

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ

## **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ВСТВ**

### **Ч.1. Матеріалознавство**

Конспект лекцій

для студентів 1 курсу спеціальності 208 «Агроінженерія»  
ОС «Молодший бакалавр»

Суми 2023

УДК 621.751

Укладач: д.т.н., проф. кафедри технічного сервісу Кирик Г.В..

Матеріалознавство і ВСТВ. Конспект лекцій для студентів 1 курсу спеціальності 208 «Агроінженерія» ОС «Молодший бакалавр». // Суми: Сумський національний аграрний університет, 2023. – 46 с., рис. 41, бібліографія 23 джерела.

В конспекті лекцій викладено теоретичний матеріал щодо будови кристалічних тіл, умов і особливостей процесу кристалізації, властивостей металів, теорії сплавів, вивченню діаграми стану сплавів системи «Залізо-цементит», теорії та практики термічної обробки, основи ливарного виробництва, обробки металів тиском, різанням.

Рецензенти: д.т.н., проф., зав. кафедрою „ТС” СНАУ Тарельник В.Б.  
к.т.н., доц., зав. кафедрою „ПТС” СНАУ Семірненко Ю.І.

Відповідальний за випуск: професор Тарельник В.Б..

Друкується за рішенням навчально-методичної ради ІТФ СНАУ  
Протокол № 4 від “30” січня 2023 р.

© Сумський національний аграрний університет, 2023

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ЛЕКЦІЯ №1 ВИРОБНИЦТВО ЧОРНИХ ТА КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ.....  | 5  |
| 1.1 Сучасне металургійне виробництво.....  | 5  |
| 1.2 Продукція чорної металургії.....   | 5  |
| 1.3 Вихідні матеріали металургійного виробництва.....  | 5  |
| 1.4 Виробництво сталі.....   | 6  |
| 1.5 Виробництво сталі в конвертерах.....   | 7  |
| 1.6 Виробництво сталі в мартенівських печах.....   | 8  |
| 1.7 Виробництво сталі в електropечач.....  | 9  |
| ЛЕКЦІЯ №2 КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ. КРИСТАЛІЗАЦІЯ.....   | 12 |
| 2.1 Metали.....  | 12 |
| 2.2 Кристалічна будова металів.....  | 12 |
| 2.3 Типи кристалічних ґраток та їх основні параметри.....  | 13 |
| 2.4 Реальна будова металічних кристалів.....   | 14 |
| 2.5 Дислокації.....  | 14 |
| 2.6 Анізотропія властивостей кристалів.....  | 15 |
| 2.7 Енергетичні умови процесу кристалізації.....   | 16 |
| 2.8 Механізм процесу кристалізації.....  | 17 |
| 2.9 Будова злитка.....   | 19 |
| 2.10 Поліморфізм.....  | 20 |
| ЛЕКЦІЯ №3 ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ.....   | 22 |
| 3.1 Класифікація властивостей.....   | 22 |
| 3.2 Фізичні властивості.....   | 22 |
| 3.3 Механічні властивості.....   | 23 |
| 3.4 Технологічні властивості.....  | 24 |
| 3.5 Хімічні властивості.....   | 25 |
| 3.6 Експлуатаційні (спеціальні) властивості.....   | 25 |
| 3.7 Пружна і пластична деформація.....   | 25 |
| 3.8 Руйнування.....  | 26 |
| 3.9 Методи визначення механічних властивостей.....   | 26 |
| ЛЕКЦІЯ №4 ТЕОРІЯ СПЛАВІВ.....  | 28 |
| 4.1 Поняття про сплави.....  | 28 |
| 4.2 Правило фаз.....   | 28 |
| 4.3 Типи, будова, властивостей сплавів.....  | 28 |
| 4.4 Класифікація сплавів твердих розчинів.....   | 29 |
| 4.5 Класифікація типів перетворень.....  | 30 |
| ЛЕКЦІЯ №5 ДІАГРАМИ СТАНУ. Ч.1.....   | 31 |
| 5.1 Загальні вимоги до побудови діаграм стану.....   | 31 |
| 5.2 Експериментальні методи побудови діаграм стану.....  | 31 |
| 5.3 Основні види діаграм стану двокомпонентних сплавів. Діаграма стану сплавів з<br>необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (сплави тверді розчини з<br>необмеженою розчинністю)..... | 32 |
| 5.4 Правило відрізків.....   | 32 |
| ЛЕКЦІЯ №6 ДІАГРАМИ СТАНУ. Ч.2.....   | 33 |
| 6.1 Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів у компонентів у<br>твердому стані (механічні суміші).....   | 33 |
| 6.2 Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів в твердому стані.....   | 33 |
| 6.3 Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічні сполуки.....   | 34 |
| 6.4 Діаграма стану сплавів, що мають поліморфні перетворення.....  | 35 |
| 6.5 Зв'язок між властивостями сплавів і типом діаграми стану.....  | 35 |
| ЛЕКЦІЯ №7 ЗАЛІЗО-ВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ. Ч. 1.....   | 37 |
| 7.1 Діаграма «Залізо-вуглець».....   | 37 |
| 7.2 Компоненти, фази, перетворення.....  | 37 |
| 7.3 Практичне застосування діаграми Fe-Fe <sub>3</sub> C.....  | 39 |
| 7.4 Вуглецеві сталі.....   | 39 |
| ЛЕКЦІЯ №8 ЗАЛІЗО-ВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ. Ч. 2.....   | 41 |
| 8.1 Чавуни.....  | 41 |

|   |    |
|---|----|
| 8.2 Структура і властивості чавуна.....                                       | 41 |
| 8.3 Ковкий чавун .....  | 42 |
| 8.4 Фазові перетворення в типових сплавах.....                                | 42 |
| 8.5 Вплив легуючих елементів на перетворення переохолодженого аустеніту. .... | 43 |
| 8.6 Класифікація легованих сталей та чавунів .....                            | 43 |
| РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....   | 45 |

# ЛЕКЦІЯ №1 ВИРОБНИЦТВО ЧОРНИХ ТА КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

## 1.1 Сучасне металургійне виробництво.

Метали, які застосовуються в техніці, поділяють на чорні та кольорові. До чорних належать залізо, споріднені метали та їх сплави, до кольорових - усі інші.

Спочатку залізо добували безпосередньо із руди відновленням у горнах. Сплав заліза насиченого вуглецем дістав назву чавуну. Чавун почали переробляти на сталь - сплав з меншим ніж у Чавуні вмістом вуглецю, кремнію, марганцю, та деяких інших елементів, а тому з більшою пластичністю та міцністю.

Сучасне металургійне виробництво являє собою складний комплекс різних виробництв, що базується на родовищах руд, коксуючого вугілля, енергетичних потужностях. Воно включає наступні підприємства:

- 1) шахти і кар'єри по видобутку руд і кам'яного вугілля;
- 2) гірничо-збагачувальні комбінати, де підготовляють руди до плавки, тобто збагачують;
- 3) коксохімічні заводи або цехи, де здійснюють підготовку вугілля, його коксування і вилучення з них корисних хімічних продуктів;
- 4) енергетичні цехи для одержання стиснутого повітря (для дуття доменних печей), кисню, а також очищення газів металургійних виробництв;
- 5) доменні цехи для виплавки чавуну і феросплавів;
- 6) заводи для виробництва феросплавів;
- 7) сталеплавильні цехи (конвертерні, мартенівські, електросталеплавильні) для виробництва сталі;
- 8) прокатні цехи, в яких злитки сталі переробляють на сортовий прокат – балки, рейки, прутки, дріт, а також лист і т.д.

Основою сучасної чорної металургії є двоступінчаста схема, що складається з доменної плавки чавуну і різних способів його переділу в сталь. При доменній плавці, що проводиться в доменних печах, відбувається вибіркоче відновлення заліза з руди, але одночасно з руди відновлюються також фосфор і в невеликих кількостях марганець і кремній; залізо насичується вуглецем і частково насичується сіркою. У результаті з руди одержують чавун – сплав заліза з вуглецем, кремнієм, марганцем, сіркою і фосфором.

Переділ чавуна в сталь виконують у конвертерах, мартенівських і електричних печах. У цих агрегатах відбувається вибіркоче окислювання домішок чавуна таким чином, що в процесі плавки вони переходять у шлак і газу. У результаті одержують сталь заданого хімічного складу.

## 1.2 Продукція чорної металургії

*Основною продукцією чорної металургії є:*

- 1) Чавун *передільний*, використовуваний для переділу на сталь, і *ливарний* для виробництва фасонних чавунних виливків на машинобудівних заводах; основна кількість (до 90%) виплавлюваного чавуна – передільний;
- 2) *феросплави* (сплави заліза з підвищеним вмістом марганцю, кремнію, ванадію, титана) для виробництва легованих сталей;
- 3) *сталеві злитки* для виробництва сортового прокату (рейок, балок, прутків, смуг, дроту), а також листа, труб і т.д.;
- 4) *сталеві злитки* для виробництва великих кованих деталей машин (валів, роторів, турбін, дисків і т.д.), називані ковальськими злитками.

*Основною продукцією кольорової металургії є:*

- 1) *злитки* кольорових металів для сортового прокату (куточків, смуг, прутків і т.д.);
- 2) *злитки* (паці) кольорових металів для фасонних виливків на машинобудівних заводах;
- 3) *лігатури* – сплави кольорових металів з легуючими елементами для виробництва складних легованих сплавів для фасонних виливків;
- 4) *злитка чистих і особливо чистих металів* для потреб приладобудування, електронної техніки й інших спеціальних галузей машинобудування.

## 1.3 Вихідні матеріали металургійного виробництва.

Для виробництва металів використовують руди, флюси, паливо, вогнетривкі матеріали.

Рудою називають гірські породи, які містять у собі метали в кількості, що забезпечує їх еко-

номічно доцільну переробку.

Основними вихідними матеріалами для виробництва чорних металів є залізні руди, паливо, флюси.

Промислове використання мають магнітні, червоні, бурі та шпатові залізнякаи.

Залізна руда - гірська порода з якої економічно доцільно добувати залізо в промислових масштабах. Залізні руди складаються з рудної частини ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;  $\text{FeCO}_3$ ) і порожньої породи ( $\text{SiO}_2$ ;  $\text{MnO}$ ;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{MgO}$  та ін.) з домішками ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ;  $\text{FeS}$ ).

Залізні руди завантажують у доменну піч переважно у вигляді агломерату.

Агломерат - пористі шматки руди, більш зручні для переробки в чавун, ніж звичайні залізні руди. Для його отримання подрібнену руду змішують з 6-12 % коксу. Суміш підпалюють на спеціальній установці, при цьому дрібні шматки руди спікаються, утворюючи агломерат.

Паливо - різні органічні і неорганічні продукти, що виділяють при спалюванні значну кількість теплоти і дають рентабельне їх використання. Паливо містить органічні з'єднання вуглецю, водню, азоту, кисню, сірки, а також вологу і золю. Паливо тим краще, чим більше в ньому вуглецю і водню, і чим менше сірки, вологи, золи.

У доменній печі в якості палива використовують кокс (рідше – деревне вугілля). Кокс отримують з коксованого вугілля сухою перегонкою без доступу повітря в спеціальних коксувальних печах при температурі 1000-1100 °С впродовж 15-18 годин.

В мартенівських печах використовують три види палива: коксувальний, доменний, генераторний і природний газ; мазут і пилоподібне паливо.

Коксувальний газ отримують попутно при виробництві коксу, доменний - при спалюванні палива в доменних печах, генераторний газ – при спалюванні твердого палива в газогенераторах.

Мазут отримують при крекінзі нафти, пилоподібне паливо - подрібненням у подрібнювачах кам'яного вугілля в тонкий порошок.

Флюси призначені для сплавлення порожньої породи і золи в шлак. У доменних печах в якості флюсу використовують обпалене вапно.

Вогнетриви - матеріали, які витримують без руйнування високу робочу температуру печей (від 600 до 2000 °С). Вогнетриви використовують у вигляді цегли, фасонних виробів, мокрих і сухих порошоків, збитої маси для кладки печей і облицювання ковшів.

Основною продукцією доменного виробництва є чавун, побічною – шлаки і гази.

Шлаки – сплави різних окислів, що утворюються в результаті фізико-хімічної взаємодії їх з флюсами. Доменні шлаки використовують для виготовлення цементу, цегли, гравію, скловати та ін.

Доменні гази – ( $\text{CO}$  26-30%;  $\text{H}_2$  1,0-2,5%;  $\text{CH}_4$  0,2-0,5%;  $\text{CO}_2$  9-16%; інше  $\text{N}_2$ ) використовують для опалення повітрянагрівачів, котлів, коксувальних печей та інших нагрівальних установок.

## 1.4 Виробництво сталі

Основними вихідними матеріалами для виробництва сталі є передільний чавун і сталевий лом (скрап). Порівняння хімічних складів передільного Чавуну й сталі наведені в таблиці 1. Видно, що зміст вуглецю й домішок у сталі істотно нижче, ніж у чавуні.

Таблиця 1 - Склад передільного чавуну й низьковуглецевої сталі

| Матеріал              | Склад, %  |           |           |          |           |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
|                       | Вуглець   | Кремній   | Марганець | Фосфор   | Сірка     |
| Передільний чавун     | 4,0-4,4   | 0,76-1,26 | До 1,75   | 0,15-0,3 | 0,03-0,07 |
| Низьковуглецева сталь | 0,14-0,22 | 0,12-0,3  | 0,4-0,65  | 0,05     | 0,055     |

Таким чином, для переділу чавуну в сталь необхідно знизити вміст вуглецю й домішок.

Тому *сутністю будь-якого металургійного переділу чавуну в сталь* є зниження вмісту вуглецю й домішок шляхом їхнього *виборчого окислювання* й перекладу в шлаки й гази в процесі плавки.

Виплавка сталі й розділяється на два етапи:

1. Окисний;
2. Розкислення.

*На першому етапі* переділу чавуну в сталь у результаті окисних реакцій, вуглець з'єднується з киснем, утворюючи  $\text{CO}$ , що видаляється в атмосферу печі. Кремній, марганець, фосфор, сірка утворюють окисли або інші з'єднання, нерозчинні або малорозчинні в металі ( $\text{Si}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Ca}$  і ін.), які в процесі плавки частково віддаляються в шлаки.

*На другому етапі* для зменшення вмісту кисню в сталі в процесі плавки її розкислюють, тобто

вводять у неї елементи з більшою спорідненістю до кисню, ніж у заліза. Взаємодіючи з киснем сталі, ці елементи утворюють нерозчинні окисли, що частково спливають у шлаки. Для розкислення сталі використовують феросплави - феросиліцій, феромарганець, а також алюміній.

Чавун переробляють на сталь у різні за принципом дії металургійних агрегатах. Основними з них є: кисневі конвертери, мартенівські печі; електропечі.

В 1974 р. світове виробництво сталі склало близько 700 млн. т у рік. У нашій країні в 1975 р. біля половини всього обсягу сталі виплавлені в мартенівських печах, біля третини в кисневих конвертерах і інше в дугових електропечах. Співвідношення між способами виробництва сталі безупинно змінюється. Обсяг виробництва сталі, виплавленої у високопродуктивних агрегатах - кисневих конвертерах і великих електропечах, зростає, а сталі, виплавленої в мартенівських печах, поступово зменшується.

### 1.5 Виробництво сталі в конвертерах

**Киснево-конвертерний процес.** Це виплавка сталі з рідкого чавуну в конвертері з основним футеруванням і продуванням киснем зверху через водоохолоджувану фурму.

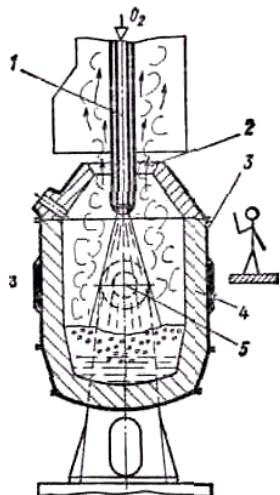


Рисунок 1.1 – Схема будови кисневого конвертера

Кисневим конвертером (рис. 1.1) є посудина 3 грушовидної форми, виготовлена із сталевих листів і викладена зсередини основною цеглиною 4, ємкістю 130–350 т рідкого чавуну. В процесі роботи конвертер можна повертати на цапфах 5 навколо горизонтальної осі на  $360^\circ$  для завалення скрапу, заливки чавуну, слива сталі, шлаку і так далі. Під час продування чавуну киснем конвертер знаходиться у вертикальному положенні. Кисень в конвертер під тиском  $0,9\text{--}1,4 \text{ МН/м}^2$  (9–14 атм.) подають за допомогою водоохолоджуваної фурми 1, яку вводять в конвертер через його горловину 2. Фурму встановлюють строго вертикально по осі конвертера.

Її піднімають спеціальним механізмом, що блокується з механізмом обертання конвертера так, що конвертер не можна повернути, поки з нього не видалена фурма.

**Шихтові матеріали.** Такими матеріалами для киснево-конвертерного процесу є рідкий передільний чавун, сталевий лом, вапно, залізняк, боксит, плавиковий шпат. Чавун для переробки в кисневих конвертерах повинен містити 3,7–4,4%С; 0,7–1,1%Мn; 0,4–0,8%Si; 0,03–0,08%S; <0,15–0,3%P. Вапно необхідне для наведення

шлаку. Воно повинно містити більше 90% CaO і мінімальна кількість SiO<sub>2</sub> і сірки. Боксит і плавиковий шпат застосовують для розрідження шлаку.

#### Технологія плавки.

Після випуску чергової плавки конвертер нахилиють і через горловину за допомогою машин завалень завантажують скрапом (рис. 1.2, а). Потім в конвертер заливають чавун при температурі  $1250\text{--}1400^\circ\text{C}$  з чавуновозних ковшів (рис. 1.2, б). Після цього конвертер повертають у вертикальне робоче положення (рис. 1.2, в), всередину його вводять кисневу фурму і подають кисень. Одночасно з початком продування в конвертер завантажують шлакотворні матеріали (вапно, боксит, залізняк). Відстань головки фурми від рівня металу в конвертері 0,7–3,0 м, залежно від ємкості конвертера. Струмені кисню, що поступають під великим тиском в конвертер, проникають в метал, викликають його циркуляцію в конвертері і перемішування з шлаком. Завдяки інтенсивному окисленню домішок чавуну при взаємодії з киснем в зоні під фурмою температура досягає  $2400^\circ\text{C}$ .

**Окислювальний період.** У кисневому конвертері складові чавуну окислюються газоподібним киснем закису заліза (FeO), що розчиняється в металі і шлаку при продуванні. У зоні контакту кисневого струменя з чавуном в першу чергу окислюється залізо, оскільки його концентрація у багато разів в концентрації домішок. Закис заліза FeO розчиняється в шлаку і металі, збагачуючи метал киснем, який інтенсивно окисляє вуглець і домішки. Частина домішок окислюється на межі метал–шлак оксидами заліза, що міститься в шлаку.

У кисневому конвертері завдяки присутності шлаків з великим змістом CaO і FeO, інтенсивному перемішуванню металу і шлаку легко віддаляється з металу фосфор. Фосфат кальцію, що утворився, віддаляється в шлак. У чавунах, що переробляються в конвертерах, повинно бути не більше 0,15% P. Прі підвищеному (до 0,3%) вмісті фосфору необхідно для повнішого його видалення проводити проміжний злив шлаку і наводити новий, що знижує продуктивність конвертера.

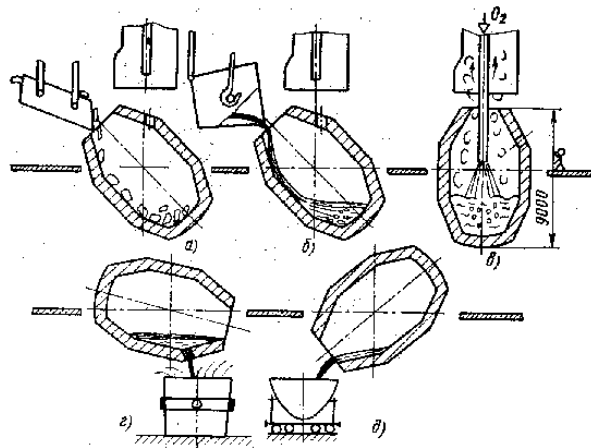


Рисунок 1.2 – Послідовність технологічних операцій при виплавці сталі в кисневих конвертерах:  
 а – завантаження скрапу; б – заливка рідкого чавуну; в – продування киснем; г – випуск сталі в ківш;  
 д – злив шлаку в шлакову чашу

Видалення сірки з металу утруднено. Тому для переділу в сталь в кисневих конвертерах застосовують чавун з обмеженим вмістом сірки (до 0,07%).

Подачу кисню закінчують в мить, коли вміст вуглецю в металі відповідає заданому вмісту в сталі. Для цього здійснюють автоматичний контроль хімічного складу металу по ходу плавки з використанням ЕОМ. Після цього конвертер повертають і проводять випуск сталі в ківш (рис. 2, з).

*Розкислювання сталі.* При випуску сталі з конвертера в ківш її розкислюють спочатку феромарганцем, потім феросиліцієм та алюмінієм. Потім з конвертера зливають шлак (рис. 2, д).

У кисневих конвертерах важко виплавляти леговані сталі, що містять легкоокислюючіся легуючі елементи. Тому в кисневих конвертерах виплавляють низьколеговані сталі, що містять до 2–3% легуючих елементів. Легуючі елементи вводять в ківш, заздалегідь розплавивши їх в електропечі, або легуючі феросплави вводять в ківш перед випуском в нього сталі. Окислення домішок чавуну в кисневому конвертері протікає дуже швидко: плавка в конвертерах ємкістю 130–300 т закінчується через 25–50 хв. Тому киснево-конвертерний процес більш продуктивний ніж плавка сталі в мартенівських печах: продуктивність конвертера ємкістю 300 т досягає 400–500 т/год сталі, а мартенівських печей і електропечей – не більше 80 т/ч. Внаслідок цього виробництво сталі і нашій країні в основному збільшується за рахунок того, що вводить до ладу нових киснево-конвертерних цехів.

## 1.6 Виробництво сталі в мартенівських печах

**Пристрій і робота мартенівської печі.** Мартенівська піч (рис. 1.3) – це полум'яна відбивна регенеративна піч. Вона має робочий плавильний простір, обмежений знизу подиною 12, зверху сводом 11, а з боків – передньою 5 і задньою 10 стінками. Подина має форму ванни з укосами у напрямку до стінок печі. У передній стінці печі знаходяться завантажувальні вікна 4 для подачі шихтових матеріалів (металевої шихти, флюсу) в піч. У задній стінці печі розташований сталевипускний отвір 9 для випуску готової сталі. З обох торців плавильного простору розташовані головки печі 2. Вони служать для змішування палива з повітрям і подачі цієї суміші в плавильний простір. Як паливо в мартенівських печах використовують природний газ або мазут.

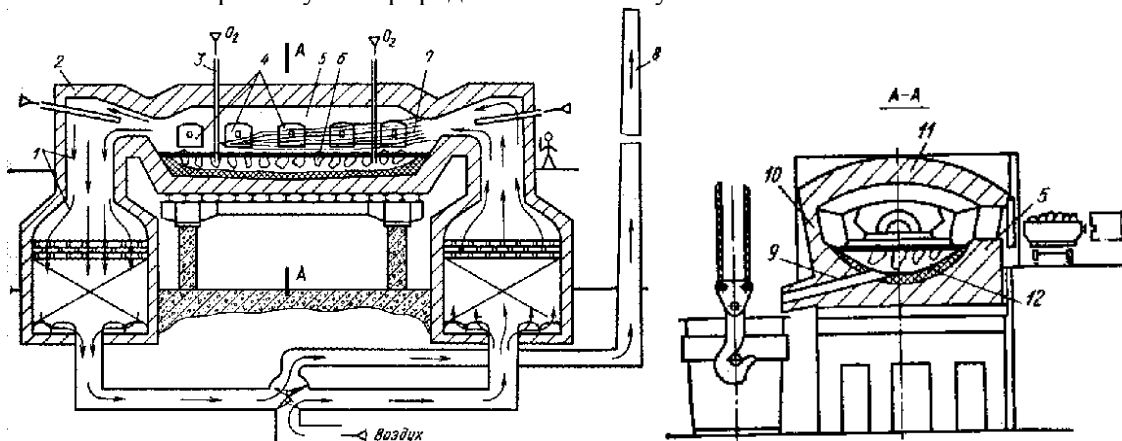


Рисунок 1.3 – Схема будови мартенівської печі



Для підігріву повітря при роботі на газоподібному паливі піч має два регенератори 1. Регенератор є камерою, в якій розміщена насадку – вогнетривка цеглина, викладена в клітку. Температура газів 1500–1000°C, що відходять з печі. Потрапляючи в регенератори, вони нагрівають насадку до 1250–1280°C, а охоложені до 500–600°C гази йдуть з печі через димар. Потім через один з регенераторів, наприклад правий, в пекти подають повітря, яке, проходячи через насадку, нагрівається до 1100–1200°C. Нагріте повітря поступає в головку печі, де змішується з паливом; на виході з головки утворюється факел 7, направлений на шихту 6. Гази, що відходять, проходять через протилежну головку (праву), очисні пристрої (шлаковики) для відділення дрібних частинок шлаку і пилу, що відносяться з печі потоком газів, і прямують в другий (лівий) регенератор, нагріваючи його насадку. Охоложені гази покидають піч через димар 8 *заввишки* до 120 м. Після охолодження насадки правого регенератора до певної температури відбувається автоматичне перемикування клапанів, і потік газів в печі змінює напрям: через нагрітий лівий регенератор і головку в печі поступає повітря, а правий нагрівається теплою газів, що відходять.

Температура факела полум'я досягає 1750–1800° С. Факел нагріває робочий простір печі і шихту. Факел має окислювальний характер, що створює умови для окислення домішок шихти впродовж всієї плавки.

Розміри плавильного простору залежать від ємкості печі. Важливою характеристикою робочого простору є *площа подини печі*, яку умовно підраховують на рівні порогів завантажувальних вікон. Наприклад, для печі ємкістю 900 т площа подини складає 115 м<sup>2</sup>.

В 2021 році в Україні зупинили роботу останньої мартенівської печі.

### 1.7 Виробництво сталі в електропечях

**Електроплавильні печі.** Ці печі мають переваги в порівнянні з іншими плавильними агрегатами. У електропечах можна швидко нагрівати, плавити і точно регулювати температуру металу, створювати окислювальну, відновну, нейтральну атмосферу або вакуум. У цих печах можна виплавляти сталь і сплави будь-якого складу, більш повно розкислювати метал з утворенням мінімальної кількості неметалічних включення – продуктів розкислювання. Тому електропечі використовують для виплавки конструкційних сталей відповідального призначення, високолегованих, інструментальних, корозійностійких (неіржавіючих) і інших спеціальних сталей і сплавів. Електроплавильні печі бувають дуговими і індукційними.

Дугова електросталеплавильна піч. У цих печах як джерело теплоти використовують електричну дугу, що виникає між електродами і металевою шихтою. Дугова електросталеплавильна пекти (рис. 1.4) живиться трифазним змінним струмом і має три циліндрові електроди 9, виготовлених з графітової маси. Електричний струм від трансформатора гнучкими кабелями 7 і мідними шинами підводиться до електродотримачем 8, а через них до електродів 9. Між електродами і металевою шихтою 4 виникає електрична дуга, електроенергія перетворюється на теплоту, яка передається металу і шлаку випромінюванням. Робоча напруга 180–600 В, сила струму 1–10 кА. Під час роботи печі довжина дуги регулюється автоматично шляхом вертикального переміщення електродів. Пекти має сталевий зварний кожух 3. Кожух печі зсередини футеровано теплоізоляційним і і. наполегливою цеглиною 1, який може бути основним (магнетитовий, магнетитохромитовий) або кислим (динасовий). Подина 12 печей набивається вогнетривкою масою. Плавильний простір обмежений стінками 5, подиною 12 і сводом 6, що виготовляється також з вогнетривкої цеглини і що має отвори для проходу електродів. У стінках печі є робоче вікно 10 для управління ходом плавки і вічка для випуску готової сталі по жолобу 2 в ківш.

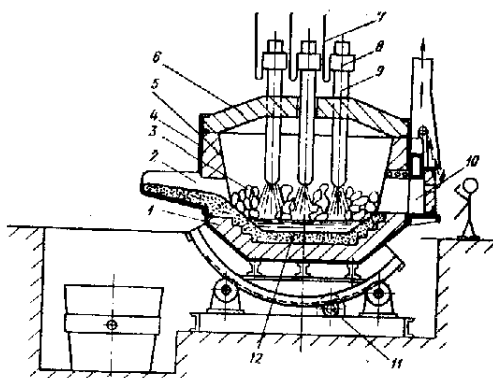


Рисунок 1.4 – Схема дугової електричної плавильної печі

Печі завантажують при знятому своді. Механізмом *II* піч може нахилитися у бік завантажувального вікна.

Ємкість дугових електропечей 0,5–400 т. У металургійних цехах зазвичай використовують дугові електропечі з основним футеруванням, а в ливарних цехах – з кислою.

Основна дугова піч. Застосовують два види технології плавки в дуговій основній печі: на шихті з легованих відходів (методом переплавки) і на вуглецевій шихті (з окисленням домішок).

*Плавку на шихті з легованих відходів* з низьким змістом фосфору проводять без окислення домішок. Шихта для такої плавки, окрім пониженого вмісту фосфору, повинна мати менше, ніж в сталі, що виплавляється, кількість марганцю і кремнію. По суті це переплавка. Проте в процесі плавки за рахунок кисню деякі домішки (алюмінію, титану, кремнію, марганцю, хрому) окислюються. Крім того, шихта може містити оксиди. Тому після розплавлення шихти метал розкислюють, видаляють сірку, наводять основний шлак, при необхідності навуглецьовують і доводять метал до заданого хімічного складу. розкислюють феросиліцієм, алюмінієм, меленим коксом. При цьому оксиди легуючих елементів відновлюються і переходять з шлаку в метал. У такий спосіб плавки отримують леговані сталі з відходів машинобудівних заводів.

*Плавку на вуглецевій шихті* частіше застосовують для виробництва конструкційних вуглецевих сталей. Цю плавку проводять за два періоди: окислювальний і відновний. Після заправки печі, видалення залишків металу і шлаку попередньої плавки, виправлення пошкоджених місць футерування в пекти завантажують шихту: сталевий лом (до 90%), чушковий передільний чавун (до 10%), електродний бій або кокс для навуглецювання металу і 2–3% вапна. Після закінчення завалення шихти електроди опускають вниз і включають струм; шихта під електродами плавиться, метал накопичується па подине печі. Під час плавлення шихти починається окислювальний *період плавки*: за рахунок кисню повітря, оксидів шихти і окалини окислюється кремній, марганець, вуглець, залізо. Разом з окислом кальцію, що міститься у вапні, оксиди цих елементів утворюють основний залізистий шлак, сприяючий видаленню фосфору з металу.

Після нагріву металу і шлаку до 1500–1540°C в печі завантажують руду і вапно. Кисень, що міститься в руді, інтенсивно окисляє вуглець і викликає кипіння ванни рідкого металу за рахунок бульбашок окислу вуглецю, що виділяються. Шлак вспінюється, рівень його підвищується; для випуску шлаку пекти нахиляють у бік робочого вікна і він стікає в шлакову чашу. Кипіння металу прискорює нагрів ванни, видалення з металу газів, неметалічних включення, сприяє видаленню фосфору. Шлак видаляють, руду і вапно додають 2–3 рази. В результаті вміст фосфору в металі знижується до 0,01 % і одночасно за рахунок утворення окислу вуглецю при кипінні зменшується і вміст вуглецю. Коли вміст вуглеводу стає менше заданого на 0,1%, кипіння припиняють і повністю видаляють з печі шлак. Цим закінчується окислювальний період плавки.

*Відновний період плавки* включає розкислювання металу, видалення сірі і доведення хімічного складу до заданого. Після видалення окислювального шлаку в пекти подають феромарганець в кількості, що забезпечує заданий вміст марганцю в сталі, а також проводять вуглецювання, якщо виплавляють високовуглецеві сталі (до 1,5% C). Потім в пекти завантажують флюс, що складається з винищити, плавикового шпату і шамотного бою. Після розплавлення флюсів і утворення шлаку в піч вводять розкислюючу суміш, що складається з винищити, плавикового шпату, меленого коксу і феросиліцію. Мелений кокс і феросиліцій вводять в порошокподібному вигляді.

При цьому вміст закису заліза в шлаку знижується і вона з металу згідно закону розподілу починає переходити в шлак. Цей процес називають *дифузійним розкислюванням* сталі. Розкислюючу суміш вводять в піч кілька разів. У міру розкислювання і пониження змісту FeO колір шлаку змінюється і він стає майже білим. Розкислювання під білим шлаком триває 30–60 хв.

Під час відновного періоду сірка віддаляється з металу, що пояснюється високим (до 55–60%) вмістом CaO в білому шлаку і низьким (менше 0,5%) змістом FeO. Це сприяє інтенсивному видаленню сірки з металу.

По ходу відновного періоду беруть проби для визначення хімічного складу металу. При необхідності в піч вводять феросплави для досягнення заданого хімічного складу металу. Коли досягнуті задані склад металу і температура, виконують *кінцеве розкислювання* сталі алюмінієм і силікокальцієм. Після цього слідує випуск металу з печі в ківш.

При виплавці легованих сталей в дугових печах в сталь вводять легуючі елементи у вигляді феросплавів. Порядок введення визначається спорідненістю легуючих елементів до кисню. Нікель, молібден володіють меншою спорідненістю до кисню, чим залізо, і їх вводять в період плавлення або в окислювальний період. Хром легко окислюється і його вводять у відновний період; кремній, ванадій, титан – перед випуском металу з печі в ківш, оскільки вони легко окислюються.

**Електроіндукційні печі.** Індукційна тигельна сталеплавильна піч (рис. 1.5) складається з во-

доохолодженого індуктора 3, усередині якого знаходиться тигель 4 з металевою шихтою. Через індуктор проходить однофазний змінний струм підвищеної частоти (500–1000 кГц). Струм створює змінний магнітний потік, пронизуючи шматки металу в тиглі, наводить в них могутні вихрові струми (Фуко), що нагрівають метал 1 до температури плавлення і необхідних температур перегріву. Тигель може бути виготовлений з кислих (кварцит) або основних (магнезитовий порошок) вогнетривких матеріалів. Ємкість тигля від 60 до 25 т. Струм до індуктора підводиться від генератора високої частоти – лампового (лабораторні печі) або машинного. Для зменшення втрат теплоти при плавці можна застосувати знімне зведення 2.

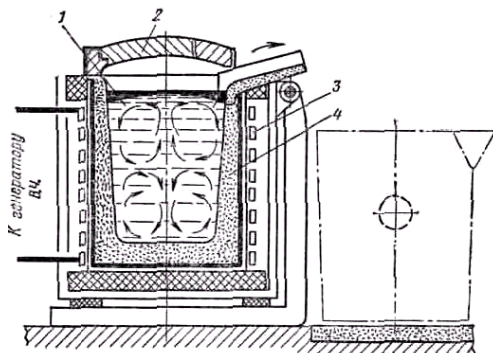


Рисунок 1.5 - Схема індукційної електричної тигельної плавильної печі

Індукційні печі мають переваги перед дуговими: 1) у них відсутня електрична дуга, що дозволяє виплавляти метали з низьким вмістом вуглецю, газів і малим угаром елементів, це особливо важливо при виплавці високоякісних сталей і сплавів; 2) при плавці в металі виникають електродинамічні сили, які перемішують метал в печі і сприяють вирівнюванню хімічного складу, спливанню неметалічних включень; 3) індукційні печі мають невеликі габаритні розміри, що дозволяє поміщати їх в закриті камери, в яких можна створювати будь-яку атмосферу, а також вакуум. Проте ці печі мають малу стійкість футерування, шлак в них нагрівається теплотою металу і температура його недостатня для інтенсивного протікання металургійних процесів між металом і шлаком.

Зазвичай в індукційних печах виплавляють сталь і сплави або з легованих відходів *методом переплавки*, або з чистого шихтового заліза і скрапу з добавкою феросплавів *методом сплаву*. В більшості випадків печі мають кисле футерування. Основне футерування використовують для виплавки сталей і сплавів з високим вмістом марганцю, нікелю, титану і алюмінію.

При завантаженні ретельно підбирають хімічний склад шихти відповідно до заданого, оскільки плавка протікає швидко, і повного аналізу металу по ходу плавки не роблять. Тому необхідну кількість феросплавів (феровольфрам, феромолібден, ферохром, нікель) для отримання заданого хімічного складу металу завантажують на дно тигля разом з рештою шихти. Після розплавлення шихти на поверхню металу завантажують шлакову суміш. Основне призначення шлаку при індукційній плавці – зменшити теплові втрати металу, захистити його від насичення газами, зменшити чад легуючих елементів. При плавці в кислій печі після розплавлення і видалення плавильного шлаку наводять шлак з бою скла ( $\text{SiO}_2$ ). Метал розкислюють феросиліцієм, феромарганцем і алюмінієм перед випуском його з печі.

Тривалість плавки в індукційній печі ємкістю 1 т близько 45 хв. Витрата електроенергії на 1 т сталі складає 600–700 кВт-год.

Вакуумна плавка в індукційних печах дозволяє отримувати сталь і сплави з дуже малим змістом газів, неметалічних включень, легувати сталь і сплави будь-якими елементами. При вакуумній індукційній плавці індуктор з тиглем, дозатор шихти і виливниці поміщають у вакуумні камери. Тут плавлять метал, вводять легуючі добавки, розкислювачі за допомогою спеціальних механізмів без порушення вакууму в камері. Метал у виливниці розливають у вакуумі або інертних газах під надмірним тиском. Заливку під тиском інертного газу проводять для підвищення щільності злитків.

## ЛЕКЦІЯ №2 КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ. КРИСТАЛІЗАЦІЯ

### 2.1 Метали

*Металознавство* – наука, що вивчає будову і властивості металів них сплавів, встановлює зв'язок між їхнім складом, будівлею і властивостями та розробляє шляхи впливу на їхні властивості.

Теоретичними основами металознавства є такі науки, як кристалографія, фізика твердого тіла, фізична хімія. У свою чергу на металознавство спираються такі наукові дисципліни, як загальна металургія, технологія металів, корозія металів, теорія міцності й ін.

М. В. Ломоносов визначав метали, як «світлі тіла, що кувати можна». Однак більш типовими, характерними властивостями металів і їхніх сплавів є високі тепло- і електропровідність, що збільшуються зі зниженням температури. Теорія твердого тіла вибирає в якості головного фізичного критерію металевого стану температурний хід електроопір  $\rho(T)$ : у металів при  $T \rightarrow 0$ ,  $K_p \rightarrow 0$ , у той час як у неметалів, тобто напівпровідників і діелектриків (ізоляторів), при  $T \rightarrow 0$ ,  $K_p \rightarrow \infty$ .

### 2.2 Кристалічна будова металів

Усі речовини можуть знаходитися в трьох агрегатних станах: твердому, рідкому і газоподібному, переходи між якими (так називані фазові переходи) супроводжуються стрибкоподібними змінами вільної енергії  $F$  ( $F=U-TS$ , де  $U$  – внутрішня енергія;  $T$  – температура;  $S$  – ентропія), ентропії, щільності й інших фізичних властивостей.

Реалізація того або іншого агрегатного стану речовини залежить головним чином від температури і тиску, при яких воно знаходиться. Важливою характеристикою є відношення середньої потенційної енергії взаємодії атомів  $E_n$  до їх середньої кінетичної енергії  $E_k$ . Для газів  $E_n/E_k \ll 1$ , для рідин  $E_n/E_k \approx 1$ , для твердих тіл  $E_n/E_k > 1$  (рис. 2.1).

У газах міжмолекулярні відстані великі, молекули практично не взаємодіють один з одним і, вільно рухаючись, заповнюють весь можливий обсяг. Таким чином, для газу характерна відсутність власного обсягу і форми.

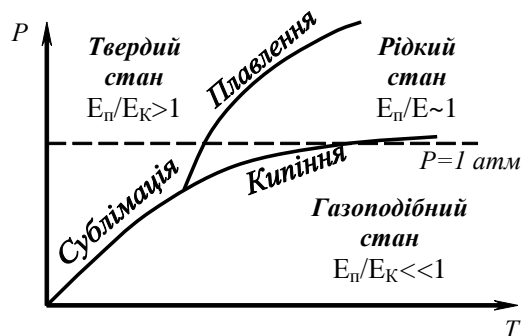


Рисунок 2.1 – Діаграма стану речовини в залежності від тиску і температури.

Рідини і тверді тіла відносять до конденсованого стану речовини. На відміну від газоподібного стану в речовини в конденсованому стані атоми розташовані ближче друг до друга, що приводить до їх більш сильної взаємодії і, як наслідок цього, рідини і тверді тіла мають постійний власний обсяг. Для теплового руху атомів у рідині характерні малі коливання атомів навколо рівноважних положень і часті перескоки з одного рівноважного положення в інше. Це приводить до наявності в рідині тільки так названого *ближнього порядку* в розташуванні атомів (рис. 2.2а), тобто деякої закономірності в розташуванні сусідніх атомів на відстанях, порівнянних з міжатомними. Для рідини на відміну від твердого тіла характерно така властивість, як плинність.

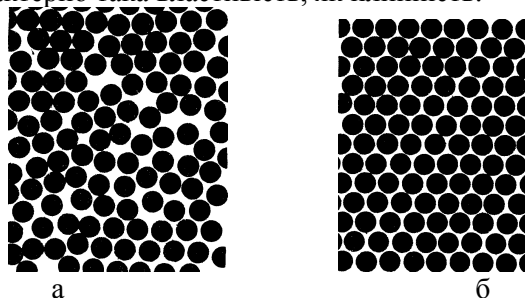


Рисунок 2.2 – Модель ближнього (а) та далекого (б) порядку в розташуванні атомів.

Атоми у твердому тілі, для якого на відміну від рідкого тіла характерна стабільна, постійна власна форма, роблять лише малі коливання біля своїх рівноважних положень. Це приводить до правильного чергування атомів на однакових відстанях для як завгодно далеко вилучених атомів, тобто існування так названого *далекого порядку* в розташуванні атомів (рис. 2.2,б). Таке правильне, регулярне розташування атомів у твердому тілі, що характеризується періодичною повторюваністю в трьох вимірах на відстанях, що значно перевищують міжатомні, називається *кристалічною ґраткою* (рис. 2.3). Відстань між двома сусідніми атомами вздовж координатних осей кристалічної ґратки називається *параметром* кристалічної ґратки і позначається латинськими літерами «а», «b» і «с» (відповідно по осям x, y, z).

### 2.3 Типи кристалічних ґраток та їх основні параметри

У твердому стані атоми всіх металів і металевих сплавів розташовуються в строгому порядку, утворити в просторі правильні кристалічні ґрати. Таке розташування атомів відрізняє кристалічні тіла від аморфних, у яких атоми розташовані хаотично, безладно.

Просторові кристалічні ґрати будь-якого металу складаються з безлічі сполучених елементарних осередків, складених з атомів, розміщених у визначеному порядку. Атоми можуть розташовуватися як у вершинах елементарного осередку, так і в інших її точках (у вузлах кристалічних ґрат). У першому випадку елементарні осередки називаються простими (примітивними), у другому – складними. Існує 14 типів кристалічних ґрат, які називають ґратками Браве. Основні показані на рисунку 2.4.

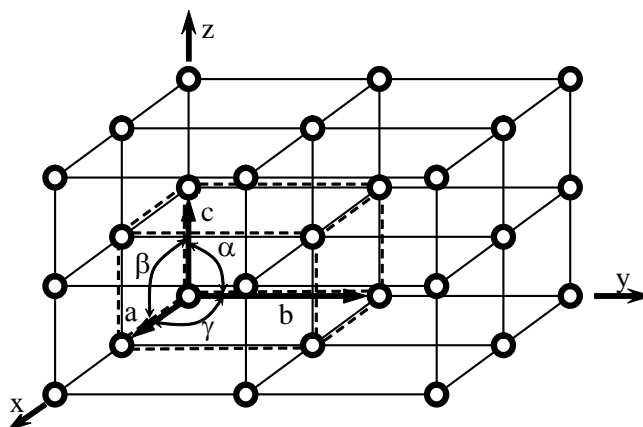


Рисунок 2.3 – Кристалічні ґрати (виділено елементарний осередок з параметрами a, b, c,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )

*Елементарний осередок (або елементарна комірка) кристалічної ґратки* – найменший об'єм кристала за допомогою якого можна повністю відтворити всю кристалічну ґратку. Елементарний осередок дає представлення про атомну структуру металу та дозволяє визначити основні характеристики кристалічної ґратки. Відстань між центрами найближчих атомів в елементарному осередку дорівнює подвоєному атомному радіусу металу, так як атоми в кристалічній ґратці розташовані таким чином, що торкаються своїми електронними оболонками. Період (параметр) ґрат та атомні радіуси вимірюють в ангстремах  $\text{Å}$  ( $1\text{Å}=10^{-10}\text{ м}$ ) або в нанометрах ( $1\text{ нм}=10^{-9}\text{ м}=10\text{Å}$ ).

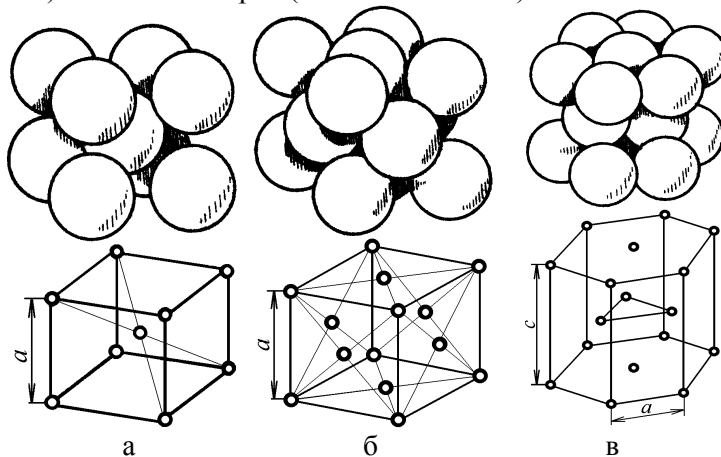


Рисунок 2.3 – Основні види елементарних осередків кристалічних ґрат: а – об'ємноцентрована кубічна (ОЦК); б – гранецентрована кубічна (ГЦК); в – гексагональна щільно впакована.

Найбільш розповсюдженими серед металів є гексагональна щільноупакована ґратка (ГПУ) (Mg, Zn, Hf і ін.), гранецентрована кубічна (ГЦК) (Cu, Al, Pt і ін.), об'ємноцентрована кубічна (ОЦК) (Na, V, Nb і ін.). Ряд металів (наприклад, Fe) у залежності від температури і тиску може існувати в станах з різними кристалічними ґратами – це явище називається *поліморфізмом* або *алотропією*.

Основними характеристиками кристалічної ґратки є: параметр, координаційне число, базис, коефіцієнт заповнення.

*Координаційне число* – кількість атомів, що розташовані на найменшій та рівній відстані від довільно обраного атома. При визначенні координаційного числа необхідно виявити найближчих сусідів довільно обраного атома та порахувати їх кількість. При цьому необхідно враховувати не тільки атоми однієї елементарної комірки, а також і атоми сусідніх комірок. Для ґратки ОЦК координаційне число – К8; для ГЦК і ГПУ – К12.

*Базис* – кількість атомів що належить лише одній елементарній комірці. При визначенні базису необхідно враховувати, що атом може приймати участь у формуванні декількох елементарних комірок. Для ґратки ОЦК базис – Б2; для ГЦК – Б4; для ГПУ – Б6.

*Коефіцієнт заповнення* – частка об'єму елементарної комірки, яка зайнята атомами. Визначається відношенням об'єму атомів, що належать елементарній комірці, до об'єму комірки.

## 2.4 Реальна будова металічних кристалів

Зазвичай шматок металу складається з скупчення великого числа маленьких кристалів неправильної форми, званих *зернами* (рис.2.5). Кристалічні ґратки в окремих зернах орієнтовані щодо один одного випадковим чином (в деяких випадках, наприклад, при холодному прокатуванні, спостерігається переважне орієнтування зерен – *текстура*). Поверхні розділу зерен називаються *межами зерен*. Такий шматок металу є *полікристалом*. За певних умов, зазвичай при дуже повільному контрольному відведенні тепла при кристалізації, може бути отриманий шматок металу, що є одним кристалом, його називають *монокристалом*. В даний час в лабораторіях вирощують монокристали масою в декілька сот грам і більш.

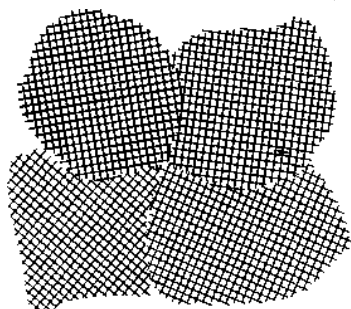


Рисунок 2.4 – Структура полікристалічного твердого тіла.

Кристали, що зустрічаються в природі, як монокристали, так і зерна в полікристаллах, ніколи не мають такої строгої періодичності в розташуванні атомів, про яку мовилося вище, тобто не є «ідеальними» кристаллами. Насправді «реальні» кристали містять ту або іншу недосконалість (дефекти) кристалічної будови.

*Дефекти в кристалах* прийнято класифікувати по характеру їх вимірювання в просторі на точкових (нульмірні), лінійних (одновимірні), поверхневих (двовірні), об'ємних (тривимірні). Точковими дефектами називаються такі порушення періодичності кристалічної решітки, розміри яких у всіх вимірюваннях близькі до розмірів атома. До точкових дефектів відносять *вакансії* (вузли в кристалічній решітці, вільні від атомів), *міжвузельні атоми* (атоми, що знаходяться поза вузлами кристалічної решітки), а також домішкові атоми, які можуть або заміщати атоми основного металу (*домішки заміщення*), або упродовжуватися в найбільші вільні місця ґрат (пори або міжвузловини) аналогічно міжвузельним атомам (*домішки впровадження*) (рис. 2.6).

Під час переходу атома з рівноважного положення (вузла) в міжвузловину виникає пара вакансія - міжвузельний атом, яка називається *дефектом Френкеля*, а якщо атом зі свого вузла виходить на поверхню кристала, то дефект, що утворюється, називається *дефектом Шоткі*. Точкові дефекти є центрами локальних спотворень в кристалічній ґратці. Проте помітні зсуви атомів, що оточують вакансію або міжвузельний атом, створюються лише на відстанях декількох атомних діаметрів від центру дефекту, і поля пружної напруги є близькодійними, тобто швидко зменшуються (із збільшенням відстані) від дефекту. Точкові дефекти, хоча і вимагають певної витрати енергії для утворення, є термодинамічно рівноважними, тобто завжди присутні в кристалі.

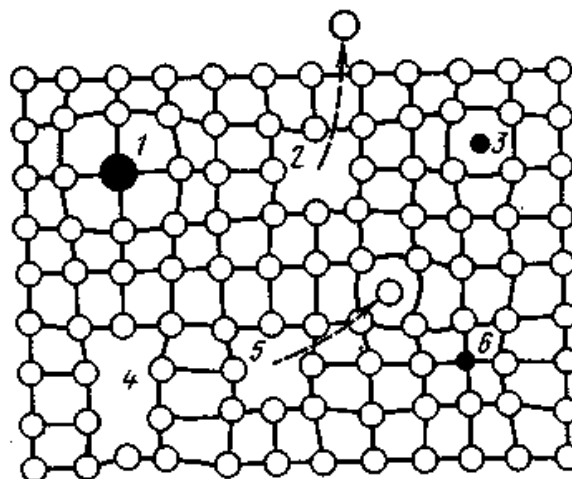


Рисунок 2.6 – Схема точкових дефектів в кристалі:  
1 - домішковий атом заміщення; 2-дефект Шоткі;  
3 - домішковий атом впровадження; 4 - дивакансія;  
5 - дефект Френкеля (вакансія і міжвузельний атом);  
6 - домішковий атом заміщення.

## 2.5 Дислокації

Лінійні дефекти в кристалах характеризуються тим, що їх поперечні розміри не перевищують

декількох міжатомних відстаней, а довжина може досягати розміру кристала. До лінійних дефектів відносяться дислокації - лінії, уподовж і поблизу яких порушено правильне періодичне розташування атомних площин кристала. Розрізняють *крайову* і *гвинтову дислокації* (рис. 2.7). Крайова дислокація є межею неповної атомної площини (екстраплощини). Гвинтову дислокацію можна визначити як зрушення однієї частини кристала щодо іншої.

Дислокації не можуть обриватися усередині кристала - вони повинні бути або замкнутими, або виходити на поверхню кристала. Щільність дислокації, тобто число ліній дислокації, що перетинають усередині металу майданчик в  $1 \text{ см}^3$ , складає  $10^3$ - $10^4$  в найбільш досконалих монокристалах до  $10^{12}$  в сильно деформованих металах. Дислокації створюють в кристалі навколо себе поля пружної напруги, що убуває обернено пропорційно до відстані від них. Наявність пружної напруги навколо дислокації приводить до їх взаємодії.

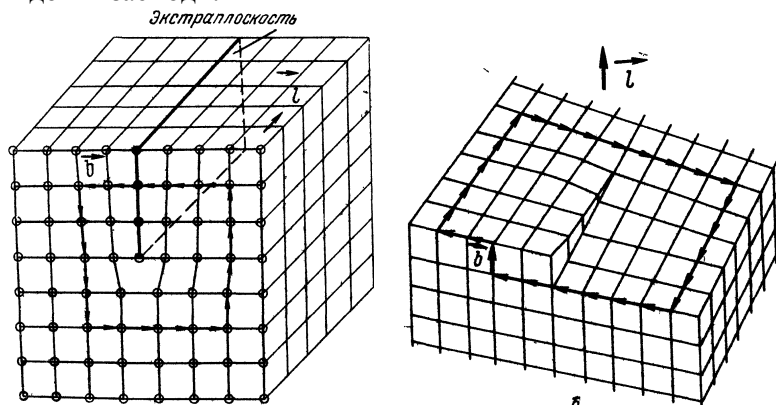


Рисунок 2.5 – Крайова та гвинтова дислокації.

Під дією зовнішньої напруги дислокації рухаються (ковзають), що визначає дислокаційний механізм пластичної деформації. Переміщення дислокації в площині ковзання супроводжується розривом і освітою знов міжатомних зв'язків тільки у лінії дислокації (рис. 2.8), тому пластична деформація може відбуватися при малому зовнішньому навантаженні, набагато меншому за ті, які необхідні для пластичної деформації ідеального кристала шляхом розриву всіх міжатомних зв'язків в площині ковзання.

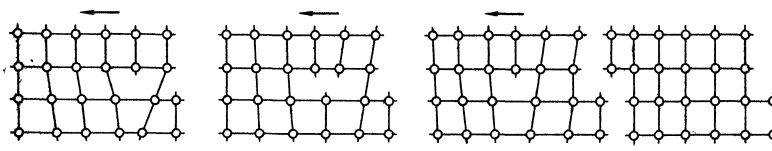


Рисунок 2.6 – Рух дислокацій.

Зазвичай дислокації виникають при утворенні кристала з розплаву. Основним механізмом розмноження дислокації при пластичній деформації є так звані джерела Франка-Ріда. Це відрізки дислокації, закріплені на кінцях, які під дією напруги можуть прогинатися, випускаючи при цьому дислокації, і знов відновлюватися. Оскільки пластична деформація в кристалічних тілах здійснюється рухом дислокації, то зміцнення металу може бути досягнуте шляхом створення перешкод для їх просування. Зазвичай зміцнений стан досягається при взаємодії дислокації один з одним, з атомами домішок і частинками іншої фази. Дислокації впливають не лише на міцнісні і пластичні властивості металів, але також і на їх фізичні властивості.

Під поверхневими (двовимірними) дефектами розуміють такі порушення в кристалічній решітці, які володіють великою протяжністю в двох вимірюваннях і протяжністю лише в декількох міжатомних відстанях в третьому вимірюванні. До них відносяться дефекти упаковки, двійникові межі, межі зерен і зовнішні поверхні кристала. Під дефектами упаковки мають на увазі локальні зміни розташування щільноупакованих площин в кристалі.

До об'ємних (тривимірним) дефектів відносяться такі, які мають розміри в трьох вимірюваннях: макроскопічні тріщини, пори і так далі

## 2.6 Анізотропія властивостей кристалів

Розглядаючи різні площини, наприклад в ОЦК ґратах, можна легко укласти, що вони заповнені атомами з різною щільністю.

Так, в заштрихованому квадраті (рис. 2.9, а) ОЦК ґратки центри атомів розташовуються по

вершинах. Оскільки кожен з цих атомів належить одночасно чотирьом квадратам, на долю кожного квадрата з площею  $a^2$  доводиться повністю один атом. У заштрихованому прямокутнику тих же ґрат на площу  $a^2\sqrt{2}$  (рис. 2.9, б) доводяться два атоми, а на долю кожного атома - площа, що менше площі  $a^2\sqrt{2}/2$ , тобто на цій площині атомів розташовано більше.

Властивості окремо взятого кристала (монокристала) по даному напрямку відрізняються від властивостей в іншому напрямку (рис. 2.9) і, природно, залежать від того, скільки атомів зустрічається в цьому напрямку. Відмінність властивостей залежно від напрямку випробування носить назву *анізотропії*. Всі кристали анізотропні.

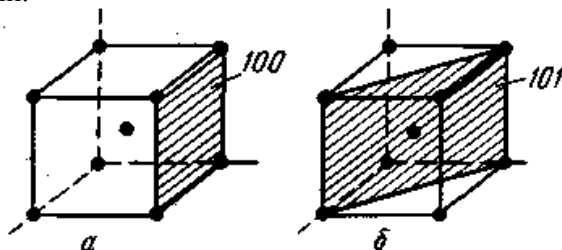


Рисунок 2.7 – Площини в ґратах об'ємноцентрованного куба.

Реальний метал складається з багатьох кристалів; розмір кожного кристала вимірюється долями міліметра, і тому в  $1 \text{ см}^3$  металу містяться десятки тисяч кристалів. Довільність орієнтування кожного кристала приводить до того, що в будь-якому напрямку розташовується приблизно однакова кількість різноорієнтованих кристалів. В результаті виходить, що властивості такого полікристалічного тіла однакові на всіх напрямках, хоча властивості кожного кристала, що становить це тіло, залежать від напрямку. Це явище називається квазіізотропією (помилкова ізотропія).

## 2.7 Енергетичні умови процесу кристалізації

Температура плавлення – особливо важлива константа властивостей металу. Вона коливається для різних металів у досить широких межах – від мінус  $38,9^\circ\text{C}$  для ртуті – самого легкоплавкого металу, що знаходиться при кімнатній температурі в рідкому стані, до  $3410^\circ\text{C}$  для самого тугоплавкого металу – вольфраму.

Низька міцність (твердість) при кімнатній температурі легкоплавких металів (олова, свинцю і т.д.) є наслідком головним чином того, що кімнатна температура для цих металів менш «віддалена» від температури плавлення, ніж у тугоплавких металів.

Щоб порівняти властивості різних металів, іспиту проводять при так званих *подібних (гомологічних)* температурах, що складають однакову частку від абсолютної температури плавлення (наприклад, 0,5 від абсолютної температури плавлення буде для свинцю  $27^\circ\text{C}$ , для заліза  $631^\circ\text{C}$ , при цих температурах властивості свинцю і заліза досить близькі)

Процес переходу з рідкого стану у тверде з утворенням кристалічних ґрат (кристалів) називається первинною *кристалізацією*.

При переході з рідкого стану у тверде утворюються кристалічні ґрати, виникають кристали. Такий процес називається кристалізацією.

У природі всі перетворення, що відбуваються самовільно, а, отже, кристалізація і плавлення, обумовлені тим, що новий стан у нових умовах є енергетично більш стійким, має менший запас енергії (рис. 2.10).

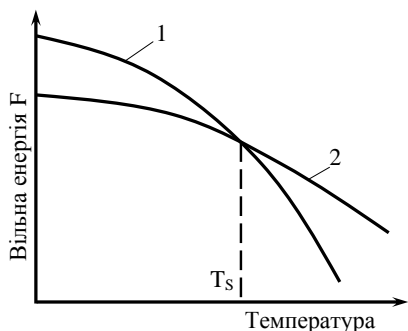


Рисунок 2.10 – Зміна вільної енергії рідкого (1) і кристалічного (2) стану в залежності від температури.

При температурі, рівній  $T_s$ , вільні енергії рідкого і твердого станів рівні, метал в обох станах знаходиться в рівновазі. Ця температура  $T_s$  і є *рівноважна або теоретична температура кристалізації*.

При температурі  $T_s$  не може відбуватися процес кристалізації (плавлення), тому що при рівності обох фаз це не буде супроводжуватися зменшенням вільної енергії.

Для початку кристалізації необхідно, щоб процес був термодинамічно вигідний системі і супроводжувався зменшенням вільної енергії системи. З кривих, приведених на рис. 3.1 видно, що це можливо тільки тоді, коли рідина буде охолоджена нижче точки  $T_s$ . Температура, при якій практично починається кристалізація, називається *фактичною температурою кристалі-*



зації.

Охолодження рідини нижче рівноважної температури кристалізації називається *переохолодженням*.

Зазначені причини обумовлюють і те, що зворотне перетворення з кристалічного стану в рідке може відбутися тільки вище температури  $T_S$ ; це явище називається *перенагріванням*.

*Величиною або ступенем переохолодження* називають різницю між теоретичною і фактичною температурами кристалізації.

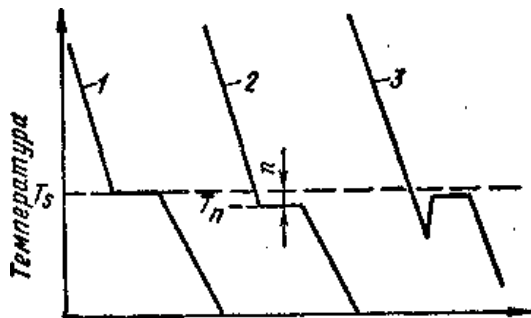


Рисунок 2.11 – Криві охолодження при кристалізації.

Процес переходу металу з рідкого стану в кристалічне можна зобразити кривими в координатах час-температура (рис. 2.11).

Охолодження металу в рідкому стані супроводжується плавним зниженням температури і може бути названо простим охолодженням, тому що при цьому немає якісної зміни стану. При досягненні температури кристалізації на кривій температура-час з'являється горизонтальна площадка, тому що відвід тепла компенсується *прихованою теплою, що виділяється при кристалізації*. По закінченні кристалізації, тобто після повного переходу у твердий стан, температура знову починає знижуватися, і тверда кристалічна речовина проходить

процес кристалізації зображується кривою 1. Крива 2 показує реальний процес кристалізації. Рідина безупинно охолоджується до температури переохолодження  $T_n$  лежачої нижче теоретичної температури кристалізації  $T_S$ . При охолодженні нижче температури  $T_S$ , створюються енергетичні умови, необхідні для протікання процесу кристалізації.

У деяких металів через велике переохолодження прихована теплота плавлення виділяється в перший момент кристалізації настільки бурхливо, що температура стрибкоподібно підвищується, наближається до теоретичного (крива 3, рис. 2.11.). Так кристалізується, наприклад, сурма.

Чим більше швидкість охолодження, тим більше величина переохолодження. Для того, щоб цілком переохолодити метал у рідкому стані потрібні великі швидкості охолодження (мільйони і навіть мільярди градусів у секунду), охолодження рідкого металу до кімнатної температури варто проводити так, щоб одержати переохолоджений рідкий метал (тобто метал, що не має кристалічної будови) за незначну частку секунди. Такий метал називається *аморфним* або *металічним склом*, що починає застосовуватися на практиці.

## 2.8 Механізм процесу кристалізації

Ще в 1878 р. Д. К. Чернов, вивчаючи структуру литої сталі, указав, що процес кристалізації складається з двох елементарних процесів. Перший процес полягає в зародженні дрібних часток кристалів, що Чернов називав «зачатками», а тепер них називають *зародками*, або *центрами кристалізації*. Другий процес складається в росту кристалів з цих центрів.

Подібна модель кристалізації представлена на рис 2.12. Припустимо, що на площі, зображеної на рис. 3 за секунду виникає п'ять зародків, що ростуть з визначеною швидкістю. До кінця першої секунди утворилося п'ять зародків, до кінця другої секунди вони вирости й одночасно з цим виникло ще п'ять нових зародків майбутніх кристалів. Так, у результаті виникнення зародків і їхнього росту відбувається процес кристалізації, що, як видно в даному прикладі, закінчується на сьомій секунді.

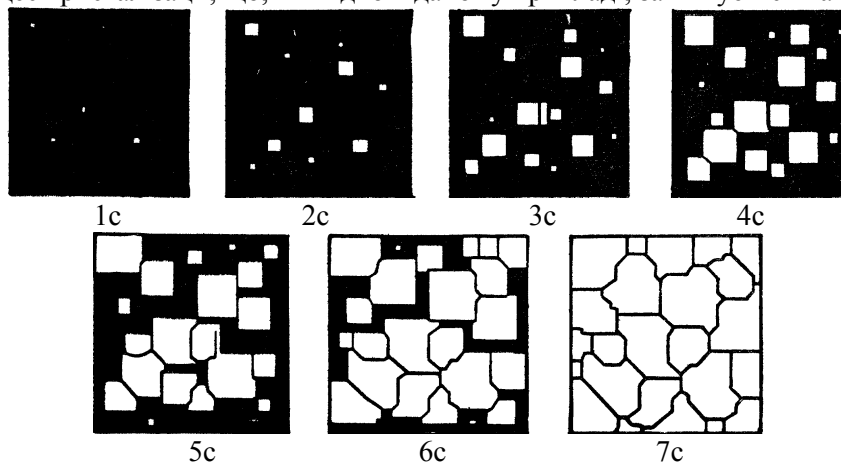


Рисунок 2.12 – Модель процесу кристалізації.

Якісна схема процесу кристалізації, зображена на рис. 3, може бути представлена кількісно кінетичною кривою (рис. 2.13).

Розгляд подібних схем кристалізації дозволяє пояснити два важливих моменти:

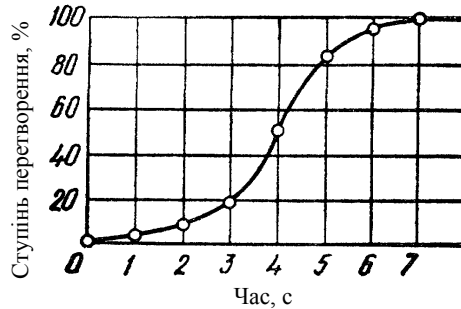


Рисунок 2.13 – Кінетична крива кристалізації.

1. В міру розвитку процесу кристалізації в ньому бере участь усе більше і більше число кристалів. Тому процес спочатку прискорюється, поки в якийсь момент (зазвичай, коли закристалізувалося 50% рідини) взаємне зіткнення зростаючих кристалів не починає помітно перешкоджати їхнього росту; ріст кристалів сповільнюється, тим більше, що і рідини, у якій утворюються нові кристали, стає усе менше.

2. У процесі кристалізації, поки кристал оточений рідиною, він часто має правильну форму, але при зіткненні і зрощенні кристалів їхня правильна форма порушується, зовнішня форма кристала виявляється залежною від умов зіткнення зростаючих кристалів. От чому кристали металу, зерна (кристаліти) не мають правильної форми.

Швидкість усього процесу кристалізації кількісно визначається двома величинами: *швидкістю зародження центрів кристалізації* і *швидкістю росту кристалів*. Обидві ці величини можна вимірити для різних умов кристалізації.

Число кристалів, що зароджуються в одиницю часу, що надалі ми будемо позначати буквами к.ц., має розмірність  $1/\text{мм}^3\text{с}$  (число центрів кристалізації, що виникли в  $1 \text{ мм}^3$  за одну секунду). Швидкість росту кристалів, що позначається надалі через ш.к., є швидкість збільшення лінійних розмірів кристала, виражена в міліметрах в одиницю часу. Розмірність цієї величини –  $\text{мм}/\text{с}$ ;  $\text{мм}/\text{хв}$

Установлено, що к.ц. і ш.к. визначаються ступенем переохолодження. Графічно зміни величин к.ц. і ш.к. у залежності від переохолодження представлені на рис. 2.14. Залежність к.ц. і ш.к. від переохолодження виражається кривий з максимумом. При теоретичній температурі кристалізації ( $n=0$ ) значення ш.к. і к.ц. дорівнюють нулеві і процес кристалізації йти не може, що знаходиться в повній відповідності з викладеним вище положенням про необхідність переохолодження для протікання процесу. Зі збільшенням переохолодження значення с.до. і к.ц. зростають, досягають максимуму і потім знижуються, при великих величинах переохолодження практично падають до нуля.

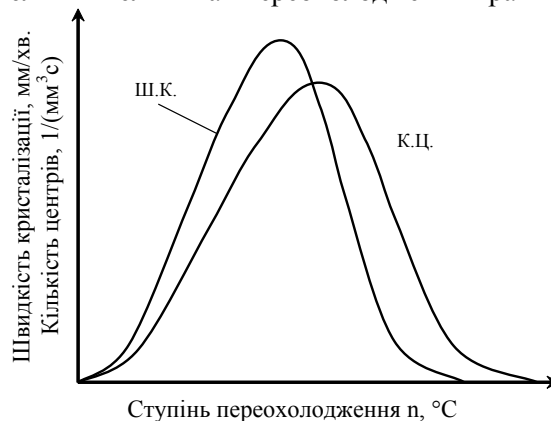


Рисунок 2.14 – Швидкість росту кристалів (ш.к.) і швидкість зародження центрів кристалізації (к.ц.) у залежності від ступеня переохолодження.

Збільшення ш.к. і к.ц. при малих ступенях переохолодження обумовлене тим, що поблизу рівноважної точки ( $T_S$ ) рухливість атомів велика і прискорення кристалізації зі збільшенням ступеня переохолодження викликається збільшенням різниці вільних енергій рідкого і кристалічного станів. Зниження ш.к. і к.ц. при великих ступенях переохолодження викликано тим, що при великій переохо-

лодження і, отже, при низьких температурах рухливість атомів зменшена, а тим самим зменшена і здатність системи до перетворення. При великих ступенях переохолодження ш.к. і к.ц. стають рівними нулеві, тому що рухливість атомів уже недостатня для того, щоб здійснилася перебудова їхній з хаотичного розташування в рідині в правильне в кристалі.

Розмір кристалів, що утворилися, залежить від співвідношення величин ш.к. і к.ц. при температурі кристалізації, при даному ступені переохолодження. При великому значенні ш.к. і малому значенню к.ц. (наприклад, при малих ступенях переохолодження, рис. 2.14), утворяться нечисленні великі кристали; при малих значеннях ш.к. і великих к.ц. (велике переохолодження) утвориться велике число дрібних кристалів. Нарешті, відповідно до кривих Таммана, якщо вдається дуже сильно переохолодити рідину без кристалізації, то ш.к. і к.ц. стають рівними нулеві, рідину зберігається неперетвореною, незакристалізованою. Солі, силікати, органічні речовини досить схильні до переохолодження. Для металів же потрібно переохолодити рідину до температури, коли рухливість атомів стане малою і такий стан виявиться досить стійким.

Не тільки в рідких розплавах, але і при перетворенні у твердому стані нова форма також утвориться шляхом зародження і росту кристалів; швидкість цих процесів залежить від переохолодження. На відміну від кристалізації з рідини процес перетворення у твердому стані (перекристалізація) звичайно протікає при сильному переохолодженні, і таммановська залежність ш.к. і к.ц. для цього випадку навіть більш прийнятна, чим для випадку первинної кристалізації з рідкого стану.

Мінімальний розмір здатного до росту зародка називається *критичним розміром зародка*, а такий зародок називається *стійким*.

## 2.9 Будова злитка

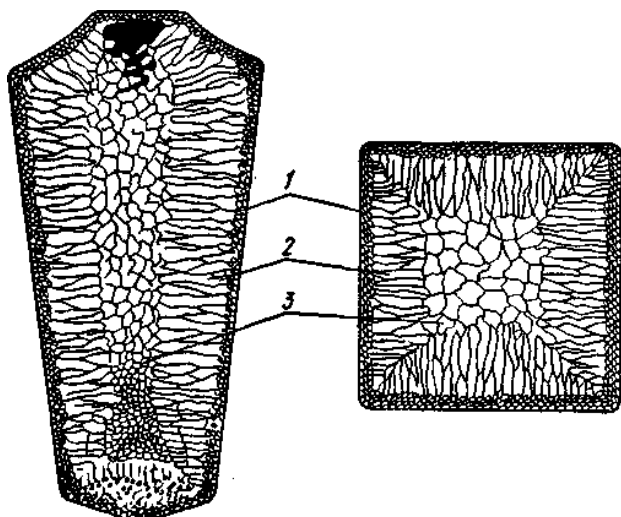


Рис 2.15. Схема будови сталевих злитків

Структура литого злитка складається з трьох основних зон (рис. 2.15). Перша зона – зовнішня дрібнозерниста кірка 1, що складається з дезорієнтованих дрібних кристалів. При першому зіткненні із стінками виливниці в тонкому прилеглому шарі рідкого металу виникає різкий градієнт температур і явище переохолодження, що веде до утворення великої кількості центрів кристалізації. В результаті кірка отримує дрібнозернисту будову. Друга зона злитка – зона стовпчастих кристалів 2. Після утворення самої кірки умови тепловідводу змінюються (із-за теплового опору, із-за підвищення температури стінки виливниці і інших причин), градієнт температур в прилеглому шарі рідкого металу різко зменшується і, отже, зменшується ступінь переохоло-

дження сталі. В результаті з невеликого числа центрів кристалізації починають рости нормально орієнтовані до поверхні кірки (тобто у напрямку відведення тепла) стовпчасті кристали.

Третя зона злитка – зона рівновісних кристалів 3. В центрі злитка вже немає певної спрямованості віддачі тепла. Температура застигаючого металу встигає майже абсолютно зрівнюватися в різних крапках і рідина перетворюється як би на кашоподібний стан, унаслідок утворення в різних її місцях зачатків кристалів. Далі зачатки розростаються осями – гілками по різних напрямках, зустрічаючись один з одним. В результаті цього процесу утворюється рівновісна структура. Зародками кристала тут є зазвичай різні найдрібніші включення, присутні в рідкій сталі, або випадково в неї потрапили, чи не розчинилися в рідкому металі.

У зоні стовпчастих кристалів метал щільніший, він містить менше раковин і газових пузирів. Проте місця стику стовпчастих кристалів мають малу міцність.

Ступінь розвитку стовпчастих кристалів варіюватиметься головним чином залежно від хімічного складу металу, ступеня його перегріву, від розміру злитка, швидкості розливання, форми виливниці і товщини, а також температури її стінок. Підвищення ступеня перегріву і збільшення швидкості охолодження злитка сприяє збільшенню частки стовпчастих кристалів і може привести до повної транскристалізації. Рідкий метал має більший об'єм, чим закристалізований метал, тому залитий у форму, в процесі кристалізації зменшується в об'ємі, що приводить до утворення порожнеч, так званих усадкових раковин. Усадкові раковини можуть бути сконцентровані в одному місці, або розсіяні по всьому об'єму злитка, або по його частині. Вони можуть бути заповнені газами, розчинними в рідкому металі, але виділяються при кристалізації. У добре розкисленій так званій спокійній сталі,

відлитій у виливницю з утепленою надставкою, усадкова раковина утворюється у верхній частині злитка, і в об'ємі всього злитка міститься мала кількість газових пузирів і раковин. Недостатньо розкислена так звана кипляча сталь, містить раковини і пузири у всьому об'ємі. Тому спокійний метал щільніший, ніж киплячий. Форма первинних кристалів (дендритів) після гарячої механічної обробки тиском (кування, пресування, прокатування і так далі) видозмінюється. Дендрити витягуються уздовж напрямку течії металу і перетворюються на волокна. В результаті виникає відмінність у властивостях уздовж прокату (уздовж волокна) і упоперек.

Сталеві злитки неоднорідні і по хімічному складу. Хімічна неоднорідність, або ліквация, виникає при затвердінні злитка унаслідок зменшення розчинності домішок заліза при його переході з рідкого стану в твердий. Ліквация буває двох видів – дендритна і зональна.

Дендритна ліквация – неоднорідність сталі в межах одного кристала (дендриту). Найбільшу схильність до дендритної ліквации мають сірка, фосфор, вуглець, які при кристалізації скупчуються в міжвісних просторах дендритів. При цьому вміст сірки на межах дендритів порівняно з її вмістом в центрі дендриту збільшується в 2 рази, фосфору в 1,2 разу, а вміст вуглецю зменшується приблизно на 50%. Цей вид ліквации призводить до появи в сталі смужчастої структури при прокатуванні, що викликає анізотропію механічних властивостей сталі: пластичні властивості в напрямі, поперечному прокатці, значно нижче, ніж в подовжньому.

Зональна ліквация – неоднорідність складу сталі в різних частинах злитка. Найбільшу схильність до зональної ліквации мають сірка, фосфор і вуглець. У верхній частині злитка за рахунок конвекції рідкого металу вміст цих елементів збільшується у декілька разів, а в нижній зменшується. Зональна ліквация погіршує якість злитка і може привести до відбракування металу унаслідок відхилення його властивості від заданого.

Дефекти сталевих злитків. До дефектів цих злитків відносяться усадкові раковини, ліквация, плівки на поверхні. При розливанні сталі і затвердінні утворюються також і інші дефекти, що погіршують якість металу при подальшій обробці тиском. До них відносяться осьова рихлість – скупчення дрібних усадкових порожнеч в осьовій зоні злитка, вона погіршує макроструктуру прокатаних виробів; заворот кірки – утворення на поверхні дзеркала металу плівки оксидів, неметалічних і шлакових включень, яка потоком металу заноситься в його об'єм; при прокатуванні в місці завороту кірки виникають дефекти – раковини, які погіршують якість виробів; поперечні і подовжні гарячі тріщини, що утворюються унаслідок гальмування усадки злитка у виливниці; підкіркові газові пузири, що виникають унаслідок надмірного змащення робочої поверхні виливниць, приводять до утворення при прокатці дрібних тріщин – волосовини.

## 2.10 Поліморфізм

Атоми даного елемента можуть створювати, якщо виходити тільки з геометричних розумінь, будь-які кристалічні ґратки. Однак стійким, а отже, реально існуючим типом є ґратки, що мають найбільш низький запас вільної енергії. Так, наприклад, у твердому стані літій, натрій, калій, рубідій, цезій, молібден, вольфрам та інші метали мають об'ємноцентровані кубічні ґрати; алюміній, кальцій, мідь, срібло, золото, платина та ін. - гранецентровану, а берилій, магній, цирконій, гафній, осмій і деякі інші - гексагональну.

Однак у ряді випадків при зміні температури або тиску може виявитися, що для того ж металу більш стійкою буде інша ґратка, ніж та, котра була при іншій температурі чи тиску. Так, наприклад, існує залізо з ґраткою об'ємноцентрованого і гранецентрованого кубів; виявлено кобальт з гранецентрованою та з гексагональною ґраткою. У різних ґратках кристалізуються також олово, марганець, титан і деякі інші метали.

Існування одного металу (речовини) у декількох кристалічних формах називається поліморфізмом, або алотропією. Різні кристалічні форми однієї речовини називаються поліморфними, або алотропними модифікаціями.

Невеликі зміни тиску, що можуть виникати в практиці, зазвичай не призводять до поліморфних перетворень. Тому для практичного металознавства важлива, головним чином, температурна алотропія.

Прийнято позначати різні алотропічні форми того самого металу буквами грецького алфавіту  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  та ін., які у вигляді індексів додають до символу, що позначає елемент ( $Fe_{\alpha}$ ,  $Fe_{\beta}$ ,  $Fe_{\gamma}$ ). Найбільш низькотемпературна позначається буквою  $\alpha$ .

Перетворення однієї алотропічної форми в іншу при нагріванні чистого металу супроводжується поглинанням тепла і відбувається при постійній температурі. Усі зміни в будові металу або сплаву, що відбуваються при охолодженні або нагріванні, зображують графічно у виді термічної кривої (кривої охолодження або кривої нагрівання в координатах температура–час), на якій перетворен-

ня відзначається горизонтальною ділянкою (рис. 2.16). При охолодженні відбувається виділення тепла (виділення прихованої теплоти перетворення) теоретично при такій же температурі, що і при нагріванні, але практично при дещо більш низькій внаслідок переохолодження.

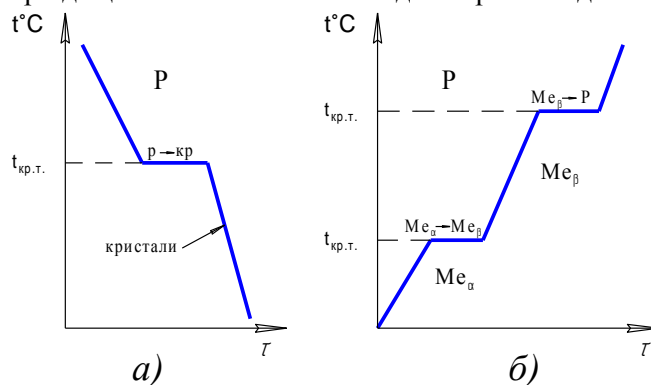


Рисунок 2.16 – Термічні криві: а) крива охолодження металу без поліморфного перетворення; б) крива нагрівання металу з поліморфним перетворенням

Явище поліморфізму базується на єдиному законі про стійкість стану з найменшим запасом енергії.

Запас вільної енергії залежить від температури. Тому в одному інтервалі температур більш стійкою є модифікація  $\alpha$ , а в іншому – модифікація  $\beta$  і т.д. Температура, при якій здійснюється перехід з однієї модифікації в іншу, називається температурою поліморфного (алотропічного) перетворення. Так, залізо має дві температури поліморфного перетворення: 911 і 1392  $^{\circ}\text{C}$ .

Нові алотропічні форми утворюються в результаті зародження центрів і росту кристалів аналогічно кристалізації з рідкого стану. В результаті поліморфного перетворення виникають нові кристалічні зерна, що мають інший розмір, форму і будову.

## ЛЕКЦІЯ №3 ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

### 3.1 Класифікація властивостей

Властивості металів і сплавів залежать від їхнього складу і стану. Домішки, що є в металі або в сплаві, значно змінюють його властивості. Наприклад, 0,1% фосфору в міді знижує її електричну провідність у 2 рази, а 0,5% фосфору – більш ніж у 5 разів.

Властивості металів і сплавів (рис. 3.1) прийнято розділяти на фізичні, механічні, технологічні, хімічні і експлуатаційні (спеціальні).

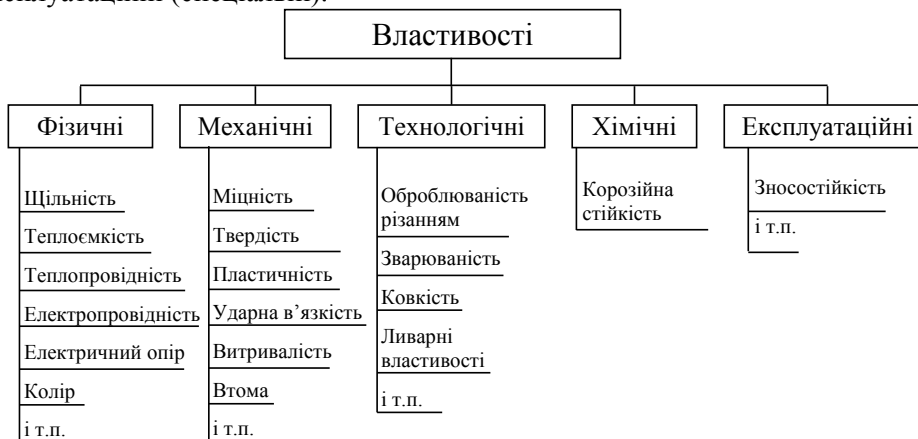


Рисунок 3.1 – Класифікація властивостей

### 3.2 Фізичні властивості

До фізичних властивостей відносять теплові властивості (теплоємність, теплопровідність, температура плавлення, теплове розширення), електричну провідність, магнітну проникність, щільність, колір і т.п.

*Теплоємністю* називають здатність металу при нагріванні поглинути визначена кількість теплоти. Теплоємності різних металів порівнюють за значенням питомої теплоємності. *Питома теплоємність* – це кількість теплоти, що необхідна для підвищення температури 1 кг металу на 1 °С. Питома теплоємність залежить від температури, хоча в багатьох випадках – цією залежністю зневажають.

*Теплопровідністю* називають здатність металів передавати теплоту від більш нагрітих до менш нагрітих ділянок тіла. Теплопровідність характеризується коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м·град). Велику теплопровідність мають при 0 °С срібло, алюміній, мідь. Теплопровідність заліза майже в 5 разів менше, ніж у міді. Маленьку теплопровідність мають марганець, вісмут, титан.

Теплопровідність має велике значення при виборі матеріалу для деталей. Наприклад, якщо метал погано проводить теплоту, то при нагріванні і швидкому охолодженні (термічна обробка, зварювання) у ньому виходять тріщини. Деякі деталі машин (лопатки турбін, поршні двигунів) повинні виготовлятися з металів, що мають високу теплопровідність.

*Температурою плавлення*  $T_{пл}$  називають температуру переходу металу з твердого стану в рідке. У залежності від температури плавлення розрізняють:

- тугоплавкі метали (W – 3416 °С, Re – 3180 °С, Nb – 2450 °С, Mo – 2620 °С, Hf – 2222 °С, Cr – 1903 °С, V – 1900 °С, Zr – 1852 °С, Ti – 1725 °С);
- легкоплавкі метали (Sn – 232 °С, Pb – 327 °С, Zn – 419,5 °С, Al – 660 °С).

Найбільш низьку температуру плавлення (-38,9 °С) має Hg.

Домішки, у кристалічних речовинах знижують температуру плавлення. Цим користуються на практиці для одержання сплавів з низькою температурою плавлення. Наприклад, сплав Вуда, що містить 50 % Bi, 25 % Pb, 5 % Sn, 12,5 % Cd має температуру плавлення 68 °С.

*Тепловим розширенням* називають здатність металів збільшуватися в розмірі при нагріванні і зменшуватися при охолодженні. Теплове розширення визначається коефіцієнтом лінійного розширення –  $\alpha$  (к.л.р.); який характеризує збільшення одиниці довжини при нагріванні на 1 °С від 0°С:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1(t_2 - t_1)}$$

де  $l_1$ ,  $l_2$  – початкова і кінцева довжина зразка,  $t_1$ ,  $t_2$  – початкова і кінцева температура.

Теплове розширення необхідно враховувати при зварюванні, куванні, гарячому штампуванні,

при зборці точних з'єднань і приладів, при будівництві мостових ферм, укладанню залізничних рейок.

*Електрична провідність* і *електричний опір* характеризують здатність металів проводити електричний струм. Висока електрична провідність необхідна, наприклад, для проводів електричного струму (Cu, Al) і навпаки, при виготовленні електронагрівальних приладів і печей необхідні сплави з високим електричним опором (ніхром, константан, манганін).

Маленький питомий опір електричному струмові (мкОм·м) при 20 °С мають: Ag – 0,0159; Cu – 0,0175; Al – 0,028; великий питомий опір – Mn – 1,85; Вi – 1,068.

По електричній провідності матеріали розділяють на провідники, напівпровідників і діелектрики.

Електрична провідність металів залежить від ступеня їхньої чистоти, температури. У чистих металів питомий опір менше ніж у сплавів. При підвищенні температури вона зменшується.

Багато металів (Al, Ti, Zn, Pb і ін.) при низьких температурах здобувають властивість надпровідності.

*Надпровідність* – властивість багатьох провідників, при якому їхній електричний опір стрибкоподібний падає до нуля при охолодженні нижче відповідної, критичної температури  $T_k$ . Критичні температури чистих металів знаходяться в інтервалі від сотих часток градуса Кельвіна (К) до 9 К. У надпровідний стан можуть переходити також трохи стільник металевих сплавів і з'єднань і деякі сильно леговані напівпровідники.

Другий найважливіший параметр для надпровідників – *критичне магнітне поле*  $H_0$ , при перевищенні якого надпровідники переходять у нормальне (ненадпровідний) стан.

*Щільність* металу характеризується масою в одиниці об'єму. По щільності всі метали поділяють на легені (менше 4500 кг/м<sup>3</sup>) і важкі. Щільність має велике значення при створенні різних виробів. Наприклад, у самоліто- і ракетобудуванні прагнуть використовувати більш легкі метали і сплави (алюмінієве, магнієві, титанові), що сприяє зниженню маси виробів.

Найбільшою щільністю відрізняється Os – 22500 кг/м<sup>3</sup>, найменшої – Li – 530 кг/м<sup>3</sup>.

*Кольором* називають здатність металів відбивати світлове випромінювання з відповідною довжиною хвилі і здобувати при цьому фарбування. Наприклад, Cu має рожево-червоний колір, Al – сріблисто-білий.

### 3.3 Механічні властивості

Під механічними властивостями розуміють здатність металу чинити опір дії зовнішніх сил. При виборі матеріалу для виготовлення деталей машин необхідно враховувати його механічні властивості (міцність, пружність, ударну в'язкість, твердість і витривалість), їх визначають за допомогою механічних іспитів, при яких метали піддають дії зовнішніх сил (навантажень). Зовнішні сили можуть бути статическ, динамічними або циклічними (повторно-змінними). Навантаження викликає у твердих тілах напруги і деформацію.

*Напруження* – відношення навантаження до одиниці площі поперечного переріза зразка, МН/м<sup>2</sup>.

$$\sigma = P/F_0,$$

де  $P$  – навантаження, МН;  $F_0$  – початкова площа, м<sup>2</sup>.

Напруга, прикладена до металу, завжди викликає деформацію.

*Деформація* – зміна форми і розмірів твердого тіла під впливом зовнішніх сил.

Для визначення міцності, пружності і пластичності металу у виді зразків круглої (плоскої) форми випробовують на статичне розтягання – за ДСТ 14-97. Дослідження проводять на розривних машинах і одержують діаграму розтягання (рис. 3.2). На осі абсцис відкладають значення деформації, на осі ординат – навантаження, що прикладене до зразка.

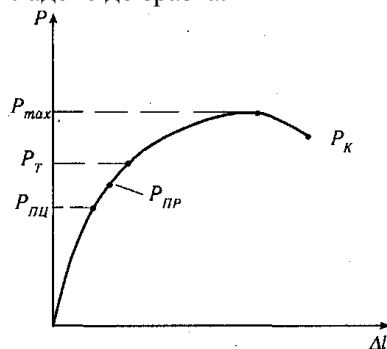


Рисунок 3.2 – Умовна діаграма розтягання

*Ударна в'язкість* – здатність матеріалу чинити опір динамічним навантаженням. Ударна в'язкість визначається відношенням витраченої на руйнування зразка роботи до площі його поперечного перерізу і вимірюється в МДж/м<sup>2</sup>:

$$K_C = K/F$$

Визначення ударної в'язкості особливо важливе для металів, що працюють при низьких температурах і виявляють схильність до холодноламкості. Чим нижче поріг холодноламкості, тобто температура, при якій грузле руйнування матеріалу переходить у тендітне, і більше запас в'язкості матеріалу, тим більше надійним є матеріал.

*Холодноламкість* – зниження ударної в'язкості при низьких температурах.

*Циклічна в'язкість* – здатність матеріалу поглинати енергію при повторно-перемінних навантаженнях. Матеріали з високою циклічною в'язкістю швидко гасять вібрації, що є причиною передчасного руйнування. Наприклад, чавун має високу циклічну в'язкість. Для станин верстатів і корпусних деталей чавун цінніше вуглецевої сталі.

*Міцність* – здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією навантаження. Міцність оцінюється максимальним навантаженням, що витримує матеріал без руйнування ( $P_{max}$ ), навантаженням при якій відбувається пластична деформація ( $P_T$ ). До характеристик поведінки матеріалу відносять навантаження при яких залишкове подовження досягає 0,05 % ( $P_{пр}$ ) і навантаження при якого виконується закон Гука ( $P_{гк}$ ), а також навантаження при якій відбувається руйнування ( $P_k$ ).

Чим вище відносно подовження і звуження для матеріалу, тим він більш пластичний. У крихких матеріалів ці значення близькі до нуля. Крихкість конструкційного матеріалу – властивість негативна.

*Пластичність* – це здатність матеріалу одержувати залишкову зміну форми і розміру без руйнування. Пластичність визначається відносним подовженням  $\delta$  зразка при розриві:

$$\delta = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} 100\%,$$

де  $\ell$  – довжина зразка після розриву, мм;  $\ell_0$  – первісна довжина зразка, мм.

*Надпластичністю* варто назвати здатність металу до значної рівномірної деформації без деформаційного зміцнення (наклепу).

*Твердість* – здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього іншого, більш твердого тіла. Високу твердість мають металорізальні інструменти: різці, свердли, фрези. Твердість металу визначають по Бринелю, Роквелу і Віккерсу.

*Утома* – процес поступового нагромадження ушкоджень матеріалу під дією повторно-перемінних напруг, що приводять до утворення тріщин і руйнувань.

Утома металу викликається концентрацією напруг в окремих його обсягах (у місцях нагромадження неметалічних і газових включень, структурних дефектів).

*Витривалість* – властивість матеріалу протистояти утомі. Границя витривалості – максимальне напруження (задане число циклів навантаження), що може витримати метал без руйнування. Між границями витривалості і міцності існує приблизна залежність:

$$\sigma_{-1} = 0,43\sigma_B; \sigma_{-1p} = 0,43\sigma_B,$$

де  $\sigma_{-1}$ ,  $\sigma_{-1p}$  – границі витривалості відповідно при вигині і розтяганні-стиску.

### 3.4 Технологічні властивості

Технологічні властивості характеризують здатність металу піддаватися обробці в холодному і гарячому стані, них визначають при технологічних іспитах, оцінюючи придатність металу до тому або іншого способу обробки.

Після технологічних іспитів зразок оглядають. При відсутності тріщин, надривів, розшарування, зламування вважається, що він витримав іспити.

До найважливіших технологічних властивостей відносять: оброблюваність різанням, зварюваність, ковкість, ливарні властивості і т.п..

*Оброблюваність різанням* – одне з найважливіших технологічних властивостей, тому що переважна більшість деталей вузлів і конструкцій піддається механічній обробці. Одні метали обробляються добре, інші, що мають висока твердість – слабо. Дуже грузлі метали і метали з низькою твердістю також погано обробляються. Поліпшити обробку сталі різанням можна термічною обробкою.

*Зварюваність* – здатність металів утворювати нероз'ємне з'єднання, властивості якого близькі до властивостей основного металу, неї визначають іспитом звареного зразка на вигин або розтягання.



*Ковкість* – здатність металу оброблятися тиском у холодному або гарячому стані без ознак руйнування. Ковкість визначають іспитами на осаджування до заданого ступеня деформації. Якщо на бічній поверхні не виходить тріщина, метал придатний для обробки тиском.

*Ливарні властивості* – здатність металів утворювати виливка без тріщин, раковин, інших дефектів. Основні ливарні властивості – Рідкотекучість, усадка, ліквация.

*Рідкотекучість* – здатність розплавленого металу добре заповнювати порожнечу ливарної форми.

*Усадка* – зменшення обсягу металу при кристалізації. Усадка – причина утворення усадочних раковин і усадочної пористості в злитках і виливках.

*Ліквация* – неоднорідність хімічного складу сплавів, що виникає при кристалізації й обумовлена тим, що сплави кристалізуються не при одній конкретній температурі, а в інтервалі температур. Ніж більш широкий температурний інтервал кристалізації, тим сильніше розвивається ліквация.

### 3.5 Хімічні властивості

До хімічних властивостей відноситься хімічна стійкість проти дії зовнішнього середовища (кислот, лугів, води, повітря, газів, високої температури і т.п.).

Для досягнення високої хімічної стійкості металевих деталей різних машин роблять спеціальні нержавіючі кислотостійкі сталі, а також виконують різні захисні покриття.

### 3.6 Експлуатаційні (спеціальні) властивості

Ці властивості, у залежності від умов роботи, визначають спеціальними іспитами. Одним з найважливіших експлуатаційних властивостей є зносостійкість.

*Зносостійкість* – властивість металу чинити опір зносу, тобто поступовому зменшенню розмірів і зміні форми тіла внаслідок руйнування поверхневого шару виробу при терті.

Іспит металів на зношування проводять у лабораторних і експлуатаційних умовах шляхом виміру розмірів, зважування зразків і інших методів.

До експлуатаційних властивостей також відносяться холодостійкість, жароміцність, антифрикційність, поведінка металів при підвищених і знижених температурах і тиску. Крім того, це властивості, рівень яких недостатній у звичайних сплавах. Але вони них здобувають, якщо в сплави при плавці вводять спеціальні домішки. Наприклад, сплави з високим активним опором, немагнітні сплави, сплави з особливими магнітними властивостями, з постійним коефіцієнтом розширення.

### 3.7 Пружна і пластична деформація.

*Деформація* – зміна форми і розмірів тіла під впливом прикладених зовнішніх сил або в результаті фізико-механічних процесів, що виникають у самому тілі (наприклад, структурних перетворень, усадки і т.п.). Деформація може бути *пружна*, зникаюча після зняття навантаження, і *пластична*, що залишається після зняття навантаження.

Пружна деформація при збільшенні навантаження переходить у пластичну, при подальшому підвищенні навантаження відбувається руйнування тіла.

На рис. 3.3 зображена діаграма навантаження–деформація, типова для низьковуглецевої сталі. По осі ординат відкладають навантаження, а по осі абсцис – абсолютні подовження.

При пружній деформації під дією зовнішньої сили в кристалічних ґратах змінюється відстань між атомами. Зняття навантаження усуває і причину, що викликає зміну міжатомної відстані, при цьому деформація зникає.

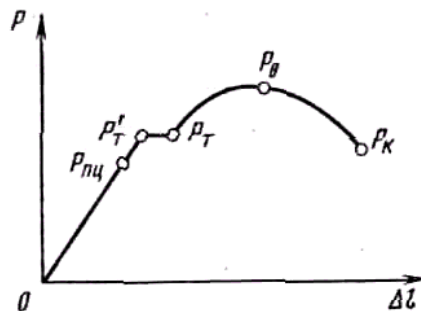


Рисунок 3.3 – Діаграма навантаження – деформація:

$P_{пц}$  – навантаження при межі пропорційності;  $P'_T$  – навантаження при верхньому границі текучості;  $P_T$  – постійне навантаження;  $P_B$  – навантаження при граничній міцності;  $P_K$  – навантаження в момент руйнування зразка

Чим меншу деформацію викликає навантаження, тим жорсткіше матеріал. Отже, модуль пружності характеризує твердість матеріалу. Розрізняють два види модуля пружності: *модуль нормальної пружності* (модуль Юнга) і *модуль дотичної пружності* (Гука) У першому випадку сили прагнуть відірвати атоми друг від друга, у другому – зсунути. Модуль Юнга ( $E$ ) у 2,5–3 рази більше модуля Гука ( $G$ ). Зокрема, для заліза  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа, а  $G = 0,8 \cdot 10^5$  МПа.

Значення модулів пружності визначаються силами міжатомного взаємодії і є константами матеріалу. Наприклад, модуль нормальної пружності для алюмінію  $0,8 \cdot 10^5$  МПа, для заліза  $2 \cdot 10^6$  МПа. Найменш твердим матеріалом є гума  $E=0,00007 \cdot 10^8$  МПа, а найбільш твердим – алмаз  $E=12 \cdot 10^5$  МПа.

### 3.8 Руйнування.

Із сказаного в раніше витікає, що від металу, як конструкційного матеріалу, потрібно не лише високий опір деформації (пружною, такою, що характеризується модулями  $E$  і  $G$ ; пластичною - межами  $\sigma_{0,2}$  і  $\sigma_b$ ), але і високе; опір руйнуванню.

Звичайний опір деформації об'єднують в загальне поняття міцність, а опір руйнуванню - надійність.

Якщо руйнування відбувається не за один, а за багато актів вантаження, причому за кожен акт відбувається мікроруйнування, то це характеризує довговічність матеріалу.

Міцність - це здатність твердого тіла чинити опір деформації або руйнуванню під дією статичних або динамічних навантажень. Міцність визначають за допомогою спеціальних механічних випробувань зразків, отриманих з досліджуваної деталі або матеріалу, з якого її виготовляють.

### 3.9 Методи визначення механічних властивостей

Розрізняють статичні і динамічні додатки навантажень. Для визначення міцності при статичних навантаженнях зразки випробовують на розтягування, стискування, вигин і кручення. Випробування на розтягування - обов'язкові. Межа міцності (тимчасовий опір розриву) в МН:

$$\sigma_b = P_b / F_0$$

На рис. 3.4, а, б представлені типові зразки прямокутного і круглого перерізів для випробування на розтягування.

Міцність при динамічних навантаженнях визначають за даними випробувань на ударну в'язкість, на межу витривалості і повзучість. Найчастіше застосовують випробування на ударну в'язкість в МН м/м<sup>2</sup> (рис. 3.5):

$$a_n = \frac{A}{F}$$

де  $A$  - робота зламу;  $F$  - площа зразка в місці надрізу.

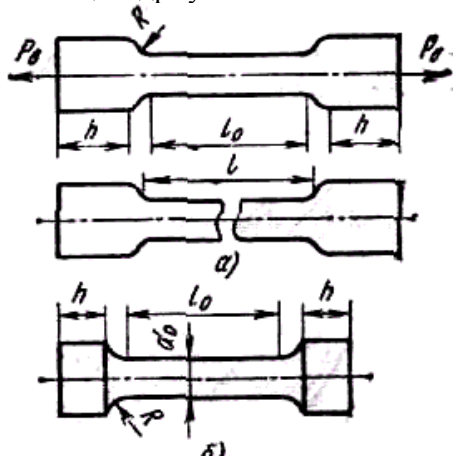


Рисунок 3.4 – Зразки для випробування на міцність і пластичність :

а - плоский для випробування на розтягування; б - круглий;  $h$  - довжина голівки, що закріплюється в захопленнях машини;  $l_0$  - розрахункова довжина зразка до випробування;

$l$  - довжина зразка після випробування;  $R$  - радіус закруглення;  $d_0$  - діаметр циліндричного зразка до випробування

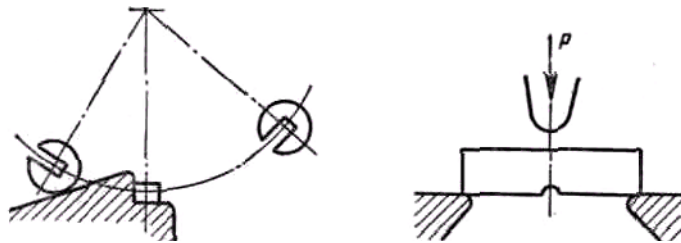


Рисунок 3.5 – Типовий зразок для визначення ударної в'язкості.

Пластичність - це здатність матеріалу отримувати залишкову зміну форми і розміру без руйнування. Пластичність визначається відносним подовженням  $\delta$  зразка при розриві:

$$\delta = \frac{\ell - \ell_0}{\ell_0} 100\%,$$

де  $\ell$  - довжина зразка після розриву, мм;  $\ell_0$  - первинна довжина зразка, мм.

Твердість - це здатність матеріалу чинити опір проникненню в нього іншого тіла. Твердість і її розмірність для одного і того ж матеріалу обумовлюються вживаним методом виміру. Наприклад, твердість по Брінеллю (НВ) в МН/м<sup>2</sup> визначають з відношення навантаження  $P$ , прикладеного до кульки, до поверхні отриманого відбитку кульки:

$$НВ = \frac{P}{F_{отп}}$$

На рис. 3.6 приведена схема, по якій заміряють твердість; твердість перераховують по таблицях і емпіричних формулах.

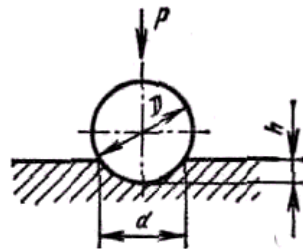


Рисунок 3.6 – Зразок для випробування твердості :

$D$  - діаметр кульки, мм;  $d$  - діаметр відбитку, мм;  $h$  - глибина відбитку, мм

У таблиці 3.1 дані фізико-механічні властивості металів і сплавів, що отримали найбільше поширення в машинобудуванні.

Таблиця 3.1 – Фізико-механічні властивості металів і сплавів

| Метал, сплав      | $\gamma$ , Г/см <sup>3</sup> | $\sigma_b$ , МН/м <sup>2</sup> | $\delta$ , % | НВ, МН/м <sup>2</sup> |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------|--------------|-----------------------|
| Залізо 99,99      | 7,57                         | 250–300                        | 50           | 800–900               |
| Сталь30           | 7,8                          | 500–550                        | 15–20        | 1200                  |
| Високоміцні сталі |                              | 1600-2400                      | 7–20         | 2400–3800             |
| Алюміній          | 2,7                          | 50–120                         | 10–25        | 2500–3000             |
| Сплави алюмінію   | 2,55                         | 150–600                        | 2–8          | 550–1000              |
| Титан             | 2,80                         | 300–750                        | 20–40        | 1800–2800             |
| Сплави титану     | 4,5                          | 1600–1700                      | 15–20        | 150–200               |

## ЛЕКЦІЯ №4 ТЕОРІЯ СПЛАВІВ

### 4.1 Поняття про сплави

Під сплавом розуміють речовина, отримана сплавкою двох або більш елементів. Можливі інші способи готування сплавів: спікання, електроліз, сублімація. У цьому випадку речовини називаються псевдосплавами.

Сплав, приготовлений переважно з металевих елементів і обласаючий металевих властивостей, називається металевим сплавом. Сплави мають більш різноманітний комплекс властивостей, що змінюються в залежності від складу і методу обробки.

### 4.2 Правило фаз

*Система* – група тіл виділюваних 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 утворюють систему. Як компоненти виступають чисті речовини і хімічні сполуки, якщо вони не дисоціюють на складові частини в досліджуваному інтервалі температур.

*Фаза* – однорідна частина системи, відділена від інших частин системи поверхневого розділу, при переході через яку структура і властивості різко змінюються.

*Варіантність (С)* (число ступенів волі) – це число внутрішніх і зовнішніх факторів (температура, тиск, концентрація), який можна змінювати без зміни кількості фаз у системі.

Якщо варіантність  $C = 1$  (моноваріантна система), то можливо зміну одного з факторів у деяких межах, без зміни числа фаз.

Якщо варіантність  $C = 0$  (ннваріантна система), то зовнішні фактори змінювати не можна без зміни числа фаз в системі

Існує математичний зв'язок між числом компонентів ( $K$ ), числом фаз ( $\Phi$ ) і варіантністю системи ( $C$ ). Це *правило фаз* або *закон Гиббса*

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

Якщо прийняти, що всі перетворення відбуваються при постійному тиску, то число перемінних зменшиться

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

де: 1 – враховує можливість зміни температури.

### 4.3 Типи, будова, властивостей сплавів

Будова металевого сплаву залежить від того, у які взаємодії вступають компоненти, що складають сплав. Майже всі метали в рідкому стані розчиняються друг у другу в будь-яких співвідношеннях. При утворенні сплавів у процесі їхнього затвердінні можливо різна взаємодія компонентів.

У залежності 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 у твердому стані і не вступають у хімічну реакцію з утворенням з'єднання.

Утворюються між елементами значно розрізняються по будові і властивостям, коли сила взаємодії між однорідними атомами більше чим між різнорідними. Сплав складається з кристалів вхідних у нього компонентів (рис. 4.1). У сплавах зберігаються кристалічні ґрати компонентів.

Сплави *хімічні сполуки* утворюються між елементами, що значно розрізняються по будові і властивостям, якщо сила взаємодії між різнорідними атомами більше, ніж між однорідними.

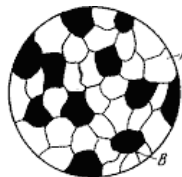


Рисунок 4.1 – Схема мікроструктури механічної суміші

Особливості цих сплавів:

1. Стальність складу, тобто сплав утвориться при визначеному співвідношенні компонентів, хімічна сполука позначається  $A_nB_m$ .
2. Утвориться специфічна, відмінна від ґрат елементів, що складають хімічну сполуку, кристалічна ґратка з правильним упорядкованим розташуванням атомів (рис. 4.2)
3. Яскраво виражені індивідуальні властивості
4. Стальність температури кристалізації, як у чистих компонентів

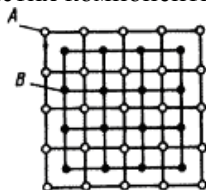


Рисунок 4.2 – Кристалічні ґрати хімічної сполуки

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

Характерною рисою твердих розчинів є наявність у їхніх кристалічних ґратах різнорідних атомів, при збереженні типу ґрати розчинника.

Твердий розчин складається з однорідних зерен (рис. 4.3).

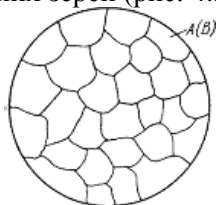


Рисунок 4.3 – Схема мікроструктури твердого розчину

#### 4.4 Класифікація сплавів твердих розчинів

По ступенях розчинності компонентів розрізняють тверді розчини:

- с необмеженою розчинністю компонентів;
- с обмеженою розчинністю компонентів.

При необмеженій розчинності компонентів кристалічні ґрати компонента розчинника в міру збільшення концентрації розчиненого компонента плавно переходять у кристалічні ґрати розчиненого компонента.

Для утворення розчинів з необмеженою розчинністю необхідні:

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

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

По характері розподілу атомів розчиненої речовини в кристалічних ґратах розчинника розрізняють тверді розчини:

- заміщення;
- упродовження;
- вирахування.

У розчинах заміщення в кристалічних ґратах розчинника частина його атомів заміщена атомами розчиненого елемента (рис. 4.4,а). Заміщення здійснюється у випадкових місцях, тому такі розчини називають неупорядкованими твердими розчинами.

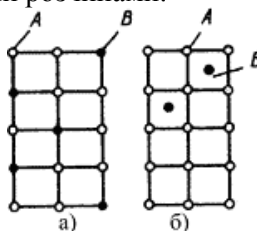


Рисунок 4.4 – Кристалічні ґрати твердих розчинів заміщення (а), упродовження (б)

При утворенні розчинів заміщення періоди ґрати змінюються в залежності від різниці атомних діаметрів розчиненого елемента і розчинника. Якщо атом розчиненого елемента більше атома розчинника, то елементарні осередки збільшуються, якщо менше – скорочуються. У першому наближенні ця зміна пропорційна концентрації розчиненого компонента. Зміна параметрів ґратки при утворенні твердих розчинів – важливий момент, що визначає зміна властивостей. Зменшення параметра веде до більшого зміцнення, чим його збільшення.

Тверді розчини впровадження утворюються впровадженням атомів розчиненого компонента в пори кристалічних ґрат розчинника (рис. 4.4 б).

Утворення таких розчинів, можливо, 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 у кристалічних ґратах металу, це викликає перекручування ґрат і в ній виникають напруги. Концентрація таких розчинів не перевищує 2-2.5%

Тверді розчини вираховання або розчини з дефектними ґратами. утворюються на базі хімічних сполук, при цьому можлива не тільки заміна одних атомів у вузлах кристалічних ґрат іншими, але й утворення порожніх, не зайнятих атомами, вузлів у ґратах.

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

#### 4.5 Класифікація типів перетворень

У рідкому стані можливо п'ять видів перетворень:

1) *Евтектичне*  $P \Leftrightarrow \alpha + \beta$

Одночасно з рідини кристалізується дві тверді фази.

2) *Перетектичне*  $P + \alpha \Leftrightarrow \beta$

Рідина, взаємодіючи з раніше утвореною твердою фазою утворить нову тверду фазу.

3) *Монотектичне*  $P^I \Leftrightarrow \alpha + P^{II}$

Рідина визначеного складу кристалізується з утворенням твердої фази і рідини нового складу.

4) *Синтектичне*  $P^I + P^{II} \Leftrightarrow \beta$

У результаті взаємодії рідин різного складу утвориться тверда фаза.

5) *Метатектичне*  $\beta \Leftrightarrow P^I + \alpha$

Тверда фаза плавиться з утворенням рідини і нової твердої фази

У твердому стані відбувається три перетворення:

1) *Евтектоїдне*  $\beta \Leftrightarrow \alpha + \gamma$

Тверда фаза при охолодженні розпадається на дві нові тверді фази.

2) *Перетектоїдне*  $\alpha + \gamma \Leftrightarrow \beta$

При взаємодії двох граничних твердих розчинів  $\alpha$  і  $\gamma$  утвориться проміжна тверда фаза  $\beta$ .

3) *Моноектоїдне*  $\beta^I \Leftrightarrow \beta^{II} + \alpha$

Ненасичений твердий розчин розпадається на два насичених твердих розчини з різним хімічним складом з однаковим типом кристалічних ґраток.

## ЛЕКЦІЯ №5 ДІАГРАМИ СТАНУ. Ч.1

### 5.1 Загальні вимоги до побудови діаграм стану

Діаграма стану являє собою графічне зображення стану будь-якого сплаву досліджуваної системи в залежності від концентрації і температури (рис. 5.1)

Діаграми стану показують стійкі стани, тобто стан, що за даних умов мають мінімум вільної енергії, і тому її також називають діаграмою рівноваги, тому що вона показує, які за даних умов існують рівноважні фази.

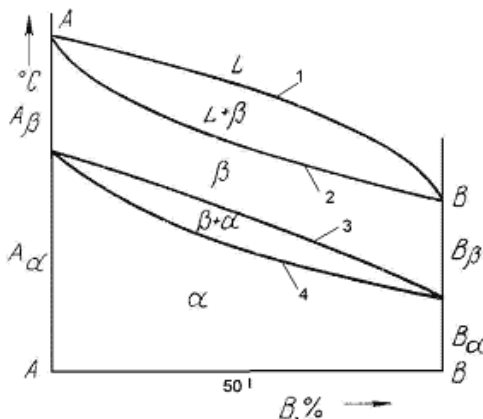


Рисунок 5.1 – Діаграма стану

Побудова діаграм стану найбільше часто здійснюється за допомогою термічного аналізу.

У результаті одержують серію криві охолодження, на яких при температурах фазових перетворень спостерігаються крапки перегину і температурні зупинки.

Температури, що відповідають фазовим перетворенням, називають критичними крапками. Деякі критичні крапки мають назви, наприклад, крапки кристалізації, що відповідають початкові, називають *крапками ліквідус*, а кінцеві кристалізації - *крапками солідус*.

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

Шкала концентрацій показує вміст компонента B. Основними лініями є лінії ліквідус (1) і солідус (2), а також лінії відповідним фазовим перетворенням у твердому стані (3, 4).

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

### 5.2 Експериментальні методи побудови діаграм стану

Найбільш розповсюджений метод побудови діаграми стану двокомпонентної системи – термічний. Схематично його представлено на рисунку 5.2.

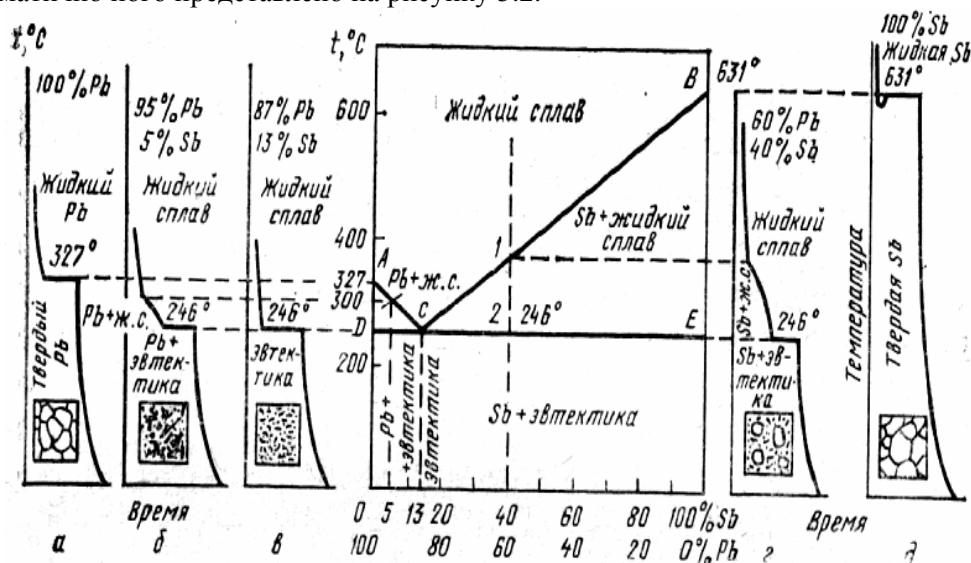


Рисунок 5.2 – Побудова діаграми стану термічним методом.

### 5.3 Основні види діаграм стану двокомпонентних сплавів. Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (сплави тверді розчини з необмеженою розчинністю)

Діаграма стану й криві охолодження сплавів системи представлені на рис. 5.3.

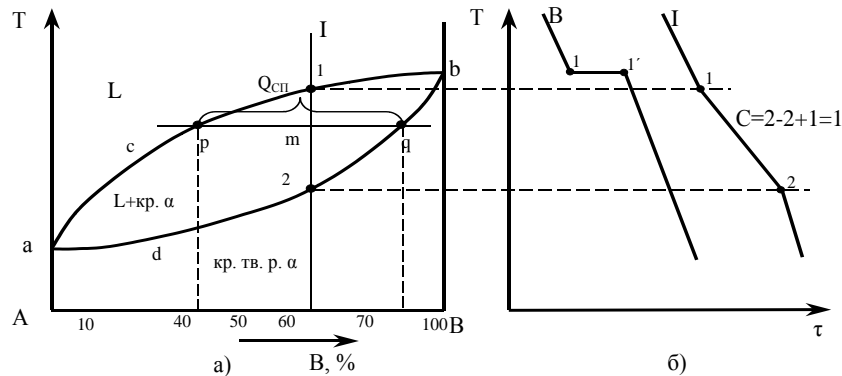


Рисунок. 5.3 Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (а); криві охолодження типових сплавів (б)

Спочатку одержують термічні криві. Отримані крапки переносять на діаграму, з'єднавши крапки початку кристалізації сплавів і крапки кінця кристалізації, одержують діаграму стану.

Проведемо аналіз отриманої діаграми.

1. Кількість компонентів:  $K = 2$  (компоненти А і В).
2. Число фаз:  $f = 2$  (рідка фаза L, кристали твердого розчину ( $\alpha$ ))
3. Основні лінії діаграми:

- acb - лінія ліквідус, вище цієї лінії сплави перебувають у рідкому стані;
- adb - лінія солідус, нижче цієї лінії сплави перебувають у твердому стані.

4. Характерні сплави системи:

Чисті компоненти А і В кристалізуються при постійній температурі, крива охолодження компонента В представлена на рис. 5.3,б.

Інші сплави кристалізуються аналогічно сплаву І, крива охолодження якого представлена на рис. 5.3, б.

### 5.4 Правило відрізків

Користуючись діаграмою стану можна для будь-якого сплаву при будь-якій температурі визначити не тільки число фаз, але і їх склад і кількісне співвідношення. Для цього використовується *правило відрізків*. Для проведення кількісного структурно-фазового аналізу через задану точку проводять горизонталь (коноду) до перетинання з найближчими лініями діаграми (ліквідус, солідус або осі компонентів).

а). Визначення складу фаз у точці m:

Для визначення складу фаз через задану точку m проводять горизонталь до перетинання з найближчими лініями діаграми (у цьому випадку - ліквідус і солідус). Склад рідкої фази визначається проекцією точки перетинання горизонталі з лінією ліквідус р на вісь концентрації. Склад твердої фази визначається проекцією точки перетинання горизонталі з лінією солідус q (або віссю компонента) на вісь концентрації. Склад рідкої фази змінюється по лінії ліквідусу, а склад твердої фази - по лінії солідуса. Зі зниженням температури склад фаз змінюється у бік зменшення змісту компонента В.

б). Визначення кількісного співвідношення рідкої й твердої фази при заданій температурі (у точці m):

*Кількісна маса фаз обернено пропорційна відріzkам проведеної коноди.* Розглянемо проведеному через точку m коноду і її відрізки.

Кількість усього сплаву ( $Q_{сп}$ ) визначається відрізком pq.

Відрізок, що прилягає до лінії ліквідус pm, визначає кількість твердої фази.

$$Q_{тв} = \frac{pm}{pq} \cdot 100\%$$

Відрізок, що прилягає до лінії солідус (або до осі компонента) mq, визначає кількість рідкої фази.

$$Q_{рідк} = \frac{mq}{pq} \cdot 100\%$$



## ЛЕКЦІЯ №6 ДІАГРАМИ СТАНУ. Ч.2

### 6.1 Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів у твердому стані (механічні суміші)

Діаграма стану й криві охолодження типових сплавів системи представлені на рис. 6.1.

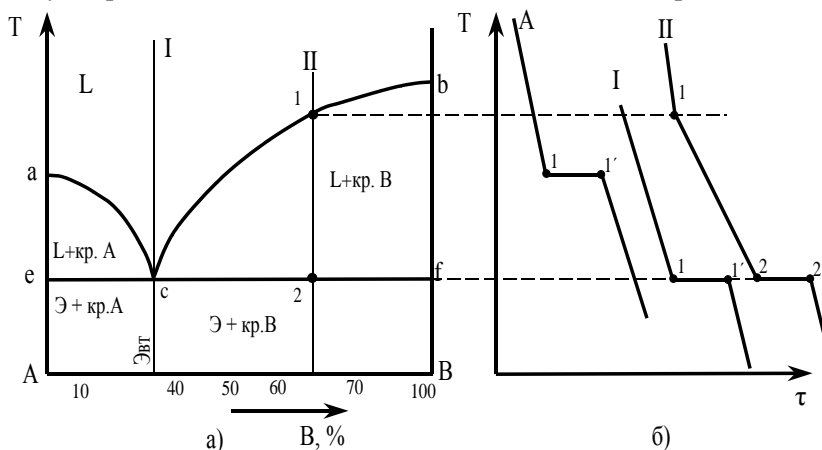


Рисунок 6.1 – Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів у твердому стані (а) і криві охолодження сплавів (б)

Проведемо аналіз діаграми стану.

1. Кількість компонентів:  $K = 2$  (компоненти А и В);

2. Число фаз:  $f = 3$  (кристали компонента А, кристали компонента В, рідка фаза).

3. Основні лінії діаграми:

- лінія ліквідус асб, складається із двох частин, що сходяться в одній точці;
  - лінія солідус есф, паралельна осі концентрацій прагне до осей компонентів, але не досягає їх;
4. Типові сплави системи.

а) Чисті компоненти, кристалізуються при постійній температурі, на рис 6.1 б показаний крива охолодження компонент А.

б). Евтектичний сплав - сплав, що відповідають концентрації компонентів у точці „с” (сплав І).

Крива охолодження цього сплаву, аналогічна кривим охолодження чистих металів (рис. 6.1 б)

Евтектика - дрібнодисперсна механічна суміш різнорідних кристалів, що кристалізуються одночасно при постійній, самій низькій для розглянутої системи, температурі.

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

в) Інші сплави системи аналогічні сплаву ІІ, криву охолодження сплаву див на рис 6.1.б.

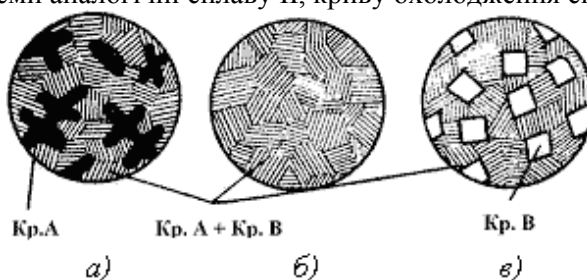


Рисунок 6.2 – Схема мікроструктур сплавів: а - доевтектичного, б - евтектичного, в – заевтектичного.

5. При проведенні кількісного структурно-фазового аналізу, конода, проведена через задану точку, перетинає лінію ліквідус і осі компонентів, тому состав твердої фази або 100 % компонента А, або 100 % компонента В.

### 6.2 Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів в твердому стані

Діаграма стану і криві охолодження типових сплавів системи представлені на рис.6.3.

1. Кількість компонентів:  $K = 2$  (компоненти А і В);

2. Число фаз:  $\Phi=3$  (рідка фаза і кристали твердих розчинів  $\alpha$  (розчин компонента В в компоненті А) і  $\beta$  (розчин компонента А в компоненті В)).

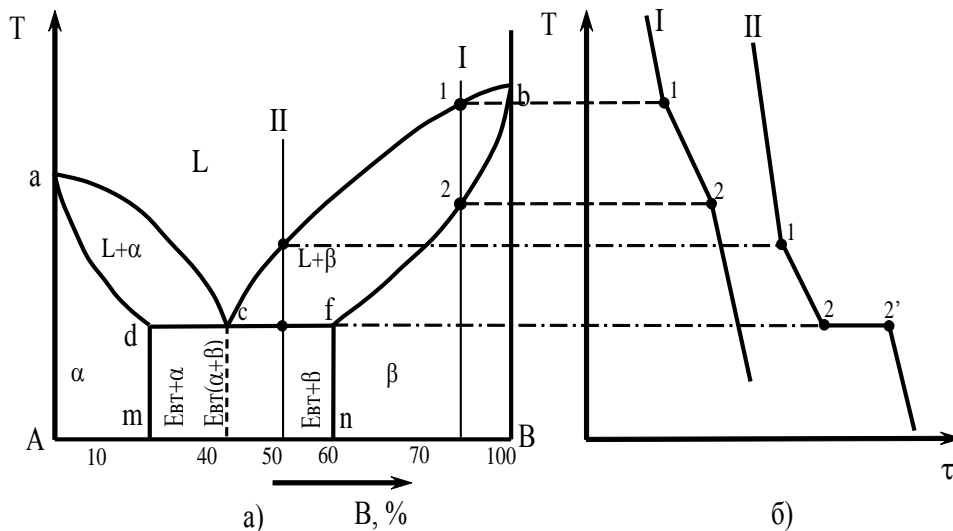


Рисунок. 6.3 – Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів в твердому стані (а) і криві охолодження типових сплавів (б).

### 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 В в компоненті А;
- $fn$  – лінія граничної концентрації компоненту А в компоненті В.

### 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. 6.3 б. При концентрації компонентів, що перевищує граничні значення (на ділянці  $dcf$ ), сплави кристалізуються аналогічно сплавам механічним сумішам, див. криву охолодження сплаву II на рис. 6.3,б.

Сплав з концентрацією компонентів, відповідній крапці  $c$ , є евтектичним сплавом. Сплав складається з мелкодисперсних кристалів твердих розчинів  $\alpha$  і  $\beta$  евт. (кр. тв. р-ну  $\alpha$  + кр. тв. р-ну  $\beta$ ) Кристали компонентів в чистому вигляді ні в одному із сплавів не присутні.

## 6.3 Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічні сполуки.

Діаграма стану сплавів представлена на рис. 6.4.

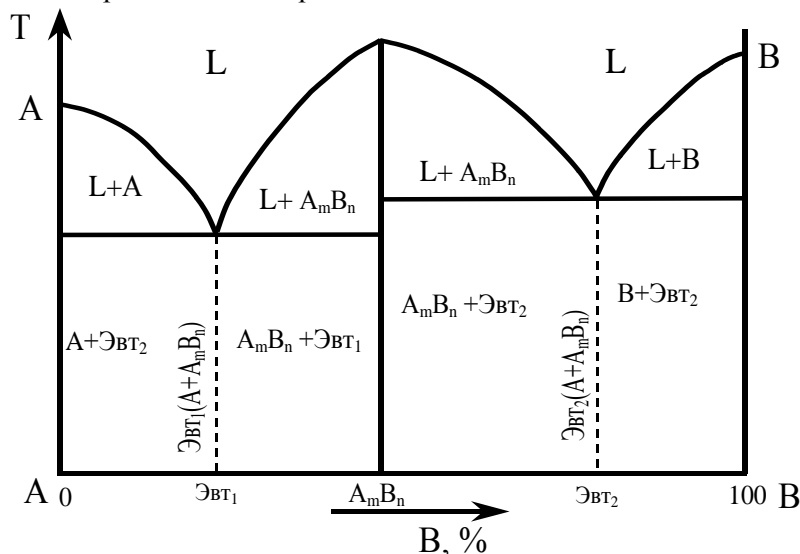


Рисунок 6.4 – Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічні сполуки

Діаграма стану складна, 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.

Евт1 (кр. А + кр. AmBn);

Евт2 (кр. В + кр. AmBn).

#### 6.4 Діаграма стану сплавів, що мають поліморфні перетворення

Діаграма стану представлена на рис. 6.5.

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 В в компоненті А;
- sk – лінія змінної граничної розчинності компоненту А в компоненті В.

Крива охолодження сплаву I представлена на рис. 6.5 б.

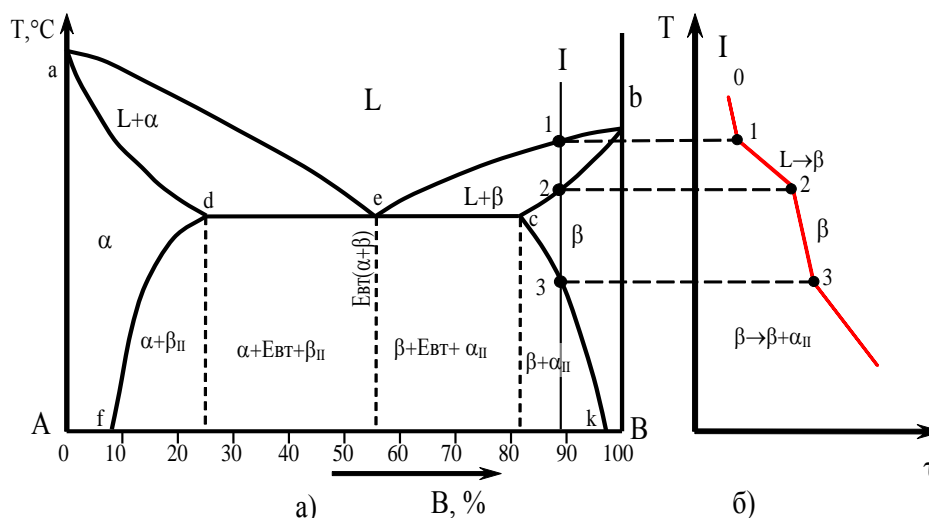


Рисунок 6.5 – Діаграма стану сплавів, що мають фазові перетворення в твердому стані (а) і крива охолодження сплаву (б)

*Процес кристалізації сплаву I:* до крапки 1 охолоджується сплав в рідкому стані. При температурі, що відповідають крапці 1, починають утворюватися центри кристалізації твердого розчину  $\beta$ . На ділянці 1–2 йде процес кристалізації, що протікає при температурі, що знижується. Досягши температури відповідній крапці 2, сплав твердне, при подальшому пониженні температури охолоджується сплав в твердому стані, що складається з однорідних кристалів твердого розчину  $\beta$ . Досягши температури, відповідній крапці С, твердий розчин  $\beta$  виявляється насиченим компонентом В, при нижчих температурах розчинність другого компоненту зменшується, тому з -раствора починає виділятися надмірний компонент у вигляді кристалів  $\alpha_{II}$ . За крапкою С сплав складається з двох фаз: кристалів твердого розчину  $\beta$  і вторинних кристалів твердого розчину  $\alpha_{II}$ .

#### 6.5 Зв'язок між властивостями сплавів і типом діаграми стану

Оскільки вид діаграми, також як і властивості сплаву, залежить від того, які з'єднання або які фази утворили компоненти сплаву, то між ними повинен існувати певний зв'язок. Ця залежність встановлена Курнаковим (див. рис. 6.6.).

1. При утворенні механічних сумішей властивості змінюються по лінійному закону. Значення характеристик властивостей сплаву знаходяться в інтервалі між характеристиками чистих компонентів.
2. При утворенні твердих розчинів з необмеженою розчинністю властивості сплавів змінюються по криволінійній залежності, причому деякі властивості, наприклад, електроопір, можуть значно відрізнятися від властивостей компонентів.
3. 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 крапки на прямій є властивостями чистих фаз, гранично насичених твердих розчинів, створюючих дану суміш.

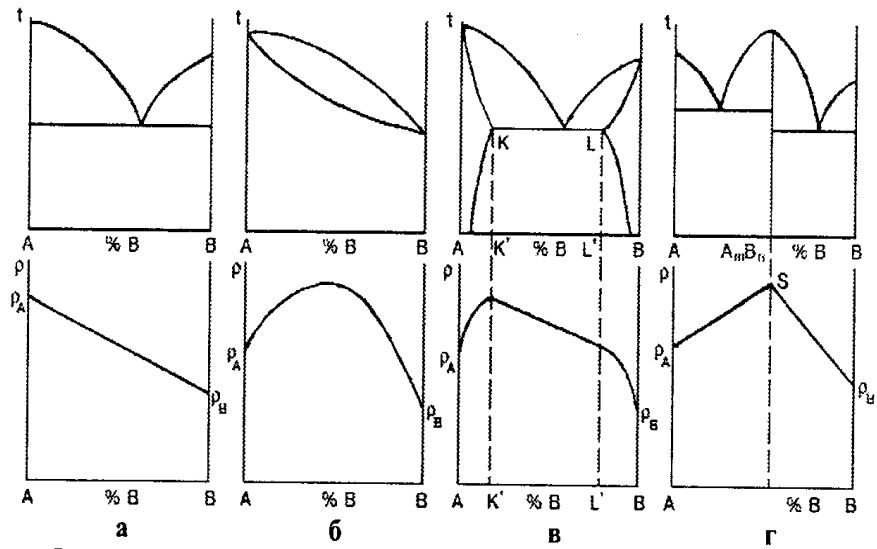


Рисунок 6.6 – Зв'язок між властивостями сплавів і типом діаграми стану

4. При утворенні хімічних сполук концентрація хімічної сполуки відповідає максимуму на кривій. Ця точка перелому, відповідна хімічній сполуці, називається сингулярною крапкою.

## ЛЕКЦІЯ №7 ЗАЛІЗО-ВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ. Ч. 1.

### 7.1 Діаграма «Залізо-вуглець»

Уперше поклав початок вивченню діаграми залізо-вуглець у 1868 р. Д.К. Чернов, що вказав на існування критичних точок у сплаві залізобуглецевої системи, зобразив сталеву частину діаграми і довів існування фазових перетворень у системі при переході через критичні крапки.

Залізо з вуглецем утворюють ряд хімічних сполук  $Fe_3C$ ,  $Fe_2C$ ,  $Fe$  і два твердих розчини  $\alpha$ -Fe і  $\gamma$ -Fe. Діаграму стану залізобуглецевих сплавів (рис. 7.1) зазвичай представляють від 0 до 6,67% вуглецю, тобто діаграма розглядається між 100% Fe і 100%  $Fe_3C$  - цементит (або карбід заліза).

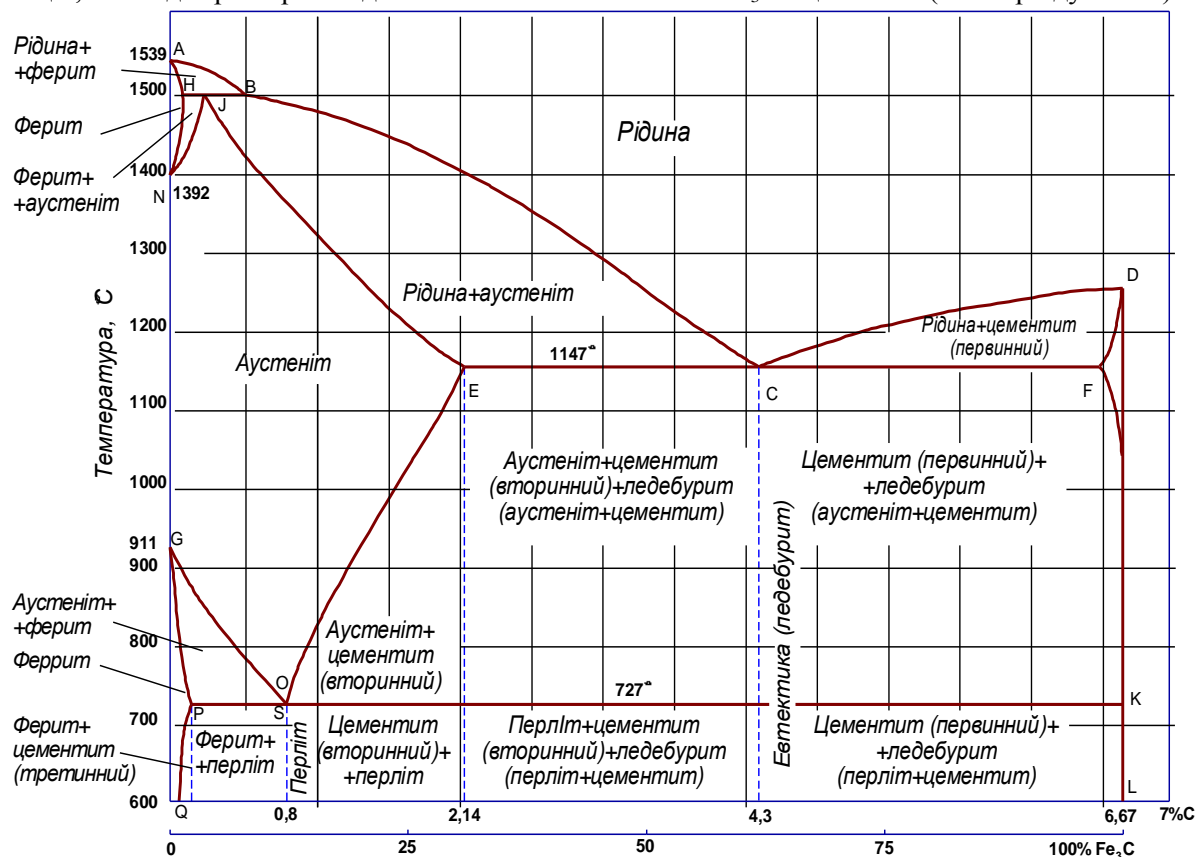


Рисунок 7.1 – Діаграма стану Fe-C

### 7.2 Компоненти, фази, перетворення

Основними компонентами в залізобуглецевих сплавах є залізо і вуглець. Майже у всіх сплавах системи Fe-C у малих кількостях маютьс $\ddot{y}$  Si, Mn, P, S, H $_2$ , N $_2$ , O $_2$  і ін. До залізобуглецевих сплавів відносять сталі і чавуни.

Залізо – метал срібlisto-сірого кольору, четвертого періоду, восьмої групи таблиці Д.І.Менделєєва, атомний номер 26, атомна маса 56. Чисте залізо містить не більш 0,0001% домішок і є дуже дорогим металом. На практиці застосовують технічне залізо залізо – АРМКО, що містить ~0,1% домішок (C, Mn, Si, S, P і ін.). Механічні властивості заліза: HB ~80,  $\sigma_B$ ~250 МПа,  $\delta$ ~50%,  $\psi$ ~80%. Температура плавлення 1539°C, щільність 7,85 г/см $^3$ .

Другим основним компонентом залізобуглецевих сплавів є вуглець.

Вуглець - неметалічний елемент другого періоду, четвертої групи, має дві алотропічні форми: графіт і алмаз.

Графіт має незначну міцність і слабовиражені металеві властивості, HB ~3, атомна маса 12, атомний номер 6, щільність 2,25 г/см $^3$ , температура плавлення 3500°C. Міцність графіту зі збільшенням температури аномально росте: при 20°C  $\sigma_B$ =20 МПа, при 2500°C  $\sigma_B$ = 40 МПа. При 2500°C графіт міцніше за всі тугоплавкі елементи. Графіт має шаруваті гексагональні кристалічні ґрати, атомний радіус 0,77А, має досить високу електропровідність, непрозорий і має металевий блиск. Вуглець із залізом утворюють два твердих розчини і три хімічні сполуки.

Алмаз - вільна форма вуглецю, що існує в природі. Самий твердий природний мінерал з ну-

льовою пластичністю. Відносно твердості алмаза виконуються всі види вимірювання твердості. Наприклад, твердість по Роквеллу прийнята HRC100; по Бринеллю - HB 1000, по Моосу - дорівнює 10 і т.д. (Твердість тальку по Моосу прийнята за 1).

Лінія ABCD відповідає лінії ліквідус – лінія початку кристалізації сплаву.

Лінія ANJESFD - лінія солідус - лінія закінчення кристалізації сплавів.

Крапка A (1539°C) - температура плавлення (затвердіння) чистого заліза, крапка D (~1550°C) - температура плавлення (затвердіння) цементиту.

Цементит - це хімічна сполука заліза з вуглецем (карбід заліза) Fe<sub>3</sub>C, містить 6,67% вуглецю; має складні ромбічні ґрати з щільним упакуванням атомів. До температури 210°C цементит феромагнітний - має високу твердість HB≈800, крихкий, практично з нульовою пластичністю. Ця метастабільна фаза за певних умов розпадається, виділяючи вільний вуглець а виді графіту. Цементит має металевий блиск, слабомагнітний, погано проводить електричний струм і тепло.

Лінія АВ - лінія початку кристалізації α-твердого розчину втілення вуглецю в ґратах ОЦК, який називають ферит (високотемпературна модифікація); він існує в області АНН. В області АВН - рідина+феррит. Максимальна розчинність вуглецю в залізі в точці Н 0,1% при температурі 1499°C, мінімальна в крапці N 0,0% при температурі 1392°C. У крапці В вміст вуглецю 0,5% при температурі 1499°C.

Лінія НJB - лінія перитектичного перетворення. У точці J при вмісті вуглецю 0,16% існує три фази: високотемпературний ферит крапки Н + рідина складу точки В + аустеніт крапки J.

По лінії ліквідус ВР кристалізується другий твердий розчин втілення вуглецю в ґратах ГЦК, і називають його γ-твердий розчин – аустеніт. Однорідний аустеніт існує в області NJESG.

Аустеніт - твердий розчин втілення вуглецю в γ-залізо (Fe-γ) із гранецентрованими ґратами, координаційним числом К12. Гранична максимальна розчинність вуглецю в аустеніті 2,14% при температурі 1147°C, і мінімальна - 0,8% при 727°C: існує тільки при високих температурах від лінії солідус до 727°C; має твердість HB 160-200, високу пластичність δ=40, ψ=50% і низькі границі текучості і міцності. Чим вище температура нагрівання сталі, тим крупніше зерна аустеніту.

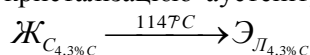
Лінія SE на діаграмі - лінія граничної розчинності вуглецю в аустеніті.

Зі зниженням температури з аустеніту виділяється цементит вторинний (Fe<sub>3</sub>C)<sub>ц</sub>.

По лінії ліквідусу CD кристалізується цементит. Він названий первинним, тому що кристалізується з рідкої фази.

У крапці С з рідини складу 4,3% вуглецю при температурі 1147°C кристалізується евтектика – ледебурит.

Ледебурит - евтектика (механічна суміш), що утвориться з рідкого розплаву з одночасною кристалізацією аустеніту і цементиту при температурі 1147°C і вмістом вуглецю 4,3% по реакції



Ледебурит складається:  $Э_{L_{4,3\%C}} = A_{2,14\%} + Ц_{6,67\%}$

(Слово «евтектика» означає – „низькоплавлячийся” – сплав складу 4,3%С з найнижчою температурою плавлення).

Твердість ледебуриту HB≈700, має високу крихкість. Від температури 1147°C до 727°C ледебурит складається з аустеніту і цементиту.

Між лініями ліквідус і солідус ліворуч і праворуч від крапки «С» розташовані двофазні області, ліворуч в області знаходиться аустеніт + рідина, праворуч - цементит + рідина.

На діаграмі стану маються дві лінії, паралельні осі концентрацій: лінія ECF при температурі 1147°C - це лінія евтектичного перетворення. Вздовж усієї цієї лінії закінчує кристалізацію сплав складу 4,3% вуглецю - ледебурит. На лінії ECF знаходяться в рівновазі три фази: аустеніт + рідина + цементит.

Друга лінія PSK (температура 727°C) - це лінія евтектоїдного, аустенітно-перлітного перетворення. Тут також знаходяться в рівновазі три фази: аустеніт + ферит + цементит.

Перліт - евтектика на відміну від ледебуритної евтектики називається евтектоїд (означає подібний до евтектики). Це теж механічна суміш з фериту і цементиту з вмістом вуглецю 0,8%, утворюється при постійній температурі 727°C (на діаграмі крапка «S») по реакції  $A_{0,8\%C} \xrightarrow{727^{\circ}C} П_{0,8\%C}$ , перліт складається з двох фаз:  $П_{0,8} = Ф_{0,023} + Ц_{6,67}$ . Механічні властивості перліту залежать від розмірів і форми цементиту (зернистого або пластинчастого): HB ≈ 260, σ<sub>y</sub> = 820 МПа, δ=15%.

В області GPQ існує низькотемпературна модифікація α-твердого розчину – ферит (α-Fe).

Ферит - твердий розчин втілення вуглецю в α-залізі (низькотемпературна модифікація). Він м'який HB≈80, δ≈40% міцність σ<sub>y</sub>≈250 МПа, сильно магнітний, добре проводить тепло й електрику.

Кристалічні грати кубічна, об'ємно центрована (ОЦК) з координаційним числом К8. При кімнатній температурі ферит містить 0,006%, а при температурі 727°C – 0,023% вуглецю. Лінія PQ на діаграмі – лінія граничної розчинності вуглецю у фериті, зі зниженням температури з фериту виділяється цементит третинний (під лінією PQ). Ферит – це технічно чисте залізо; добре штампується, протягується, прокочується.

Сплави із вмістом вуглецю до 2,14% називають сталями. Сталі підрозділяються на доевтектоїдні із вмістом вуглецю до 0,8% зі структурою ферит+перліт; евтектоїдні, із вмістом вуглецю 0,8% зі структурою перліт, і заевтектоїдні, із вмістом вуглецю від 0,8 до 2,14%, зі структурою перліт + цементит.

Чавун відрізняється від сталі великим змістом вуглецю – більш 2,14%. Володіє гарними ливарними властивостями. У залежності від стану вуглецю в чавуні розрізняють білий, сірий, ковкий і високоміцний чавуни.

Чавун не обробляється пластичною деформацією, куванням, штампуванням, пресуванням. Відливка з чавунів приблизно в 3-3,5 рази дешевше, ніж зі сталі, тому 70-80% від ваги машини металорізального устаткування та ін. виготовлені із сірого чавуна.

У чавунах, як і в сталях, присутні шкідливі домішки P і спеціальні S, і введені домішки Mn і Si.

Марганець нейтралізує вплив сірки, трохи перешкоджає графітизації.

Кремній при зміні 2,8-3,8% сприяє графітизації – одержанню графіту пластинчастої форми.

Чавуни, у які вводяться легуючі елементи Cг, Ni, Si>3,5%, Mn>1,5%, Cu, Al і ін., називають спеціальними або легованими.

### 7.3 Практичне застосування діаграми Fe-Fe<sub>3</sub>C

Діаграму Fe-Fe<sub>3</sub>C використовують для визначення видів і температурних інтервалів при термічній обробці сталі і при обробці тиском, температури плавлення і заливання сплаву і ливарних властивостей сплаву (рідкотекучості, усадки).

### 7.4 Вуглецеві сталі

Сталі є найбільш численними сплавами і широко застосовуються в промисловості як основний машинобудівний матеріал. Сталі класифікують по хімічному складі, способів виробництва і застосуванню.

По хімічному складу класифікують в основному конструкційні сталі. Відповідно до цієї класифікації сталі підрозділяють на вуглецеві, хромисті, хромонікелеві і т.д.

По способу виробництва сталі класифікують на групи А, Б, В і Г.

**Група А.** До неї відносяться сталі звичайної якості. Вони можуть мати підвищений вміст сірки (до 0,055%) і фосфору (до 0,07%). Механічні властивості сталей звичайної якості нижче механічних властивостей сталей інших класів. Основним елементом, що визначає механічні властивості цих сталей, є вуглець.

**Група Б.** До неї відносяться якісні сталі вуглецеві або леговані. У цих сталях вміст сірки і фосфору не повинний перевищувати 0,035% кожного. Виплавляють їх в основних мартенівських печах.

**Група В.** До цієї групи відносяться високоякісні сталі, головним чином леговані, виплавлювані в електропечах. У цих сталях вміст сірки і фосфору не повинний перевищувати 0,025% кожного.

**Група Г.** сталі особливовисокоякісні, виплавлювані в електропечах, електрошлаковим переплавом або іншими методами. вміст сірки і фосфору до 0,015% кожного.

По застосуванню сталі підрозділяють на будівельні, машинобудівні (конструкційні, загальнопризначення), інструментальні, машинобудівні спеціалізованого призначення, з особливими фізичними властивостями, з особливими хімічними властивостями (стійкі проти корозії).

Будівельні сталі – це вуглецеві і деякі низьколеговані сталі з невеликим вмістом вуглецю – сталі звичайної якості.

Для машинобудівних сталей (конструкційних) загального призначення головною характеристикою є їхні механічні властивості, що залежать від вмісту вуглецю, що змінюється в межах 0,05–0,65%.

Інструментальні сталі мають високі твердість, міцність і зносостійкість. Їх використовують для виготовлення що ріже і вимірювального інструментів, штампів і т.д. Твердість і в'язкість залежать від змісту в інструментальних сталях вуглецю.

Машинобудівні сталі і сплави спеціалізованого призначення характеризуються їх механічними властивостями при низьких і високих температурах; фізичними, хімічними і технологічними влас-

тивостями. Вони можуть бути використані для експлуатації в особливих умовах (на холоді, при нагріванні, при динамічних і гідроабразивних навантаженнях і т.п.).

Сталі і сплави з особливими фізичними властивостями одержують ці властивості в результаті спеціального легування і термічної обробки. Їх застосовують в основному в приладобудуванні, електронної, радіотехнічної промисловості і т.д.

Сталі і сплави з особливими хімічними властивостями (стійкі проти корозії). Стійкості сталей проти корозії досягають при вмісті хрому не нижче 12,5–13%. сталі з високим вмістом хрому і нікелю – стійкі в агресивних середовищах.



## ЛЕКЦІЯ №8 ЗАЛІЗО-ВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ. Ч. 2

### 8.1 Чавуни

Білий чавун. Фазовий склад білого чавуна (при нормальній температурі) цементит і ферит. У білому чавуні весь вуглець знаходиться у формі цементиту. Білий чавун має високу твердість і крихкість, практично не піддається обробці різальним інструментом.

Сірий чавун. У структурі сірого чавуна мається графіт, кількість, форми і розміри якого змінюються в широких межах. Таким чином, у сірому чавуні міститься графіт, а в білому його немає. У мікроструктурі чавуна варто розрізняти металеву основу і графітні включення.

По будові металевої основи чавун розділяють на:

- перлітний чавун. Структура його складається з перліту з включеннями графіту. Як відомо, перліт містить 0,8 %C, отже, ця кількість вуглецю в сірому перлітному чавуні знаходиться в зв'язаному стані (тобто у виді  $Fe_3C$ ), інша кількість знаходиться у вільному виді, тобто у формі графіту;
- ферито-перлітний чавун. Структура цього чавуна складається з фериту + перліт і включення веретеноподібного графіту. У цьому чавуні кількість зв'язаного вуглецю менше 0,8% C;
- феритний чавун. У цьому чавуні металевою основою є ферит, і весь вуглець, наявний у сплаві, є присутнім у формі графіту.

Отже, за структурою сірі чавуни відрізняються від сталі тільки тим, що в чавунах маються графітні включення, що визначають специфічні властивості чавунів.

Графіт у чавунах може бути в чотирьох основних формах:

- пластинчастий графіт. У звичайному сірому чавуні графіт утвориться у виді пелюстків; такий графіт називається пластинчастий.
- вермикулярний графіт – у виді червоподібних прожилок;
- кулястий графіт. У сучасних так званих високоміцних чавунах, виплавлених із присадкою невеликої кількості магнію (або церію), графіт отримує форму кулі;
- пластівчастий графіт. Якщо при виливку одержати білий чавун, а потім, використовуючи нестійкість цементиту, за допомогою відпалу розкласти його, то графіт, що утвориться, отримує компакту, майже рівнобісну, але не округлу форму. Такий графіт називається пластівчастим або вуглецем відпалу.

Таким чином, чавун із пластинчастим графітом називають звичайним сірим чавуном, з червоподібним графітом – сірим вермикулярним; чавун з кулястим графітом – високоміцним чавуном і чавун із пластівчастим графітом – ковким чавуном.

### 8.2 Структура і властивості чавуна

Оскільки структура чавуна складається з металевої основи і графіту, то і властивості чавуна будуть залежати як від властивостей металевої основи, так і від кількості і характеру графітних включень.

Графіт у порівнянні зі сталлю володіє низькими механічними властивостями, і тому графітні включення можна вважати в першому наближенні просто порожнечами, тріщинами. Звідси випливає, що чавун можна розглядати як сталь, поцятковану великою кількістю порожнеч і тріщин. Природно, що чим більший об'єм займають порожнечі, тим нижче властивості чавуна. При однаковому обсязі порожнеч (тобто кількості графіту) властивості чавуна будуть залежати від їхньої форми і розташування. Отже, чим більше в чавуні графіту, тим нижче його механічні властивості, чим грубіше включення графіту тим більше вони роз'єднують металеву основу, тим гірше властивості чавуна. Найнижчі механічні властивості виходять тоді, коли графітні включення утворюють замкнутий кістяк.

При навантаженнях, що розтягують, полегшується утворення вогнищ Катастрофи по кінцях графітних включень. По механічних властивостях чавун характеризується низьким опором розвитку тріщини, і, отже, виявляє низькі механічні властивості при іспиті, де превалюють нормальні напруги, що розтягують, (наприклад, при іспиті на розтягання).

Якщо напруги, що розтягують, мають мінімальні значення, як наприклад при стиску, властивості чавуна виявляються досить високими і практично дуже близькими до властивостей сталі того ж складу і структури, що і металева основа чавуна.

Тому межа міцності при стиску і твердість чавуна залежать головним чином від будови металевої основи і мало відрізняються від цих властивостей сталі.

Такі ж властивості чавуна, як опір розриву, а також згину, крученню, в основному обумовлюються кількістю, формою і розмірами графітних включень; у даному випадку властивості чавуна

сильно відрізняються від властивостей сталі.

Сказане відноситься головним чином до сірого чавуна з пластинчастими включеннями графіту. В міру округлення графітних включень зазначений негативний вплив графітних включень зменшується.

Округлі включення кулястого графіту не створюють різкої концентрації напруг, такі включення не є «тріщинами» і чавун з кулястим графітом має значно більш високу міцність при розтяганні і згині, чим чавун із пластинчастим графітом (звідси і назва чавуна з кулястим графітом – високоміцний чавун). Ковкий чавун із пластинчастим графітом займає проміжне положення по міцності між звичайним сірим і високоміцним чавуном з вермикулярним графітом між сірим і ковким.

У ряді випадків саме завдяки наявності графіту чавун має переваги перед сталлю: по-перше, наявність графіту полегшує оброблюваність різанням, робить стружку ламкою; по-друге, чавун володіє гарними антифрикційними властивостями завдяки змащувальній дії графіту; по-третє, наявність графітних виділень швидко гасить вібрації і резонансні коливання; по-четверте, чавун майже нечутливий до дефектів поверхні, надрізам і т. д.

Варто також вказати кращі ливарні властивості в порівнянні зі сталлю. Більш низька температура плавлення і закінчення кристалізації при постійній температурі (утворення евтектики) забезпечують не тільки зручність у роботі, але і кращі рідкотекучість і заповнюваність форми. Описані переваги чавуна роблять його коштовним конструкційним матеріалом, широко застосовуваним у деталях машин, головним чином тоді, коли вони не випробують значних що розтягують і ударних навантажень.

### 8.3 Ковкий чавун

Ковким називається чавун із графітом в вигляді пластівців, що отримують з білого чавуна в результаті спеціального графітизуючого відпалу (томління).

При виробництві ковкого чавуна важливо одержати при розливі чисто білий чавун, тому що часткова графітизація при литті і, отже, утворення пластинчастого графіту викликають при наступній графітизації відкладення графіту на цих пластинках. Такий чавун буде мати знижені властивості, близькі властивостям звичайного сірого чавуна.

Незважаючи на прагнення отримати у відливці білий чавун, не слід надмірно збільшувати вміст елементів, що перешкоджають графітизації (наприклад, марганцю), тому що в цьому випадку буде важко провести графітизуючий відпал. Тому склад ковкого чавуна обмежується порівняно вузькими межами

Звичайний склад ковкого чавуна: 2,4–2,8%С; 0,8–1,4%Si; <1%Mn; <0,1%S, <0,2%P.

Через низький вміст вуглецю виходить мала кількість графітних утворень і поліпшується якість чавуна. Однак чавун з таким низьким вмістом вуглецю не можна приготувати у вагранці, і для розплавлення ковкого чавуна користуються спеціальними печами, що, підвищує вартість виробу. Однак основна частина витрат на одержання виробу з ковкого чавуна приходить на відпал, що є тривалою і дорогою операцією.

### 8.4 Фазові перетворення в типових сплавах

Елементи, уводяться спеціально в сталь у певних концентраціях з метою зміни її будови й властивостей, називаються легуючими елементами, а сталі - легованими.

Вміст легуючих елементів може змінюватися в дуже широких межах: хром або нікель - 1% і більше відсотків; ванадій, молібден, титан, ніобій - 0,1...0,5%; кремній і марганець - більше 1 %. При вмісті легуючих елементів до 0,1 % - мікролегування.

У конструкційних сталях легування здійснюється з метою поліпшення механічних властивостей (міцності, пластичності). Крім того, змінюються фізичні, хімічні, експлуатаційні властивості.

Легуючі елементи підвищують вартість сталі, тому їхнє використання повинне бути строго обґрунтовано.

Переваги легованих сталей:

- особливості виявляються в термічно обробленому стані, тому виготовляються деталі, що піддаються термічній обробці;
- покращені леговані сталі мають більше високі показники опору пластичним деформаціям;
- легуючі елементи стабілізують аустеніт, тому прогартовуємість легованих сталей вище;
- можливе використання більше «м'яких» охолоджувачів (знижується брак по гартівних тріщинах і жолобленню), тому що гальмується розпад аустеніту;

- підвищуються запас в'язкості й опір холодноламкості, що приводить до підвищення надійності деталей машин.

Недоліки:

- схильні до оборотної відпускнуї крихкості II роду;
- у високолегованих сталях після гартування залишається аустеніт залишковий, котрий знижує твердість і опірність утоми, тому потрібна додаткова обробка;
- схильні до дендритної ліквіації, тому що швидкість дифузії легуючих елементів у залізі мала. Дендрити збіднюються, а границі - міждендритний матеріал - збагачуються легуючим елементом. Утворюється стрічкова структура після кування й прокатки, неоднорідність властивостей уздовж і впоперек деформування, тому необхідно виконувати дифузійний відпал.
- схильні до утворення флокенів.

Флокени - світлі плями в зламі в поперечному перерізі - дрібні тріщини з різною орієнтацією.

Причина їхньої появи - виділення водню, розчиненого в сталі.

При швидкому охолодженні від 200° водень залишається в сталі, виділяючись із твердого розчину, викликає великий внутрішній тиск, що приводить до утворення флокенів.

### 8.5 Вплив легуючих елементів на перетворення переохолодженого аустеніту.

По впливові на стійкість аустеніту й на форму С-подібних кривих легуючі елементи розділяються на дві групи.

Елементи, які розчиняються у фериті й цементиті (кобальт, кремній, алюміній, мідь, нікель), роблять тільки кількісний вплив на процеси перетворення. Сповільнюють перетворення (більшість елементів), або прискорюють його (кобальт) (рис. 8.1 а)

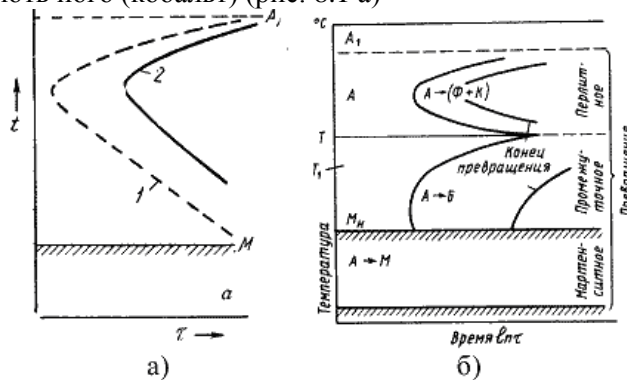


Рисунок 8.1 – Вплив легуючих елементів на перетворення переохолодженого аустеніту: а – не карбідоутворюючі елементи; б - карбідоутворюючі елементи

Карбідоутворюючі елементи (хром, молібден, вольфрам, ванадій, титан) вносять і якісні зміни в кінетику ізотермічного перетворення. При різних температурах вони по різному впливають на швидкість розпаду аустеніту: при температурі 700...500°С – сповільнюють перетворення в перлітній області, при температурі 500...400°С (утворення троститу) – дуже сильно сповільнюють перетворення, при температурі 400...300°С (проміжне перетворення) - сповільнює перетворення аустеніту в бейніт, але менше, ніж утворення троститу. Це відбивається на формі С-подібних кривих: спостерігаються два максимуми швидкості ізотермічного розпаду, розділених областю високої стійкості переохолодженого аустеніту (рис. 7.2 б)

Температура максимальної стійкості аустеніту залежить від карбідоутворюючого елемента: хром – 400...500°С, вольфрам – 500...550°С, молібден – 550...575°С, ванадій – 575...600°С. Час максимальної стійкості при заданій температурі зростає зі збільшенням ступеня легуваності (дуже сильно для високолегованих сталей).

Важливим є зменшення швидкості розпаду. Це сприяє більше глибокої прогартуємості й переохолодженню аустеніту до інтервалу мартенситного перетворення при більше повільному охолодженні (олива, повітря). Збільшують прогартуємість хром, нікель, молібден, марганець, особливо при спільному легуванні

### 8.6 Класифікація легованих сталей та чавунів

Стали класифікуються по декількох ознаках.

1. За структурою після охолодження на повітрі виділяються три основних класи сталей:

- перлітний;
- мартенситний;
- аустенітний

Стали перлітного класу характеризуються малим вмістом легуючих елементів; мартенситного – дещо більшим вмістом; аустенітного - високим вмістом легуючих елементів.

Класифікація пов'язана з кінетикою розпаду аустеніту. Діаграми ізотермічного розпаду аустеніту для сталей різних класів представлені на мал. 7.3

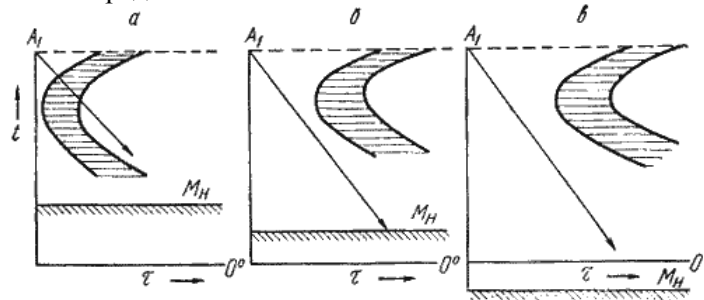


Рисунок 8.2 – Діаграми ізотермічного розпаду аустеніту для сталей перлітного (а), мартенситного (б) і аустенітного (в) класів

У міру збільшення вмісту легуючих елементів стійкість аустеніту в перлітній області зростає, а температурна область мартенситного перетворення знижується.

Для сталей перлітного класу крива швидкості охолодження на повітрі перетинає область перлітного розпаду (рис. 8.2,а), тому утворюються структури перліту, сорбіту або троститу.

Для сталей мартенситного класу область перлітного розпаду зрушена вправо (рис.8.2,б). Охолодження на повітрі не приводить до перетворення в перлітній області. Аустеніт переохолоджується до температури мартенситного перетворення й відбувається утворення мартенситу.

Для сталей аустенітного класу збільшення змісту вуглецю й легуючих елементів зрушує вправо область перлітного розпаду, а також знижує мартенситну точку, переводячи її в область негативних температур (рис. 8.2,в). Сталь проохолоджується на повітрі до кімнатної температури, зберігаючи аустенітний стан.

2. По ступеню легування (по вмісту легуючих елементів):

- низьколеговані – до 5 %;
- середньолеговані – від 5 до 10 %;
- високолеговані - більше 10%.

3. За кількістю легуючих елементів:

- трикомпонентні (залізо, вуглець, легуючий елемент);
- чотирикомпонентні (залізо, вуглець, два легуючі елементи) і так далі.

4. По складу(ознака – наявність тих або інших легуючих елементів):

- нікелеві,
- хромисті,
- хромонікелеві,
- хромонікельмолібденові й так далі.

5. По призначенню:

- конструкційні;
- інструментальні (ріжучі, міряльні, штампові);
- сталі й сплави з особливими властивостями (різко виражені властивості - нержавіючі, жароміцні й термостійкі, зносостійкі, з особливими магнітними й електричними властивостями).

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

### Базова

1. Атаманюк В. В. Технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. для вищ. навч. закл. / В. В. Атаманюк. - К. : Кондор, 2006. - 528 с.
2. Афтанділянц Є.Г. Матеріалознавство: підручник /Є.Г.Афтанділянц, О.В.Зазимко, К.Г.Лопатько. – Київ : Видавництво Ліра-К, Олді-Плюс, 2013. – 612 с.
3. Бялік О.М. Металознавство / О.М.Бялік, В.С.Чернеко, В.М.Писаренко, Ю.Н.Москаленко. – Київ : Кондор, 2018. - 384 с.
4. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів : підручник / А.М.Власенко. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с.
5. Гарнець В.М. Матеріалознавство. – К.: Кондор, 2009. – 386 с.
6. Гуляев А.П. Металловедение М.: Альянс, 2015. - 648 с.
7. Кондратьев Е.Т. Технология конструкционных материалов и материаловедение. М.; Колос, 1983. – 272
8. Пахолук А.П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали : посібник / А.П.Пахолук, О.А.Пахолук. – Львів : Світ, 2005. – 172 с.
9. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник / В.В.Попович, В. В. Попович. – Львів : Світ, 2006. – 624 с.
10. Сологуб М. А., Рожнецький І. О. Технологія конструкційних матеріалів / М. А. Сологуб, І. О. Рожнецький. - К. : Вища шк., 2002. - 300 с.
11. Хільчевський В. В., Кондратюк С. Є., Степаненко В. О., Лопатько К. Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. / Хільчевський В. В., Кондратюк С. Є., Степаненко В. О., Лопатько К. Г. - К. : Либідь, 2002. - 326 с.

### Допоміжна

12. Астапова Г.В. Матеріалознавство та основи технології переробки природної сировини у непродовольчі товари / Г.В.Астапова. – Київ : Центр учбової літератури, 2009. – 120 с.
13. Арзамасов Б. Н. Материаловедение / Арзамасов Б. Н., Сидорин Н. Н., Косолапов Г. Ф. и др. - М. : Машиностроение, 1986. - 384 с.
14. Вакуленко І. О., Грищенко М.М., Смирнов Б.М., Мещерякова Т.М. Матеріалознавство та технологія матеріалів. - Дніпропетровськ, 2005. - 32 с
15. Дальский А.М., Арутюнова И.А., Барсукова Т.М. и др. Технология конструкционных материалов. М., Машиностроение. 1985. - 448 с.
16. Лахтин, Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. Учебник / Ю.М. Лахтин. - М.: Альянс, 2015. - 448 с.
17. Матеріалознавство : підручник / С. С. Дяченко, І. В. Дощечкіна, А. О. Мовлян, Е. І. Плешаков; за ред. проф. С. С. Дяченко. – Харків : ХНАДУ, 2007. - 440 с
18. Практикум по технологии конструкционных материалов и материаловедению (С.С. Некрасов, А.М. Пономаренко, Г.К. Потапов и др. Под общ. ред. С.С. Некрасова). М.: Колос, 1983, -256 с.
19. Мохорт А. В., Чумак М. Г. Термічна обробка металів : навч. посіб. / А. В. Мохорт, М. Г. Чумак. - К.: Либідь, 2002. -512 с.
20. Кривоухов В. А., Петруха П. Г. и др. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки / В. А. Кривоухов, П. Г. Пеструха. - М. : Машиностроение, 1974. - 616с.
21. Опальчук А. С., Котречко О. О. Роговський Л. Л. Лабораторний практикум з технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства : навч. посіб. / за ред. А. С. Опальчука. - К. : Вища освіта, 2006. - 287 с.
22. Прейс Г. А. Технология конструкционных материалов / Г. А. Прейс - К. : Вища шк., 1991.-392 с.
23. Пахолук А. П, Пахолук О. А. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали. - 2-ге вид., доп. / А. П. Пахолук, О. А. Пахолук. - Львів : Світ, 2006. -256 с.

Кирик Григорій Васильович

# **МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І ВСТВ**

Конспект лекцій

для студентів 1 курсу спеціальності 208 «Агроінженерія»  
ОС «Молодший бакалавр»

Суми, РВІВ, Сумський НАУ, вул. Герасима Кондраєва, 160

---

Підписано до друку 2023 р. Формат А5. Тираж 100 примірників  
Гарнітура Peterburg Умовних друкованих аркушів Замовлення №