують: у верстатобудуванні – базові, корпусні деталі, кронштейни, зубчаті колеса; у автобудуванні – блоки циліндрів, поршневі кільця, розподільні вали, диски зчеплення; в електромашинобудуванні використовуються відливання з сірого чавуну для виготовлення товарів народного споживання.

З *ковких чавунів* виробляють різноманітні деталі (гайки, фланці, колінчаті вали, кронштейни). З феритних чавунів виготовляють картери редукторів, маточини, крюки, скоби, хомутики, муфти, фланці. З перлітних чавунів, що характеризуються високою міцністю, достатньою пластичністю, виготовляють вилки карданних валів, ланки і ролики ланцюгів конвеєра, гальмівні колодки.

5.4. Термічна та хіміко-термічна обробка сталей

Види термічної обробки металів.

Експлуатаційні властивості сталі залежать від її хімічного складу і структури. Основним способом, що дозволяє змінювати структуру, а, отже і властивості, є термічна обробка. До 40% сталей, які використовуються в машинобудуванні для виготовлення деталей машин, проходять різні види термічної обробки. Основи термічної обробки розробив Чернов Д.К.. Надалі вони розвивалися в роботах Бочвара А.А., Курдюмова Г.В., Гуляєва А.П.

Під час термічної обробки сталі звичайно нагрівають до аустенітного стану. Необхідні структури формуються у процесі охолодження аустеніту. Основні види термічної обробки: *відпал, гарт, відпуск, нормалізація* (рис. 5.9).

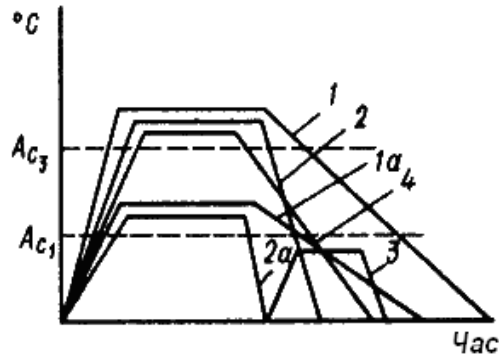


Рис. 5.9. Графіки різних видів термообробки:

відпалу (1, 1a), гарту (2, 2a), відпуску (3), нормалізації (4). A_{c1} і A_{c3} – температури відповідно $A \leftrightarrow П$ і $A \leftrightarrow \Phi$ перетворення.

Розрізняють наступні види термічної обробки:

1. **Відпал I роду** характеризується повільним охолодженням.

Різновидами відпалу першого роду є:

- дифузійний чи гомогенізація. Служить для отримання більш однорідного хімічного складу виливки;
- рекристалізаційний. Служить для зняття наклепу між операціями холодного деформування. Це збільшує пластичність і полегшує виконання подальшої холодної пластичної деформації;
- відпал для зняття напружень після кування, зварки, литва.

2. **Відпал II роду** характеризується нагрівом до температур вище за критичних і дуже повільним охолодженням, як правило, разом з піччю (рис. 5.9 (1, 1a)). Проводять відпал другого роду з метою отримання більш рівноважної структури. В результаті відпалу подрібнюється зерно, підвищуються пластичність і в'язкість, знижуються міцність і твердість, поліпшується обробка різанням.

3. **Гарт** характеризується нагрівом до температур вище за критичних і високими швидкостями охолодження (рис. 5.9 (2, 2а)). Проводиться з метою підвищення твердості і міцності шляхом утворення нерівноважних структур (сорбіт, троостит, мартенсит).

4. **Відпуск** характеризується нагрівом до температури нижче за критичну A_1 (рис. 5.9 (3)). Проводиться з метою зняття внутрішніх напружень, зниження твердості і збільшення пластичності і в'язкості загартованих сталей.

Перетворення, що протікають в структурі сталі при нагріві і охолодженні. Мартенсит сталі.

Будь-який різновид термічної обробки сталі складається з комбінації чотирьох основних перетворень, в основі яких лежать прагнення системи до мінімуму вільної енергії (рис. 5.10).

1. Перетворення перліту в аустеніт ($\Pi \rightarrow A$) відбувається при нагріві вище за критичну температуру A_1 ($t > 727^\circ\text{C}$): $\text{Fe}_\alpha(\text{C}) + \text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{Fe}_\gamma(\text{C})$

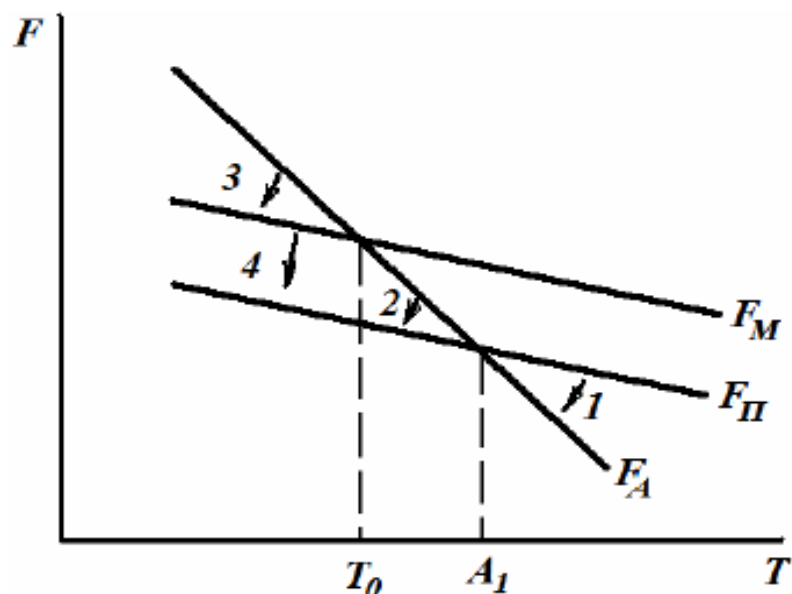


Рис. 5.10. Залежність вільної енергії структурних складових сталей від температури: аустеніту (F_A), мартенситу (F_M), перліту (F_Π)

Мінімальною вільною енергією володіє аустеніт.

В результаті такого нагріву відбувається поліморфне перетворення в залізі $Fe_a \rightarrow Fe_\gamma$ (кристалічна решітка заліза з об'ємноцентрованої кубічної перетворюється на гранецентровану кубічну). Процес дифузійний, при цьому весь вуглець, який входив до складу перліту у вигляді цементиту, розчиниться в гранецентрованої кубічної гратці заліза.

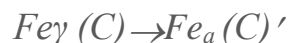
Криві на рис. 5.10 показують, що чим вища температура, тим швидше протікає перетворення, і що швидше здійснюється нагрів, тим при вищій температурі відбувається перетворення.

2. Перетворення аустеніту в перліт ($F \rightarrow П$) відбувається при охолодженні нижче A_1 . Мінімальною вільною енергією володіє перліт:



Процес дифузійний, характеризується діаграмою ізотермічного розпаду аустеніту.

3. Перетворення аустеніту в *мартенсит* ($A \rightarrow M$) відбувається при швидкому охолодженні нижче за температуру нестійкої рівноваги (при гарті), процес бездифузійний



Мартенсит – це пересичений твердий розчин впровадження вуглецю в $\alpha - Fe$. Він містить стільки вуглецю, скільки його було в аустеніті, тобто в сталі. Мартенсит має тетрагональну кристалічну гратку. Чим більше вуглецю в сталі, тим більше ступінь тетрагональності гратки і тим більше твердість та міцність сталі. *Мартенсит* – це структура загартованої сталі.

4. Перетворення мартенситу в перліт ($M \rightarrow П$); відбувається при будь-яких температурах, оскільки вільна енергія мартенситу більша, ніж вільна енергія перліту.



Повільне охолодження.

Структури сталей в багато в чому залежать від швидкості охолодження після нагріву.

При термічній обробці сталі звичайно нагрівають до температури аустенітного стану, а потім охолоджують. Необхідні структури і відповідні властивості сталі отримують при охолодженні сталі в процесі перетворення аустеніту. Швидкість охолодження може бути визначена по діаграмі ізотермічного розпаду аустеніту. Діаграма будується на основі дослідження перетворення переохолодженого аустеніту при постійних температурах.

Початок і кінець перетворення аустеніту в перліт на цій діаграмі представляються у вигляді двох С – подібних кривих, одна з яких є геометричним місцем точок початку, а друга – кінця перетворення аустеніту в перліт. Діаграма будується в координатах *температура – час*. У цих же координатах зображаються і криві охолодження, що дозволяє їх сумістити (рис. 5.11).

Лінія V_1 , що характеризує повільне охолодження, перетне С – образні криві при високій температурі. При малих ступенях переохолодження, у області температур $727...550^{\circ}\text{C}$, в результаті перетворення аустеніту утворюється механічна суміш фериту і цементиту, що називається перлітом (П).

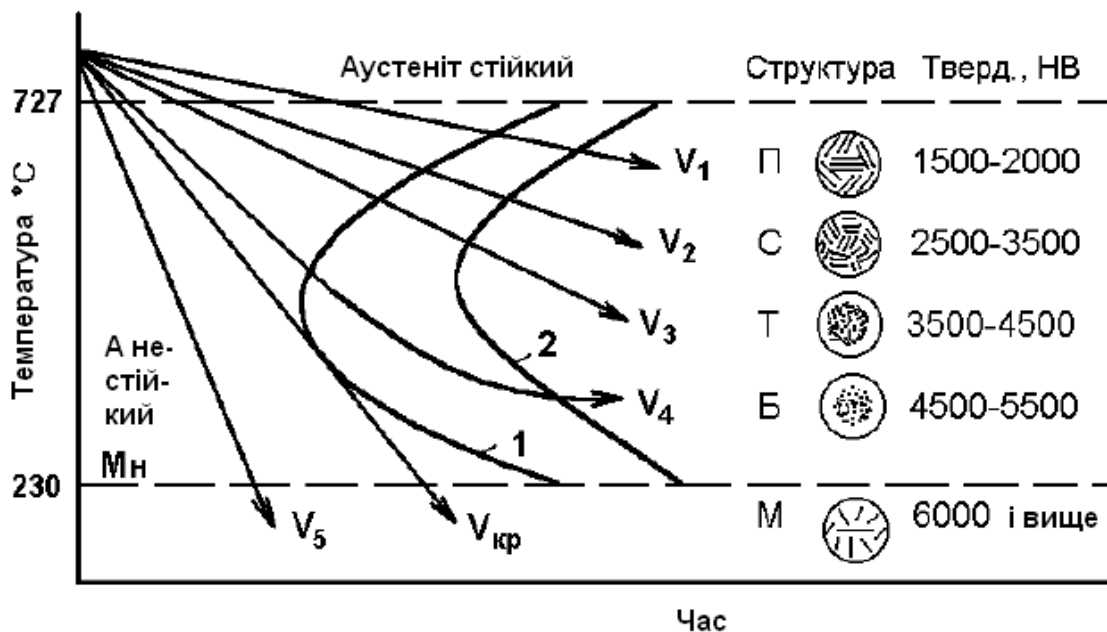


Рис. 5.11. Діаграма ізотермічного розпаду аустеніту в сталі 40 і криві охолодження. 1 – початок перетворення аустеніту в перліт; 2- кінець перетворення аустеніту в перліт.

При підвищенні швидкості охолодження (V_2, V_3) криві охолодження перетинають лінії діаграми при нижчих температурах (рис. 5.11). При охолодженні на повітрі (V_2) утворюється сорбіт, при охолодженні в маслі (V_3), а не у воді, утворюється структура троостит, (назви дані по іменах учених Трооста і Сорбі). По своїй будові сорбіт і троостит схожі з перлітом, тобто представляють суміш фериту з цементитом, але відрізняються ступенем дисперсності (товщиною пластин) фериту і цементиту. У *перліті* відстань меж пластинами $d \approx 1$ мкм, HV 1500...2000 МПа; у *сорбіті* $d \approx 0,3$ мкм, HV 2500...3500 МПа; у *трооститі* $d \approx 0,1$ мкм, HV 3500...4500 МПа.

Нижче за вигин С-подібної кривої і до температури, відповідної початку мартенситного перетворення (M_H) утворюється *бейніт* (на ім'я вченого Е. Бейн, HV 4500...5500) структура, що має вигляд різаної соломи (верхній бейніт при $\approx 450^\circ\text{C}$) чи голчата структура (нижній бейніт при більш низькій температурі). Особливістю бейнітного перетворення є те, що воно протікає в інтервалі температур, коли можлива тільки дифузія вуглецю. (від $t = 200$ до $t = 450^\circ\text{C}$). Бейнітне перетворення ще називають проміжним.

Швидке охолодження. Гарт.

При гарті сталь нагрівається до аустенітного стану (рис. 5.1). Доевтектоїдні сталі нагрівають до температур вище за критичну точку A_{C3} , а заевтектоїдні сталі – вище за A_{C1} , витримують при цій температурі, а потім швидко охолоджують з критичною або вищою швидкістю. При гарті сталь набуває високої твердості (HV 6000 і вище). Мартенсит в структурі сталі утворюється при охолодженні тільки з критичною швидкістю $V_{кр}$ або вищої (рис. 5.11).

Наприклад, якщо охолодити сталь зануренням у воду, тобто провести гарт, то температура сталі різко знизиться до кімнатної. При цьому неминуче відбувається зворотна перебудова кристалічної ґратки – з гранецентрованої в об'ємноцентровану ($Fe\gamma \rightarrow Fe\alpha$). Але при кімнатній температурі швидкість дифузії атомів вуглецю в залізі дуже мала. Атоми вуглецю не встигають при швидкому охолодженні вийти з розчину і утворити цементит. У цих

умовах вуглець, ніби силоміць, утримується в гратці $\text{Fe}\alpha$ -заліза, утворюючи перенасичений твердий розчин – *мартенсит*. При цьому атоми вуглецю розпирають гратку заліза, створюючи в ній великі внутрішні напруження. Гратка витягується уздовж одного напрямку так, що кожна елементарна комірка з кубічної перетворюється на тетрагональну, тобто приймає форму прямокутної призми (рис. 5.12), яка характеризується показником тетрагональності ($c/a > 1$).

Таке перетворення супроводжується і структурними змінами. Виникає голчата структура, відома під назвою мартенситу. Кристали мартенситу є дуже тонкими пластинами, які орієнтовані один відносно одного під кутом 60 або 120° . У поперечному перетині, який виходить на мікрошліфі, такі пластини під мікроскопом представляються у вигляді голок (рис. 5.13).

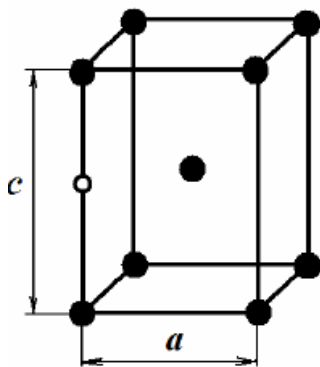


Рис. 5.12. Тетрагональна кристалічна гратка мартенситу. Світлі кульки – атоми вуглецю, темні кульки – атоми заліза.



Рис. 5.13. Орієнтованість кристалів мартенситу.

Питомий об'єм мартенситу більше питомого об'єму аустеніту, з якого цей мартенсит утворюється, тому утворення мартенситу супроводжується виникненням великих внутрішніх напружень, а це призводить до появи великого числа дислокацій в кристалах мартенситу. Якщо загартовану сталь з мартенситною структурою спробувати деформувати, то численні дислокації, рухаючись в різних напрямках, зустрічатимуться і блокуватимуть одна одну,

взаємно перешкоджаючи їх подальшому переміщенню. Таким чином, створюються численні перешкоди для руху дислокацій, що підвищує опір пластичної деформації, а отже, збільшує твердість і міцність сталі.

Твердість мартенситу HB 6000- 7000 МПа, (HRC 62-66), а показники пластичності δ , ψ і ударна в'язкість KCU близькі до нуля.

Перетворення аустеніту в мартенсит протікає в певному температурному інтервалі: починається при температурі M_H і закінчується при температурі M_K (ці температури називають мартенситними точками). Положення мартенситних точок залежить від вмісту вуглецю в сталі. Так, наприклад, точка M_K в заевтектоїдних сталях лежить у області негативних температур, що приводить до присутності в сталі після гарту залишкового (остаточного) аустеніту $A_{ост.} \approx 5-20\%$. Наявність в структурі сталі $A_{ост.}$ зменшує твердість загартованої сталі. Усунути $A_{ост.}$ із структури можна за допомогою обробки холодом і відпуском.

Гарт дуже часто проводиться у воді. Водні розчини їдкого натру або куховарської солі володіють більшою охолоджуючою здатністю.

Різні сорти і марки сталі мають різну здатність сприймати гарт. Здатність до гарту оцінюється по найбільшій твердості, одержуваній в результаті гарту. Як вже наголошувалося, сталі, що містять менше 0,25 %С, нездатні до гарту. Із зростанням змісту вуглецю здатність до гарту швидко росте, досягає найбільшої величини при 0,8 % С і потім майже не міняється.

Найважливішою властивістю сталі є **прожарюваність** (прогартування), яка визначається як глибина загартованого шару в даних умовах охолодження.

Найпростіший вид гарту – гарт в одному середовищі (режим 5 рис. 5.11). Недоліком цього способу являється виникнення великих напружень у виробі через високу швидкість охолодження. Гарт в двох середовищах здійснюється шляхом занурення виробу спочатку у воду, а потім в масло. Первинне охолодження у воді дозволяє швидко пройти область якнайменшої стійкості аустеніту і досягти температур, при яких він більш

стійкий. Подальше, більш сповільнене охолодження в маслі, дозволяє дещо вирівняти перепад температур по перетину виробу. При цьому виді гарту вимагається дуже точно вибрати час зміни гартівних середовищ.

Східчастий гарт полягає в тому, що нагрітий виріб швидко поміщають в середовище, що має температуру 200 – 250°C, тобто на 30 – 50 градусів вище за точку початку появи мартенситу, і витримують якийсь час для вирівнювання температури у всьому об'ємі, проте не більше, чим необхідно для початку перетворення аустеніту в бейніт. Охолоджуючим середовищем служать розплави селітри і лугів. Потім виріб витягують з соляної ванни і охолоджують на повітрі, при цьому відбувається утворення мартенситу. На початку охолодження до утворення мартенситу сталь зберігає аустенітну структуру і тому можлива правка виробів, що покоробилися.

Спосіб східчастого гарту застосовується лише для невеликих за розміром виробів, оскільки у внутрішніх шарах, де охолодження йде з меншою швидкістю, може відбутися звичайний розпад аустеніту з утворенням трооститу або сорбіту.

Ізотермічний гарт проводять в соляній ванні, що має температуру 250 – 300°C. Ізотермічний гарт дозволяє одержувати сталь з меншою твердістю, ніж після звичайного гарту, але з більшою в'язкістю.

Гарт з самовідпуском полягає в тому, що виріб витягують з охолоджуючого середовища перш, ніж температура в середніх шарах досягла 400 – 500°C. Зовнішні шари в цей час встигають охолодитися до 150 – 200°C. У витягнутому з охолоджуючого середовища виробі, за рахунок тепла центральних шарів, зовнішні шари, де встиг з'явитися мартенсит, прогріваються до 300 – 400°C і в них відбувається відпуск мартенситу. В результаті утворюється тверда кірка з в'язкою серцевиною. Для гарту з самовідпуском вирішальне значення має визначення температури поверхні за кольорами бігучості, що з'являються на чистій поверхні через виникнення шару оксидів різної товщини. Жовтий колір відповідає 220 – 240, оранжевий 240 – 260, червоно-фіолетовий 260 – 280, синій 280 – 300°C.

Поверхневий гарт проводиться шляхом нагріву поверхневих шарів виробу на глибину 2 – 3 мм і відповідного охолодження. Нагрів здійснюється в індукторі струмами високої частоти.

Таким чином обробляють шийки сталевих колінчастих валів, шестерні. Нагрівання поверхні великих виробів (прокатних валів, великих валів) здійснюється за допомогою газових або гасових пальників. Поверхневий гарт дозволяє отримати структуру мартенситу в поверхневому шарі до 2 – 4 мм. Структурні властивості серцевини виробу при цьому не міняються, вони визначаються попередньою загальною термообробкою всього виробу.

Обробка холодом була запропонована А.П. Гуляєвим. Закінчення мартенситного перетворення може відбуватися не тільки при позитивних температурах, як це показано на рис. 5.11, але й при негативних. В такому випадку температура кінця мартенситного перетворення M_k лежить нижче нуля. Отже, при звичайному охолодженні до кімнатної температури в структурі залишається деяка кількість аустеніту. Це означає, що не досягається найбільше можливе значення твердості. Крім того, залишковий аустеніт з часом може поступово перетворюватися на бейніт. Через це можлива зміна розмірів готових виробів. Отже, для відповідальних деталей прецизійного устаткування, кулькових підшипників, високоточного мірного інструменту і т.п. бажано найбільш повно перевести аустеніт в мартенсит. Це досягається охолодженням до температури M_k . Важливо, щоб охолодження після звичайного гарту відбувалося щонайшвидше, інакше аустеніт, що зберігся, стає стійким і не так повно перетворюється на мартенсит.

Нормалізація.

Нормалізацією називається термічна обробка, при якій виріб нагрівають до аустенітного стану при температурі на $30...50^0$ С вище A_3 або A_{cm} з подальшим охолодженням на повітрі.

$$T_{\text{н}} = A_3 + (30...50)^0 \text{ C} \quad \text{або} \quad T_{\text{н}} = A_{cm} + (30...50)^0 \text{ C}$$

В результаті нормалізації одержують тоншу будову евтектоїда (тонкий перліт або сорбіт), зменшуються внутрішні напруги, усуваються недоліки, одержані в процесі попередньої обробки. Твердість і міцність дещо вище, ніж після відпалу.

Відпуск.

Високі структурні і термічні напруження, а також підвищена твердість і крихкість сталі, загартованої на мартенсит, викликають необхідність проведення відпуску. При відпуску структура сталі від нерівноважної (метастабільної) структури мартенситу гарту все більше наближається до рівноважного стану.

Відпуском називається завершальна операція термічної обробки, що полягає в нагріві загартованої сталі до температури нижче за критичну A_{C1} , витримці при цій температурі і подальшому повільному або швидкому охолодженні. Мета відпуску – зменшення напружень в сталі, підвищення в'язкості, пластичності і зниження твердості. В результаті відпуску нестійкі структури гарту переходять в стійкіші. Залежно від температури розрізняють три різновиди відпуску: *низький, середній і високий*.

При *низькому* відпуску загартовану сталь нагрівають до температур 150-250°C. Під дією підвищеної температури атоми вуглецю набувають вищої рухливості і завдяки цьому частково виходять з мартенситу (перенасиченого твердого розчину в δ -залізі). Вони утворюють метастабільний карбід Fe_2C . При цьому внутрішні напруження в кристалічній гратці заліза і її тетрагональність зменшуються, а, отже, знижується схильність до крихкості загартованої сталі. Карбіди, що утворюються, мають малі розміри і металографічно не виявляються.

Суміш дисперсних карбідів і мартенситу, що утворюється, з пониженим вмістом вуглецю називається мартенситом відпуску M_6 .

При температурах вище 200°C залишковий аустеніт перетворюється на мартенсит відпуску M_6 .

При *середньому* відпуску нагрів загартованої сталі проводять до температур 300-450°C. При цьому повністю завершується процес виділення вуглецю з пересиченого твердого розчину і мартенсит перетворюється на ферит. Карбід Fe_2C перетвориться в цементит Fe_3C .

Утворюється *структура, що складається з фериту, в якому рівномірно розподілені найдрібніші частинки цементиту, названа трооститом відпуску T_v .*

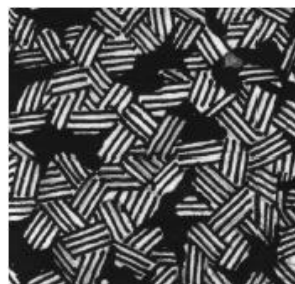
При *високому* відпуску загартовану сталь нагрівають до температур 500...650°C. Такий нагрів приводить до коагуляції частинок цементиту – дрібні частинки зливаються в більші. *Суміш фериту і цементиту грубішої будови, ніж троостит, називають сорбітом відпуску S_v .*

Термічну обробку, що включає гарт і високий відпуск, називають *поліпшенням*. Відпуск вище за 650°C вже не підвищує пластичність. Структура сталі після такого відпуску є достатньо грубою сумішшю фериту і цементиту, яка називається зернистим перлітом або перлітом відпуску.

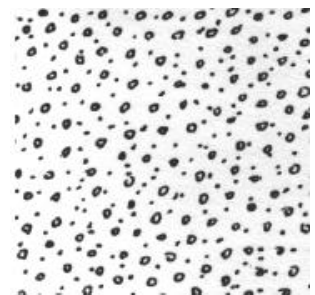
Структури загартованої сталі 40 після низького (а), середнього (б) високого (в) відпуску зображені на рис. 5.14.



а) мартенсит відпуску



б) мартенсит



в) сорбіт відпуску
троостит відпуску

Рис. 5.14. Структури загартованої сталі 40 після відпуску.

З вищевикладеного випливає, що структури, одержані після відпуску та безпосереднього розпаду аустеніту, мають однакову назву (троостит, сорбіт, перліт) і однакову фізичну природу (суміш фериту і цементиту). Але структури після відпуску мають вищі механічні властивості (рис. 5.15).

Низькому відпуску піддають ріжучий і вимірювальний інструменти, а також деталі після поверхневого гарту і цементації.

Структура M_6 + карбіди забезпечують високу твердість сталі (у сталі із вмістом вуглецю 0,7% - HRC 59...63).

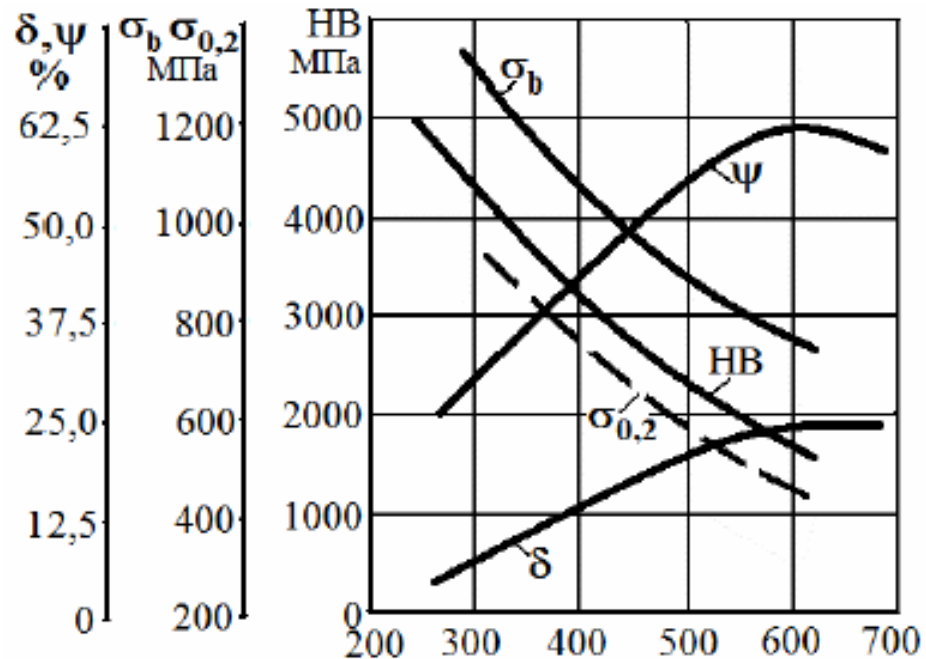


Рис. 5.15. Механічні властивості сталі 40 в залежності від температури відпуску.

Середній відпуск застосовується головним чином після гарту пружин і ресор. Середній відпуск зменшує внутрішні напруження більшою мірою, чим низький відпуск. Структура T_6 призводить до значного зниження твердості (у евтектоїдній сталі HRC 45...50) і забезпечує високі межі пружності і витривалості.

Високий відпуск на 90-95% усуває внутрішні напруження. Гарт з високим відпуском одночасно підвищує межу міцності (тимчасовий опір), межу текучості, відносне звуження і особливо ударну в'язкість.

Структура C_6 забезпечує зниження твердості (HRC 30...45).

Застосовують для відповідальних деталей і інструментів, що працюють в умовах динамічного навантаження: валів, шатунів, молотових штамсів і ін.

Хіміко-термічна обробка сталі.

Хіміко-термічна обробка (ХТО) – процес зміни хімічного складу, мікроструктури і властивостей поверхневого шару деталі з метою поверхневого зміцнювання. Зміна хімічного складу поверхневих шарів досягається в результаті їх взаємодії з навколишнім середовищем (твердої, рідкої, газоподібної, плазмової), в якому здійснюється нагрів.

Основними різновидами хіміко-термічної обробки є:

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

Цементация.

Цементация – хіміко-термічна обробка, що полягає в дифузійному насиченні поверхневого шару атомами вуглецю при нагріві до температури 900...950⁰С. На поверхні виробу утворюється шар заевтектоїдної сталі, що складається з перліту і цементиту. У міру віддалення від поверхні, зміст вуглецю знижується і наступна зона складається тільки з перліту. Потім з'являються зерна фериту, їх кількість у міру віддалення від поверхні збільшується. Цементация піддають сталі з низьким змістом вуглецю (до 0,25%). Нагрів виробів здійснюють в середовищі, що легко віддає вуглець. Підібравши режими обробки, поверхневий шар насичують вуглецем до необхідної глибини. **Глибина цементация (h)** – відстань від поверхні виробу до середини зони, де в структурі є однакові об'єми фериту і перліту ($h = 1.2$ мм). **Ступінь цементация** – середній вміст вуглецю в поверхневому шарі (звичайно, не більше 1,2 %). Вищий вміст вуглецю приводить до утворення значних кількостей цементиту вторинного, який веде до підвищення крихкості. На практиці застосовують цементацию у карбюризаторі (у вуглецевому середовищі) твердому (деревне вугілля) або газовому.

Азотування.

Азотування вперше здійснив Чижевський І.П., промислове застосування почалося в двадцяті роки. При азотуванні вироби завантажують в герметичні печі, куди поступає аміак NH_3 з певною швидкістю. При нагріві аміак дисоціює по реакції: $2NH_3 \leftrightarrow 2N+3H_2$. Атомарний азот поглинається поверхнею і дифундує углиб виробу. При азотуванні збільшуються не тільки твердість і зносостійкість, але також підвищується корозійна стійкість.

Для азотування використовують сталі, що містять алюміній, молібден, хром, титан. Нітриди цих елементів дисперсні і володіють високою твердістю і термічною стійкістю.

Ціанування і нітроцементация.

Ціанування – є остаточною обробкою і здійснюється у ваннах з розплавленими ціаністими солями, наприклад $NaCN$ з добавками солей $NaCl$, $BaCl$ і ін. при температурі $800...950^{\circ}C$ (високотемпературне) або при температурі $540...600^{\circ}C$ (низькотемпературне). Тривалості процесу $0,5...2$ години. При окисленні ціаністого натрію утворюється атомарний азот і окисел вуглецю: $2NaCNO+O_2 \rightarrow Na_2CO_3+CO+N_{am}$ Вміст азоту в ціанованому шарі $0,2...0,6$ %, товщина шару $0,15...2$ мм. Вміст вуглецю до $0,6...1,2$ %. Глибина шару і концентрація в ньому вуглецю і азоту залежать від температури процесу і його тривалості. Остаточна структура ціанованого шару складається з тонкого шару карбонітридів $Fe_2(C, N)$, а потім азотистий мартенсит. Ціанований шар володіє високою твердістю $58...62 HRC$ і добре чинить опір зносу. Підвищуються втомна міцність і корозійна стійкість. Проводиться для інструментів з швидкорізальних, високо хромових сталей. Основним недоліком ціанування є отруйність ціаністих солей.

Нітроцементация – газове ціанування, здійснюється в газових сумішах з цементуючого газу і дисоційованого аміаку. Склад газу і температуру процесу визначають співвідношення вуглецю і азоту в ціанованому шарі. Глибина шару залежить від температури і тривалості витримки.

Використається для машинобудівних деталей з вуглецевих і

малолегованих сталей при підвищеному вмісті аміаку. Твердість досягає 56...62 HRC. Нітроцементация характеризується безпекою в роботі, низькою вартістю. Наприклад, на ВАЗі до 95% деталей піддаються нітроцементации.

Дифузійна металізація.

Дифузійна металізація – хіміко-термічна обробка, при якій поверхня сталевих виробів насичається різними елементами: алюмінієм, хромом, кремнієм, бором тощо.

При насиченні хромом процес називають *хромуванням*, алюмінієм – *алітуванням*, кремнієм – *силіціюванням*, бором – *борованням*. Дифузійну металізацію можна проводити в твердих, рідких і газоподібних середовищах.

При *твердій дифузійній металізації* металізатором є феросплав з додаванням хлористого амонію (NH_4Cl). В результаті реакції металізатора з HCl або Cl_2 утворюється з'єднання хлору з металом ($AlCl_3$, $CrCl_2$, $SiCl_4$), які при контакті з поверхнею дисоціюють з утворенням вільних атомів.

Рідка дифузійна металізація проводиться зануренням деталі в розплавлений метал (наприклад, алюміній).

Газова дифузійна металізація проводиться в газових середовищах різних металів, що є хлоридами.

Дифузія металів протікає дуже поволі, оскільки утворюються розчини заміщення, тому при однакових температурах дифузійні шари в десятки і сотні разів тонші, ніж при цементации.

Дифузійна металізація – процес дорогий, здійснюється при високих температурах (1000...1200⁰C) протягом тривалого часу.

Однією з основних властивостей металізованих поверхонь є жаростійкість, тому жаростійкі деталі для робочих температур 1000...1200⁰C виготовляють з простих вуглецевих сталей з подальшим алітуванням, хромуванням або силіціюванням.

Виключно високою твердістю (2000 HV) і високим опором зносу із-за утворення бориду заліза (FeB , FeB_2) характеризуються боровані шари, але ці шари дуже крихкі.

5.5. Леговані сталі: маркування, структури, призначення.

Прості вуглецеві сталі далеко не завжди задовольняють вимогам техніки. У промисловості широко застосовуються леговані сталі, які володіють високими механічними або особливими фізичними і хімічними властивостями, що набувають після відповідної термічної обробки.

Легованими називаються сталі, в які для отримання необхідних властивостей спеціально додаються певні кількості необхідних елементів. Основними легуючими елементами в сталях є хром, нікель, марганець, кремній, молібден, вольфрам, ванадій, титан, кобальт, алюміній, бор, ніобій та інші. Вивчаючи вплив легуючих елементів на властивості сталі, важливо знати взаємодію легуючого елемента із залізом і вуглецем, а також вплив легуючих елементів на поліморфізм заліза і перетворення в сталі при термічній обробці.

Всі елементи, які розчиняються в залізі, впливають на температурний інтервал існування його алотропічних модифікацій, тобто зрушують положення критичних точок A_3 ($\gamma \leftrightarrow \alpha$ – перетворення) і A_4 ($\delta \leftrightarrow \gamma$ – перетворення) за температурною шкалою. Більшість елементів або підвищують температуру A_4 і знижують температуру A_3 , розширюючи область існування γ -модифікації (Mn, Ni, Pt) (рис. 5.16, а), або знижують A_4 і підвищують A_3 , звужуючи область існування α -модифікації (Si, W, Mo, Cr, Ti) (рис. 5.16, б).

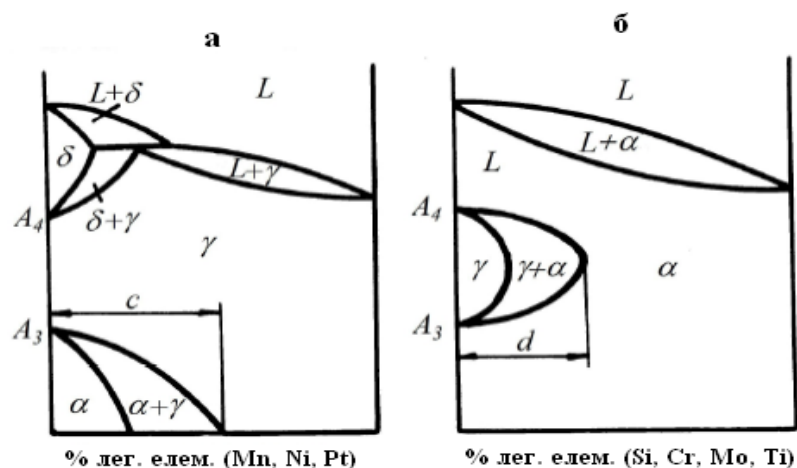


Рис. 5.16. Схема діаграм стану залізо – легуючий елемент.

Аустенітними сплавами на основі заліза називають такі сплави, що мають стабільний γ - стан (гранецентрована кубічна гратка) в інтервалі температур від плавлення до кімнатної температури. З рис. 5.16, а витікає, що при вмісті марганцю, нікелю більше певної кількості (c) γ - стан існує як стабільний від температури плавлення до кімнатної температури.

Феритними сплавами на основі заліза називають такі сплави, що мають стабільний α - стан (об'ємноцентрована кубічна гратка) при всіх температурах. З рис. 5.16, б видно, що при вмісті ванадію, молібдену, кремнію і інших елементів більше певного значення (d) стійким при всіх температурах є α - стан.

Аустенітні і феритні сплави не мають перетворень при нагріванні і охолодженні.

Вплив легуючих елементів на ферит.

Розчинення легуючих елементів в α - залізі відбувається шляхом заміщення атомів заліза атомами цих елементів. Атоми легуючих елементів, відрізняючись від атомів заліза розмірами і будовою, створюють в кристалічній гратці напруження, які викликають зміну її періоду. Зміна розмірів α - гратки викликає і зміну властивостей фериту. На рис. 5.17 показані зміни механічних властивостей фериту (твердість, ударна в'язкість) при розчиненні в ньому різних елементів.

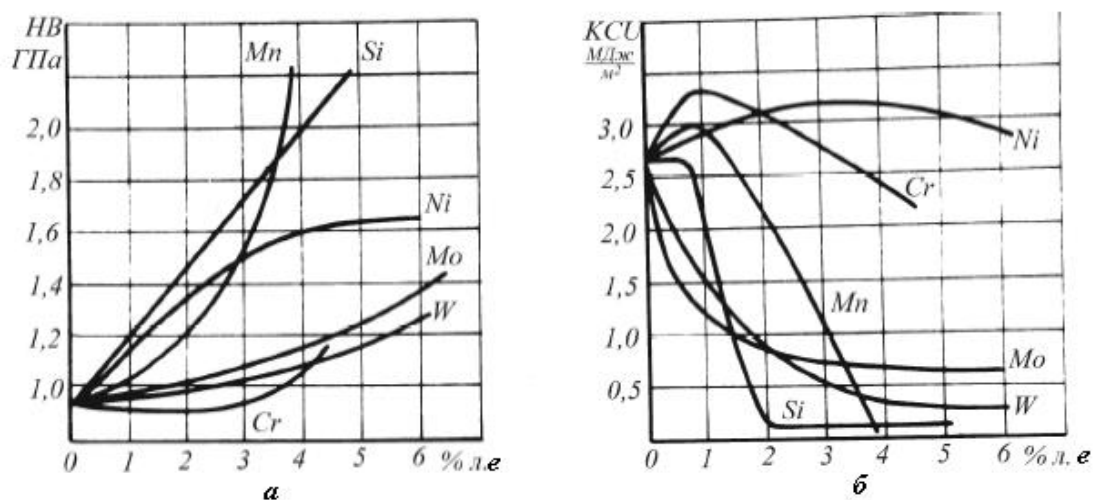


Рис. 5.17. Вплив легуючих елементів на властивості фериту.

Як видно з діаграм, хром, молібден, вольфрам зміцнюють ферит менше, ніж нікель, кремній і марганець. Молібден вольфрам, марганець і кремній знижують в'язкість фериту. Хром зменшує в'язкість значно слабше перерахованих елементів, а нікель не знижує в'язкості фериту.

Важливе значення має вплив елементів на поріг холодноламкості, що характеризує схильність сталі до крихкого руйнування. Наявність хрому в залізі сприяє деякому підвищенню порогу холодноламкості, тоді як нікель інтенсивно знижує поріг холодноламкості, зменшуючи тим самим схильність заліза до крихких руйнувань.

Маркування легованих сталей.

Для позначення марок сталі розроблена система, прийнята в Держстандартах. Кожен легуючий елемент позначається буквою:

H - нікель; *X* - хром; *K* - кобальт; *M* - молібден; *Г* - марганець;
Д - мідь; *P* - бор; *Б* - ніобій; *Ц* - цирконій; *С* - кремній;
П - фосфор; *В* - вольфрам; *А* - азот; *Ф* - ванадій; *Ю* – алюміній,
Ч - рідкоземельні метали.

Перші цифри в позначеннях показують середній вміст вуглецю в сотих долях відсотка. *Цифри*, що йдуть *після букви*, вказують на приблизний вміст даного легуючого елемента в *цілих відсотках*.

Цифри після букви відсутні, якщо кількість таких елементів як

Cr, Mn, W, Ni, Co, Al складає приблизно 1% *V, Cu, Mo* – десяті доли відсотка, *Ti, Nb, N* – соті доли відсотка.

Для того, щоб показати, що в сталі обмежений вміст сірки і фосфору ($S < 0,03\%$; $P < 0,03\%$), а також, що дотримані всі умови металургійного виробництва високоякісної сталі, в кінці позначення марки ставиться літера *A*. *Наприклад, сталь 20ХНЗА* в середньому містить 0,20%С, 1%Cr; 3% Ni. Буква *A* означає, що сталь високоякісна. В інструментальних сталях одна цифра на початку марки вказує на вміст вуглецю в десятих долях відсотка. При вмісті в сталях 1%С або більш початкову цифру опускають.

Наприклад, в сталі *XB5* міститься більше 1%С ~ 1% Cr і 5% W.

Деякі види сталей позначають особливо. Літеру Ш застосовують для позначення шарикопідшипникових сталей. Наприклад, сталь ШХ15 – шарикопідшипникова, в якій цифра 15 показує вміст основного легуючого елементу Cr – 1,5%. У цій сталі $\sim 1\%C$ а також є Mn і Si.

Літера Ш в кінці марки означає особливо високоякісну леговану сталь. Наприклад, ШХ15СГ-Ш.

Швидкорізальні сталі маркуються літерою Р (від англійського Rapid – швидкій), цифри після літери показують вміст вольфраму – основного легуючого елемента – С%. Наприклад, сталь Р18 – швидкорізальна, в якій цифра 18 показує середній вміст вольфраму – 18%. У цій сталі 0,7 - 0,8%С, $\sim 4\% Cr$, а також є Mo і V.

Класифікація легованих сталей.

Леговані сталі можуть бути класифіковані за п'ятьма ознаками: по ступеню легованості, по рівноважній структурі (після відпалу), по структурі після охолодження на повітрі (після нормалізації), по складу і за призначенням.

Класифікація по ступеню легованості.

По ступеню легованості сталі діляться на *низьколеговані* (містять до 5% легуючих елементів), *середньолеговані* (містять 5...10% легуючих елементів), *високолеговані* (містять 10...50% легуючих елементів).

Класифікація по рівноважній структурі.

1. Доевтектоїдні сталі, що мають в структурі надмірний ферит.
2. Евтектоїдні сталі, що мають перлітну структуру.
3. Заевтектоїдні сталі, що мають в структурі надмірні (вторинні) карбіди.
4. Ледебуритні сталі, що мають в структурі первинні карбіди, що виділилися з рідкої фази. У литому вигляді надмірні карбіди спільно з аустенітом утворюють евтектику - ледебурит, який при куванні або вальцюванні розбивається на відособлені карбіди і аустеніт.
5. Феритні сталі.
6. Аустенітні сталі.

Класифікація по структурі після охолодження на повітрі.

Виходячи із структури, що формується після охолодження на спокійному повітрі зразків невеликої товщини, виділяють три основні класи сталей:

1. перлітний, характеризуються відносно малим вмістом легуючих елементів;
2. мартенситний, характеризується значнішим, ніж перлітні вмістом легуючих елементів;
3. аустенітний, характеризується високим вмістом легуючих елементів.

Отримання цих класів сталі обумовлене тим, що у міру збільшення вмісту легуючих елементів стійкість аустеніту в перлітній області зростає, а температурна область мартенситного перетворення знижується, як це видно з рис. 5.18.

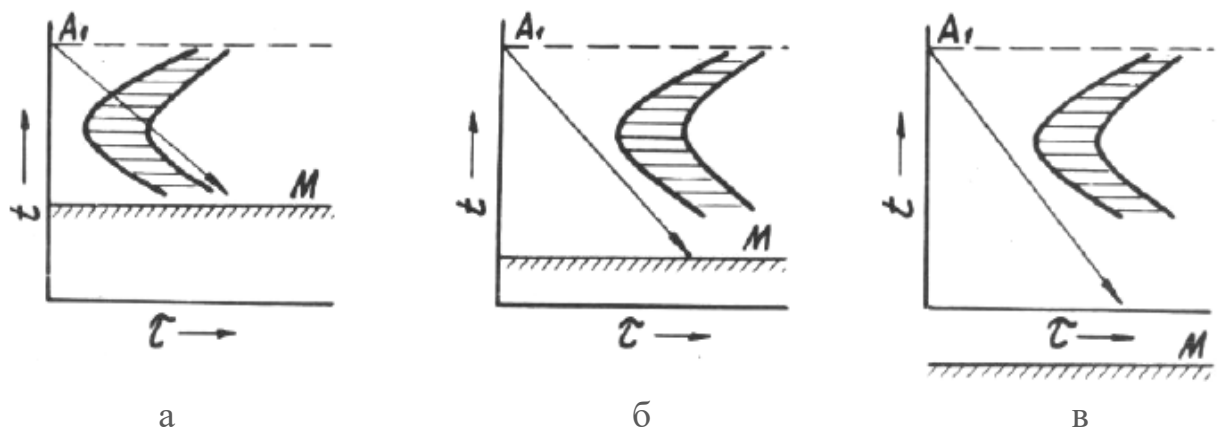


Рис. 5.18. *Діаграми ізотермічного розпаду аустеніту легованих сталей: а – перлітних; б – мартенситних; в – аустенітних.*

Для легованих сталей перлітного класу крива швидкості охолодження на повітрі перетинає область перлітного розпаду. Кінцеві структури – перліт, сорбіт, троостит (рис. 5.18, а). У сталей мартенситного класу область перлітного розпаду зсунута вправо. Тому аустеніт тут переохолоджується без розпаду до температур мартенситного перетворення (рис. 5.18, б). Якщо мартенситне перетворення протікає у області негативних температур, то сталь, охолоджена до кімнатної температури, зберігає аустенітний стан (рис. 5.18, в).

Класифікація по складу.

Залежно від складу леговані сталі класифікуються як нікелеві, хромисті, хромонікелеві і т.п. Класифікаційна ознака – наявність в сталі тих або інших легуючих елементів.

Класифікація за призначенням.

1. **Конструкційні** сталі, що ідуть на виготовлення деталей машин. Головною структурою є **ферит** – твердий розчин вуглецю і легуючих елементів у α залізі. Конструкційні сталі підрозділяються на цементовані (що піддаються цементації), поліпшувані (що піддаються гарту і високому відпуску), пружинні, високоміцні, шарикопідшипникові, будівельні, мартенситно-старіючі.

2. **Цементовані** конструкційні леговані сталі є сталями з низьким вмістом вуглецю (до 0,3%). Такі сталі після цементації і гарту з низьким відпуском мають високу твердість (біля 60 *HRC*), зносостійку поверхню і в'язку серцевину. Цементації піддають сталі *12X*, *12XH3A*, *18XГТ*, *18X2H4MA*, *20XГР*, *20XНР* та ін.

3. **Поліпшувані** сталі містять 0,3...0,5%С. З них виробляють деталі машин, які підлягають поліпшенню – гарту з подальшим високим відпуском. Після такої термічної обробки утворюється структура сорбіт, яка забезпечує достатньо високу міцність. Марки деяких поліпшуваних сталей *40X*, *40XH*, *40XMA* та інші. Наприклад, на рис. 5.19 показана структура сталі *40X* у відпаленому стані, що складається з фериту (світлий) і перліту (темний). В поліпшеному стані (після гарту з охолодженням в маслі і послідуєчому високому відпуску при температурі 500⁰С з послідуєчим охолодженням у воді до 60⁰С структура складається з продукту розпаду мартенситу – сорбіту.

4. **Пружинні** сталі містять 0,5...0,8% С. З них виробляють пружини, мембрани, пружинні елементи приладів. Вироби з пружинних сплавів підлягають гарту з послідуєчим середнім відпуском (структура – троостит або бейніт). Марки деяких пружинних сталей: *65Г*, *55С2*, *50ХГА*, *60С2ХФА*.

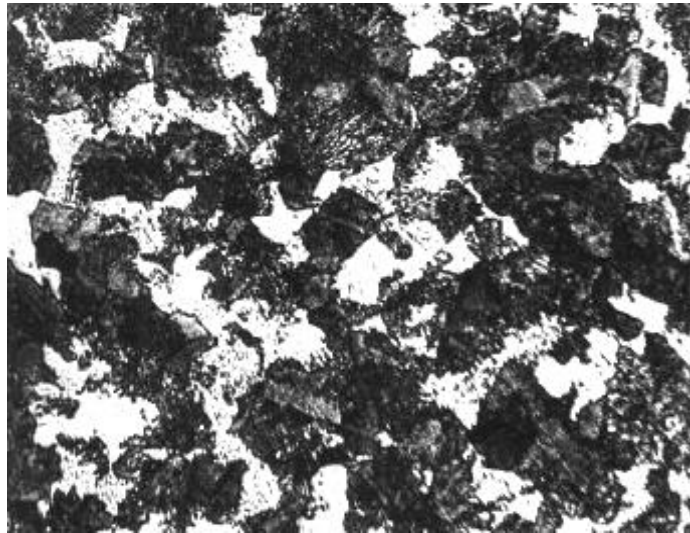


Рис. 5.19. Структура сталі 40X у відпаленому стані.

5. *Підшипникові* сталі містять $\approx 1\%$ С. Їх піддають гарту і послідуєчому низькому відпуску. Структура після термічної обробки: мартенсит і карбіди, які забезпечують високу твердість і зносостійкість. Марки підшипникових сталей: *ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ*. (Літера *Ш* означає – шарикопідшипникова. Кількість хрому в цих марках записують в десятих долях відсотка.

Наприклад, на рис. 5.20 показана структура сталі *ШХ15* після гарту в маслі з температури $830\dots 840^{\circ}\text{C}$ і послідуєчого низького відпуску являє собою мартенсит відпуску (темний) з рівномірно розподіленими надмірними карбідами (світлі).

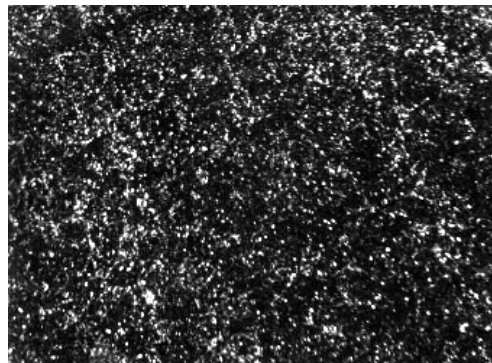


Рис. 5.20. Структура підшипниковій сталі *ШХ15* після гарту і низького відпуску.

6. **Будівельні** леговані сталі. До них відносяться низьколеговані сталі *17ГС, 16Г2АФ, 17ГСБ, 09Г2С, 08Г2СФБ*. Вони підлягають поліпшенню для отримання високої міцності і пластичності, зниження порогу холодноламкості. З будівельної сталі виготовляють зварні будівельні конструкції. Арматурна сталь має марки: *18Г2С, 35ГС, 25ГС2, 20ХГ2Ц, 45С, 45ГС*.

7. **Інструментальна** сталь, що йде на виготовлення ріжучого, вимірювального, штампового і іншого інструменту, а також деталей точних приладів: пружин, підшипників тощо. Головні властивості, які характеризують інструментальні сталі, це **зносоустійкість, теплостійкість, прогартування**.

Зносоустійкість забезпечує збереження розміру і форми робочої частини інструменту протягом довгого часу. Зносоустійкість пов'язана з твердістю.

Прогартування – це глибина загартованого шару, яку можна підвищити хромом, марганцем.

Теплостійкість – характеризує здібність сталі зберігати велику твердість до високих температур.

Нетеплостійкі сталі (вуглецеві та низько – і середньо леговані) зберігають високу твердість, яку здобули після гарту, до 200...250⁰С. При подальшому нагріванні мартенсит розпадається. До нетеплостійких сталей з відносяться сталі *У7...У13, 7ХФ...11ХФ, 13Х* та інші (мале прогартування ≈ 5 мм); *Х, ХВГ, ХГ, ХВ5* (середнє прогартування ≈ 50...80 мм); *6ХС...9ХС, ХГСВ* (високе прогартування до 100 мм).

Напівтеплостійкі сталі зберігають високу твердість до 250...400⁰С. Це високохромисті сталі *Х6ВФ, Х12Ф1* і хромонікелеві сталі *5ХНВ, 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХГВС* та інші. Хромонікелеві сталі підлягають гарту і відпуску при 500...550⁰С (структура сорботроостит).

Теплостійкі (червоностійкі) сталі зберігають свої властивості до 550...600⁰С.

Вони складають групу так званих швидкоріжучих сталей, які маркують літерою *P*: *P9*, *P6M5*, *P12*, *P9Ф5*, *P9K5*. Як приклад, на рис. 5.21 показана структура швидкоріжучої сталі *P18* після гарту і високого триразового відпуску при $\approx 560^{\circ}\text{C}$. Структура складається з мартенситу відпуску (темний) і карбідів (світлі).

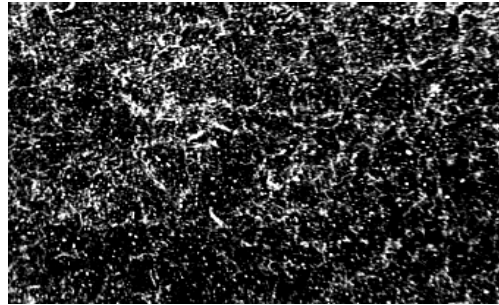


Рис. 5.21. Структура швидкоріжучої сталі *P18* після гарту і високого відпуску.

Тверді сплави є ще більш теплостійкими, ніж швидкоріжучі сталі. Тверді сплави виробляють на основі карбиду вольфраму WC (I група): *BK3*, *BK4*, *BK6*, *BK8*, *BK10*, *BK15* (число показує вміст кобальту, решта WC); на основі $WC + TiC$ (II група): *T30K5*, *T15K6*, *T5K10* (перше число – вміст TiC , друге число – вміст Co , решта WC); на основі $WC + TiC + TaC$ (III група): *TT7K12*, *TT8K6*, *TT20K9* (перше число – кількість $TiC + TaC$, друге число – вміст Co , решта WC). Тверді сплави виробляють спіканням порошків карбідів з порошком кобальту при високих температурах ($\approx 1400^{\circ}\text{C}$). На рис. 5.22 зображено зміну твердості загартованих різних по теплостійкості сталей:

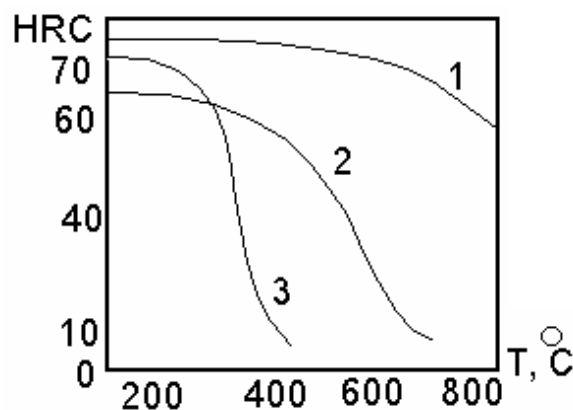


Рис. 5.22. Зміна твердості при відпуску загартованих сталей: 1 – твердий сплав, 2 – швидкоріжуча сталь, 3 – вуглецева сталь.

8. **Сталі з особливими властивостями**, це – високолеговані сталі. До них відносяться сталі, що володіють якою-небудь різко вираженою властивістю: електротехнічні, нержавіючі, жароміцні і теплостійкі, зносостійкі і т.д. Термічна обробка різних високолегованих сталей залежить від структурного класу сталей.

9. **Сталі мартенситного** класу (09X16H4Б) підлягають гарту на повітрі (мал. 13.2, б). При цьому утворюється мартенсит.

10. **Аустенітні** сталі (12X18H10T – 0,12% C; 1-2 % Mn, 17-19% Cr; 8-10% Ni ~ 1% Ti) (рис. 13.2, в) підлягають гарту на аустеніт, тобто структурою таких сталей є аустеніт (рис. 5.23). В такому стані сталі залишаються високопластичними і легко деформуються. Сталі з вмістом 18% Cr і 10% Ni – нержавіючі, тобто корозійностійкі, набули найбільш високого використання.

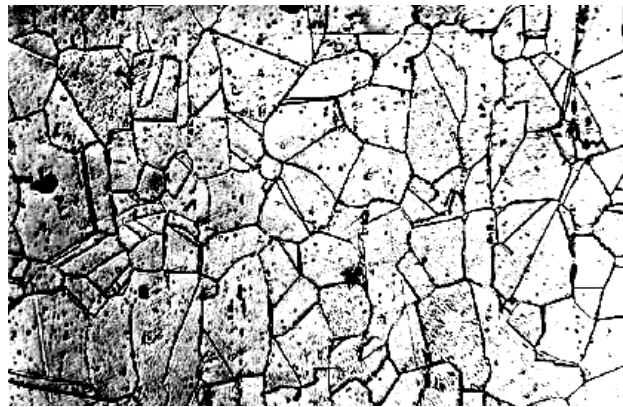


Рис. 5.23. Структура загартованої сталі 12X18H10T (аустеніт).

11. **Високоміцні мартенситно-старіючі** сталі підлягають гарту з послідовним старінням. При цьому утворюється структура нікелевого мартенситу з невисокою міцністю і інтерметалідів Ni_3Ti , $NiAl$, Fe_2Mo , які підвищують міцність сталі. Найбільш ефективно підвищують міцність титан і молібден. Марки деяких мартенситно-старіючих сталей $H18K9M5T$, $H18K12M5T2$, $H16K4M5T2$, $H18K14M5T$.

Існують емпіричні формули, за якими можна підрахувати міцність (σ_B) і пластичність (δ , %) мартенситно-старіючих сталей:

$$\sigma_B = 11 + 42 \cdot \%Ni + 158 \cdot \%Mo + 38 \cdot \%Co + 332 \cdot \%Ti \text{ (МПа)}$$

$$\delta = 44 - 0,46 \cdot \%Ni - 2,4 \cdot \%Mo - 0,6 \cdot \%Co - 5,2 \cdot \%Ti \text{ (\%)}$$

5.6. Контрольні запитання

1. Визначити відповідний заданому варіанту тип сплаву, користуючись таблицею 5.1.
2. На діаграму Fe – Fe₃C нанесіть відповідний сплав.
3. Для заданого сплаву побудуйте і проаналізуйте криву охолодження.
4. Відповідно до заданого варіанту при заданій температурі (таблиця 5.1) визначить:
 - а) кількість кожної фази (структурної складової),
 - б) хімічний склад структурних складових.
5. Визначить твердість заданого сплаву, враховуючи твердості структурних складових.

Таблиця 5.1

Початкові дані для виконання роботи

№ варіанту	Вміст вуглецю, %	Температура, °C	№ варіанту	Вміст вуглецю, %	Температура, °C
1	0,1	20	11	1,1	1000
2	0,2	100	12	1,2	1100
3	0,3	200	13	1,3	1200
4	0,4	300	14	1,4	1300
5	0,5	400	15	1,5	1000
6	0,6	500	16	1,6	900
7	0,7	600	17	1,7	800
8	0,8	700	18	1,8	700
9	0,9	800	19	1,9	600
10	1,0	900	20	2,0	500

6. Розгляньте та проаналізуйте структури вуглецевих сталей на рисунку 5.24. Схематично нарисуйте структури сталей, стрілками вкажіть структурні складові.

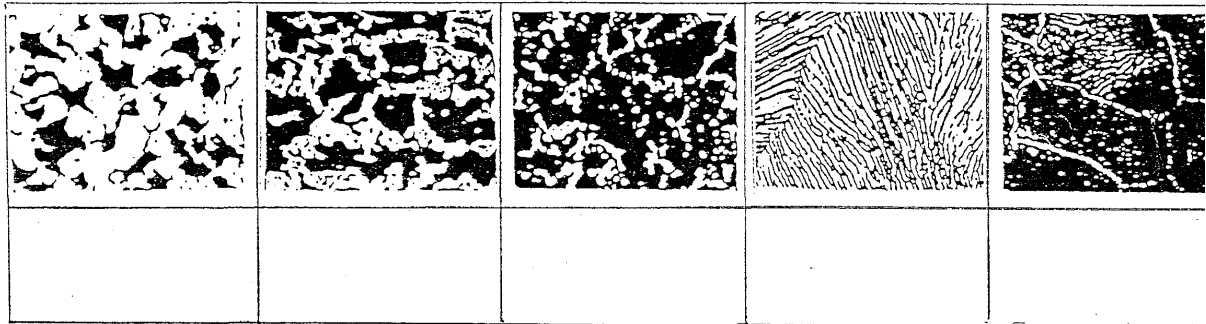


Рисунок 5.24.

7. Визначить кількість структурних складових, кількість вуглецю у кожній сталі, призначення та їх марки. Заповніть таблицю 5.2.

Таблиця 5.2

Структура					
% С					
Призначення					
Марка сталі					

8. Накресліть «сталеву частину» діаграми Fe – Fe 3 % С. На діаграму нанесіть сталь з кількістю вуглецю, відповідно до свого варіанту (див. табл. 5.3).

Таблиця 5.3.

Початкові дані для виконання роботи

№ варіанту	Вміст вуглецю, %	№ варіанту	Вміст вуглецю, %
1	0,1	11	1,1
2	0,2	12	1,2
3	0,3	13	1,3
4	0,4	14	1,4
5	0,5	15	1,5
6	0,6	16	1,6
7	0,7	17	1,7
8	0,8	18	1,8
9	0,9	19	1,9
10	1,0	20	2,0

Побудуйте відповідну криву охолодження (рисунок 5.25).

Опишіть фазові перетворення в сталі.

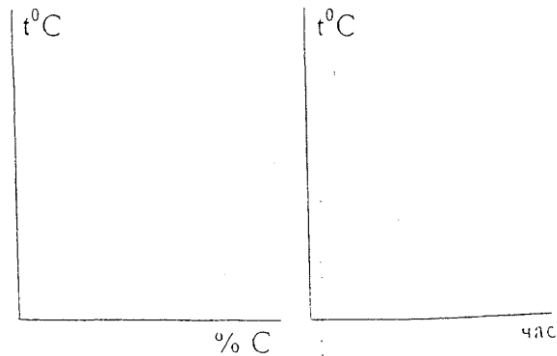


Рис. 5.25.

9. Визначить твердість по Брінеллю сталей, марки яких визначені з рис. 5.23 і записані в табл. 5.3, виходячи з того, що ферит (вміст вуглецю 0,006 %) має НВ 80, перліт (вміст вуглецю 0,8 %) – НВ 170, ледебурит (вміст вуглецю 4,3 %) – НВ 550, цементит (вміст вуглецю 6,67 %) – НВ 800. Заповніть табл. 5.4 і побудуйте графік $HV = f(\% C)$ (див. рис. 5.26).

Марка	НВ

Таблиця 5.4

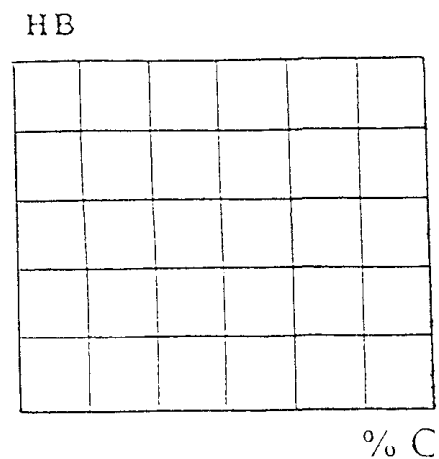


Рис. 5.26

10. Розгляньте і схематично нарисуйте структури білих чавунів. Приблизно вкажіть твердість кожного з чавунів (рис. 5.27).

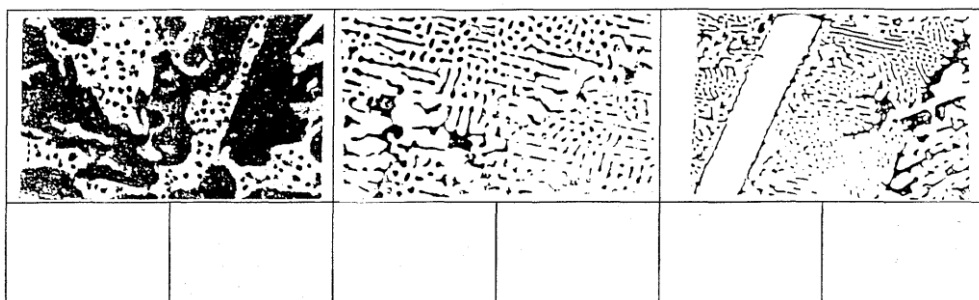


Рис. 5.27.

11. Розгляньте рис. 5.28 і схематично нарисуйте на вільних полях цього рисунку структури графітованих чавунів. Проаналізуйте їх структури та властивості. Заповніть табл. 5.5.

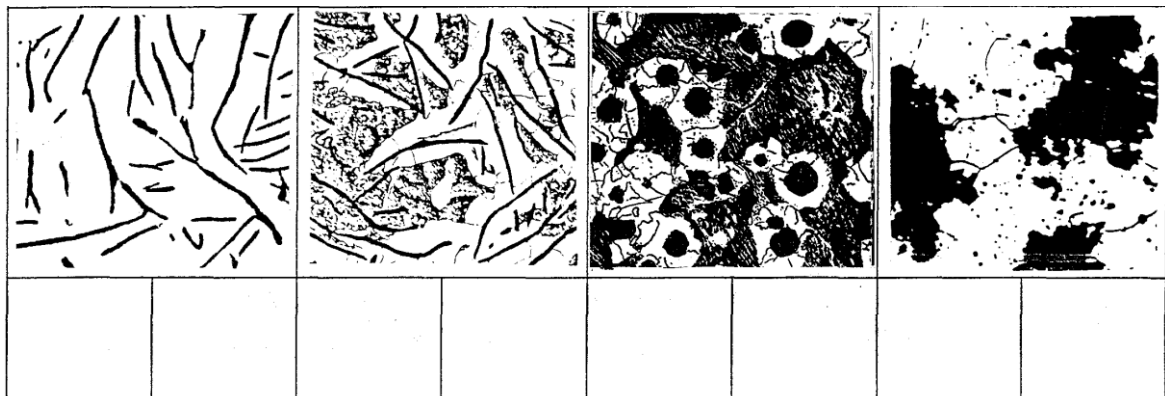


Рис. 5.28.

Таблиця 5.5

Назва чавуну	Форма графіту	Металева основа	Марка	Властивості			Застосування
				σ_B (кгс/мм ²)	δ , %	НВ	
1							
2							
3							
4							

12. На діаграму ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту для сталі У8 (рис. 5.29) нанесіть криві охолодження, які відповідають відпалу, нормалізації, гартуванню. Нанесіть також вектор критичної швидкості гартування.

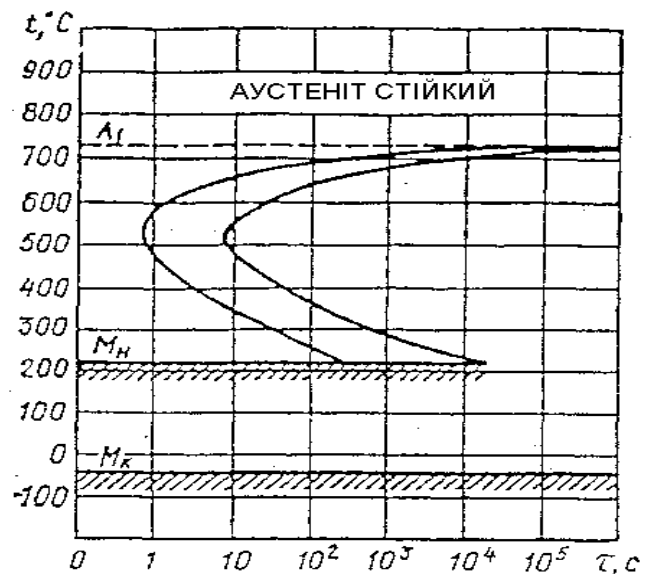


Рис. 5.29.

13. Розгляньте на рис. 5.30 і схематично нарисуйте на вільних полях рис. 5.29 (а) структури сталі У8 після відпалу, нормалізації, гартування. Вкажіть на вільних полях рис. 5.30 (б) структури, які утворюються при таких термічних обробках та їх твердості.

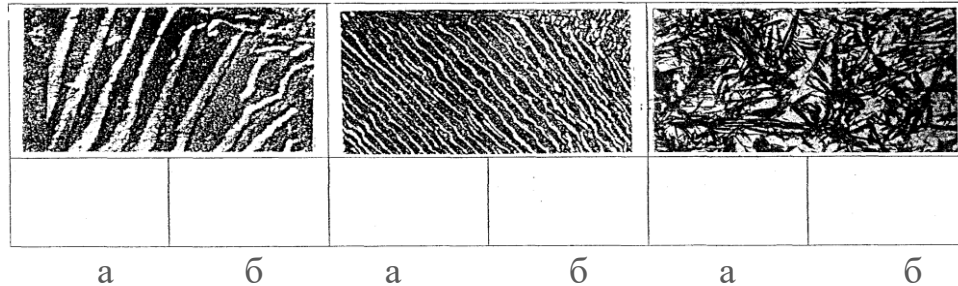


Рис. 5.30

14. Визначить вміст вуглецю у заданих сталях і заповніть таблицю 5.6. Проаналізуйте вплив кількості вуглецю на твердість загартованої сталі. Побудуйте графік $HRC = f(\%C)$ (рис. 5.31). Поясніть хід кривої.

Марка	%, С	HRC
Сталь 20		40
Сталь 30		48
Сталь 45		57
Сталь 60		59
У 8		60
У10		57
У12		55

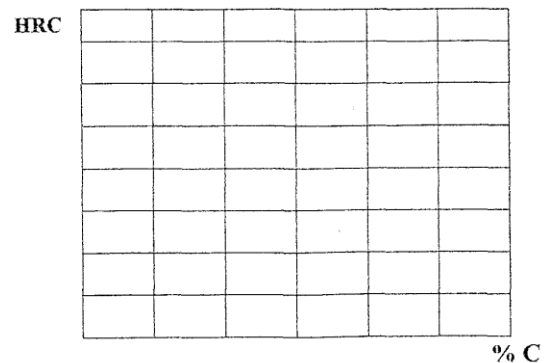


Табл. 5.6.

Рис. 5.31.

15. Розгляньте на рис. 5.32 і схематично нарисуйте структури сталі У8 після низького, середнього та високого відпуску (на вільних полях рис. 5.32,а). Вкажіть, які структури утворюються при цьому (на вільних полях рис. 5.32,б).

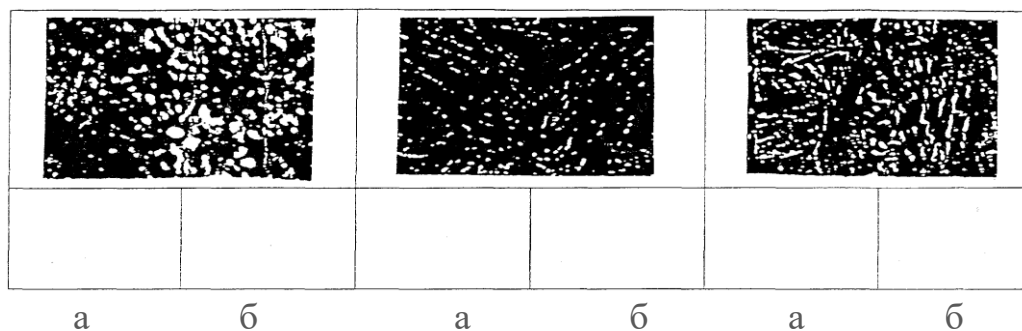


Рис. 5.32

18. Охарактеризуйте задані марки конструкційних сталей та сталей з особливими властивостями відповідно до Вашого варіанту (табл. 5.8).

Таблиця 5.8.

Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
70C2XA	110X17H13M 3T	30XГCН2МА	12X18H10T	30X2ГCН2ВМ
P18	15XM	P9	30X10Г10	P12Φ3
15X	12X18H9T	15XA	30XГCН2A	15XΦ
40XH	XH62MBKЮ	25XГСА	ШX15	30XГC
H18K9M5	08X18H10	09X15H8Ю	25X2ГНТРА	H4X12K15M4T
12X13	12X18H9T	15X6CM	P6M5	40X9C2
12X18H10T	H18K9M5T	45X14H14B2 M	H10X12Д2T	H16K4M5T2
Варіант 6	Варіант 7	Варіант 8	Варіант 9	Варіант 10
40X13	ШX15CГ	P6M5K5	18XГT	40XH2CMA
P6M5Φ3	10Г2C1	12X2H4A	P18K5Φ2	95X18
12XH3A	50XA	40XH2MA	20XГHP	XH77TЮP
30XH3A	OX14AГ12M	20X17H2	30X13	XH56BМКЮ
20X13	10X11H23T3 MP	20X3MBΦ	XH70Ю	60C2
12X17	20X13	XH60Ю	55C2	50XΦA
12X1MΦ	25X2M1Φ	40X10C2M	ШX15Ш	ШX15BД
Варіант 11	Варіант 12	Варіант 13	Варіант 14	Варіант 15
17Г1C	5XHM	30XГCН2M A	12X18H10T	09Г2C
40X	20X13	P9	30X10Г10	P12Φ3
40XH	12X18H9T	15XA	40XMΦA	15XΦ
15XM	06X12H3ДЛ	25XГСА	ШX15	36Г2CP
30XM	10X12ДЛ	09X15H8Ю	25X2ГНТРА	H4X12K15M4T
30X2H2M	12X18H9T	15X6CM	P6M5	40X9C2
40XH2MA	65Г	45X14H14B2 M	H10X12Д2T	30X13H7C2
Варіант 16	Варіант 17	Варіант 18	Варіант 19	Варіант 20
40XH2CMA	ШX15CГ	P6M5K5	18XГT	38X2H2MA
P6M5Φ3	X12MΦ1	12X2H4A	P18K5Φ2	95X18
12XH3A	50XA	40XH2MA	20XГHP	XH77TЮP
30XH3A	18X2H4BA	20X17H2	30X13	38XH3MΦA
20X13	10X11H23T3 MP	20X3MBΦ	XH70Ю	60C2
12X17	20X13	XH60Ю	55C2	50XΦA
12X1MΦ	25X2M1Φ	20XГНTP	ШX15Ш	ШX15BД

19. Підрахуйте σ_B і δ для високоміцної мартенситно-старіючої сталі.
20. Проаналізуйте зміну твердості при відпуску загартованих сталей У12, Х12Ф1, Р18 (рис. 5.34). Поясніть хід кривих.
21. Розгляньте структури сталі (рис. 5.35) Х12Ф1 після гартування і низького відпуску; сталі Р18 після гартування і високого відпуску; твердого сплаву ВК12. Вкажіть відповідність структур маркам сплавів. Схематично нарисуйте структури, стрілками покажіть структурні складові на вільних полях рис. 5.35.

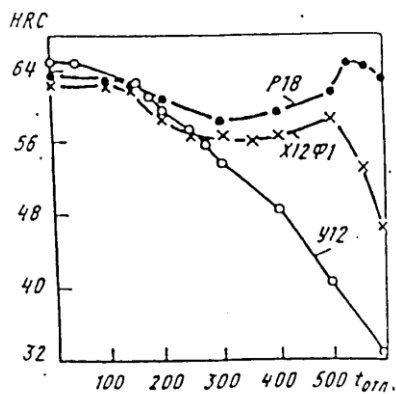


Рис. 5.34.

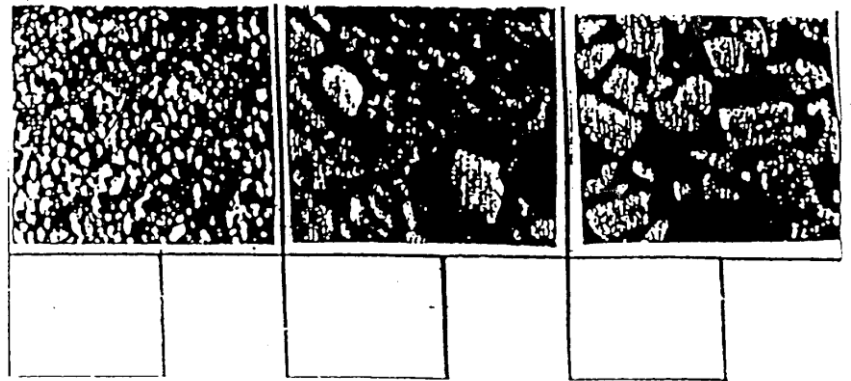


Рис. 5.35.

22. Відповідно до свого варіанту (табл. 5.9) Заповніть таблицю 5.10.

Таблиця 5.9

Варіант	Марка сталі (сплаву)				
	1	Х	У7	Р18	ВК2
2	9ХС	У8	Р10К5Ф5	ВК3-М	ТТ20К9
3	ХГСВФ	У10	Р9К5	ВК3	ТН-20
4	ХГ	У11	Р6М3	Т5К12	ВК6-М
5	ХВГ	У13	Р18Ф2К8М	ТТ10К8-Б	ВК6-ОМ
6	ХВСГ	У7А	Р9Ф5	ТН-30	ВК8
7	ХСВФ	У8А	Р14Ф4	ТН-50	ВК8-В
8	3Х2В8Ф	У10А	Р18Ф2	ВК6	ВК30
9	4Х8В2	У11А	Р18Ф2К8М	ВК4-В	ТТ17К12
10	ХВГ	У13А	Р10К5Ф5	ВК4	ТТ8К6
11	Р18	У12А	Р6М5	ВК10	Т14К8

12	5ХНМ	P10K5Φ5	4X5MΦC	BK10-OM	T15K6
13	40XCMΦ	P18K5Φ2	X12MΦ	BK15	T30K4
14	4XMHΦC	P9Φ5	3X3M3Φ	BK20	T5K12Б
15	3X2MHΦ	P14Φ4	X12Φ1	BK25	T14K8
16	5X2MHΦ	P18Φ2	5XHB	B18M7K25	T15K6
17	9XC	4X5MΦC	5XHBС	B18M3K25	T30K4
18	XBГ	У11Х	7X3	B10M5K25	T15K6
19	X12MΦ	9XC	4XMΦC	BK8B	T14K8
20	X12Φ1	XГCBΦ	8X3	BK6M	T5K12Б

Таблиця 5.10

Марка сталі (сплаву)					
Хімічний склад					
Теплостійкість					
Призначення					
Термообробка (ТО) інструменту					
Структура інструменту після ТО					

Рекомендована література

1. Бочар І. Й. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів (лабораторний практикум). Тернопіль: ТДПУ. 2002. 76 с.
2. Опальчук А. С., Котречко О. О., Роговський Л. Л. Лабораторний практикум з технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства. Навчальний посібник. За ред. А.С. Опальчука. Київ: Вища освіта. 2006. 287 с.

РОЗДІЛ 6. СПЛАВИ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ.

6.1. Мідь та її сплави.

Мідь має гранецентровану кубічну гратку. Густина міді 8940 кг/м^3 , температура плавлення 1083°C .

Характерною властивістю міді є її висока електропровідність, тому вона знаходить широке застосування в електротехніці. Технічно чиста мідь маркується: *МОО* (99,99% *Cu*), *МО* (99,95% *Cu*), *М2*, *М3* і *М4* (99% *Cu*).

Механічні властивості міді відносно низькі: межа міцності складає $150\dots 200 \text{ МПа}$, відносне подовження $\delta \approx 15\dots 25 \%$. Тому як конструкційний матеріал мідь застосовується рідко. Підвищення механічних властивостей досягається створенням різних сплавів на основі міді. Сплави міді діляться на *латуні*, *бронзи* і *мідно-нікелеві* сплави.

6.2. Латуні та бронзи.

Латуні – це сплави міді з цинком, які містять до 49% *Zn*. Підвищення змісту цинку до 45% приводить до збільшення межі міцності σ_b до 450 МПа . Максимальна пластичність має місце при вмісті цинку близько 37 %. При сплаві міді з цинком утворюється ряд твердих розчинів α , β , γ , ε (рис. 6.1).

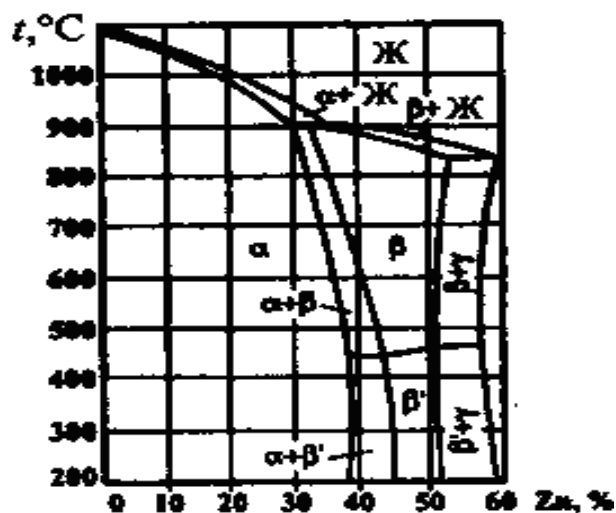


Рис. 6.1. Діаграма стану мідь – цинк.

З діаграми стану мідь – цинк видно, що залежно від складу є однофазна латунь, що складається з α – твердого розчину Zn в Cu з гранецентрованою ґраткою, і двофазні ($\alpha+\beta$) – латунь.

За способом виготовлення виробів розрізняють латуні *деформувальні* та *ливарні*.

Деформувальна латунь маркується буквою *Л*, за якою слідує число, що показує вміст міді у відсотках, наприклад в латуні *Л62* міститься 62% мідь і 38% цинку. Однофазні α – латуні *Л96*, *Л90* (томпаки) мають колір золота, їх використовують для виготовлення деталей деформацією в холодному стані (ювелірних виробів, стрічок, гільз патронів, радіаторних трубок, дроту). Латуні *Л80*, *Л70* (півтомпаки) застосовують для деталей електрообладнання. Для виготовлення деталей деформацією при температурі вище 500⁰С використовують ($\alpha+\beta$) – латунь. З двофазної латуні виготовляють листи, прутки і інші заготовки, з яких при подальшій механічній обробці виготовляють деталі.

Для поліпшення механічних і технологічних властивостей латуні легують. Якщо окрім міді і цинку, є інші елементи, то їх позначають літерами: *О* – олово, *С* – свинець, *Ж* – залізо, *Ф* – фосфор, *Мц* – марганець, *А* – алюміній, *Ц* – цинк. В марках багатокomпонентних латуней після букв слідує числа через дефіс. Перше число показує кількість міді, інші – кількість відповідних легуючих елементів. Наприклад, сплав *ЛАЖ60-1-1* містить 60 % міді, 1% алюмінію, 1% заліза, решта (38%) – цинк. Таки елементи, як *Al*, *Si*, *Ni*, *Mn* підвищують корозійну стійкість в морській воді, тому латуні з оловом зуться «морськими латунями» – *ЛО70-1*, *Л60-1*, *Л90-1*. Таки елементи, як *Fe*, *Al*, *Mn* підвищують твердість і міцність латуні до 550 МПа. Латунь, що обробляється різанням, поліпшується присадкою до складу латуні свинцю, наприклад, латуні марки *ЛС59-1*, *ЛС74-3*, *ЛС64-3* називають «автоматною латунню». Введення в латуні легуючих елементів (окрім *Ni*) рівноцінно підвищенню в них кількості Zn з відповідними коефіцієнтами Гійє (табл. 6.1.).

Термічна обробка латуней – відпал при 600...700⁰С перед пластичним деформуванням. Латунь є хорошим матеріалом для конструкцій, що працюють при негативних температурах.

Таблиця 6.1.

Коефіцієнти Гійє, що враховують еквівалент Zn при легуванні латуней

Легуючий елемент	Si	Al	Sn	Pb	Fe	Mn	Ni
Коефіцієнт Гійє	11	5	2	1	0,9	0,5	-1,4

Бронза

Бронзою називаються сплави міді з іншими елементами, окрім цинку і нікелю. Zn і Ni вводять у бронзи, як додаткові легуючі елементи. Бронзи маркуються літерами Бр, далі вказують легуючі елементи і їх кількість. Наприклад, марка *БрОФ10-1* означає, що в бронзу входить 10% олова, 1% фосфору, решта – мідь. В залежності від легуючих елементів відрізняють олов'яні, алюмінієві, свинцеві бронзи та інші.

Олов'яні (олов'янисті) бронзи містять до 12% олова. Олов'яні бронзи підрозділяється на **деформувальні** і **ливарні**.

У **деформувальній** бронзі зміст олова не повинен перевищувати 6%, для забезпечення необхідної пластичності. Якщо олова до 6%, структура бронзи α – твердий розчин олова в міді. Залежно від складу деформувальні бронзи відрізняються високими механічними, антикорозійними, антифрикційними і пружними властивостями, і використовуються в різних галузях промисловості. З цих сплавів виготовляють прутки, труби, стрічку, дріт.

Ливарні бронзи містять від 6 до 12% олова, – двохфазні зі структурою α + евтектоїдна суміш ($\alpha + \delta$). δ – твердий розчин на базі електронного сполучення $Cu_{31}Sn_8$. Евтектоїдна суміш складається з м'якої і твердої фаз. Така будова є сприятливою для деталей типу підшипників ковзання: м'яка фаза забезпечує хорошу пристосованість деталей, тверді частинки створюють

зносостійкість. Тому олов'яні бронзи є хорошими антифрикційними матеріалами. *БрОЗЦ7С5Н1*, *БрО4Ц4С17* застосовуються для виготовлення пароводяної арматури і для відливань антифрикційних деталей типу втулок, вінців черв'ячних коліс, вкладишів підшипників. Олов'яна бронза має низьку об'ємну усадку (близько 0,8%), тому використовуються в художньому литві. Наявність фосфору забезпечує хорошу рідкотекучість.

Алюмінієві бронзи містять до 11 % *Al*. Якщо *Al* в бронзі до 7,4%, структура α – твердий розчин *Al* в *Cu*. Якщо *Al* більше 7,4%, то структура бронзи α евтектоїдна суміш ($\alpha + \gamma$). γ – це твердий розчин на базі сполучення $Cu_{31}Al_{19}$. α – бронзи (*БрФ5*, *БрФ7*) пластичні. Двохфазні бронзи звичайно легують. Таки елементи як *Fe*, *Mn* підвищують міцність, зносостійкість, а *Mn*, *Ni* підвищують корозійну стійкість, жаростійкість. Марки алюмінієвих бронз: *БрАЖ9-4*, *БрАЖ9-4Л*, *БрАЖН10-4-4*. З алюмінієвої бронзи виготовляють відносно дрібні, але високо відповідальні деталі типу шестерень, втулок, фланців литвом і обробкою тиском. З бронзи ***БрА5*** штампуванням виготовляють медалі і дрібну розмінну монету.

Крем'янисті бронзи *БрКМц3-1*, *БрК4* застосовують як замітники олов'яної бронзи. Вони немагнітні і морозостійкі, перевершують олов'яну бронзу по корозійній стійкості і механічним властивостям, мають високі пружні властивості. Сплави добре зварюються і піддаються паянню. Завдяки високій стійкості до лужних середовищ і сухих газів, їх використовують для виробництва стічних труб, газо- і димопроводів.

Свинцеві бронзи містять до 33% *Pb* і мають структуру механічної суміші $Cu + Pb$. Їх легують *Sn*, *Ni*, які підвищують зносостійкість. *БрС30*, *БрОС8-12*, *БрСН60-45* використовують як високоякісний антифрикційний матеріал для виробництва підшипників ковзання. В порівнянні з олов'яною бронзою мають нижчі механічні і технологічні властивості.

Берилієві бронзи містять до 1,8...2,5% *Be*. *БрБ2*, є високоякісним пружинним матеріалом. Розчинність берилію в міді з пониженням температури значно зменшується.

Це явище використовують для отримання високих пружності і міцності виробів методом дисперсійного твердіння. Готові вироби з берилієвої бронзи піддають гарту від 800°C , завдяки чому фіксується при кімнатній температурі пересичений твердий розчин берилію в міді. Потім проводять штучне старіння при температурі $300\text{...}350^{\circ}\text{C}$. При цьому відбувається виділення дисперсних частинок, структура $\alpha + \text{CuBe}$, зростають міцність і пружність. Після старіння межа міцності досягає $1100\text{...}1200 \text{ МПа}$.

6.3. Мідно-нікелеві сплави.

Їх маркують літерами *MH* і числом, що показує сумарний вміст (*Ni + Co*). Наприклад, *MH19* – сплав, в якому 19% (*Ni + Co*), решта 81% *Cu*. Головні мідно-нікелеві сплави такі:

Нікелін — сплав міді з нікелем (25—35% *Ni*) з домішками марганцю, заліза і цинку. Характеризується великим електричним опором, застосовується в реостатах.

Мельхіор – *MH19, MHЖМц30-0,8-1*. Їх структура α – твердий розчин *Ni, Co, Fe, Mn* в *Cu*. **Мельхіор** (нім. *melchior*, від спотвореного фр. *mail-lechort*) – є сплавом міді з нікелем, іноді з добавками заліза і марганцю. Мельхіор відрізняється високою корозійною стійкістю, добре обробляється тиском в холодному і гарячому стані. Залежно від складу, мельхіор може бути електронегативним відносно морської води, через що застосовується у виробництві високоякісних деталей морських човнів. З мельхіору виготовляють також ювелірні вироби, посуд, термоелементи, точні резистори і так далі. Більшість сучасних монет сріблястого кольору складаються з мельхіору (звичайно 75% мідь і 25% нікелю з незначними добавками марганцю). Звичайно до складу мельхіору входить 5—30% нікелю, до 8% заліза і до 1% марганцю, хоча в окремих випадках він відрізняється від накреслених рамок. Наприклад, при виготовленні резисторів використовується сплав, що містить 55% міді і 45% нікелю.

Мельхіор слід відрізняти від монелі — нікелево-мідного сплаву, вміст нікелю в якому досягає 67 %. Хоча сплав міді з нікелем був відомий ще в III столітті до н. е. як «біла мідь», сучасна його назва склалася від імен його європейських «винахідників» — Майо і Шор'є.

Нейзильбер МНЦ15-20 ((Ni + Co) 15%, Zn 20%, решта Cu). Нейзильбер — (від нім. *neusilber* — «нове срібло») сплав міді з 5-35% нікелю і 13-45% цинку. Характеризується корозійною стійкістю, підвищеною міцністю і пружністю після деформації, задовільною пластичністю в гарячому і холодному стані. Застосовується в промисловості для виготовлення деталей точних приладів, медичних інструментів, парової і водяної арматури, а також медалей і ювелірних виробів (останнім часом частіше використовують саме нейзильбер, хоча за інерцією, такі сплави звичайно іменують мельхіором, — він колись широко застосовувався).

Копель МНМц43-0,5. **Копель** — сплав, що складається з наступних елементів: Ni (43—44%); Fe (2—3%); решта Cu. Густина сплаву 8900 кг/м³, температура плавлення 1220—1290 °С, температурний коефіцієнт лінійного розширення $14 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, питомий електричний опір 0,5 мкОм·м. Володіє високою термоелектрорушійною силою в парі з багатьма металами і застосовується для виготовлення електродів термопар.

Константан МНМц40-1,5. Константан — сплав, що складається з наступних елементів: Ni (39—41%); Mn (1—2%); решта Cu. Сплав має високий питомий електричний опір (близько 0,5 мкОм·м), мінімальне значення термічного коефіцієнта електричного опору, високу термоелектрорушійну силу в парі з хромелем, а також з міддю. Температурний коефіцієнт лінійного розширення $14,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Густина 8800—8900 кг/м³, температура плавлення близько 1260°С. Добре піддається обробці. Йде на виготовлення, реостатів і електронагрівальних елементів з робочою температурою до 400—500°С, вимірювальних приладів низького класу точності.

6.4. Антифрикційні (підшипникові) мідні сплави

Антифрикційні (підшипникові) сплави застосовують для заливки вкладишів підшипників. Ці сплави повинні мати достатню твердість, але не дуже високу, щоб не викликати сильного зносу валу; порівняно легко деформуватися під впливом місцевих напружень, тобто бути пластичними; утримувати мастило на поверхні; мати малий коефіцієнт тертя між валом і підшипником. Крім того, температура плавлення цих сплавів не повинна бути високою, і сплави повинні володіти доброю теплопровідністю і опором корозії.

Бабіти – сплави системи $Sn-Sb-Cu$. Маркуються літерою B , за якою йде число, яке показує кількість головного компоненту – Sn (решта Sb і Cu). Наприклад, $B88$, $B16$. Структура бабітів має два компоненти: м'який і твердий. М'який компонент – це α – твердий розчин сурми в олові. Твердий компонент – це кристали твердого розчину на основі хімічної сполуки $SnSb$ (β – фаза). На мікрофотографії м'яка фаза виглядає темною (темне поле), а тверда фаза – світлі кристали квадратної форми $SnSb$ (β), кристали у вигляді зірочок або здовжених голок (сполука Cu_2Sb).

6.5. Алюміній та його сплави.

Дисперсне твердіння та модифікування.

Алюміній – легкий метал з густиною 2700 кг/м^3 і температурою плавлення 660°C . Має гранецентровану кубічну гратку. Володіє високою тепло- і електропровідністю. Хімічно активний, але щільна плівка оксиду алюмінію Al_2O_3 оберігає його від корозії. Механічні властивості: межа міцності 150 МПа , відносне подовження 50% , модуль пружності 7000 МПа .

Алюміній високої чистоти маркується $A99$ ($99,999 \%$ Al), $A8$, $A7$, $A6$, $A5$, $A0$ (зміст алюмінію від $99,85\%$ до 99%).

Технічний алюміній добре зварюється, має високу пластичність. З нього виготовляють будівельні конструкції, малонавантажувальні деталі машин, використовують як електротехнічний матеріал для кабелів, дротів.

Алюмінієві сплави.

Принцип маркування алюмінієвих сплавів. На початку вказується тип сплаву: *A* – технічний алюміній; *D* – сплави типу дюралюмін; *AK* – ковкі алюмінієві сплави; *B* – високоміцні сплави; *AL* – ливарні сплави.

Далі вказується умовний номер сплаву. За умовним номером слідує позначення, що характеризує стан сплаву: *M* – м'який (відпалений); *T* – термічно оброблений (гарт плюс старіння); *H* – нагартований; *P* – півнагартований.

По технологічних властивостях сплави підрозділяються на три групи:

- деформувальні сплави, що не зміцнюються термічною обробкою;
- деформувальні сплави, що зміцнюються термічною обробкою;
- ливарні сплави.

Методами порошкової металургії виготовляють спечені алюмінієві сплави (*SAC*) і спечені алюмінієві порошкові сплави (*SAP*).

Деформовані сплави, що не зміцнюються термічною обробкою.

Міцність алюмінію можна підвищити легуванням. У сплави, що не зміцнюються термічною обробкою, вводять марганець або магній. Атоми цих елементів істотно підвищують його міцність, знижуючи пластичність. Позначаються сплави: з марганцем – *AM_ц*, з магнієм – *AM_г*; після позначення елемента вказується число, що показує його вміст (*AM_{г3}*).

Магній тільки завищує міцність, марганець зміцнює і підвищує корозійну стійкість. Деформувальні сплави, що не зміцнюються термічною обробкою, мають структуру α – твердого розчину *Mn* і *Mg* в *Al*. Це сплави системи *Al-Mg* (2...7% *Mg*), так звані магналії, і *Al-Mn* (1...1,6% *Mn*).

Деякі марки α – сплавів: *AM_г*, *AM_{г6}*, *AM_ц*. Міцність сплавів підвищується тільки в результаті деформації в холодному стані. Чим більший ступінь деформації, тим значніше росте міцність і знижується пластичність.

Ці сплави застосовують для виготовлення різних зварних балонів для пального, азотної і інших кислот, мало- і середньо навантажених конструкцій.

Деформувальні сплави, що зміцнюються термічною обробкою.

До таких сплавів відносяться *дюралюміни* (складні сплави систем алюміній – мідь – магній або алюміній – мідь – магній – цинк). Вони мають знижену корозійну стійкість, для підвищення якої вводиться марганець. Марки дюралюміну *Д1, Д16, Д18, Д19*. Їх зміст: 2,2...5,2% *Cu*; 0,15...2,7% *Mg*; 0,5...1,0% *Mn*. Дюралюміни звичайно піддаються гарту з температури 500°C і природному старінню, якому передує двох - тригодинний інкубаційний період. Максимальна міцність досягається через 4...5 діб.

Широке застосування дюралюміни знаходять в авіабудуванні, автомобілебудуванні, будівництві.

Високоміцні старіючі сплави системи Al-Zn-Mg-Cu містять 5... 8% *Zn*; 1,2...3,2% *Mg*; 1,4...2,8% *Cu* і маркуються: *B94, B95, B96*. Сплави *B95, B96* мають межу міцності близько 650 МПа. Основний споживач – авіабудування (обшивка, стрингери, лонжерони).

Кувальні алюмінієві сплави (авіалі) – це сплави системи Al-Mg-Si. Марки авіалів: *AK6, AK8*. Вони містять 0,4...0,9% *Mg*; 0,5... 1,2% *Si*. Застосовуються для виготовлення поковок. Поковки виготовляються при температурі 380...450°C, піддаються гарту від температури 500...560°C і старінню при 150...165°C протягом 6...15 годин. До складу алюмінієвих сплавів додатково вводять нікель, залізо, титан, які підвищують температуру рекристалізації і жароміцність до 300°C.

Виготовляють поршні, лопатки і диски осьових компресорів, турбореактивних двигунів.

Ливарні алюмінієві сплави.

До ливарних сплавів відносяться сплави системи Al з елементами, що утворюють легкоплавкі евтектики. Це сплави систем Al-Si; Al-Cu; Al - Mg; Al-Cu-Mn; Al-Cu-Mn-Mg та інші. Сплави системи Al-Si зветься *силуміни*. Ливарні сплави маркуються від *АЛ2* до *АЛ20*. *АЛ2* містить 10...13% кремнію. На рис. 6.2 зображена частина діаграми Al-Si.

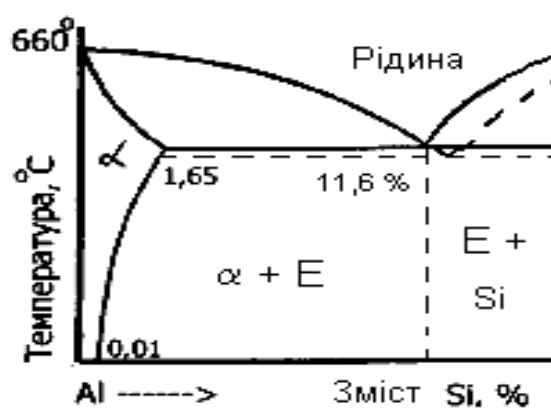


Рис. 6.2. Діаграма Al-Si.

На діаграмі (рис. 6.2) α - твердий розчин Si в Al. E – це є евтектична суміш ($\alpha + Si$), що відповідає 11,6 % Si. Завдяки крихкості Si, евтектика має низкі механічні властивості ($\sigma_s = 120 \dots 160$ МПа, $\delta = 1 \dots 2\%$). Для підвищення механічних властивостей силуміни модифікують Na або Ca.

Модифікування силумінів впливає на температуру евтектичного перетворення і на склад евтектики – пунктирна лінія на діаграмі (рис. 6.2). Як бачимо, після модифікування температура евтектичного перетворення зменшується. Кількість Si в евтектиці збільшується з 11,6% до 13...15% Si.

Таким чином, силуміни з 12...13% Si, які були за структурою заевтектичними сплавами, після модифікування стають доевтектичними з структурою $\alpha + E$. Механічні властивості поліпшуються $\sigma_b = 170 \dots 200$ МПа, $\delta = 3 \dots 5\%$). Для подальшого підвищення механічних і технологічних властивостей силуміни легують Mg, Cu, Mn. Присадка до силумінів магнію, міді сприяє ефекту зміцнення ливарних сплавів при старінні.

Титан і цирконій подрібнюють зерно.

Марганець підвищує антикорозійні властивості.

Нікель і залізо підвищують жароміцність.

Силуміни широко застосовують для виготовлення литих деталей приладів і інших середньо-і мало навантажених деталей, зокрема тонкостінних відливаних складної форми.

Старіння або **дисперсне твердіння** – це процес розпаду нестабільного пересиченого твердого розчину, одержаного гарту. Старіння буває **природним** і **штучним**.

При старінні міцність сплаву збільшується за рахунок виділення в розчині атомів міді, надмірних по зрівнянню з їх рівноважною концентрацією до початку гарту. Ці виділені атоми міді утворюють опір переміщенню дислокацій при накладенні зовнішнього напруження.

Природне старіння відбувається при кімнатній температурі. Закінчується протягом 7 діб.

Штучне старіння відбувається при підвищених температурах.

При старінні сплавів системи *Al-Cu* з пересиченого твердого α - розчину *Cu* в *Al* виділяються атоми *Cu*, які групуються в ґратці *Al* у вигляді субмікроскопічних зон.

Ці зони зветься зонами Гінґе – Престона (*G-P*). Поява таких зон в структурі приводить до збільшення дефектів кристалічної будови і наслідок цього – підвищення міцності і твердості.

6.6. Контрольні запитання

1. Заповніть таблицю 6.2.

Варіант завдання вказаний у таблиці 6.3.

Марка сплаву					
Назва сплаву					
Хімічний склад					
% Zn E_{Zn} в латуні					
Структура					

Таблиця 6.3

Вариант	Марка сплаву				
	1	Л96	ЛО70-1	МН19	МНМц43-0,5
2	Л90	ЛЖМц59-1-1	МНЖМц30-0,8-1	МНМц40-1,5	БрФ5
3	ЛКС80-3-3	Бр.ОФ10-1	МНЦ15-20	БрСН60-45	БН
4	ЛК80-3Л	Бр.ОФ6,5-0,15	МНЖМц30-0,8-1	БрОС8-12	Б83С
5	ЛС74-3	Бр.С30	МН19	БрС30	Б88
6	ЛО70-1	Бр.КН1-3	ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5	БрКМц3-1	БрФ7
7	ЛН65-5	Бр.Б2	ЛМцОС58-2-2-2	БК2Ш	БрФ5
8	ЛЖМц59-1-1	Бр.Мц5	ЛМцЖ55-3-1	БК2	БрОФ10-1
9	ЛАН59-3-2	Бр.АМц9-2	Бр.БНТ1,7	БКА	БрО3Ц7С5Н1
10	ЛАЖМц66-6-3-2	Бр.АЖН10-4-4	БС 6	БрО4Ц4С17	Б 88
11	Бр.АЖН10-4-4	ЛАЖ60-1-1	БрАЖМц10-3-1,5	БН	МНМц40-1,5
12	Бр.АЖ 9-4	БРОЦС5-5-5	ЛА77-2	МН19	Б16
13	БрАЖ9-4Л	ЛЖМц59-1-1	ЛАН59-3-2	МНЖМц30-0,8-1	Б83С
14	Бр. АЖ9-4	Бр.А5	Л63	МНМц40-1,5	Б83
15	Бр. А7	Б83С	БрАЖН10-4-4	Л68	Б 88
16	Л80	Бр. ОЦС5-5-5	ЛАЖМц66-6-3-2	МНЦ15-20	Б16
17	ЛЖМц59-1-1	Бр. ОЦСН3-7-5-1	МНМц43-0,5	БрФ7	Б83
18	Л70	ЛЖМц59-1-1	Бр. С30	МНМц40-1,5	БКА
19	ЛАН59-3-2	ЛК80-3Л	БРОЦС5-5-	МНМц43-0,5	БН
20	ЛН65-5	БрАЖ9-4Л	Бр.БНТ1,7	МНЖМц30-0,8-1	Б16

2. Підрахуйте еквіваленти цинку в заданих у відповідному варіанті (табл. 6.3) легованих латунях за формулою:

$$E_{Zn} = \frac{\%Zn + 11 \cdot \%Si + 5 \cdot \%Al + 2 \cdot \%Sn + \%Pb + 0.9 \cdot \%Fe + 0.5 \cdot \%Mn - 1.4 \cdot \%Ni}{\%Cu + \%Zn + 11 \cdot \%Si + 5 \cdot \%Al + 2 \cdot \%Sn + \%Pb + 0.9 \cdot \%Fe + 0.5 \cdot \%Mn - 1.4 \cdot \%Ni} \cdot 100\%$$

3. Розгляньте і схематично нарисуйте структуру підшипникового сплаву бабіту Б83 (рис. 6.3). Вкажіть на рисунку структурні складові.

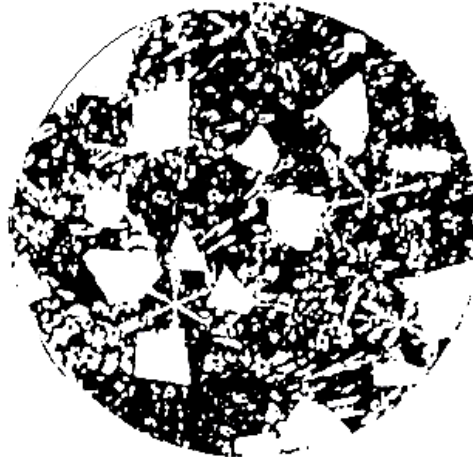


Рис. 6.3. Структура бабіту Б83

4. Розгляньте криви зміни σ_B загартованого дуралюмінію в залежності від температури і часу старіння (рисунок 6.4). Поясніть хід кривих. Якому процесу відповідають максимуми на кривих?

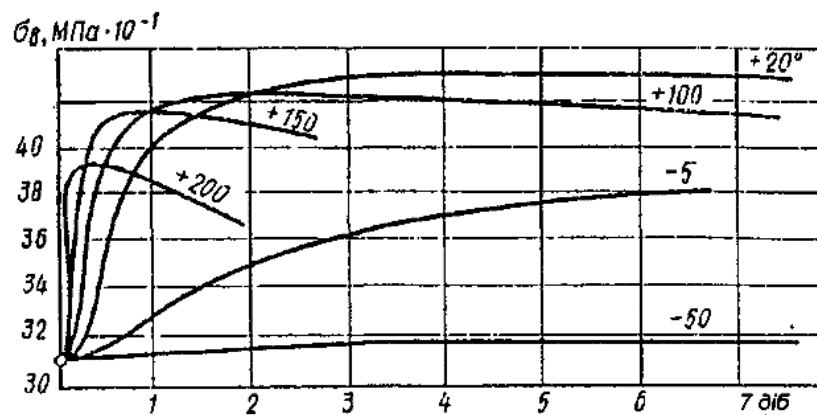


Рис. 6.4.

6. Охарактеризуйте задані у відповідному варіанті (табл. 6.3) марки Al – сплавів, заповнивши таблицю 6.4.

Таблиця 6.4

Марка сплаву			
Назва сплаву			
Структура			
Термічна обробка			

Варіант	Марка сплаву			Варіант	Марка сплаву		
1	АМзб	Д19	АЛ1	11	АД31	В93	АЛ25
2	АК8	Д1	АЛ9	12	АД33	В65	АЛ30
3	АК6	Д16	АЛ4	13	АВ	В95	АЛ7
4	АМГ1	Д18	АЛ6	14	АК6	В96	АЛ1
5	АМГ6	Д19	АЛ2	15	АК8	В93	АЛ19
6	АД31	В94	АЛ8	16	АД31	В94	АЛ24
7	АД33	В95	АЛ9	17	АД33	ВАД23	АЛ8
8	АВ	В96	АЛ4	18	АВ	В92	АЛ2
9	АМГ1	Д20	АЛ5	19	АК6	В93	АЛ9
10	АМГ6	В92	АЛ3	20	АК8	В95	АЛ4

6. На фазову діаграму системи Al-Si (рис. 6.5) нанесіть сплав з 13 % Si (силумін АЛ2). Проаналізуйте і зробіть висновки, як впливає модифікування силумінів на температуру евтектичного перетворення на склад евтектики. Яку структуру має силумін АЛ2 до і після модифікування:

- а) структура АЛ2 до модифікування _____
 б) структура АЛ2 після модифікування _____

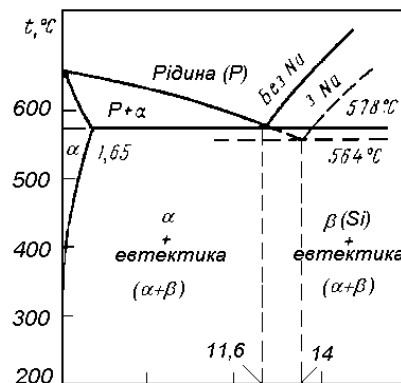


Рис. 6.5. Модифікування силуміну

Рекомендована література

1. Косенко В. А. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство. Київ: Видавництво Університет «Україна». 2012. 252 с.
2. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єрмоєнко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій. Х.: УЦЗУ. 2008. 136 с.

РОЗДІЛ 7. НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ.

7.1. Класифікація хімічних зв'язків:

іонний, ковалентний, металевий, молекулярний

Зв'язок між атомами буває іонним, ковалентним (атомним), металевим, молекулярним.

Іонний зв'язок обумовлений кулонівським тяжінням протилежно заряджених іонів. Іонний зв'язок характерний для неорганічних діелектриків ($NaCl$, LiF). Відомо, що хімічний елемент є стійким, якщо атом елемента має всі електронні оболонки повністю заповненими, як це є у інертних газів. Якщо, наприклад, атом Na має тільки 1 електрон на зовнішній оболонці (тобто його валентність $+1$), то він «прагне» його віддати, щоб всі електронні оболонки атому стали повністю заповненими; з іншого боку, атом хлору, у якого не вистачає одного електрону до заповнення останньої оболонки (тобто його валентність -1), «прагне» його отримати. Тому електрон Na переходить до Cl , обидва атома тепер мають повністю заповнені оболонки. Але при цьому утворюються іони, які мають некомпенсовані електричні заряди: іон Na – позитивний, іон Cl – негативний і притягуються один до одного кулонівськими силами. Так утворюється кристалічна гратка іонних кристалів.

Ковалентний (атомний) зв'язок виникає між атомами шляхом утворення загальних пар валентних електронів. Такий зв'язок мають Si , Ge , алмаз, сполуки з елементів середніх груп таблиці Менделєєва (SiC , BN), а також органічні сполуки (поліетилен C_2H_4 , політетрафторетилен C_2F_4 , гази H_2 , O_2 , N_2).

Але чисто іонний і чисто ковалентний зв'язки є ідеалізованими типами зв'язку. У одній і тій же речовині тип зв'язку залежить від температури, тиску, середовища. Наприклад, у газоподібному HCl зв'язок майже ковалентний, а у водному розчині – іонний.

Тому реальний зв'язок між атомами речовини може бути частково ковалентний, а частково іонний. Мірою збільшення іонного типу зв'язку є *електронегативність x* .

Електронегативність x характеризує спроможність атома до приєднання електрона. Наприклад, якщо електронегативності атомів A і B рівні, тобто $\Delta x = x_A - x_B = 0$, то зв'язок повинен бути практично ковалентний чи дуже близький до нього. Чим більше Δx , тим більше вага іонного стану. В теорії напівпровідників величини Δx часто використовують як критерій для вибору іонної чи ковалентної моделі, по якій оцінюють міцність хімічних зв'язків.

Металеві зв'язки виникають між позитивно зарядженими іонами металів і хмарою колективізованих електронів. Відповідно до класичної теорії електропровідності металів, при об'єднанні їхніх атомів у масивний метал, електрони провідності, що знаходяться на самих віддалених від ядра оболонках атомів і тому менш за все притягуються до ядра, відриваються від своїх власних атомів, які перетворюються в іони. Ці іони утворюють просторову кристалічну ґратку. "Колективізовані" електрони провідності усередині цієї кристалічної решітки хаотично безупинно рухаються, як "ідеальний газ" із квазивільних електронів.

Молекулярні зв'язки існують між окремими молекулами за рахунок електростатичного тяжіння зарядів протилежного знаку, що знаходяться в молекулах (сили Ван-дер-Ваальса). Ці зв'язки дуже слабкі, тому речовини, що мають цей вид зв'язку, легко розм'якшуються при нагріванні, мають низькі температури плавлення. Прикладом кристалу з молекулярним типом зв'язку є кристал PCl_5 . Він має більш менш міцні зв'язки всередині молекул, але слабкі зв'язки між молекулами, що є характерним для типових кристалів з молекулярним зв'язком.

Водневий зв'язок є особливим видом зв'язку. Він відбувається через іон водню, розташованому між двома іонами, що є характерним для води H_2O .

7.2. Елементи зонної теорії. Генерація і рекомбінація носіїв заряду, власна та домішкова провідність у напівпровідниках.

Виникнення енергетичних зон. Класифікація матеріалів з точки зору зонної теорії: метали, напівпровідники, діелектрики.

Відповідно до *зонної теорії провідності*, при об'єднанні атомів у кристал внаслідок взаємодії, що виникає між атомами при їх зближенні, кожний з енергетичних рівнів розділяється на ряд близько розташованих підрівнів (смуги). Ці смуги називають *енергетичними зонами*.

Кількість підрівнів у зоні приблизно дорівнює кількості атомів, що поєднуються в кристал. Розрізняють "дозволену" зону, у якій енергія електронів може приймати дискретний ряд близько розташованих значень, мінімальна порція якої – квант – дорівнює $E = h\nu$, (ν – частота випромінювання, h – постійна Планка). Дозволені зони відокремлюються одна від одної "забороненими" зонами значень енергії. Характерною рисою енергетичного спектра, тобто будови зон, є те, що чим більше енергія електрона, тим ширше дозволена зона і тим більш вузька заборонена зона.

Валентна зона – остання, сама далека від ядра зона, цілком зайнята електронами. Наступна за нею зона називається зоною *провідності*.

У *металів* при абсолютному нулі температур валентна зона не цілком заповнена електронами. Енергія останнього рівня, зайнятого електроном при абсолютному нулі температур у валентній зоні металу, називається енергією Фермі (E_f), а сам рівень називається рівнем Фермі (f). Електрони, що володіють енергією Фермі і більше під дією зовнішнього електричного поля можуть переходити на більш високі енергетичні рівні, тобто переміщатися усередині цієї зони, а, отже, проводити електричний струм навіть при абсолютному нулі температур. Такі електрони називаються електронами провідності (*рис.7.1*). Електрони, що рухаються під дією зовнішнього електричного поля, будуть випробовувати зіткнення з іонами кристалічної ґратки. Ці зіткнення утворюють опір електричному струму.

При зростанні температури амплітуда коливань іонів кристалічної ґратки металу збільшується, а, отже, і електричний опір металів при нагріванні зростає, а електропровідність падає.

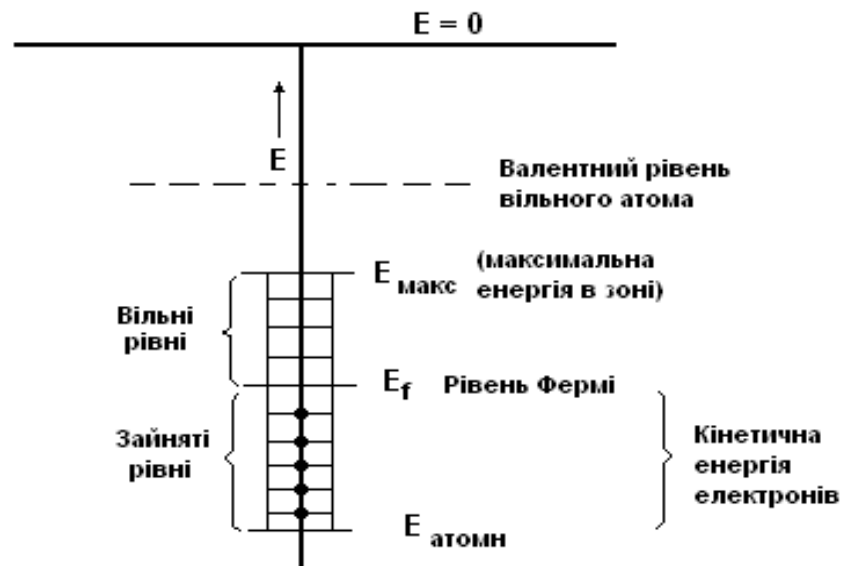


Рис.7.1. Схема енергетичних рівнів частково заповненої зони (метал).

У напівпровідників і діелектриків зона провідності при абсолютному нулі температур цілком вільна, тобто електронів, що проводять електричний струм у зоні провідності, у них немає. Тому при абсолютному нулі температур і напівпровідники, і діелектрики не проводять електричний струм.

Однак у напівпровідників зона провідності відокремлюється від валентної зони більш вузькою, ніж у діелектриків, забороненою зоною. Так що в напівпровідниках при температурі, відмінній від абсолютного нуля, частина електронів із валентної зони за рахунок своєї теплової енергії може перебороти енергетичний бар'єр, що дорівнює ширині забороненої зони, і перескочити в зону провідності, де електрони зможуть брати участь в електропровідності (електронна провідність). Аналогічну роль у верхній частині валентної зони виконують порожні місця (вакансії чи дірки, що мають заряд рівний за величиною і протилежний за знаком заряду електрона), залишені електронами після їхнього переходу в зону провідності

(діркова провідність). Дірки поводяться подібно до частинки з позитивним зарядом, рівним заряду електрона. При накладанні зовнішнього електричного поля електрони переміщатимуться в напрямі, протилежному напрямку напруженості електричного поля, а дірки – у напрямі поля (рис.7.2).

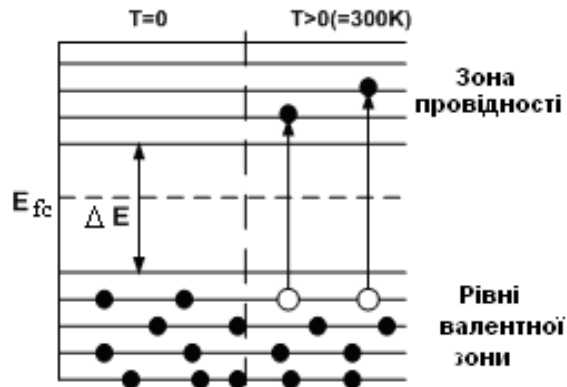


Рис. 7.2. Схема зонної структури напівпровідників і діелектриків.

Загальна електропровідність залежить від концентрації носіїв заряду (n і p) і їх рухливості μ . Під рухливістю розуміють середню швидкість руху носіїв заряду (м/с) при накладанні зовнішнього електричного поля напруженості у 1 В/м, тобто розмірність рухливості рівна

$$\frac{m \cdot m}{c \cdot B} = \frac{m^2}{B \cdot c} = m^2 / (B \cdot c).$$

Загальна провідність напівпровідника

$$\gamma = \gamma_{\text{e}} + \gamma_{\text{d}} = q\mu_n n + q\mu_p p, \quad (7.1)$$

де γ_{e} – електронна провідність,

γ_{d} – діркова провідність,

μ_n і μ_p – рухливості електронів і дірок,

n і p – концентрації електронів і дірок.

У чистому (власному) напівпровіднику $n_i = p_i$, тоді $\gamma = qn_i(\mu_n + \mu_p)$.

Розглянута провідність напівпровідників називається **власною провідністю**, а напівпровідники з таким типом провідності називаються **власними напівпровідниками**.

При зростанні температури кінетична енергія електронів збільшується, отже, і кількість електронів, що можуть перескочити із валентної зони в зону провідності, зростає.

Таким чином, у напівпровідників з ростом температури електропровідність зростає, а електроопір зменшується, на відміну від металів. Ширина забороненої зони ΔE у напівпровідників при кімнатній температурі ($\approx 300\text{ K}$) знаходиться в інтервалі $0,08 < \Delta E < 3,2$ еВ (електрон-Вольт, $1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

При кімнатній температурі електропровідність напівпровідників лежить в межах $10^{+3} - 10^{-12}$ Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$ і росте з температурою. Прикладами напівпровідників є сіре олово αSn ($\Delta E = 0,1$); германій Ge (0,75); кремній Si (1,12); AlSb (1,60); CdS (2,3).

У діелектриків ширина забороненої зони настільки велика, що ні при яких умовах електрони з валентної зони не можуть перейти в зону провідності. Тому діелектрики не проводять електричний струм. Ширина забороненої зони у діелектриків $\Delta E > 3,2$ еВ.

Електропровідність діелектриків з температурою росте. Прикладом діелектриків є алмаз (5,3 еВ).

Власна і домішкова провідність напівпровідників. Розрізняють електропровідність *власну* і *домішкову*.

Власна електропровідність спостерігається у чистих напівпровідників, що називаються ще власними. Власна провідність напівпровідників була розглянута вище.

Домішкова провідність спостерігається у напівпровідників з домішками. Таки напівпровідники називаються *домішковими*.

Домішки порушують періодичність кристала і утворюють в енергетичному спектрі напівпровідника додаткові рівні, розташовані у забороненій зоні, як показано на рис. 7.3.

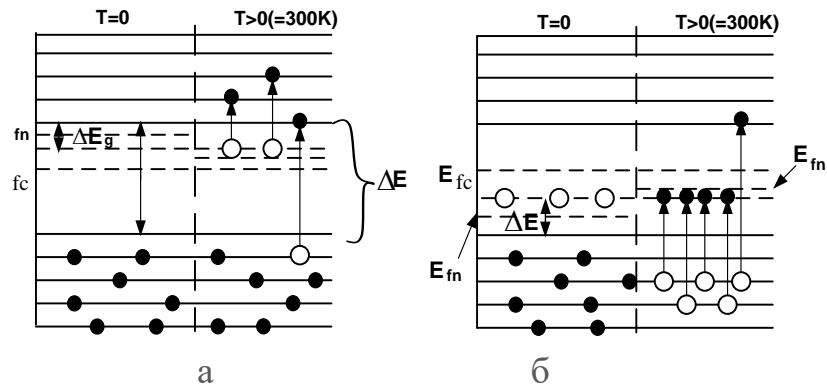


Рис.7.3. Домішкова провідність.

Донорними називаються домішки, що створюють додаткові рівні поблизу дна зони провідності (рис.7.3, а).

Акцепторними називаються домішки, що створюють додаткові рівні поблизу стелі валентної зони. E_{fn} – рівень Фермі для домішкового н/п. Із зростанням температури положення E_{fn} міняється. Для *Ge* і *Si* донорними є елементи 5-ої групи таблиці Менделєєва, акцепторними є елементи 3-ої групи. При наявності донорних домішок теплове перекидання електронів з донорних рівнів в зону провідності ймовірніше, ніж перехід електронів з валентної зони, оскільки $\Delta E_{\delta} \ll \Delta E$. При цьому число електронів в зоні провідності більше числа дірок у валентній зоні. Така провідність називається **електронною**, а напівпровідник – напівпровідником n- типу. Загальна провідність

$$\gamma = n_i q \mu_n + p_i q \mu_p + n_n q \mu_n \approx n_n q \mu_n. \quad (7.2)$$

За наявності акцепторних домішок під дією теплового руху перехід електронів з валентної зони на рівні домішок (рис. 7.3, б) більш імовірний, ніж перехід електронів у вільну зону провідності. Така провідність називається **дірковою**, а н/п – напівпровідником p-типу. Загальна провідність

$$\gamma = n_i q \mu_n + p_i q \mu_p + p_n q \mu_p \approx p_n q \mu_p. \quad (7.3)$$

Якщо в напівпровідник вводиться ряд домішок, що створюють донорні або акцепторні рівні, провідність визначається рухливістю і концентрацією надмірних носіїв заряду, тобто $\gamma = q \mu_{n\text{нм}} \cdot n_{\text{нм}}$ або $\gamma = q \mu_{p\text{нм}} \cdot p_{\text{нм}}$.

Елементи 5-ої і 3-ої груп таблиці Менделєєва є в *Ge* і *Si* домішками заміщення. Домішки впровадження також змінюють тип провідності н/п. Атоми лужних металів (*Li, Na, K, Pb, Cs*) легко віддають валентні електрони і є донорами.

Атоми металоїдів звичайно є акцепторами (O_2). Інші метали можуть створювати як донорні, так і акцепторні рівні. Теплові дефекти в *Ge* і *Si* можуть створювати два рівні: атом, що упродавився в міжвузловину, діє як донор, а порожній вузол, що залишився, діє як акцептор.

Генерація і рекомбінація носіїв заряду у напівпровідниках.

Генерацією називається введення в напівпровідник неосновних носіїв заряду. Нерівноважні носії заряду можуть генеруватися *інжекцією, дією світла* і іншими способами. Генерація є основою дії більшості напівпровідникових приладів. Концентрація неосновних носіїв заряду називається *нерівноважною* і з часом прагне до рівноважної в результаті процесу *рекомбінації*.

Рекомбінацією називається взаємне знищення електронів і дірок при їх зустрічі. При рекомбінації, як і при генерації носіїв заряду, виконуються закони збереження енергії.

Відомо три види рекомбінації електронів і дірок:

- 1) безпосередня рекомбінація;
- 2) рекомбінація через пастки – центри рекомбінації;
- 3) поверхнева рекомбінація.

Безпосередня рекомбінація полягає в переході електронів із зони провідності у валентну зону. Причому можлива випромінювальна і безвипромінювальна рекомбінації. При випромінювальній рекомбінації енергія електрона і дірки випускається у вигляді світла (фотонів), при безвипромінювальній рекомбінації енергія випускається у вигляді тепла (фононів). Імовірність безпосередньої рекомбінації дуже мала.

Рекомбінація через пастки в переважній більшості випадків грає вирішальну роль.

Пастками називаються локальні енергетичні рівні в забороненій зоні напівпровідника. Ці рівні утворюються різною недосконалістю кристалічної структури, тобто атомами домішки, дислокаціями, порожніми вузлами в кристалічній ґратці тощо. При рекомбінації через пастку електрон із зони провідності спочатку потрапляє на рівень пастки, а потім можливі два випадки:

- 1) електрон викидається назад в зону провідності;
- 2) електрон далі звальюється у валентну зону після рекомбінації з діркою; причому спочатку може з'явитися в пастці дірка, а потім електрон або навпаки.

Викид електрона з рівня пастки назад в зону провідності може відбутися за рахунок теплових флуктуацій, якщо рівень пастки лежить ближче до дна зони провідності, ніж до стелі валентної зони. В цьому випадку захоплення пасткою електрона більш імовірно, ніж захоплення дірки. Електрон буде або довго чекати свого «партнера», або повернеться в зону провідності. Якщо зворотний викид електрона в зону провідності з рівня пастки більш імовірний, ніж рекомбінація, то такі рівні називаються *центрами прилипання*, якщо імовірніше рекомбінація – *центрами рекомбінації*.

Рекомбінація електронів через пастки більш імовірна, ніж безпосередня, з наступної причини: енергія рекомбінації при цьому розбивається на дві частини, кожна з яких менша, ніж при безпосередній рекомбінації.

Концентрація нерівноважних носіїв заряду за рахунок рекомбінації знижується згідно закону:

$$n-n_0=(n_n-n_0)e^{-t/\tau}, \quad (7.4)$$

де n_n – нерівноважна концентрація у момент введення надмірних носіїв заряду; t – поточний час; τ – час життя, тобто час, протягом якого концентрація нерівноважних носіїв заряду знижується в e раз.

Час життя знижується від концентрації домішок, температури, структури напівпровідника. Якщо напівпровідник полікристалічний, то грані його кристалітів утворюють своєрідні дефекти ґратки, що веде до зменшення τ .

Тому для виготовлення транзисторів використовуються монокристали.

З ростом концентрації домішок в напівпровіднику τ зменшується, оскільки домішкові атоми грають роль пастки, так як разом з корисною домішкою потрапляють і шкідливі, атоми яких дають пастки. Таким чином, чим більше провідність γ (тобто більше N_a або N_d), тим менше τ (рис. 7.4).

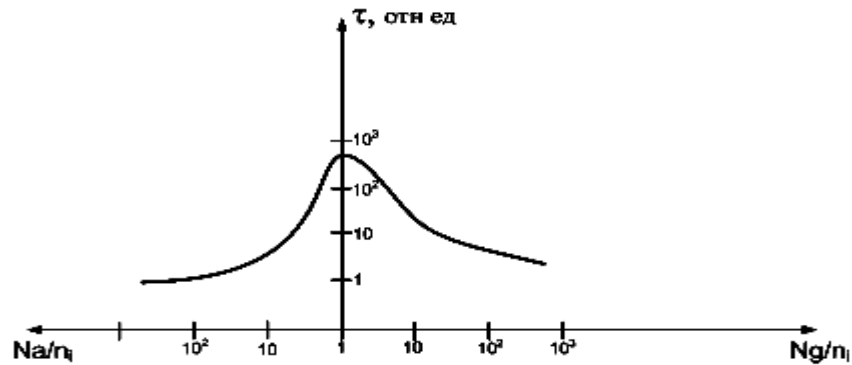


Рис. 7.4. Залежність часу життя нерівноважних носіїв заряду від концентрації числа донорів і акцепторів

При підвищенні температури τ зростає (рис. 7.5), оскільки пастки інтенсивніше заповнюються носіями заряду, що чекають рекомбінації.

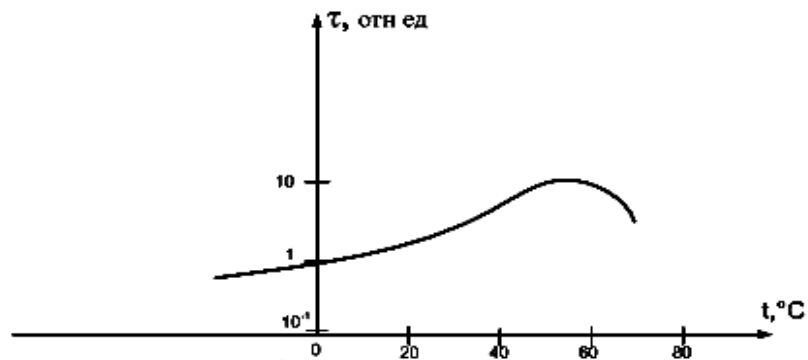


Рис. 7.5. Залежність часу життя носіїв заряду від температури.

У зв'язку з цим пастки значну частку часу виявляються зайнятими. Власний напівпровідник володіє мінімальним τ . Компенсований напівпровідник ($N_a=N_d$, $n=p$) володіє меншим τ , ніж власний.

Поверхнева рекомбінація відбувається на поверхні зразка, де є велика кількість дефектів ґратки, адсорбованих атомів газів, волога, оксиди і т.д.

Тому на поверхні напівпровідника створюється велика кількість пасток, що призводять до посиленої рекомбінації. Поверхнева рекомбінація характеризується швидкістю поверхневої рекомбінації S , вимірюваної в см/с. Вона є складною функцією геометрії зразка, стану його поверхні, рухливості носіїв. Фізично швидкість поверхневої рекомбінації є середньою швидкістю носіїв заряду, з якою вони рухаються до поверхні, де рекомбінують. Наприклад, хімічно оброблені зразки германію і кремнію мають $S = (10-100)$ см/с, при механічній обробці $S = (10^4-10^5)$ см/с.

7.3. Вплив електричного поля і світла на провідність та ефекти в напівпровідниках (Гана, Зеєбека, Холла)

Закон Ома в диференціальній формі має вигляд:

$$j = \gamma \cdot E, \quad (7.5)$$

де j – щільність електричного струму; γ – питома провідність; E – напруженість електричного поля.

Закон Ома зберігається, якщо електропровідність γ не залежить від напруженості поля E . У загальному випадку

$$\gamma = \sum_{k=1}^c q_k \cdot n_k \cdot \mu_k, \quad (7.5)$$

де q_k – заряд k -того носія струму; n_k – концентрація k -того носія струму
 μ_k – рухливість k -того носія струму.

Тобто електропровідність виражається через рухливість. Рухливість прямопропорційна довжині вільного пробігу електрона між зіткненнями з тепловими коливаннями іонів кристалічної ґратки l , і обернено пропорційна абсолютній швидкості руху електронів V_{abc} :

$$\mu = \frac{\Delta V}{E} = \frac{q \cdot \tau}{m^*} = \frac{q}{m^*} \cdot \frac{l}{V_{abc}}, \quad (7.6)$$

де l – довжина вільного пробігу; V_{abc} – абсолютна швидкість електрона;
 m^* – ефективна маса електрона.

Поле впливає на l і V_{abc} , а отже, на рухливість μ . Ступінь і характер впливу залежить від механізму розсіяння електронів, який в свою чергу, залежить від температури. Залежність μ від E для германію приведена на рис. 7.6. При високих температурах (77K) носії заряду розсіюються на теплових коливаннях кристалічної ґратки (тобто на фононах). Якщо електричне поле при цьому слабе, то l і V_{abc} трохи змінюються, а μ залишається незмінною. При сильних полях, l не залежить від E , а V_{abc} зростає. Тоді μ падає.

При низьких температурах (20K) носії заряду розсіюються на іонах домішки. При цьому у слабкому електричному полі l росте швидше, ніж V_{abc} , і μ зростає.

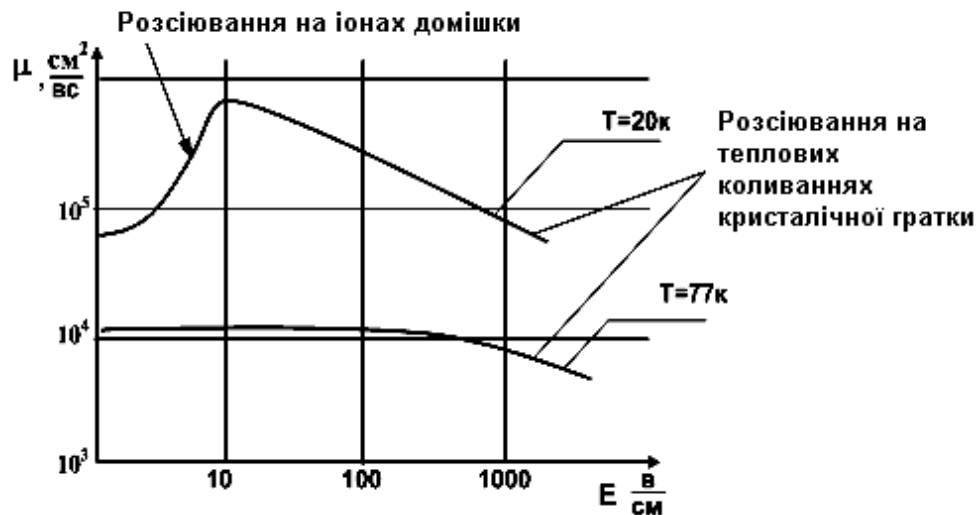


Рис. 7.6. Залежність μ від E для Ge.

Напруженість поля, при якому стає помітним зміна μ , і отже, порушується закон Ома, називається критичною ($E_{кр}$). У напівпровідників з великою μ помітна зміна V_{abc} і l із зростанням поля виявляється раніше, ніж у напівпровідників з малою рухливістю. Отже, $E_{кр}$ буде тим менше, чим вище рухливість носіїв заряду.

Для германію:

$$\mu_p = 1900 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad E_{кр} = 1400 \frac{\text{В}}{\text{см}}, \quad \mu_n = 3900 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad E_{кр} = 800 \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

Для кремнію:

$$\mu_p = 500 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad E_{kp} = 7500 \frac{\text{В}}{\text{см}}, \quad \mu_n = 1200 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}} \quad E_{kn} = 2800 \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

Електричне поле впливає також на концентрацію носіїв заряду. Причиною зміни концентрації є: *термоелектронна іонізація, ударна іонізація, електростатична іонізація, ефект Штарка*.

Дія термоелектронної іонізації полягає в тому, що електричне поле полегшує перехід електронів в зону провідності за рахунок теплової енергії.

Дія ударної іонізації полягає в збудженні вільних електронів, які одержали енергію при зіткненні з домішковим атомом або з атомом основної ґратки.

Дія електростатичної іонізації пов'язана з тим, що електричне поле нахиляє рівні валентної зони і зони провідності (рис. 7.7). При цьому електрони віддають перевагу горизонтальним переходам над 2 і 2^1 у зрівнянні з вертикальними переходами 1 і 1^1 .

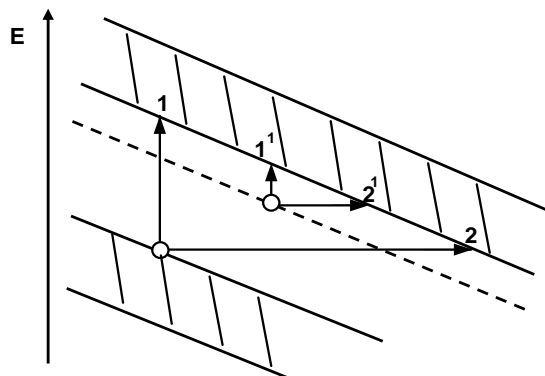


Рис. 7.7. Дія електростатичної іонізації у сильному електричному полі.

Ефект Штарка пов'язаний із зменшенням ширини забороненої зони в сильному електричному полі при високих концентраціях домішок.

Для більшості напівпровідників залежність γ від E визначається зростанням концентрації носіїв заряду із збільшенням E . Залежність γ від E має вигляд, показаний на рис. 7.8.

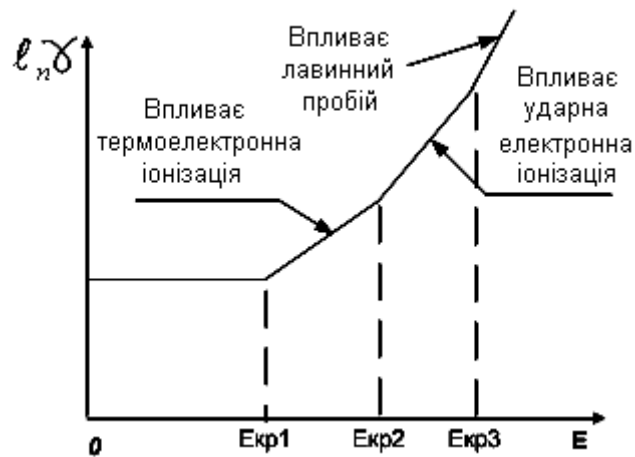


Рис. 7.8. Залежність γ від E для напівпровідників у електричному полі.

На рис. 7.8 критичні значення напруженості електричного поля відповідають:

$$E_{кр1} = 10 - 10^4 \frac{B}{см}, E_{кр2} = 10^5 \frac{B}{см}, E_{кр3} > 10^5 \frac{B}{см}.$$

Залежність j від E для германію представлена на рис. 7.9.

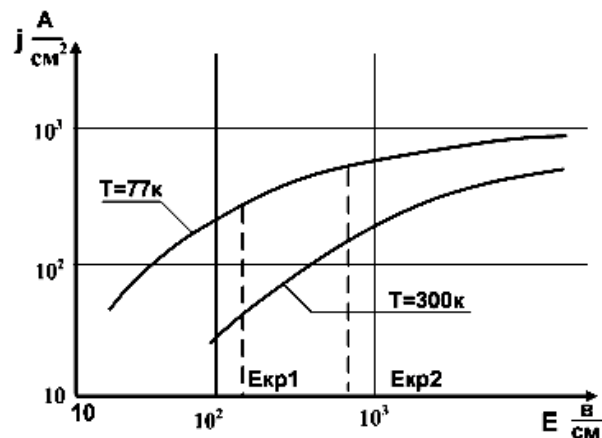


Рис. 7.9. Залежність щільності струму j від E для Ge .

Не зважаючи на те, що при $E > 10^3$ В/см концентрація носіїв заряду зростає, μ падає сильніше, тому зростання j із збільшенням E сповільнюється.

Вплив світла на провідність напівпровідників. Фотопровідність. Напівпровідники поглинають енергію світлового потоку, причому існує два види поглинання – *фотоелектричне активне* і *фотоелектричне неактивне*.

Фотоелектричне активне поглинання забезпечує **внутрішній фотоефект**. Внутрішній фотоефект виникає у напівпровідників, що мають діелектричну проникність $\epsilon > 4$. **Внутрішній фотоефект** полягає в збільшенні концентрації вільних носіїв заряду в напівпровіднику за рахунок енергії світла і виникає, коли енергія світла перевищує ширину забороненої зони.

Для власного напівпровідника енергія фотону повинна бути більше ширини ΔE забороненої зони:

$$h\nu > \Delta E \quad (7.7)$$

Для домішкового напівпровідника енергія фотону повинна бути більше ширини забороненої зони домішки ΔE_δ :

$$h\nu > \Delta E_\delta \quad (7.10)$$

де ν – частота, h – постійна Планка.

Енергія видимого спектру лежить в межах 1,6...3,1 еВ, причому $\nu = (4...8) \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$. Енергія 1,6 еВ відповідає червоному кольору; 3,1 еВ – фіолетовому.

Залежності фотоструму I_ϕ і коефіцієнта поглинання світла K від довжини хвилі приведені на рис. 7.10.

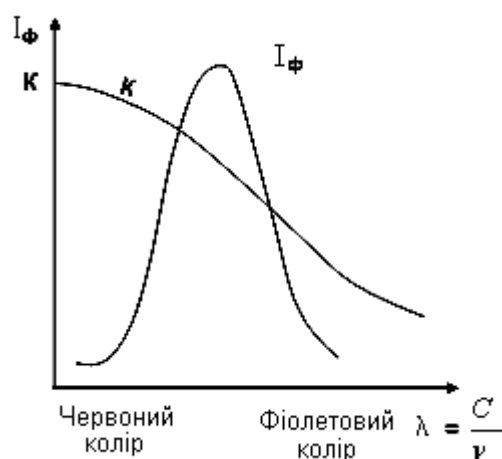


Рис. 7.10. Залежність фотоструму і коефіцієнта поглинання напівпровідника від довжини хвилі світла.

При великих λ енергії не достатньо, щоб іонізувати атом напівпровідника. Із зменшенням λ збільшується енергія, I_ϕ росте. У області фіолетового світла, що опромінює напівпровідник, сила фотоструму I_ϕ падає внаслідок збільшення коефіцієнта поглинання. При цьому енергія поглинається тільки тонким поверхневим шаром напівпровідника. Підвищення концентрації носіїв заряду у поверхні викликає посилену рекомбінацію (ефект Суля). Іноді посилена рекомбінація розповсюджується углиб напівпровідника внаслідок дифузії носіїв заряду, що може привести навіть до зменшення загальної провідності напівпровідника при опромінюванні.

Із збільшенням освітленості L провідність напівпровідника збільшується, як показано на рис. 7.11. Коли майже всі атоми вже іонізовані, фотострум набуває насичення.

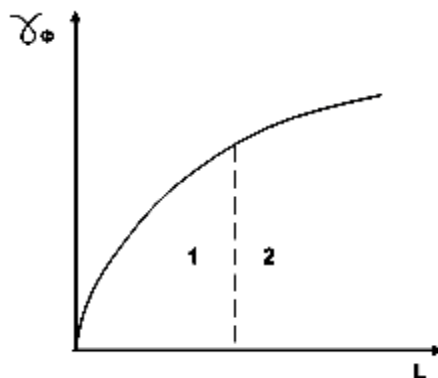


Рис. 7.11. Залежність фотопровідності напівпровідника γ_ϕ від його освітленості L .

Фотоелектричне неактивне поглинання світла полягає в тому, що під дією світла атом переходить в збуджений стан, при якому електрон не розриває зв'язку з діркою, виникаючою у валентній зоні, а утворює з нею єдину зв'язану систему. Така система називається **екситоном**. Так як екситони є нейтральними електричними системами, то наявність екситонів не змінює провідність напівпровідника. Екситони хаотично мігрують по напівпровіднику. Зовнішнє електричне поле не змінює хаотичного руху екситонів. Проте в кристалі можуть існувати умови, що приводять до

загибелі екситону. Наприклад, при зіткненні екситону з домішковим центром або іншим дефектом структури екситон може «розірватися». Замість нього з'являється вільні носії заряду – електрон і дірка. Виникає фотопровідність, при цьому збуджений атом забирає енергію з кристалічної ґратки. На внутрішньому фотоефекті заснована дія **фотоопорів (фоторезисторів)**.

При зіткненні з домішковим центром екситон може зникнути з передачею енергії кристалічній ґратці чи випромінюється у вигляді кванту світла. Так виникає **люмінесценція**.

Ефект Ганна. Ефект Ганна пов'язаний із зміною рухливості вільних носіїв заряду μ під дією сильного електричного поля. Він спостерігається у напівпровідників, що мають два мінімуми в зоні провідності, наприклад, у *GaAs* (рис. 7.12).

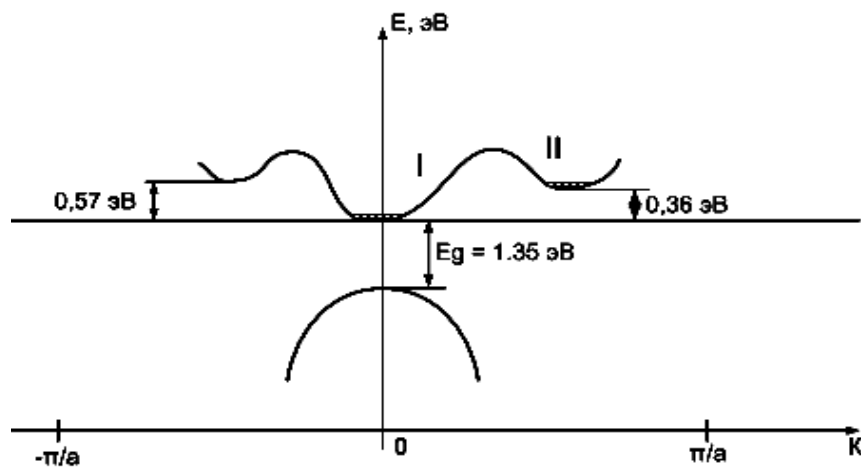


Рис. 7.12. Структура зони провідності напівпровідника з ефектом Ганна.

На рис. 7.12 K – хвильовий вектор, a – параметр ґратки. У мінімумі I μ_n в 25-30 разів вище, ніж в мінімумі II. При сильному зовнішньому електричному полі енергія електронів першого мінімуму підвищується настільки, що виявляється можливим їх перехід в другий мінімум. В результаті провідність γ ($\gamma = n \cdot q \cdot \mu_n$) зменшується і щільність струму j ($j = E \cdot \gamma$) падає. На вольт-амперній характеристиці (ВАХ) з'являється ділянка негативного диференціального опору. При цьому ВАХ має N-подібний вигляд (рис. 7.13).

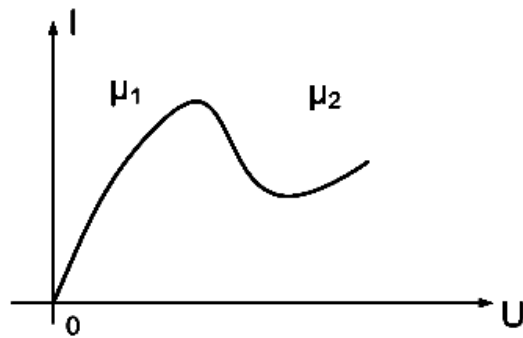


Рис. 7.13. ВАХ напівпровідника з ефектом Ганна.

Якщо такий діод включити в резонансну систему (відрізок хвилеводу), то в системі виникають незгасаючі електричні коливання. При товщині відрізка $d = 100$ мкм частота, що генерується $f = 1$ ГГц, а при $d = 2$ мкм $f = 30$ ГГц.

Термоелектричний ефект Зеебека. Термоелектричний *ефект Зеебека* полягає в появі ЕРС у відрізку напівпровідника, уздовж якого існує градієнт температури (рис. 7.14)

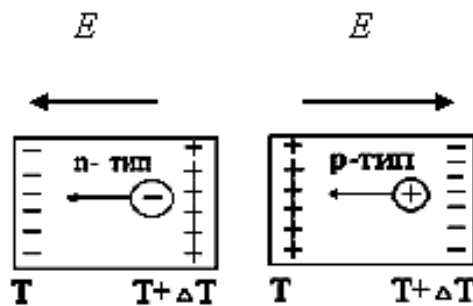


Рис. 7.14. Виникнення термо-ЕРС.

Рухомі носії у області більшої температури мають більші енергії і швидкості, ніж в області з низькою температурою. Внаслідок цього переважає дифузія носіїв заряду з гарячої області напівпровідника в холодну. На холодному кінці відбувається накопичення заряду одного знаку, на гарячому іншого. Для напівпровідників n-типу гарячий кінець заряджається позитивно, для напівпровідників p-типу – негативно. Цей ефект використовується при визначенні типу провідності напівпровідника.

Величина виникаючої термо-ЕРС визначається співвідношенням:

$$E = \alpha \cdot \Delta t, \quad (7.11)$$

де α – коефіцієнт термо-ЕРС; для напівпровідників *n*-типу α негативний, *p*-типу – позитивний.

Чисельне значення α суттєво залежить від вигляду і концентрації домішок і досягає 1 мВ/град.

Якщо підігрівати *p-n*- перехід, як показано на рис. 7.15, то загальна термо-ЕРС буде рівна:

$$E = E_1 + E_2 = (\alpha_1 + \alpha_2) \cdot \Delta t \quad (7.12)$$

Такі пристрої використовуються для перетворення теплової енергії в електричну. Обернений термоелектричний ефект відомий як ефект Пельтьє.

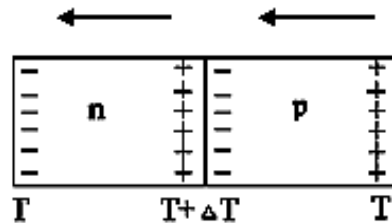


Рис. 7.15. Схема термоелектронного перетворювача.

Гальваномагнітний ефект Холла. Ефект Холла полягає в появі поперечної різниці потенціалів при русі носіїв заряду в подовжньому напрямі зразка напівпровідника, що знаходиться в магнітному полі (рис. 7.16).

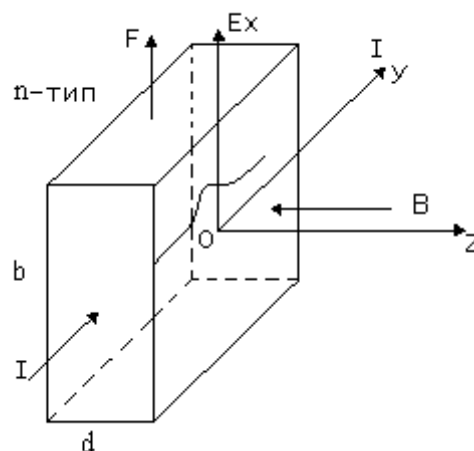


Рис. 7.16. Схема виникнення ефекту Холла.

Нехай в зразку напівпровідника n -типу у вигляді прямокутного паралелепіпеда тече струм I уздовж зразка. Перпендикулярно великій площині зразка діє магнітне поле з індукцією B . На кожен електрон діє сила Лоренца F :

$$F = q \left[\vec{v} \times \vec{B} \right], \quad (7.13)$$

де \vec{v} – швидкість руху заряду, q – заряд.

Під дією цієї сили носії заряду зміщуватимуться так, що на гранях зразка з'явиться поперечна різниця потенціалів E_x . Напрямок відхилення носіїв заряду визначається за правилом лівої руки: чотири пальці руки повинні бути направлені уздовж напрямку руху струму, напруженість магнітного поля H повинна бути перпендикулярна долоні, тоді великий палець руки покаже напрям відхилення носіїв заряду. Відхилення носіїв заряду продовжується до тих пір, поки виникле поперечне електричне поле E_x не зрівноважить відхиляючу дію магнітного поля, тобто

$$E_x q = qvB \quad (7.14)$$

Помножимо обидві частини рівності на n – концентрацію електронів, тоді:

$$E_x qn = nqvB \quad (7.15)$$

Тут $nqv = j$ – щільність струму, причому $j = I/bd$, тоді $E_x qn = \frac{IB}{bd}$.

Звідси, оскільки $E_x = \frac{U_x}{b}$ (U_x – напруга), то

$$U_x = \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB}{d} \quad (7.16)$$

Ця формула справедлива в тому випадку, якщо всі носії заряду мають однакову швидкість руху.

З урахуванням розподілу електронів за швидкостями

$$U_x = \frac{A}{qn} \cdot \frac{IB}{d} \quad (7.17)$$

Тут коефіцієнт $A = \frac{3\pi}{8}$ для напівпровідників з атомарними ґратками при низьких температурах, і $A=1,93$ при високих температурах. Для напівпровідників з іонними ґратками $A=1,11$.

Для германію і кремнію при $T = 293K$ $A = \frac{3\pi}{8}$. Коефіцієнт

$$R = \frac{A}{qn} \quad (7.18)$$

називають постійною Холла. Знак R залежить від носіїв заряду. Для напівпровідників n-типу $R < 0$, p-типу – $R > 0$. По знаку EPC Холла можна визначити тип провідності напівпровідника і рухливість носіїв заряду.

Оскільки провідність $\gamma = nq\mu$, то $\mu = \frac{\gamma}{nq}$. З формули для R $nq = \frac{3\pi}{8R}$. Тоді

$\mu = \frac{8R}{3\pi} \cdot \gamma$. Таким чином, ефект Холла дозволяє визначити рухливість носіїв

заряду, яку називають холлівською.

Для напівпровідників із змішаною провідністю:

$$R = \frac{3\pi}{8q} \cdot \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (7.19)$$

Для напівпровідників з власною провідністю:

$$R = \frac{3\pi}{8} \cdot \frac{\mu_p - \mu_n}{\mu_p + \mu_n} \cdot \frac{1}{nq} \quad (7.20)$$

Оскільки траєкторія руху носіїв заряду викривляється, то довжина вільного пробігу їх у напрямі подовжнього електричного поля зменшується, зменшується і рухливість, падає провідність, причому

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} \approx (\mu V)^2. \quad (7.21)$$

Це явище називається *ефектом Гауса*.

7.4. Поляризація діелектриків

Поляризація є зворотним зсувом електричних заряджених частинок, що входять до складу діелектрика, при прикладенні до нього електричного поля.

Ємність конденсатора, що має на пластинах заряд Q і заповненого вакуумом, визначається по формулі

$$C_0 = Q/U_0, \quad (7.22)$$

де U_0 – різниця потенціалів.

Після того, як в зазор буде вставлений діелектрик (рис. 7.17),

$$C = Q/U = \varepsilon C_0. \quad (7.23)$$

Величину $\varepsilon = E_0/E$ (E – напруженість електричного поля) називають відносною діелектричною проникністю.

Вона залежить від властивостей діелектрика і показує у скільки разів зменшуються сили взаємодії електричних зарядів усередині діелектрика в порівнянні з вакуумом.

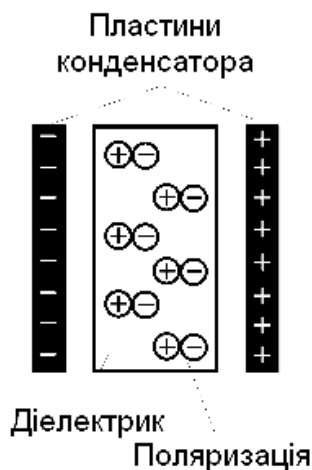


Рис. 7.17. Конденсатор з діелектриком.

Вектор поляризації. При накладенні електричного поля всередині діелектрика виникають елементарні електричні дипольні моменти p_j . Вектор поляризації є об'ємною щільністю електричного дипольного моменту діелектрика: $P = (\Sigma p_j)/V$.

При підтримці постійної різниці потенціалів і введенні в конденсатор ізотропного діелектрика зростає електрична індукція (електричне зміщення) D :

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 \varepsilon E = \varepsilon D_0 \quad (7.24)$$

$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}/(\text{В} \cdot \text{м})$ – електрична постійна.

Вектора E і D направлені від позитивного заряду до негативного. Вектор P направлений від негативного заряду до позитивного. Вектори E , D і P в ізотропних діелектриках мають один і той же напрям.

У анізотропних діелектриках діелектрична проникність є симетричним тензором другого рангу

$$\varepsilon_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (7.25)$$

Можна отримати зв'язок між поляризацією і напруженістю електричного поля:

$$P = \chi_e \varepsilon_0 E = \alpha E, \quad \chi_e = \varepsilon - 1, \quad (7.26)$$

де χ_e – діелектрична сприйнятливість, що характеризує спроможність до зміщення зарядів у атомах чи молекулах; α – поляризованість (атомна чи молекулярна діелектрична сприйтливність, є характеристикою матеріалу).

Для газів, неполярних рідин і кубічних кристалів зв'язок між діелектричною проникністю і поляризованістю описується рівнянням Клаузіуса–Мосотті:

$$3\varepsilon_0(\varepsilon - 1) = \alpha(\varepsilon + 1). \quad (7.27)$$

Механізми поляризації. Використання діелектрика багато в чому залежить від механізму поляризації. Механізми поляризації зручно представити у вигляді схеми, що приведена на рис. 7.18



Рис. 7.18. Механізми поляризації діелектриків.

Як видно зі схеми, розрізняють пружну і релаксаційну поляризацію. Якщо частинки всередині діелектрика зв'язані достатньо жорстко, то сили, які намагаються повернути в початкове положення зміщені електричним полем заряди, носять квазіпружний характер.

Виникаючі зсуви звичайно невеликі. Така поляризація називається **пружною (деформаційною)**.

Період, за який частинки повернуться у початковий стан після виключення поля, називається періодом релаксації τ_r . При пружній релаксації $\tau_r = 10^{-12} \div 10^{-16}$ с.

У випадку слабого зв'язку між частинками на поляризації позначається їх тепловий рух. Під дією електричного поля за рахунок теплової енергії при зсуві частинки долають потенційні бар'єри. Виникаючі зсуви достатньо великі: $\sim 0,5$ нм.

Після виключення поля унаслідок дезорієнтуючого впливу теплового руху система повертається (релаксує) в початкове положення повільніше ($\tau_r \sim 10^{-6} \div 10^{-10}$ с), ніж при пружній поляризації. Така поляризація називається **тепловою (стрибковою, релаксаційною)**.

Пружна електронна поляризація. Під дією електричного поля ядра атомів і електронні оболонки зміщуються один відносно одного. Відбуваються пружні зсув і деформація оболонок атомів і іонів. Виникаючі зсуви звичайно невеликі. Така поляризація називається пружною (деформаційною) (рис. 7.19). Період релаксації при електронній пружній поляризації $\tau_r = 10^{-12} - 10^{-16}$ с. Електронна пружна поляризація спостерігається у всіх діелектриках незалежно від їх агрегатного стану.

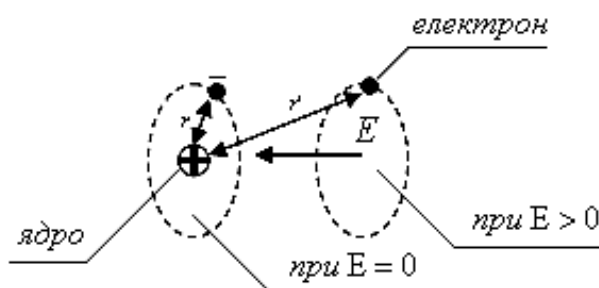


Рис. 7.19. Схема пружної електронної поляризації.

Пружна іонна поляризація. Іонна пружна поляризація має місце в діелектриках з іонним типом хімічного зв'язку, наприклад, в кристалах куховарської солі. У зовнішньому електричному полі позитивні іони кристалічної решітки зміщуються у напрямі напруженості поля, негативні – проти. В результаті відбувається певна деформація кристалічної решітки або, як часто говорять, – зміщення позитивної і негативної підрешіток, що приводить до виникнення дипольних моментів, тобто до поляризації діелектриків (рис. 7.20).

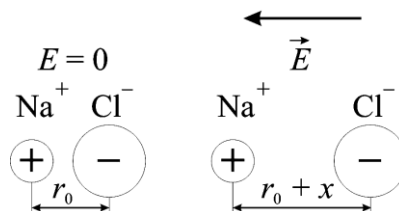


Рис. 7.20. Схема іонної поляризації.

Час встановлення іонної поляризації складає $\sim 10^{-15} \div 10^{-14}$ с. Тому така поляризація встигає встановлюватися і в надвисокочастотних полях ($10^{10} \div 10^{11}$ Гц). Проте в інфрачервоній області спектру спостерігається запізнення у встановленні іонної поляризації.

Пружна дипольна поляризація. Коли диполі зв'язані достатньо жорстко (полярні кристали), то при накладенні зовнішнього електричного поля відбуваються пружні зміни в їх напрямі. Під дією зовнішнього електричного поля відбувається пружний поворот диполя на кут γ в зовнішньому електричному полі E , що створює кут β з внутрішнім полем кристала $E_{\text{вн}}$. (рис. 7.21). Поляризованість залежить від електричного моменту кожної молекули, енергії міжмолекулярних зв'язків і напрямку електричного поля. Вона максимальна при $\beta = 90$ і 270° . Коли внутрішнє і зовнішнє поля паралельні, поляризованість рівна нулю. Тому внесок пружної дипольної поляризації може обумовлювати анізотропію діелектричної проникності. Період релаксації при дипольній пружній поляризації складає

$$\tau_r = 10^{-12} \div 10^{-14} \text{ с.}$$

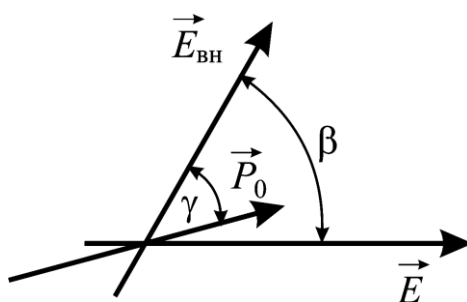


Рис. 7.21. Схема пружної дипольної поляризації.

Теплова електронна поляризація. Електронна теплова поляризація характерна для твердих діелектриків, що мають певного роду дефекти. Вона грає істотну роль в таких технічно важливих діелектриках, як рутит TiO_2 , перовскит $CaTiO_3$ та подібних їм складних оксидах титану, цирконію, ніобію, танталу, свинцю, церію, вісмуту. Для цих полікристалічних речовин характерна висока концентрація дефектів кристалічної структури.

Приклад: у стехіометричному TiO_2 атоми Ti мають валентність 4. При наявності вакансій кисню виникають слабо зв'язані електрони і частина атомів Ti стає тривалентною. В результаті теплового руху такі електрони хаотично переходять від одного близько лежачого до вакансії атома Ti до іншого, долаючи певний потенційний бар'єр. Період релаксації для електронної теплової поляризації $\tau_r \sim 10^{-7} \div 10^{-2}$ с.

Теплова іонна поляризація. Іонна теплова поляризація можлива тільки в твердих діелектриках і переважає в речовинах з вираженою нерегулярністю структури і слабо зв'язаними іонами: склі, ситалах і діелектричній кераміці, із-за високої концентрації структурних дефектів. Слабо зв'язані іони в результаті теплових флуктуацій можуть переходити з одного положення рівноваги в інше, долаючи потенційні бар'єри (рис. 7.22).

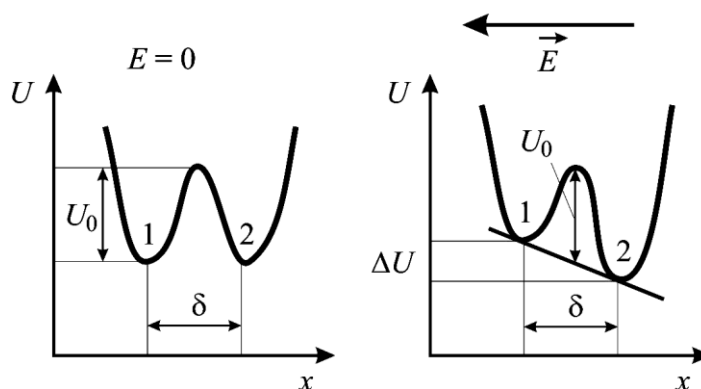


Рис. 7.22. Схема теплової іонної поляризації.

Залежно від особливостей структури діелектрика і типу дефектів період релаксації іонної теплової поляризації при кімнатній температурі складає $\sim 10^{-8} \div 10^{-4}$ с. Тому іонна теплова поляризація може бути основною причиною діелектричних втрат на радіочастотах.

Теплова дипольна поляризація. Слабозв'язані диполі в полярних діелектриках під дією зовнішнього електричного поля можуть відносно легко повертатися. При відсутності поля в результаті теплового руху диполі орієнтовані хаотично, і поляризація рівна нулю. За наявності поля в процесі хаотичного теплового руху частина диполів орієнтується по полю. Внаслідок цього виникає новий стан рівноваги - поляризований. З одного боку, тепловий рух сприяє орієнтації диполів по полю, а з іншого – перешкоджає орієнтації по полю всіх диполів. Період релаксації дипольної теплової поляризації експоненційно залежить від температури, зменшуючись при нагріванні діелектрика. При кімнатній температурі для різних діелектриків період релаксації лежить в межах $\sim 10^{-10} \div 10^{-4}$ с.

Міграційна поляризація. До макроскопічної поляризації відносять міграційну, або об'ємно-зарядну поляризацію. Вона характерна для

неоднорідних діелектриків. Накопичення електричних зарядів на межах неоднорідностей (шарів, пор, включень) приводить до об'ємно-зарядної поляризації. Ця поляризація істотно підвищує електричну ємність конденсатора, що містить неоднорідний діелектрик. Величина зсуву зарядів при міграційній поляризації може складати макроскопічну величину: приблизно 1 мкм. Період релаксації $\tau_r = 10^{-5} \div 10^{-4}$ с.

Спонтанна поляризація. У деяких діелектриках відбувається мимовільна орієнтація диполів (спонтанна поляризація), яка спостерігається всередині окремих областей (доменів) при відсутності електричного поля. Спонтанна поляризація має місце у матеріалів, так званих сегнетоелектриків. При відсутності електричного поля електричні моменти доменів направлені безладно і компенсують один одного. При накладенні зовнішнього поля моменти орієнтуються уздовж поля, приводячи до аномально великих значень діелектричної проникності. При релаксаційній і спонтанній поляризації мають місце втрати енергії, що розсіюється в діелектриках у вигляді тепла.

Діелектрична проникність у змінному електричному полі. У постійному електричному полі всі види поляризації, властиві даній речовині, встигають встановитися. У змінному електричному полі із зростанням частоти ν починають запізнюватися найбільш повільні види поляризації, а потім і інші види. Це приводить до зменшення діелектричної проникності із зростанням частоти, аж до $\epsilon = 1$ в полях з частотою $\nu = 10^{17} \div 10^{18}$ Гц (рис. 7.23).

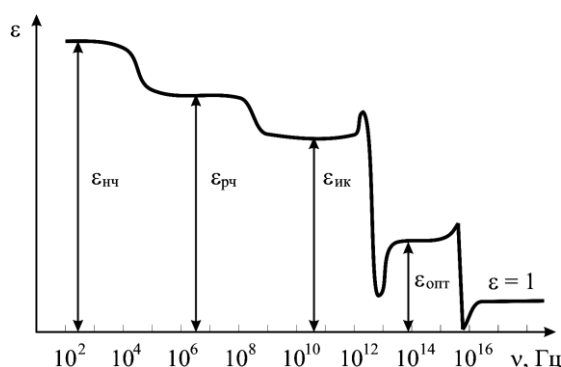


Рис. 7.23. Залежність діелектричної проникності від частоти зовнішнього електричного поля.

7.5. Неметалеві матеріали і вибір матеріалу для конкретного призначення

Сучасні прилади неможливо створити, застосовуючи тільки металеві матеріали. Ряд неметалічних матеріалів, одержаних сучасною промисловістю володіють значно вищими фізичними і хімічними властивостями. Неметалічні матеріали умовно можна розділити на штучні і природні, органічні і мінеральні, однорідні і композиційні. Найбільшого поширення в техніці набули неметалічні матеріали на основі різних полімерів.

ГУМА

Гумою називається продукт спеціальної обробки (вулканізація) суміші каучуку і сірки з різними добавками. Основою гуми служить каучук натуральний (*НК*) або синтетичний (*СК*). Для поліпшення фізико-механічних властивостей вводяться різні добавки.

Старіння гуми – в процесі експлуатації гумові вироби піддаються світловому, озонному, тепловому, радіаційному, вакуумному старінню.

Вакуумне старіння гуми – гуми газопроникні, термічно окислюються, виділяють гази. Оцінка вакуумостійкості робиться по втраті маси і залежить від типу каучуку. Стійкі у вакуумі – СКІ - 3, СКД, СКМС - 10 і ін.

Озонне старіння гуми – на стійкість до радіації впливає природа каучуку, інгредієнтів, захисних добавок, середовище. Стійкі до радіації – НК, СКІ-3, СКЕП.

ГЕРМЕТИКИ

Герметики – це полімерні композиції зазвичай на основі полісульфідних або кремній-органічних рідких каучуків), що забезпечують непроникність болтових і заклепувальних з'єднань металевих конструкцій. Герметизуючий прошарок утворюється безпосередньо на сполучному шві в результаті вулканізації (затвердіння) полімерної основи герметика.

КАУЧУК СИНТЕТИЧНИЙ (СК)

Каучуки – це синтетичні полімери, які при звичайних температурах високоеластичні і можуть бути перероблені в гуму. СК ділять зазвичай на каучук загального і спеціального призначення.

КЕРАМІКА

Керамікою називають вироби і матеріали, що одержують спіканням оксидів металів, глин і сумішей, а також інших тугоплавких з'єднань; характеризуються, як правило, підвищеною твердістю, міцністю і жаростійкістю.

КЛЕЙ

Клей – плівкотвірний матеріал. Складається з розчинів або розплавів полімерів, а також неорганічних речовин.

Для створення певної в'язкості у клей додають розчинники.

Для усунення усадкових явищ додають пластифікатори.

Для переводу в термостабільний стан додають затверджувачі і каталізатори.

Класифікація клеїв:

- по плівкотвірній речовині розрізняють смоляні і гумові;
- по адгезивних властивостях – універсальні (що склеюють різні матеріали) і з виборчою адгезією;
- по відношенню до нагріву – термопластичні і термореактивні і т.п.

Силікатний — неорганічний клей, основа – калієве або натрієве рідке скло. Можна склеювати скло, кераміку, скло з металом, азбест.

Гумовий — розчин каучуків або гумових сумішей в органічних розчинниках. Розрізняють клеї гарячої вулканізації (140-150°C) і холодної – клей, що самостійно вулканізується.

ПЛАСТМАСА

Пластмаса – це композиційний матеріал, що є металевими листами з полімерним покриттям.

Полімер — від грецького що “складається з багатьох частин” – високомолекулярні з'єднання.

Прості пластмаси — полімери без добавок.

Складні пластмаси — суміші полімерів з різними добавками (наповнювачами, стабілізаторами, пластифікаторами і т.д.).

Наповнювачі — додають в пластмаси для підвищення їх механічних властивостей. Можуть використовуватися порошки – деревина, борошно, саж, слюда, тальк; волокна – бавовняні, скляні, азбестові, полімерні; листи – папір, тканина, деревинний шпон.

Термореактивні пластмаси (реактопласти) – це такі пластмаси, переробка яких у виробі супроводжується незворотною хімічною реакцією. Одержують на основі епоксидних, поліефірних і інших полімерів.

Термопластичні пластмаси — пластичні маси, здатні розм'якшуватися при нагріванні і тверднути при охолодженні. Можуть піддаватися повторній переробці.

Поліетилен — твердий продукт полімеризації етилену. Густина 913 – 978 кг/м², плавиться при 102 – 137°C. Поєднує високу міцність при розтягуванні з еластичністю.

ФТОРОПЛАСТ

Технічна назва пластмас, що містять фтор - політетрафторетилен і політрифторхлор-етилен.

Фторопласт-3 — політетрафторетилен – фторопласт-3, фтор лон-3, твердий продукт полімеризації. Призначається для виготовлення агресивно-стійких виробів і покриттів, використовується як низькочастотний діелектрик. Температурний діапазон експлуатації виробів від -195°C до 125°C.

Фторопласт-4 — політетрафторетилен – фторопласт-4, фтор лон-4, аморфно-кристалічний полімер. Стійкий до дії розчинників, кислот, лугів, окислювачів, не змочується водою, високоякісний діелектрик, має дуже низький коефіцієнт тертя.

СКЛЮ

Неорганічне – аморфний ізотропний, твердий і крихкий термопластичний прозорий матеріал, що одержується в результаті переохолодження розплаву різних склоутворюючих компонентів. По типу склоутворюючого компоненту розрізняють скло неорганічне силікатне, боратне, боросилікатне і т.п.

Кварцове — найбільш чисте (практично однокомпонентне – SiO_2) силікатне скло, що одержується плавленням (вище 1770°C) природного кристалічного кварцу (гірський кришталь, жильний кварц або чистий кварцовий пісок).

Органічне — прозорий аморфний термопласт на основі складних ефірів акрилової і метакрилової кислот. Від неорганічного скла відрізняється невеликою щільністю, меншою крихкістю, але значно нижчою температурою розм'якшення. Йде на виготовлення тришарового безосколочного скла, яке використовується в суднобудуванні.

7.6. Контрольні запитання

1. Виходячи з даних про температурну залежність питомого електроопору міді (рис. 7.24) і температурної залежності провідності кремнію (рис.7.25), підрахуйте температуру, при якій $\sigma_{\text{Cu}} = \sigma_{\text{Si}}$ (якщо обидві речовини остаються твердими при необмежено високих температурах).

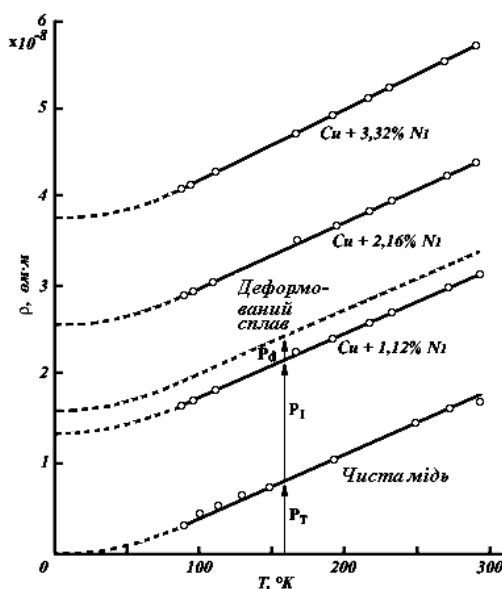


Рис. 7.24.

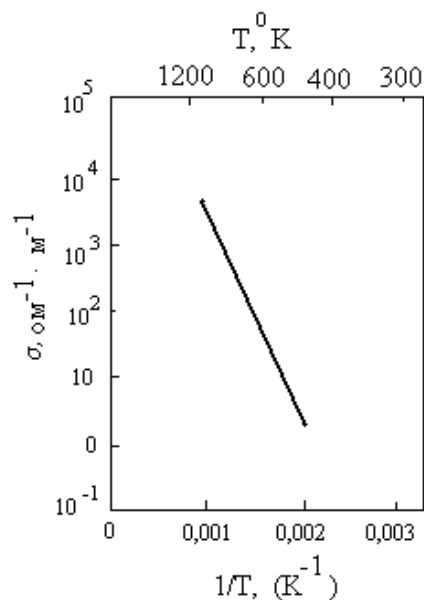


Рис. 7.25.

2. Провідник і напівпровідник з'єднані паралельно. При певній напрузі покази амперметрів в обох вітках однакові. Чи будуть однаковими покази амперметрів, якщо збільшити напругу джерела струму.

3. Залежність логарифма електричної провідності двох напівпровідників від $1/T$ має вигляд, схематично зображений на рис. 7.26. Чи відрізняються один від одного ці напівпровідники?

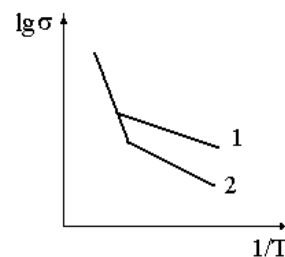


Рис. 7.26

4. Провідник і напівпровідник з'єднані послідовно і до них прикладене таку напругу, що покази вольтметрів однакові. Чи збережуться ці покази, якщо збільшити напругу джерела струму?

5. Залежність логарифма провідності від $1/T$ для двох напівпровідників дана на рисунку 7.27. У якого з цих напівпровідників ширина забороненої зони більше?



Рис. 7.27

6. Чи збільшиться провідність чистого напівпровідника з шириною забороненої зони $0,9$ еВ, якщо подіяти на нього при кімнатній температурі випромінюванням з довжиною хвилі $1,0$ мкм?
7. Визначити питомий опір власного напівпровідника (германію) якщо концентрація дірок $2,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, рухливість електронів $0,36 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, рухливість дірок $0,16 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.
8. У досліджуваному напівпровіднику з даних вимірювання ефекту Холла концентрація електронів при 400 К $6,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Знайти ширину забороненої зони матеріалу, вважаючи, що вона змінюється залежно від температури за лінійним законом.
9. Визначити електронну та діркову провідності легованого кремнію р-типу, а також його опір, якщо відомо, що лінійні розміри зразка такі: довжина 5 мм, ширина 2 мм і товщина 1 мм; рухливість електронів $0,12 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; концентрація вільних носіїв $2,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$; на $7,1 \cdot 10^7$ атомів кремнію припадає один атом акцептора.
10. Порівняйте електропровідність чистого германію при $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ і $+100 \text{ }^\circ\text{C}$. Енергія активації для германію дорівнює $0,72$ еВ.

11. Власна електропровідність германію при 27°C дорівнює $2,13 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$, рухливості електронів і дірок дорівнюють відповідно $0,38$ і $0,18 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Вичислити щільність носіїв струму і сталу Холла.
12. Визначити домішкову електропровідність германію, що містить індій у концентрації $2\cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; сурму в концентрації $5\cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$.
13. Визначити положення рівня Фермі у власному напівпровіднику, якщо відомо, що ширина забороненої зони лінійно залежить від температури: $\Delta W = \Delta W_0 - \xi T$, де $\xi = \text{const} > 0$.

Рішення. Для власного напівпровідника концентрації електронів і дірок рівні ($n = p$), оскільки кожний електрон, що покинув валентну зону, створює одну дірку. Прирівнюючи

$$n = 2 \left(\frac{m_n^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_f - E_n}{kT} \right) \quad \text{і} \quad p = 2 \left(\frac{m_p^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_p - E_f}{kT} \right),$$

отримаємо
$$\exp\left(\frac{2E_f}{kT} \right) = \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right) \exp\left(\frac{2E_p - \Delta W}{kT} \right).$$

Вирішивши останню рівність відносно E_f , отримаємо
$$E_f = E_p - \frac{\Delta W}{2} + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)$$

Температурна залежність положення рівня Фермі у власному напівпровіднику визначається третім доданком в останньому рівнянні. Якщо підставити дані задачі, то отримаємо

$$E_f = \frac{\Delta W_0}{2} - \frac{1}{2} \xi T + \frac{3}{4} kT \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right),$$

якщо відраховувати енергію від стелі зони провідності E_p .

Якщо ефективні маси електронів і дірок рівні [$m_n^* = m_p^*$, $\ln(m_p^*/m_n^*) = 0$], рівень Фермі власного напівпровідника при будь-якій температурі розташовується посередині забороненої зони.

Якщо ефективна маса дірки у валентній зоні більше ефективної маси електрона в зоні провідності, то рівень Фермі зміщується з підвищенням

температури ближче до дна зони провідності. В протилежному випадку рівень Фермі зміщується до стелі валентної зони.

14. Вважаючи ширину забороненої зони кремнію (Si) не залежної від температури і рівної 1,10 еВ, знайти хімічний потенціалі концентрацію електронів і дірок в області власної провідності при температурах $T_1 = 300$ К і $T_2 = 400$ К,

якщо $\frac{m_p^*}{m_n^*} = 6$ і $\frac{m_p^*}{m_0} = 0,8$ (m_0 – маса вільного електрона).

Рішення. Положення рівня Фермі власного напівпровідника, якщо за начало відліку енергії береться стеля валентної зони, визначається формулою

(16.6). Враховуючи, що при $T_1 = 300$ К енергія $kT = \frac{1}{40}$ еВ, маємо для E_f :

$$E_{f1} = E_f(T_1) = (0,550 + 0,75 \cdot (1/40) \cdot \ln 6) \text{ еВ} \approx 0,589 \text{ еВ},$$

$$E_{f2} = E_f(T_2) = (0,550 + 0,078) \text{ еВ} = 0,628 \text{ еВ}.$$

Концентрація рівно вагових носіїв у залежності від температури виражається співвідношенням:

$$n = p = 2 \left(\frac{m_p^* kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_f}{kT}\right).$$

Підставляючи дані для $\frac{m_p^*}{m_n^*} = 6$ і $\frac{m_p^*}{m_0} = 0,8$ в останню формулу,

отримаємо $m_p^* = 4,8m_0$ і $n = p = 3,4 \cdot 10^{21} T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_f}{kT}\right)$, м^{-3} .

При $T_1 = 300$ К для $n_1 = p_1 \approx 1,2 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$ и при $T_2 = 400$ К $n_2 = p_2 \approx 0,8 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

15. Оцінити хімічний потенціал і концентрацію носіїв кристалічного чистого германію (Ge) при температурі 300 К, якщо ширина забороненої зони $\Delta W = 0,68$ еВ і ефективні маси електронів і дірок прийняти рівними масі вільного електрона.

16. Використав результати попередньої задачі і відомі значення рухливості електронів і дірок $\mu_n = 0,39 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ і $\mu_p = 0,19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ германію, оцінити питому електропровідність при температурі 300 К.

Яка повинна бути напруженість електричного поля, щоб щільність струму в такому зразку була рівною 19 А/см^2 ?

17. Визначити дрейфову рухливість і концентрацію електронів провідності в германію n – типу, якщо відомо, що його питомий опір і стала Холла при вибраних умовах дорівнюють відповідно

$$\rho = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}, R_H = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}.$$

Розсіяння носіїв решіткове.

18. Пластинку з напівпровідника p – типу шириною $d = 0,5 \text{ см}$ і довжиною $b = 2 \text{ см}$ помістили в однорідне магнітне поле індукцією $B = 0,2 \text{ Тл}$ (рисунок 16.3). Визначити постійну Холла і дрейфову рухливість дірок, знаючи, що питомий опір зразка $\rho = 0,03 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ і при напрузі U на кінцях зразка вздовж вісі OY виникає холлівська різниця потенціалів $U_x = 0,06 \text{ В}$. Розсіяння носіїв решіткове.

Рішення. Напруженість поля Холла $E_H = \frac{U_H}{b} = R_H j B$, де j – щільність

струму, B – магнітна індукція.

Для щільності струму згідно закону Ома дійсне співвідношення

$$j = \sigma E = \frac{1}{\rho} \frac{U}{d}, \text{ де } \rho \text{ – питомий опір. Тоді } R_H = \rho \frac{b}{d} \frac{U_H}{U} \frac{1}{B}.$$

Підставляючи числові дані, отримаємо $R_H = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$.

Використовуючи вирази для R_H і ρ $R_H = \frac{1,18}{e p}$ і $\rho = \frac{1}{e p \mu_p}$,

для рухливості дірок отримаємо $\mu_p = \frac{R_H}{1,18 \rho} \approx 0,085 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

19. У напівпровідниковому зразку n – типу щільність струму вздовж вісі OY (рис. 7.16) $j_y = 0,2 \text{ A/cm}^2$.

Вектор магнітної індукції, направлений, як показано на рис. 7.16, дорівнює $0,1 \text{ Тл}$.

Визначити напруженість поля Холла, постійну Холла, якщо відомо, що концентрація електронів $n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Розсіяння носіїв решіткове.

20. Відомо, що питомий опір чистого телуру (Te) при нагріванні його від

$T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 400 \text{ К}$ зменшується приблизно в $5,2$ разів.

Визначити мінімальну енергію утворення пари електрон-дірка в чистому телурі при абсолютному нулю температури.

Рекомендована література

1. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали. Навчальний посібник. Львів: «Магнолія-2006». 242 с.
2. Леонтєв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ. 2013. 122 с.
3. Шаповал О.А. Матеріали електронної апаратури: Російсько-український тлумачний словник. Івано-Франківськ: ІМЕ «Галицька академія», 2006. 144 с.
4. www.ime.if.ua (Кафедра комп'ютерні системи та мережі. Книги ІМЕ Матеріали електронної апаратури / Шаповал О.А.).

РОЗДІЛ 8. ПРАКТИЧНІ ЗАВДАННЯ

8.1. Аналіз фазових діаграм двокомпонентних систем.

8.1.1. Мета завдання.

- 1) Вивчити структуру металів, освоїти основи теорії сплавів та побудови фазових діаграм, двокомпонентних систем;
- 2) Вивчити методи побудови фазових діаграм матеріалів.

8.1.2. Початкові дані для виконання завдання.

У таблиці 8.1 приведені початкові дані для виконання першого індивідуального завдання (колонка 2, 5 табл. 8.1), типи діаграм стану представлені на рис.8.1, 8.2, 8.3. В таблиці 8.1-8.3 А і В – компоненти сплаву.

Таблиця 8.1

Початкові дані для виконання завдання

№ варіанту	Тип діаграми	Склад сплаву	№ варіанту	Тип діаграми	Склад сплаву
1	2	3	4	5	6
1	1	10 % А	16	1	30 % В
2	2	10 % А	17	2	30 % В
3	3	60 % А	18	3	30 % В
4	1	80 % В	19	1	40 % А
5	2	10 % В	20	2	80 % А
6	3	70 % В	21	3	40 % А
7	1	20 % А	22	1	90 % В
8	2	60 % А	23	2	40 % В
9	3	70 % А	24	3	40 % В
10	1	20 % В	25	1	50 % А
11	2	80 % В	26	2	60 % А
12	3	20 % В	27	3	70 % А
13	1	30 % А	28	1	70 % В
14	2	40 % А	29	2	80 % В
15	3	70 % В	30	3	90 % В

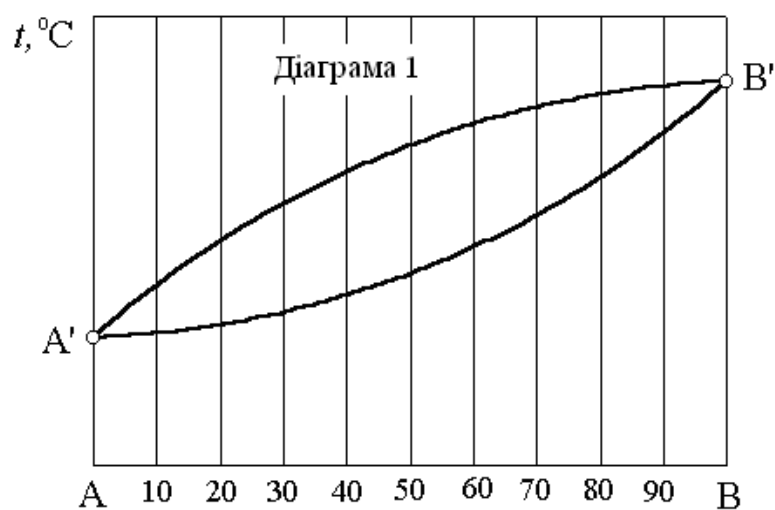


Рис. 8.1. Діаграма стану (тип 1)

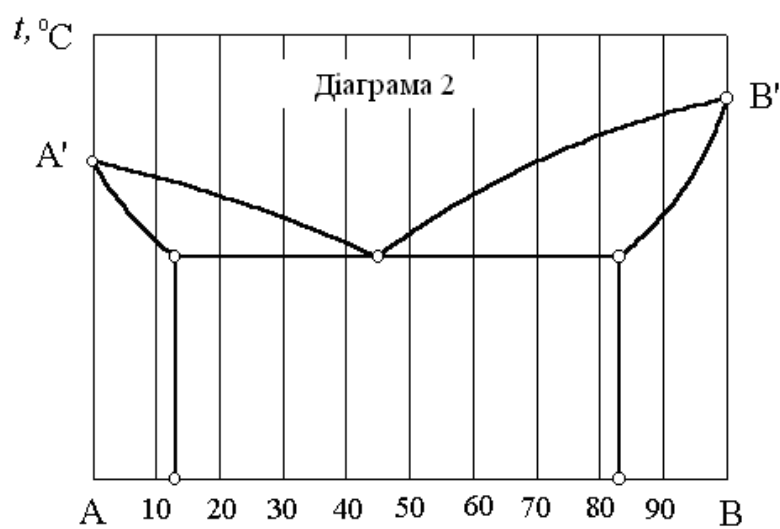


Рис. 8.2. Діаграма стану (тип 2)

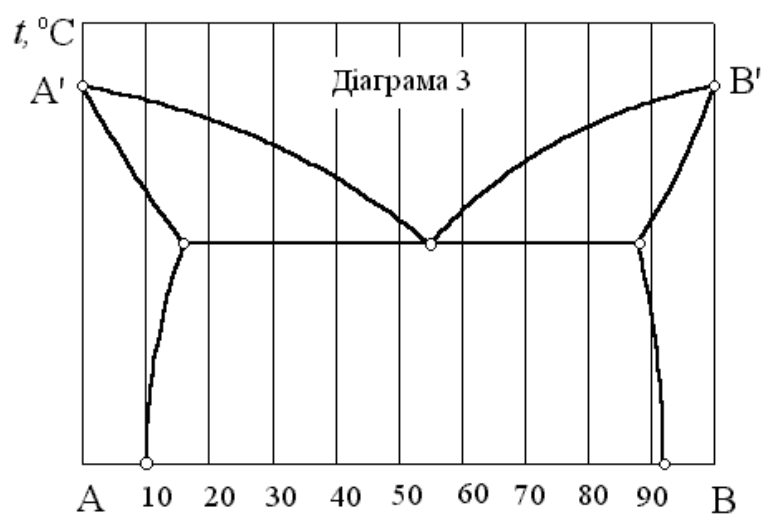


Рис. 8.3 Діаграми стану (тип 3)

8.1.3. Порядок виконання завдання.

Для виконання завдання необхідно:

1. Визначити відповідний цьому варіанту тип діаграми стану і склад сплаву. (Наприклад, для варіанту завдання № 15 слід копіювати діаграму стану третього типу (рис. 8.3), вписати склад подвійного сплаву, що відповідає 70% компоненту В).
2. Зобразити діаграму стану системи АВ відповідно до Вашого варіанту завдання у фазовому і структурному вигляді.
3. Позначити на малюнках критичні точки, лінії ліквідусу, солідусу, фазові перетворення, фазові і структурні області.
4. Нанести на діаграму фігуративну лінію контрольного сплаву з вказівкою критичних точок.
5. Побудувати криву охолодження подвійного сплаву заданого складу, розглянути перетворення, що проходять при його кристалізації.
6. У середині температурного інтервалу первинної кристалізації заданого сплаву визначити кількісне співвідношення фаз і їх хімічний склад.
7. Зобразити мікроструктуру заданого сплаву при нормальній температурі, відзначивши структурні складові і фази.

8.1.4. Оформлення результатів виконання завдання

Звіт за індивідуальним завданням виконується по встановленій викладачем формі (вказується викладачем) на листах формату А4.

8.1.5. Контрольні запитання

1. Що означає проекція точки перетину коноди з лінією солідуса на вісь концентрацій?
2. Що означає проекція точки перетину коноди з лінією ліквідусу на вісь концентрацій ?
3. Конода розділена точкою, що показує склад сплаву, на два відрізки. Відрізок, прилеглий до лінії ліквідусу удвічі довший. Який відсоток рідкої фази в сплаві ?

4. Конода розділена точкою, що показує склад сплаву, на два відрізки. Відрізок, прилеглий до лінії ліквідусу удвічі довший. Який відсоток твердої фази в сплаві ?
5. На якій лінії фазової діаграми лежить точка, що відповідає закінченню процесу рівноважної кристалізації сплаву?
6. Скільки фаз знаходиться у рівновазі при первинній кристалізації двокомпонентного сплаву неевтектичного складу ?
7. Як називається різниця між температурою плавлення і температурою кристалізації металу ?
8. З яких фаз складається структура сплаву, що містить 30% компоненту А (рис.8.2.) в області первинної кристалізації ?
9. Яким чином змінюється склад твердої фази при кристалізації сплаву, що містить 60% компоненту В (рис.8.1)?
10. Сплав з якою структурою (рис. 8.3) буде мати мінімальну температуру плавлення ?
11. Як називається здатність твердого тіла існувати в декількох кристалічних структурах ?
12. По якій лінії змінюється склад рідкої фази в процесі кристалізації ?
13. За яким правилом визначається склад фаз ?
14. За яким правилом визначається кількість фаз, що знаходяться в рівновазі?
15. В яких координатах будують криві охолодження сплавів ?
16. Як називається перехід металу з рідкого або пароподібного стану в твердий стан з утворенням кристалічної структури ?
17. Як називається група хімічних елементів, що володіють в області низьких температур явищем надпровідності ?
18. Як називається лінія діаграми стану, на якій лежать точки, що відповідають початку рівноважної кристалізації сплаву ?
19. Що називають зерном металу ?

8.2. Аналіз залізовуглецевих сплавів та їх складових залежно від вмісту вуглецю

8.2.1. Мета завдання

- 1) Вивчити властивості заліза та його сплавів, фазові діаграми залізо-цементит, класифікацію, маркування та застосування сталей і чавунів: білих сірих, високоміцних.
- 2). Вивчити мікроструктуру сталей у рівноважному стані, навчитися визначати вміст вуглецю (по масі) в сталі та марку сталі за її мікроструктурою. Вивчити мікроструктуру білих і графітізованих чавунів, їх маркування та практичне застосування.

8.2.2. Початкові вхідні дані для виконання завдання

У таблиці 8.2 приведені початкові дані для виконання другого індивідуального завдання, в колонках 2, 4, 6 табл.8.2 приведені дані по відсотковому вмісту (по масі) вуглецю в сплавах.

Таблиця 8.2

Варіанти заданих сплавів

№ варіанту	% вуглецю (по масі)	№ варіанту	% вуглецю (по масі)	№ варіанту	% вуглецю (по масі)
1	2	3	4	5	6
1	0,1	11	5,0	21	4,5
2	3,5	12	4,3	22	0,6
3	0,9	13	1,0	23	0,25
4	0.022	14	3,0	24	1,1
5	0.018	15	0,8	25	4,7
6	2,0	16	0,4	26	0,5
7	2,8	17	1,3	27	1,2
8	0.35	18	2,2	28	0,9
9	0,7	19	5,5	29	0,05
10	1,8	20	0,012	30	0,045

8.2.3. Порядок виконання завдання

1. Відповідно до номера вашого варіанту виписати з табл. 8.2 вміст (по масі) вуглецю контрольного сплаву.
2. На листі формату А4 викреслити діаграму стану Fe-Fe₃C. Позначити структурні складові у всіх областях діаграми.
3. Нанести на діаграму фігуративну лінію контрольного сплаву, виконати побудову необхідних конод.
4. Побудувати криву охолодження контрольного сплаву. Дати детальний опис його мікроструктури при повільному охолодженні. Привести необхідні реакції.
5. Вказати, до якої групи залізовуглецевих сплавів відноситься заданий сплав, по можливості привести марку розглянутого сплаву, навести приклади його застосування.
6. Схематично зобразити мікроструктуру сплаву в інтервалі температур первинної кристалізації і при кімнатній температурі. На малюнку відзначити структурні складові.

8.2.4. Оформлення результатів виконання завдання

Звіт за індивідуальним завданням виконується по встановленій викладачем формі (вказується викладачем) на листах формату А4.

8.2.5. Контрольні запитання

1. Яке перетворення відбувається в залізовуглецевих сплавах при температурі 1147°C?
2. Яке перетворення відбувається в залізовуглецевих сплавах при температурі 727°C?
3. Який фазовий склад мають сталі по завершенню процесу первинної кристалізації?
4. Який фазовий склад мають сталі при кімнатній температурі?
5. Чим відрізняється ледебурит від ледебуриту перетвореного?

6. Чим відрізняються структурні складові «цементит первинний», «цементит вторинний», «цементит третинний»?
7. Назвіть всі характерні точки фазової діаграми двокомпонентних систем і їх загальноприйняті міжнародні позначення.
8. Яким чином відрізняються позначення критичних точок при нагріві і охолодженні?
9. Назвіть стабільну і метастабільну модифікації вуглецю.
10. Назвіть характеристики точок і ліній діаграми двокомпонентних систем.
11. Що називають перлітом?
12. Що називають ледебуритом?
13. Що називають аустенітом?
14. Що називають феритом?
15. Чим відрізняються перетворення в твердому стані у доєвтектоїдної і заєвтектоїдної сталі?
16. Яка фаза первинно кристалізується в заєвтектичних білих чавунах?
17. Зобразіть фазову діаграму залізо-цементит.
18. Як називається чавун, в якому весь вуглець знаходиться в зв'язаному стані у вигляді карбїду?
19. Яка фаза первинно кристалізується в доєвтектичних білих чавунах?
20. Який сплав називають технічним залізом?

8.3. Визначення технології термічної обробки виробів на основі залізовуглецевих сплавів

8.3.1. Мета завдання

- 1) Освоїти теорію, технологію та види термічної (відпал, гарт, відпуск, нормалізація) та хіміко-термічної (цементация, нітроцементация, азотування) обробки сталі.
- 2) Вивчити питання застосування на практиці процесу відпалу, процесу гарту та питання впливу вмісту (по масі) вуглецю на загартованість сталі; технологію проведення низького, середнього та високого відпуску сталі; їх вплив на твердість сталі.

8.3.2. Початкові вхідні дані для виконання завдання.

В таблиці 8.3 вказані варіанти завдання по вибору способу виготовлення заготовки деталі та технології термічної обробки.

Таблиця 8.3

№ варіанту	Марка матеріалу деталі	Вид деталі	№ варіанту	Марка матеріалу деталі	Вид деталі
1	2	3	4	5	6
1	У7	шабер	16	70	ресора
2	45	вал	17	30	піввісь
3	60	шестерня	18	35	розподіл. вал
4	75	пружина	19	40	кулачна шайба
5	У12	різець	20	У8А	кернер
6	40	вісь	21	40	шатуновий болт
7	50	молоток	22	55	зубчате колесо
8	У8	зубило	23	50	черв'ячне колесо
9	У13	напилок	24	У7А	викрутка
10	45	шатун	25	У10А	свердло
11	40	шпонка	26	У12А	плашка
12	55	шків гальмівний	27	60	лінійка до малки
13	35	важіль	28	30	малка
14	45	шпindelь верстата	29	50	рисувалка
15	У10	надфіль	30	У10	розгортка

8.3.3. Порядок виконання завдання.

1. Вказати спосіб виготовлення заготовки деталі вашого варіанту. (Заготовка лита, кована вальцьована та ін. варіанти).
2. Описати процес термічної обробки заготовки перед механічною обробкою з позначенням температурних режимів, графіків термічної обробки (у координатах температура-час) і зображенням макро - і мікроструктури заготовки до і після попередньої термічної обробки.
3. Описати процес термічної обробки заданої деталі для надання їй оптимальних експлуатаційних властивостей.
4. Представити графік завершальної термічної обробки і вказати на ньому температурні інтервали термічної обробки і вид охолодження.
5. Схематично зобразити мікроструктуру деталі на різних етапах термічної обробки.

8.3.4. Оформлення результатів виконання завдання.

Звіт за індивідуальним завданням виконується по встановленій викладачем формі (вказується викладачем) на листах формату А4.

8.3.5. Контрольні запитання

1. В яких координатах представляють графіки термічної обробки?
2. При якій температурі відпуску загартованої сталі утворюється структура «сорбіт відпуску»?
3. Від чого залежить прогартування сталі?
4. Які сталі практично не гартуються?
5. Як позначається критична точка перетворення аустеніту в перліт?
6. Яка структура формується з аустеніту при малих ступенях його переохолодження?
7. Який вид відпалу призначають для усунення дендритної ліквіації злитків сталі?
8. Що називають термічним поліпшенням сталі?

9. Який вид термічної обробки приводить сталь в рівноважний стан?
10. Після гарту сталі 45 отримана структура “мартенсит + ферит”. В чому причина браку?
11. Назвіть середовище гарту, що забезпечує високу швидкість охолодження.
12. Якій термічній обробці піддають деталі після цементації?
13. Як називають найдрібнішу ферито - цементитну суміш?
14. Від чого залежить твердість ферито-цементитної суміші?
15. Чим відрізняється сорбіт від трооститу відпуску?
16. В яких випадках відпал доцільно замінювати нормалізацією?
17. Сталь якої марки більш чутлива до гартівних напружень?
18. Які сталі звичайно піддають цементації?
19. В яких випадках призначають середній відпуск деталі?

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник. Херсон: Олді-плюс. Київ: Видавництво Ліра - К. 2013. 612 с.
<https://www.yakaboo.ua/materialoznavstvo-pidruchnik.html#tab-description>
2. Бочар І. Й. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів (лабораторний практикум). Тернопіль: ТДПУ. 2002. 76 с.
3. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали. Навчальний посібник. Львів: «Магнолія-2006». 242 с.
4. Косенко В. А. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство. Київ: Видавництво Університет «Україна». 2012. 252 с.
5. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єршоменко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій. Х.: УЦЗУ. 2008. 136 с.
6. Леонт'єв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ. 2013. 122 с.
7. Опальчук А. С., Котречко О. О., Роговський Л. Л. Лабораторний практикум з технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства. Навчальний посібник. За ред. А.С. Опальчука. Київ: Вища освіта. 2006. 287 с.
8. Шаповал О.А. Матеріали електронної апаратури: Російсько-український тлумачний словник. Івано-Франківськ: ІМЕ «Галицька академія», 2006. 144 с.
9. www.ime.if.ua (Кафедра комп'ютерні системи та мережі. Книги ІМЕ. Матеріали електронної апаратури / Шаповал О.А.).