

Міністерство освіти і науки України  
Відокремлений структурний підрозділ  
«Любешівський технічний фаховий коледж  
Луцького національного технічного  
університету»



## **Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів**

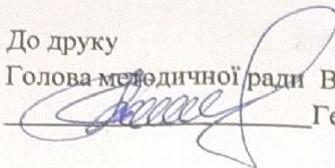
Методичні вказівки до лабораторних занять  
для здобувачів освіти освітньо-професійного ступеня  
фаховий молодший бакалавр  
галузь знань 13 Механічна інженерія  
спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
денної форми навчання

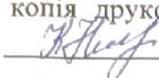
Любешів 2024 р.

УДК 621.762(07)

До друку

Голова методичної ради ВСП «Любешівський ТФК ЛНТУ»

  
Герасимук-Чернова Т.П.

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій коледжу  
Бібліотекар  Н.М. Корець

Затверджено методичною радою ВСП «Любешівський ТФК ЛНТУ»  
протокол № 4 від «30» 12 2024 р.

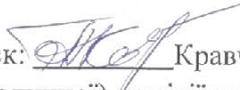
Рекомендовано до видання на засіданні випускної циклової (методичної) комісії  
педпрацівників харчового виробництва, галузевого машинобудування, готельно-  
ресторанної справи, обліку та оподаткування

протокол № 4 від «    » чрудне 2024 р.

Голова циклової методичної комісії  Кравченко Т.Ф.

Укладач:  С.Л. Куцик, викладач спецдисциплін

Рецензент:  А.В. Хомиг, кандидат технічних наук

Відповідальний за випуск:  Кравченко Т.Ф., викладач вищої категорії, голова  
випускної циклової (методичної) комісії педпрацівників харчового виробництва, галузевого  
машинобудування, готельно-ресторанної справи, обліку та оподаткування

Лабораторні роботи з дисципліни «Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів» для  
здобувачів освітньо-професійного ступеня фаховий молодший бакалавр галузь знань  
13 Механічна інженерія спеціальності 133 Галузеве машинобудування денної форми  
навчання/уклад. С.Л. Куцик – Любешів: ВСП «Любешівський ТФК ЛНТУ», 2024. – 82 с.

Видання містить лабораторні та практичні роботи.

© С.Л. Куцик, 2024 р.

## Лабораторна робота № 1

### МАКРОСКОПІЧНИЙ ТА МІКРОСКОПІЧНИЙ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Мета роботи - застосувати різні методи макроаналізу для вивчення хімічної та структурної неоднорідності металічних матеріалів. Ознайомитись з методикою проведення мікроаналізу.

#### 1. Теоретичні відомості

##### Макроаналіз

Дослідження структури (будови) металів і сплавів неозброєним оком або при невеликих збільшеннях (до 30 разів) називається макроаналізом, або макроскопічним аналізом. Для збільшення при макроаналізі використовуються лупи.

Будова металів, яка вивчається при макроаналізі, називається **макроструктурою**. Макроструктура вивчається на зламах і за допомогою макрошліфів (зразок металу, спеціально підготовлений для макродосліджень).

За допомогою макроаналізу можна визначити:

- порушення суцільності матеріалу (тріщини, пори);
- вид зламу;
- ліквіацію сірки, фосфору й вуглецю;
- спосіб виготовлення матеріалу (волокнистість при обробці тиском, дендритна будова при литті, зона термічного впливу при зварюванні);
- спосіб обробки матеріалу (наявність поверхневого загартування, хіміко-термічної обробки).

##### Макроаналіз зламу

Макроаналіз зламу - це найпростіший спосіб визначення будови металів, який дає змогу робити висновки про величину зерен металу, наявність перегрівання, причини руйнування, особливості виплавки і лиття, термічної обробки тощо.

**За видом зламу встановлюють характер руйнування виробу, який може бути крихким, в'язким або втомним.**

Крихкий злам характеризується кристалічною будовою, відбувається без значної пластичної деформації, тому зерна не порушені. Злам може проходити по межі зерен – міжкристалітний, або по зернах – транскристалітний.

В'язкий злам має волокнисту будову, форма і розмір зерна дуже змінені, оскільки руйнування супроводжується значною пластичною деформацією.

Залежно від режиму термічної обробки і умов руйнування (температури та швидкості деформації) один і той же метал може мати в'язкий або крихкий злам.

**Втомний злам має дві зони порушення:**

- зону втомного зародження і поширення тріщини з дрібнозернистою будовою;

– зону доламування з крупнозернистою будовою, яка спостерігається на останній стадії руйнування.

### Виготовлення макрошліфів

**Приготування макрошліфа складається з трьох операцій: вирізання, шліфування та травлення.**

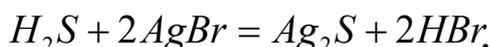
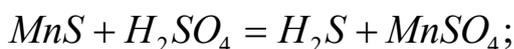
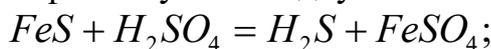
Вирізання зразка. Місце вирізання і переріз матеріалу, за яким проходить площина макрошліфа, залежать від мети дослідження, розмірів, форми й особливостей будови дослідженого об'єкта. Зразки виготовляють на фрезерних станках відрізними фрезами або абразивними кругами, на токарних верстатах, ножівкою та ін.

Шліфування. Шліфування виконують на шліфувальних шкурках різних номерів, поступово зменшуючи зернистість. Шліфування кожною шкуркою потрібно проводити так, щоб усі риси на поверхні зразка були паралельними. При переході до наступного номера напрям шліфування змінюють на 45...90°.

Травлення. Травлення полягає у **вибірковій взаємодії окремих структурних складових матеріалу з хімічним реагентом.** Найчастіше застосовують хімічне травлення, яке виконують зануренням макрошліфа в хімічний розчин (реагент) протягом 1...3 хв. В якості реагенту використовують хімічні розчини кислот, лугів, солей. При травленні реагент по-різному реагує з різними частинами матеріалу, що призводить до відбивання світла під різним кутом від даних зон, а отже появляються світліші і темніші ділянки (контраст) на досліджуваній поверхні, за якими характеризують макроструктуру металу.

### Дослідження хімічної неоднорідності (ліквації) сірки - метод Баумана

Для дослідження розподілу сірки за перерізом макрошліфа необхідно його відшліфувати поверхню накласти на бромосріблястий шар фотопаперу, який спочатку був поміщений в 5%-ний водний розчин сірчаної кислоти. Між сульфідами, які знаходяться в металі, сірчаною кислотою, яка залишається на папері, і бромистим сріблом фотоемulsion відбуваються хімічні реакції:



У місцях з підвищеним вмістом сірки виділяється більше сірководню, а в емульсійному шарі одержується більше сірчаного срібла.

Темні ділянки сірчаного срібла, які спостерігаються на фотопапері, вказують форму й характер розподілу сульфідів (сірки) за перерізом макрошліфа. При відсутності ліквації сірки фотопапір має колір від світло- до темно-коричневого залежно від вмісту сірки. Знятий з макрошліфа фотопапір промивають у воді, обробляють фіксажем, знову промивають і висушують.

### Мікроаналіз

**Мікроскопічний метод дослідження металів і сплавів, або мікроаналіз, дає змогу вивчати структуру (будову) металів і сплавів за допомогою мікроскопа на спеціально підготовлених зразках, які називаються мікрошліфами.** Структура металів і сплавів, яка визначається при мікроаналізі,

називається мікроструктурою. Готують мікрошліфи спочатку так само, як і макрошліфи (вирізання, шліфування зразків), але тут **обов'язкове полірування поверхні перед травленням**.

**Мікроаналіз дозволяє визначити число, розміри, форму, взаємне розміщення і кількісне взаємовідношення фаз і структурних складових.**

Застосовується механічне, хіміко-механічне та електрохімічне полірування. Полірування використовують з метою усунення слідів (рисок, подряпин) попередньої обробки шліфування, оскільки вони спотворюють зображення.

Механічне полірування виконують на крузі, що обертається, з натягнутим на нього полірувальним матеріалом (м'яка тканина), на який періодично наносять абразивну речовину з частинками малих розмірів – 1...5 мкм (оксид хрому, оксид алюмінію, оксид заліза, алмаз). Полірування вважається закінченим, якщо поверхня зразка набуває дзеркального блиску і під мікроскопом не видно рисок.

При дослідженні поверхні металу під мікроскопом зразу після полірування без травлення можна виявити на загальному світлому фоні темні точки або лінії. Це - неметалічні включення (оксиди, сульфід, шлаки, силікати, графіт, нітриди), їх присутність погіршує якість металу.

Після дослідження мікрошліфа під мікроскопом він підлягає травленню. Операцію травлення мікрошліфів виконують аналогічно травленню макрошліфів, враховуючи лише специфіку матеріалу і вибираючи при цьому необхідний травник з довідника.. Після травлення зразок промивають під струменем води, а потім у спирті і просушують.

Для мікроскопічного дослідження структури металів використовують металографічні мікроскопи (МІМ-6, МІМ-7, МІМ-8, МІМ-10). Вони відрізняються від біологічних головним чином методом освітлення зразка. Це пояснюється тим, що металічні шліфи непрозорі для світлових променів, тому їх досліджують не в прохідному, а у відбитому світлі.

## 2. Порядок виконання роботи

### Макроаналіз

1. Приготувати макрошліф згідно методики дослідження металів на вміст сірки.
2. Визначити ліквідацію сірки, одержавши відбиток за методом Баумана.
3. Замалювати макрошліф і дати висновок про проведені дослідження.

### Мікроаналіз

1. Приготувати мікрошліфи зі сталі та чавуну, дослідити під мікроскопом їх поверхню після різних стадій механічної обробки (грубого і тонкого шліфування, полірування) і замалювати їх.
2. Протравити мікрошліфи у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти, дослідити під мікроскопом і замалювати мікроструктуру.

## 3. Контрольні запитання

1. Що називають макроаналізом?
2. Що називають макрошліфом і який порядок його виготовлення?
3. Які існують види зламів?
4. Що досліджують при макроаналізі зламів і макрошліфів?
5. Як визначити ліквідацію сірки?

6. Що таке мікроаналіз?
7. В чому полягає різниця у приготування макро- і мікрошліфів.
8. Призначення полірування і травлення шліфів.
9. Опишіть процес полірування.
10. Що досліджують за допомогою мікроаналізу?

## Лабораторна робота № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРВИННОЇ САМОВІЛЬНОЇ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

**Мета роботи – ознайомитись з процесом формування структури кристалічних тіл при первинній самовільній кристалізації.**

### 1. Теоретичні відомості

#### Енергетичні умови кристалізації

**Перехід речовини з рідкого чи газоподібного стану в твердий з утворенням кристалічної структури називається первинною кристалізацією.**

**Утворення нових кристалів в твердому кристалічному стані називається вторинною кристалізацією.**

Енергетичний стан системи при сталому об'ємі і даній температурі  $T$  характеризується вільною енергією Гельмгольца  $F$ , яка визначається як

$$F = U - T \cdot S, \quad (2.1)$$

де  $U$  – внутрішня енергія,  $S$  – ентропія системи. Ентропія системи  $S$  визначається ймовірністю існування стану системи, яка пропорційна числу способів, якими може бути здійснено даний стан. Наприклад, ентропія  $S_p$  рідкого стану більша, ніж ентропія  $S_T$  твердого стану, оскільки в структурі рідини більший безпорядок в розміщенні частинок (атомів, молекул).

У випадку змінного тиску  $p$  і об'єму енергетичний стан системи характеризується вільною енергією Гіббса

$$G = U + p \cdot V - T \cdot S, \quad (2.2)$$

де величину  $H = U + P \cdot V$  називають ентальпією (тепломісткістю) системи.

Чим більша вільна енергія системи, тим вона менш стійка. Різні фізичні процеси (в т.ч. і процеси фазових перетворень) відбуваються таким чином, що система прагне зняти стан з найменшим запасом вільної енергії.

Самовільна кристалізація металу обумовлена прагненням системи до рівноваги, тобто до стану з меншим запасом енергії.

Як видно з (2.1) при збільшенні температури  $T$  вільна енергія  $F$  буде зменшуватися, оскільки внутрішня енергія  $U$  при цьому змінюється мало, а  $S > 0$ . Відповідно до цього схематично покажемо характер зміни вільної енергії  $F$  в рідкому і твердому стані (рис.2.1.).

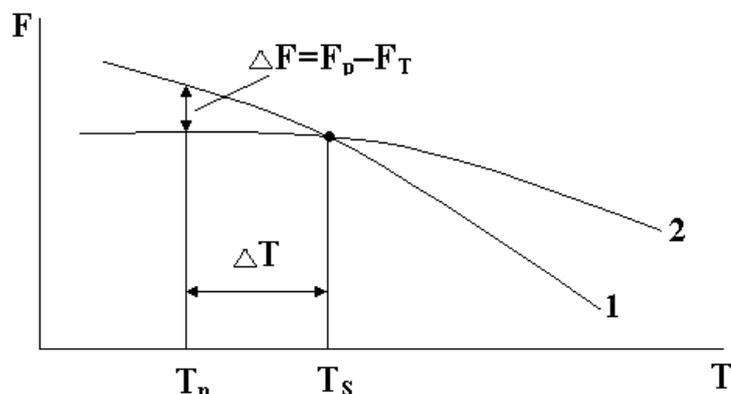


Рис.2.1. Зміна вільної енергії  $F_p$  в рідкому (1) і  $F_T$  – в твердому (2) стані в залежності від температури  $T$ . (Крива (1) йде більш круто, бо  $S_p > S_T$ )

Як бачимо (рис.2.1), при  $T=T_s$ ,  $F_p=F_T$ , тобто буде рівновага твердої і рідкої фази, тому температура  $T_s$  називається рівноважною.

При  $T < T_s$  система намагається зайняти твердий стан, оскільки  $F_p < F_T$ .

Таким чином, кристалізація рідини буде відбуватися при  $T < T_s$ , тобто при деякому переохолодженні. **Ступінь переохолодження**  $\Delta T$  визначається як

$$\Delta T = T_s - T_n, \quad (2.3)$$

де  $T_n$  – фактична температура кристалізації.  $\Delta T$  залежить від природи і чистоти металу. При підвищенні чистоти металу і збільшенні швидкості охолодження його, ступінь переохолодження  $\Delta T$  зростає.

#### Механізм (кінетика) процесу кристалізації

Кристали можуть зароджуватись в розплаві чи в розчині самовільно (самовільна кристалізація) або рости на наявних готових центрах кристалізації (не самовільна кристалізація).

Ще Д.К.Чернов (1868 р.) вперше відмітив, що **в процесі кристалізації необхідно розрізняти дві стадії:**

- утворення зародків кристалів;
- ріст цих зародків.

Для описання цих стадій Г.Тамман ввів кількісні параметри, а саме:

1. Швидкість зародження центрів кристалізації – ч.ц. (число центрів),  $1/\text{мм}^3 \cdot \text{с}$ ;
2. Лінійну швидкість росту цих зародків – ш.р., мм/с під якою розуміють швидкість переміщення поверхні кристалу в напрямку, перпендикулярному до цієї поверхні.

Графічна залежність цих величин від переохолодження показана на рис.2.2.

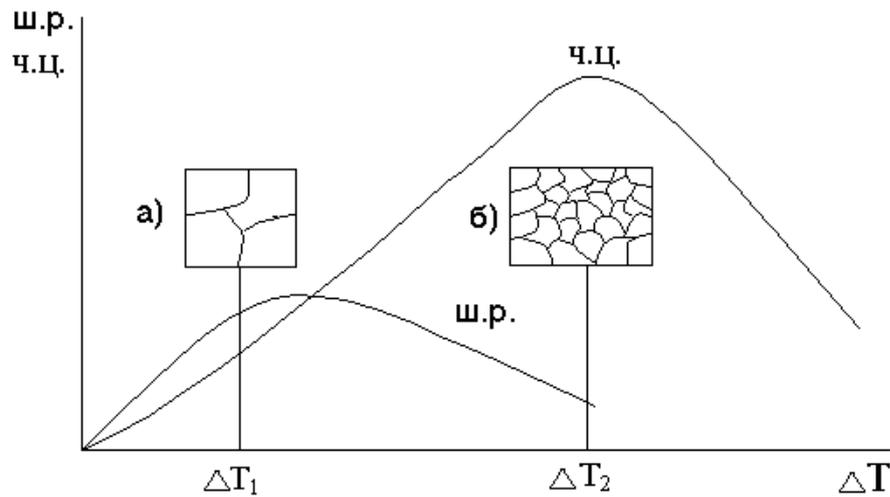


Рис.2.2. Залежність швидкості зародження центрів (ч.ц. – 1) і швидкості росту кристалів (ш.р. – 2) від ступеня переохолодження

При малих переохолодженнях  $\Delta T_1$ , ш.р. буває значною, тоді як ч.ц. мале. За таких умов при кристалізації одержимо крупнозернисту структуру металу (рис.2.2, а). Для одержання дрібнозернистої структури потрібно більше переохолодження  $\Delta T_2$  (рис.2.2, б), при якому число центрів досягне значної величини, а швидкість росту спаде. Зниження ч.ц. і ш.р. при збільшенні  $\Delta T$  пов'язане зі зменшенням інтенсивності дифузії при пониженні температури.

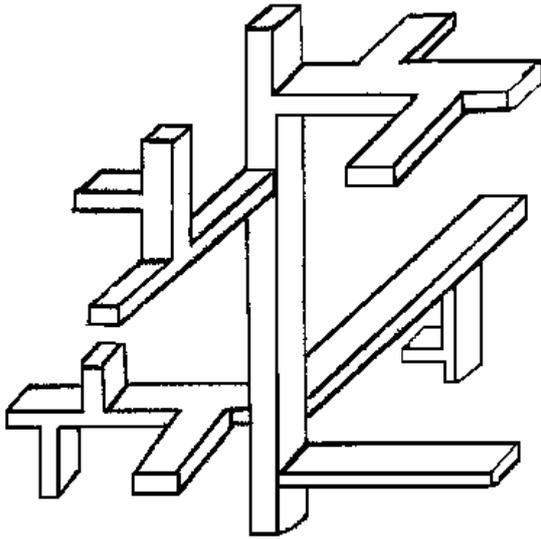
Якщо максимуми на кривих ч.ц. і ш.р. приблизно співпадають, то значно переохолодити розплав неможливо (що характерно для металів), однак при швидкості охолодження більше  $10^5$  К/с зародки кристалів не утворюються і метал може тверднути в аморфному стані.

На процес кристалізації, крім переохолодження  $\Delta T$ , впливають домішки (модифікатори), які спеціально вводяться в розплав або попадають випадково при виплавлянні металу. Їх навіть незначна кількість (0,001–0,01%) істотно впливає на розмір і форму зерен. Модифікатори поділяють на дві групи за механізмом дії.

- до першої групи відносяться **дрібні тугоплавкі частинки** (карбіди, оксиди). Якщо їх будова близька до будови металу, що твердне, то вони стають додатковими центрами кристалізації, що приводить до подрібнення структури.

– модифікатори другого роду (**поверхнево-активні речовини**), осідають на поверхні кристалів тонким шаром, що приводить до зміни  $\sigma$ , ш.р. і форми кристалів.

Самовільний ріст зародків відбувається шляхом приєднання до його поверхні окремих атомів (молекул), при цьому переважно забудовуються площини з більш щільною упаковкою, що мають меншу поверхневу енергію (наприклад, в ОЦК-кристалах – грань (110)). Процес росту значно полегшується завдяки утворенню гвинтових дислокацій, в місцях виходу яких на поверхню утворюється сходи́нка, яка полегшує приєднання наступних атомів, що і забезпечує ріст поверхні кристалу по спіралі (підтверджено експериментально).



Переважаюча забудова площин з щільною упаковкою обумовлює більшу швидкість росту кристалів в певних напрямках, що спричиняє дендритну кристалізацію. При цьому вітки дендритів поступово заповнюють весь об'єм металу, що твердне (рис.2.4). Оскільки в металі існує багато центрів кристалізації в процесі їх росту та дотику відбувається спотворення форми і розмірів. **Дендрити неправильної форми називають кристалітом або зерном.**

Рис.2.4. Схема дендрита

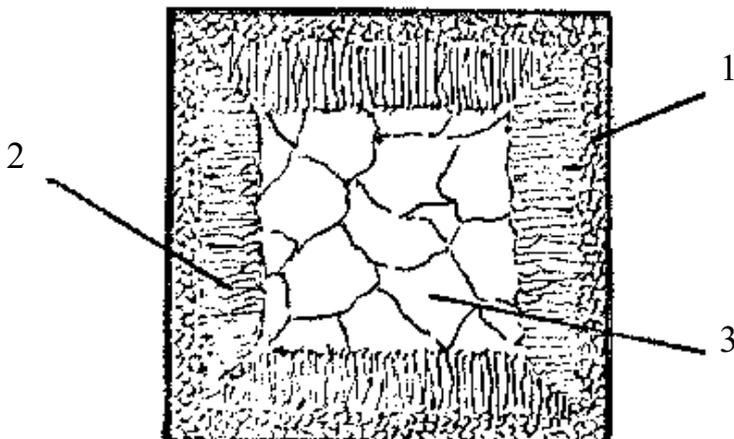
#### Будова зливка

На процес кристалізації, розмір і форму кристалів чинять вплив і інші фактори:

- сторонні неметалічні домішки, тверді і газові включення,
- механічні фактори (вібрація),
- теплоємність і теплопровідність металу,
- температура розплаву,
- способи лиття,
- стан поверхні виливниці (форми, в яку виливають метал).

Зокрема, форма і розмір зерен, що утворюються при кристалізації, залежать від умов їх росту, головним чином, від швидкості і напрямку відведення тепла і зміни температури рідкого металу, а також від вмісту домішок.

Типова структура зливка складається з трьох зон (рис.2.5). Рідкий метал найбільше переохолоджується в місцях дотику з холодними стінками виливниці, що сприяє утворенню на поверхні зливка зони дрібних рівновісних кристалів (1). Далі утворюється зона стовпчастих подовжених кристалів (2), розміщених



нормально по відношенню до стінок виливниці. В середині зливка де спостерігається найменше переохолодження  $\Delta T$  і відсутнє напрямлене відведення тепла, утворюються рівновісні великі кристали (3).

Рис.2.5. Будова зливка

Спостереження за процесом кристалізації металів і сплавів пов'язане з труднощами: високі температури і швидкоплинність процесів, непрозорість металів і виливниці та ін. Тому для вивчення цих процесів використовуються моделі, в яких об'єктом дослідження є прозорі легкоплавкі солі і розчини, наприклад, розчин червоної кров'яної солі або хромпіку.

## 2. Порядок виконання роботи

Спостереження самовільного утворення зародка в перенасиченому розчині:

- а) підготувати скляну пластинку моделі, старанно очистивши її поверхню;
- б) підігріти пластинку в сушильній шафі (при  $t=60^{\circ}\text{C}$ );
- в) нанести на пластинку велику краплю перенасиченого розчину хром піку;
- г) помістити пластинку з краплею в сушильну шафу для інтенсивного випаровування;

д) з появою кристалізації по краях кріплю помістити під мікроскоп МБС-2 і при збільшенні  $\times 2$  (або  $\times 4$ ) спостерігати за зародженням і ростом зародків посередині краплі;

е) замалювати результати спостереження в процесі кристалізації та по її завершенні (подібно до рис.2.6).

Інтенсивне випаровування, значне перенасичення і утворення числа зародків по краях краплі обумовлюється великою кривизною поверхні в цьому місці та більшим переохолодженням в тоншому перерізі краплини.

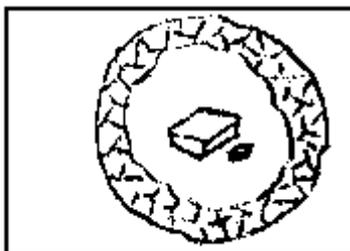


Рис.2.6. Зародження кристалів в перенасиченому розчині

## 2.4. Контрольні запитання

1. Які термодинамічні умови фазових перетворень?
2. В чому сутність процесу кристалізації?
3. Що називають вторинною кристалізацією?
4. Що характеризує ентропія, ентальпія?
5. Які є параметри процесу кристалізації?
6. Які стадії кристалізації за Д.К. Черновим?
7. Що називають переохолодженням?
8. Який існує зв'язок між величиною зерна, числом центрів кристалізації, швидкістю росту кристалу і ступенем переохолодження  $\Delta T$ ?
9. Що таке модифікатори, які вони бувають і з якою метою застосовуються?
10. Які основні зони кристалізації має зливоч?
11. Що таке ліквация і яких видів вона буває?

## Лабораторна робота № 3

### СТАТИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ НА РОЗТЯГ. ДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ.

**Мета роботи** – ознайомитись з видами деформації та механічними властивостями матеріалів; вивчити методику статичних випробувань на розтяг, навчитись визначити основні характеристики міцності й пластичності досліджуваних сплавів. Вивчити поняття ударної в'язкості матеріалів і методику її визначення. Навчитись визначати ударну в'язкість та аналізувати вид зламу зразків.

#### 1. Теоретичні відомості

##### Деформація та механічні властивості

Під час експлуатації виробу, елементи споруд зазнають різноманітних силових навантажень. **Дія навантаження викликає деформацію матеріалу, тобто зміну його розмірів і форми.** Розрізняють два види деформації – пружну й пластичну.

**Пружна деформація** зумовлена дією нормальних (перпендикулярних до площини, на яку вони діють) зусиль, внаслідок чого відбувається зміщення атомів із положень рівноваги (ці положення визначаються зрівноважуванням сил притягання електронів атома з ядрами сусідніх атомів та сил відштовхування ядер сусідніх атомів). Атоми зміщуються без зміни сусідів на відстані, що не перевищують міжатомних відстаней. Тому пружна деформація має зворотний характер, тобто при усуненні навантаження атоми повертаються до початкових місць рівноваги, внаслідок чого пружна деформація зникає і виріб набуває попередньої форми й розмірів.

**Пластична деформація** зумовлена незворотним переміщенням атомів у певних площинах під впливом діючих у них дотичних сил. Вона не зникає після розвантаження матеріалу й тому її ще називають *незворотною* або *залишковою*. Зі зростанням навантаження деформування закінчується **руйнуванням, тобто порушенням суцільності матеріалу.**

Залежно від внеску пластичної деформації в загальний процес деформування аж до руйнування матеріалу розрізняють **пластичні й крихкі** матеріали. Разом з тим, залежно від умов навантаження (температура, швидкість деформування) один і той самий матеріал може перебувати в пластичному або крихкому стані. Пластичному стану матеріалу властива істотна пластична деформація перед руйнуванням. У крихкому стані матеріал руйнується без помітної пластичної деформації катастрофічно швидко, у зв'язку з чим матеріали в такому стані не застосовують для виготовлення навантажених деталей машин чи елементів конструкцій.

Поведінку матеріалів у навантаженому стані характеризують **механічні властивості**. До основних механічних властивостей матеріалів відносять:

- **пружність** – здатність матеріалу відновлювати свою форму та розміри після припинення дії сил, що викликали його деформацію;
- **міцність** – здатність матеріалу чинити опір деформуванню й руйнуванню;

- **пластичність** – здатність матеріалу під дією навантаження пластично деформуватися без руйнування, зберігаючи змінену форму й розміри (залишкову деформацію) після припинення дії навантаження;
- **твердість** – здатність поверхневого шару матеріалу опиратися місцевому пластичному деформуванню;
- **ударну в'язкість** – здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією динамічних навантажень;
- **втомну міцність** – здатність матеріалу опиратися втомному руйнуванню, яке викликає дія тривалого повторно-змінного навантаження.

### Класифікація механічних випробувань

За характером зміни навантаження в часі розрізняють:

- **статичні випробування**, за яких одноразово прикладене навантаження плавно і порівняно повільно зростає від мінімальної до максимальної величини;
- **динамічні (ударні) випробування**, за яких навантаження прикладаються одноразово й з великою швидкістю зростають від найменшої до найбільшої величини;
- **втомні випробування**, за яких навантаження прикладаються багаторазово і можуть змінюватися не тільки за величиною, а й за напрямком, причому з різними швидкостями навантаження та розвантаження.

За способом прикладення навантаження розрізняють випробування на розтягання, стискання, закручування, згинання.

Основні стандартні характеристики міцності подаються умовними нормальними напруженнями — відношеннями відповідних зусиль  $F$  (рис. 3.1) до початкової площі поперечного перерізу зразка  $S_0$ . Зусилля визначають розрахунковим способом за показами тензометрів, прикріплених до поверхні зразків, або графічним способом на діаграмі розтягання.

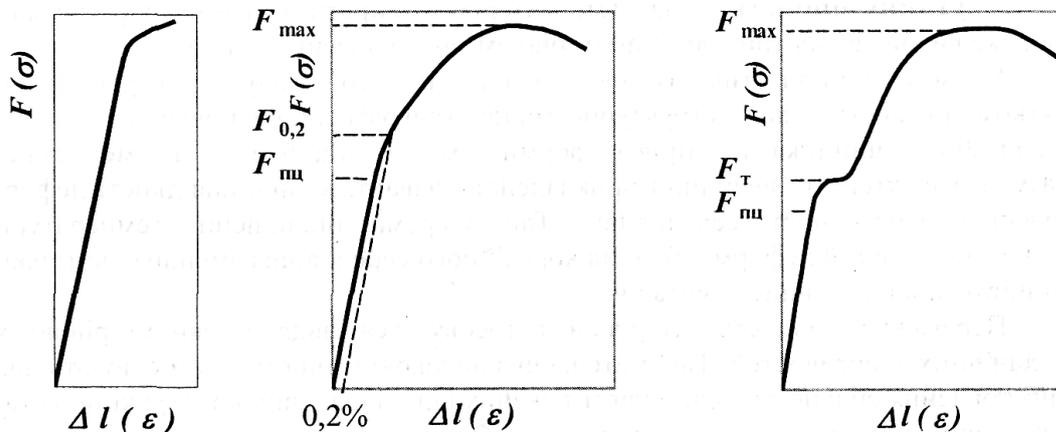


Рис. 3. 1. Схеми діаграм розтягання матеріалів:  
а - крихких; б - міцних; в - пластичних

**Границю пропорційності**  $\sigma_{\text{плц}}$  - умовне напруження, до якого в матеріалі зберігається лінійна залежність між навантаженням і видовженням, вираховують за формулою

$$\sigma_{\text{плц}} = \frac{F_{\text{плц}}}{S_0} \quad (3.1)$$

При графічному визначенні границі пропорційності за розрахункову величину  $F_{\text{плц}}$  приймають зусилля, при якому відхилення від лінійної залежності між навантаженням і видовженням досягає певної величини. Переважно допуск при визначенні  $F_{\text{плц}}$  задають збільшенням тангенса кута між дотичною до кривої деформації й віссю навантажень на 50 % від його значення на лінійній пружній ділянці.

**Границю текучості фізичну**  $\sigma_T$  визначають як найменше напруження, за якого зразок деформується без помітного зростання навантаження і якому відповідає сходинка текучості на діаграмі розтягання (рис. 3.1, в):

$$\sigma_T = \frac{F_T}{S_0} \quad (3.2)$$

**Границю текучості умовну**  $\sigma_{0.2}$ , при якій величина пластичної (залишкової) деформації сягає 0,2 %, визначають за відсутності на кривій розтягання сходинки текучості (рис. 3.1, б) за формулою

$$\sigma_{0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad (3.3)$$

Із залежності  $\Delta l = (0,2 \cdot l) / 100$  визначають абсолютне видовження зразка на робочій довжині зразка, яке відповідає залишковій деформації 0,2 %. Його значення відкладають вздовж осі абсолютного видовження діаграми розтягання (рис. 3.1, б). З точки, що відповідає 0,2 % деформації, проводять пряму, паралельну до прямолінійного відрізка кривої деформації. Точка її перетину з кривою деформації відповідає зусиллю  $F_{0.2}$ .

**Границю міцності**  $\sigma_B$  – напруження, яке відповідає найбільшому зусиллю  $F_{\text{max}}$  (рис. 3.1, б, в), що витримує зразок перед руйнуванням, вираховують за формулою

$$\sigma_B = \frac{F_{\text{max}}}{S_0} \quad (3.4)$$

Для визначення границі міцності зразок плавно навантажують до руйнування.

### **Визначення характеристик пластичності**

**Пластичність матеріалу характеризують відносні видовження та звуження.**

**Відносне видовження** зразка після руйнування  $\delta$  (%) визначають за формулою

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

де  $l_0$  і  $l_k$  – відповідно початкова й кінцева розрахункова довжина зразка.

**Відносне звуження  $\psi$  (%)** вираховують за формулою

$$\psi = \frac{S_0 - S_k}{S_0} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

де  $S_0$  і  $S_k$  — площа відповідно початкового перерізу зразка та перерізу у місці руйнування (шийки).

### **Динамічні випробування матеріалів (визначення ударної в'язкості)**

Різноманітні деталі машин та елементи металоконструкцій зазнають під час експлуатації ударних навантажень. Тому для визначення здатності металів витримувати такі навантаження проводять динамічні випробування, серед яких найпоширенішими є випробування на ударний згин, швидкість деформування під час яких сягає 3...5 м/с. Така велика швидкість деформування порівняно зі швидкістю деформування під час статичних випробувань ( $10^{-5}$ ... $10^{-2}$  м/с) збільшує жорсткість напруженого стану матеріалу та ймовірність його крихкого руйнування. Завдяки цьому, випробування на ударний згин з визначенням ударної в'язкості застосовують також для оцінки схильності металів до крихкого руйнування.

Здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією динамічних навантажень характеризує **ударна в'язкість, яку визначають як відношення питомої роботи надрізаних призматичних зразків до площі їх поперечного перерізу.**

З одного боку зразка посередині виконується концентратор напружень у вигляді U- чи V-подібного надрізу, а для особливо жорстких умов випробування – втомної тріщини (Т) на дні V-надрізу. Стандарт встановлює 20 типорозмірів зразків з різними видами концентраторів.

Зразок встановлюють на опори маятникового копра і руйнують з протилежного до надрізу боку ударом відпущеного з певної висоти важкого молота маятника. Метою випробування на копрі є визначення роботи руйнування зразка  $K$ .

Властивості матеріалу при випробуваннях на ударний згин зразків з концентраторами типу U і V оцінюються за роботою удару (руйнування) або ударною в'язкістю, зразків з Т-концентраторами - тільки за ударною в'язкістю.

Роботу удару позначають літерами KU, KV або KT, де K – символізує роботу удару (роботу руйнування зразка), а U, V, T - вид концентратора. Якщо параметри випробування відрізняються від максимальної енергії удару маятника 300 Дж, глибини U- і V-концентраторів 2 мм, Т-концентратора 3 мм, ширини зразка 10 мм, то в позначенні роботи удару вказують значення використаних параметрів (наприклад KU150/5/5 = 60 Дж). Допускається позначати роботу удару  $A_i$ , де  $A$  – символ роботи удару,  $i$  — символ типу зразка (від 1 до 20).

На практиці роботу  $K$  розраховують за формулою:

$$A = gl \left[ (\cos \beta - \cos \alpha) - (\cos \gamma - \cos \alpha) \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \gamma} \right],$$

де  $g$  – маса маятника, кг;

$l$  – довжина маятника, град;

$\alpha$  – кут зарядки маятника, град;

$\beta$  – кут підйому маятника після руйнування зразка, град;

$\gamma$  – кут підйому маятника при холостому ході, град.

**Ударну в'язкість КС** визначають в Дж/см<sup>2</sup> як відношення роботи руйнування зразка  $K$  (Дж) до площі його поперечного перерізу  $S_0$  (см<sup>2</sup>) у місці концентратора:

$$КС = \frac{K}{S_0} \quad (3.7)$$

Для позначення ударної в'язкості до символу КС додається третя літера – U, V або T, яка характеризує тип концентратора напружень, наприклад КСУ.

Ударну в'язкість визначали за ГОСТ 4647-69. Зразки у вигляді брусків прямокутного перерізу розміром  $6 \pm 0,2 \times 4 \pm 0,2 \times 50 \pm 1$  мм піддавали руйнуванню ударом впоперек. Відстань між опорами для зразків складала  $40 \pm 0,2$  мм; краї опор заокруглені радіусом 3 мм.

### Застосування ударної в'язкості для оцінки стану матеріалу

**Низьке значення ударної в'язкості свідчить про крихкий стан матеріалу, тобто про його схильність до крихкого руйнування.** Крихке руйнування належить до найнебезпечніших видів руйнування, тому що проходить катастрофічно швидко під дією відносно малих навантажень (менших за границю текучості) без помітних слідів пластичної деформації. Тріщина після досягнення критичного розміру починає рости дуже швидко (зі швидкістю, близькою до швидкості звуку в матеріалі) за рахунок накопиченої в матеріалі енергії пружного деформування, не потребуючи зростання зовнішнього навантаження.

У в'язкому стані матеріал має велику ударну в'язкість. В'язке руйнування супроводжується значною пластичною деформацією. Магістральна тріщина росте відносно повільно, оскільки на її поширення витрачається значна енергія у вигляді роботи, яку виконує зовнішнє навантаження, напруження від якого повинно перевищувати границю текучості матеріалу. Тому цей вид руйнування не є таким небезпечним, як крихке руйнування.

### **3. Послідовність виконання роботи**

Статичні випробування на розтяг:

1. Заміряти штангенциркулем початкові розміри зразків з різних матеріалів, перевірте відповідність їх розмірів вимогам стандарту.
2. Позначте на зразках початкову розрахункову довжину.

3. Підготувати розривну машину до випробування: установити відповідний діапазон навантаження, масштаб запису видовження на діаграмі розтягання, швидкість деформування.

4. Провести випробування зразків на розтягання аж до руйнування. Початкові й кінцеві розміри зразків, максимальне зусилля до руйнування записати у протокол випробувань (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

Протокол статичних випробувань зразків на розтягання на розривній машині

Початкова ширина, мм	Початкова товщина, мм	Початкова площа поперечного перерізу, мм <sup>2</sup>	Початкова робоча довжина, мм	Ширина в місці руйнування, мм	Товщина в місці руйнування, мм	Площа поперечного перерізу в місці руйнування, мм <sup>2</sup>	Робоча довжина після руйнування, мм	Зусилля границі текучості, Н	Максимальне зусилля, Н	Границя текучості, МПа	Границя міцності, МПа	Відносне видовження, %	Відносне звуження, %

5. Обчислити за формулами (3.2), (3.3), (3.4), (3.5), (3.6) відповідно границю текучості (умовну чи фізичну), границю міцності, відносне видовження та відносне звуження. Результати записати в протокол випробувань.

### Динамічні випробування матеріалів

1. Виміряти з точністю до 0,1 мм ширину, висоту, глибину концентратора зразка, обчислити площу поперечного перерізу зразка в місці надрізу та записати ці дані у табл. 3.2.

2. Підніміть опорну раму в храповому механізмі та закріпіть його в рамі замком.

3. Поставте зразок на опори копра так, щоб надріз був з протилежного боку до місця удару маятника, і відцентруйте його за допомогою шаблона.

4. Підніміть опорну раму і зафіксований замком маятник на потрібну висоту, яка визначає запас енергії маятника відносно зразка. Забороняється перебувати під маятником, оскільки випадкове відмикання замка і звільнення маятника може спричинити важку травму.

5. Виставте показник вимірювального пристрою на "0" шкали.

6. Поставте захисну сітку для захисту від половинок зразка, що можуть розлітатися в усі боки внаслідок його руйнування.

7. Відімкніть замок та відпустіть маятник для вільного падіння. Після руйнування зразка зафіксуйте значення роботи руйнування зразка зі шкали

вимірювального пристрою та запишіть його в протокол випробування (табл. 3.2).

8. За формулою (3.7) обчисліть значення ударної в'язкості КСУ та запишіть його в табл. 3.2.

9. Якщо зразок не зруйнувався, то відзначте це в протоколі випробувань. Для випробування іншого зразка з такого ж матеріалу підніміть опорну раму вище для збільшення запасу потенціальної енергії маятника.

10. Дослідіть та проаналізуйте характер зламу. Для змішаного зламу оцініть кількісне співвідношення в'язкої та крихкої складових зламу, їх взаємне розташування. Висновки запишіть у протокол випробувань (табл. 3.2).

Таблиця 3.2

## Протокол випробування на ударний згин на маятниковому копрі

Матеріал зразка	Тип концентратора	Температура випробувань, °С	Ширина зразка, мм	Висота зразка, мм	Глибина концентратора, мм	Висота робочого перерізу, мм	Площа поперечного перерізу, мм <sup>2</sup>	Робота удару, Дж	Ударна в'язкість, Дж/мм <sup>2</sup>	Характеристика зламу

### 3. Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте основні механічні властивості матеріалів.
2. За якими ознаками класифікують механічні випробування?
3. Що таке напруження та чим відрізняються нормальні й дотичні напруження, дійсні та умовні напруження?
4. Які характеристики міцності та як їх визначають при статичних випробуваннях на розтяг?
5. Що характеризують границя пропорційності, границя текучості (фізична та умовна), границя міцності?
6. Які характеристики пластичності та як їх визначають при статичних випробуваннях на розтяг?
7. Яке застосування мають характеристики міцності й пластичності матеріалів?
8. З якою метою проводять динамічні випробування матеріалів?
9. Охарактеризуйте ударну в'язкість як механічну властивість матеріалу.
10. Охарактеризуйте зразки для визначення ударної в'язкості.
11. Поясніть принцип визначення ударної в'язкості на маятниковому копрі.
12. Як позначають ударну в'язкість?
13. Яку інформацію про стан матеріалу, його поведінку в навантаженому стані забезпечує ударна в'язкість?

14. Порівняйте за характерними ознаками в'язке й крихке руйнування. Охарактеризуйте в'язкий, крихкий і змішаний злами.

## Лабораторна робота № 4 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ

**Мета роботи** – набути навички вимірювання твердості на твердомірах Брінеля і Роквелла.

### 1. Теоретичні відомості

Твердістю називають опір поверхневих шарів металу локальній пластичній деформації, що виникає при втискуванні в поверхню металу твердого тіла (індентора) при певному навантаженні.

Значення твердості дає можливість оцінити механічні властивості металів і їх придатність для роботи в конструкціях.

В залежності від твердості випробуваного металу і розмірів зразка застосовуються різні методи визначення твердості. Чим більша глибина проникнення індентора, тим менша твердість металу.

#### Вимірювання твердості методом Брінеля

Суть методу полягає у втискуванні сталюї загартованої кульки в зразок під дією навантаження, прикладеного перпендикулярно поверхні зразка, протягом певного часу і вимірюванні діаметра відбитку після зняття навантаження. Для випробовувань застосовуються сталюї загартовані кульки діаметрів **1; 2; 2,5; 5; 10 мм**. Витримка під навантаженням повинна бути від 10 до 15 сек. для чорних металів і від 10 до 180 сек. для кольорових металів в залежності від матеріалу і його твердості.

Твердість за Брінелем позначається  $HV$  і вимірюється відношенням навантаження  $P$  до площі поверхні  $A$  сферичного сегмента:

$$HV = \frac{P}{A}, \quad (4.1)$$

де  $P$  - навантаження (Н, кГс),  $A = \pi Dh$ ,  $D$  - діаметр кульки,  $h$  - глибина відбитка (сферичного сегмента), яку можна виразити через діаметр кульки  $D$  і діаметр відбитка  $d$ .

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (4.2)$$

Підставивши значення в (3.1), одержимо вирази для твердості:

$$HV = \frac{2P}{\pi D \left( D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}, \text{ кГс/мм}^2 \quad (4.3)$$

Величину навантаження вибирають з умов подібності, тобто  $P = KD^2$ , де  $K$  - стала для даного металу величина (табл. 4.1).

При виконанні цієї умови забезпечується сталість кута втискування ( $\varphi = \text{const}$ ) (рис.4.1).

Умови випробувань регламентовані: діаметр кульки, навантаження і тривалість витримки під навантаженням вибирають в залежності від твердості матеріалу і товщини зразка (табл.4.2).

Значення коефіцієнта К для різних металів і сплавів

№ п/п	Метали і сплави	К, МПа (кГс/мм <sup>2</sup> )	НВ: кГс/мм <sup>2</sup>
1	Залізо, сталь, чавун та інші високоміцні сплави.	294 (30)	96...450
2	Мідь, нікель, їх сплави	98 (10)	32...200
3	Алюміній, магній та їх сплави	49 (5)	16...100
4	Антифрикційні підшипникові сплави	24,5 (2,5)	8...50
5	Олово, свинець	9,8 (1)	3,2...20

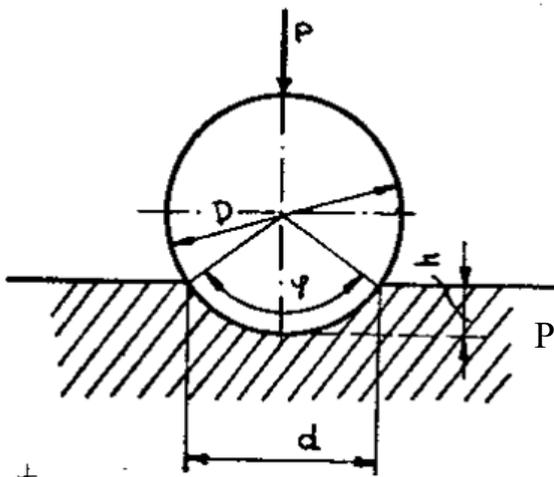


Рис.4.1. Схема визначення твердості металів за Брінелем

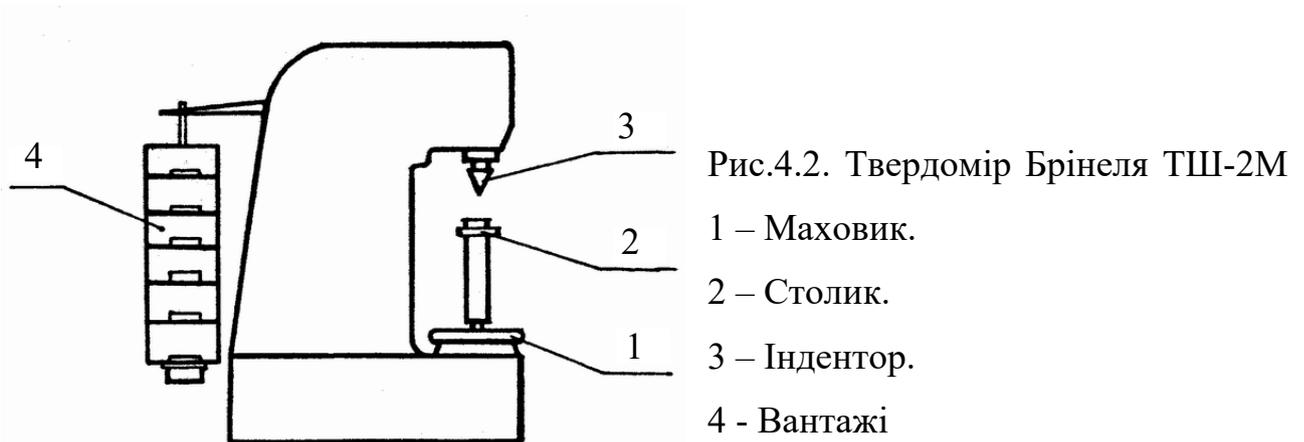
#### Методика роботи на твердомірі Брінеля

1. Підготувати твердомір ТШ-2М (рис.4.2) до роботи, для чого встановити відповідний індентор 3, необхідний вантаж 4, а також час витримки, вибраний з табл.4.2.

Таблиця 4.2

Рекомендовані параметри при вимірюванні твердості за Брінелем

Матеріал	Твердість НВ, МПа	Товщина зразка, мм	Співвідношення	Діаметр кульки, мм	Навантаження, кГс	Витримка, с
Чорні метали	1400...4500	>6	$P=30D^2$	10,0	3000	10
		3...6		5,0	750	10
		<3		2,5	187	10
Кольорові метали	350...1300	>6	$P=10D^2$	10,0	1000	30
		3-6		5,0	250	30
		<3		2,5	62,5	30
Кольорові метали	80...350	>6	$P=2,5D^2$	10,0	250	60
		3-6		5,0	62,5	60
		<3		2,5	15,6	60



2. Зачищений зразок для випробування встановити на столі 2. Обертанням за годинниковою стрілкою маховика 1 підвести зразок до дотику з кулькою 3 і, продовжуючи обертання маховика, довести до упору, створюючи попереднє навантаження.

3. Натиснувши кнопку, ввімкнути електродвигун. Прикладання основного, навантаження, витримка під навантаженням і зняття навантаження здійснюється автоматично. В момент початку прикладання навантаження загоряється сигнальна лампочка і горить протягом часу, відповідного встановленій тривалості витримки кульки під навантаженням. Після зупинки електродвигуна обертанням маховика і проти годинникової стрілки опустити столик 2 і вивільнити зразок.

4. Провести три випробування на одному і тому самому зразку.

Вимірювання діаметра відтиску. Діаметр відтиску вимірюють відліковим мікроскопом (рис.4.3).

У корпус 6 мікроскопа вставлено тубус 3 оптичної системи, у який вмонтовано окуляр 1, об'єктив 5 та сітка зі шкалою 2 для вимірювання діаметра відтисків. Обертанням окуляра 1 в протилежних напрямках піднімають або опускають його відносно шкали, досягаючи її чіткого зображення. Обертанням кільця 4, що забезпечує піднімання чи опускання тубуса 3, регулюється чіткість зображення контуру відтиску.

## 2. Порядок виконання роботи

1. Заміряти діаметри відбитків на шкалі мікроскопа МПБ-2 (ціна малої поділки на шкалі окуляра складає 0,05 мм) (рис.4.3). Знайти середнє значення з трьох вимірювань.

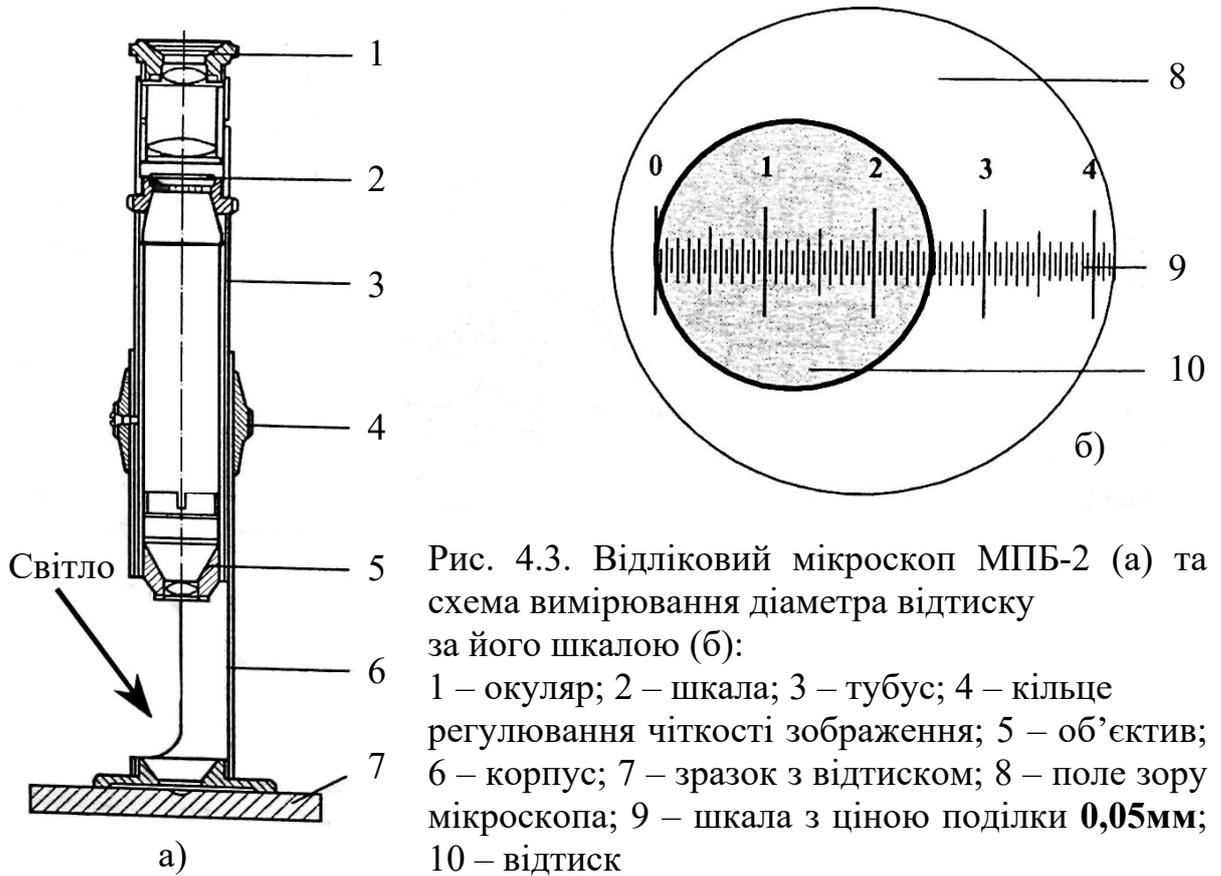


Рис. 4.3. Відліковий мікроскоп МПБ-2 (а) та схема вимірювання діаметра відтиску за його шкалою (б):

1 – окуляр; 2 – шкала; 3 – тубус; 4 – кільце регулювання чіткості зображення; 5 – об’єктив; 6 – корпус; 7 – зразок з відтиском; 8 – поле зору мікроскопа; 9 – шкала з ціною поділки **0,05мм**; 10 – відтиск

2. За середнім значенням діаметра відбитка:

- розрахувати твердість за формулою 3.3 за середнім діаметром відбитка  $d_{\text{ср}}$ ;
- знайти відповідну твердість за таблицею (додаток 1). Дані занести в таблицю 3.3;
- визначити орієнтовну границю міцності в залежності від твердості, порохованої за формулою 4.3.

Таблиця 4.3.

Визначення твердості за Брінелем

Матеріал Товщина зразка	Діаметр кульки $D$ , мм	Наванта- ження, $H$	Діаметр відбитка, мм	$d_{\text{ср}}$ , мм	НВ, МПа		Границя міцності $\sigma_{\text{в}}$ , МПа
					За формулою	За таблицею	

При вимірюванні твердості за Брінелем кулькою  $D=10$  мм під навантаженням 3000 кГс (30кН) з витримкою 10с після числа твердості дописують символ НВ, наприклад, 400 (4000) НВ, кГс/мм<sup>2</sup> (МПа). При інших умовах випробування до числа твердості за Брінелем дописують індекс, що позначає ці умови, наприклад, 200 (2000) НВ 5/250/30 означає число твердості

за Брінелем 200 (2000) кГс/мм<sup>2</sup> (МПа), одержане при випробуванні кулькою D= 5мм під навантаженням 250 кГс (~2500 Н), прикладеним протягом 30 сек.

Між величиною твердості за Брінелем і межею міцності металів існує приблизна залежність:

Сталь, твердість 120...175 НВ .....	$\sigma_B=0,34$ НВ
Сталь, твердість 175...450 НВ .....	$\sigma_B=0,35$ НВ
Мідь, латунь і бронза відпалені .....	$\sigma_B=0,55$ НВ
Мідь, латунь і бронза нагартовані .....	$\sigma_B=0,40$ НВ
Алюміній і його сплави твердістю 20- 45 НВ .....	$\sigma_B=0,33 \dots 0,36$ НВ
Дюралюміній відпалений .....	$\sigma_B=0,36$ НВ
Дюралюміній після зміцнюючої ТО .....	$\sigma_B=0,35$ НВ

#### Вимірювання твердості за Роквеллом.

Твердість, за Роквеллом, – безрозмірна величина, помірjana в умовних одиницях твердості. За умовну одиницю твердості прийнято величину, що відповідає осьовому переміщенню індентора на 0,002мм (2мкм). Індентором служить алмазний конус з кутом при вершині 120° або загартована кулька діаметром D= 1,588 мм.

Загальне навантаження на індентор рівне сумі попереднього навантаження  $P_0$  і основного навантаження  $P_1$ .

$$P = P_0 + P_1 \quad (4.5)$$

Попереднє навантаження  $P_0$  рівне 10 кГс (100 Н).

На індикаторному приладі є дві шкали А і С - чорна, зовнішня, та шкала В - червона, внутрішня. При вимірюванні твердості за шкалами А і С індентором служить алмазний конус, а за шкалою В – загартована кулька.

Твердість за Роквеллом не обчислюють за формулою, а відраховують безпосередньо за шкалою індикаторного приладу (рис.4.5). На його циферблаті нанесено дві шкали: червона В і чорна С і А, що мають по 100 поділок кожна. Шкала В зміщена відносно нуля шкали С на 30 поділок. Це викликано тим, що при випробуванні кулькою глибина лунки не буває менше 0,06 мм.

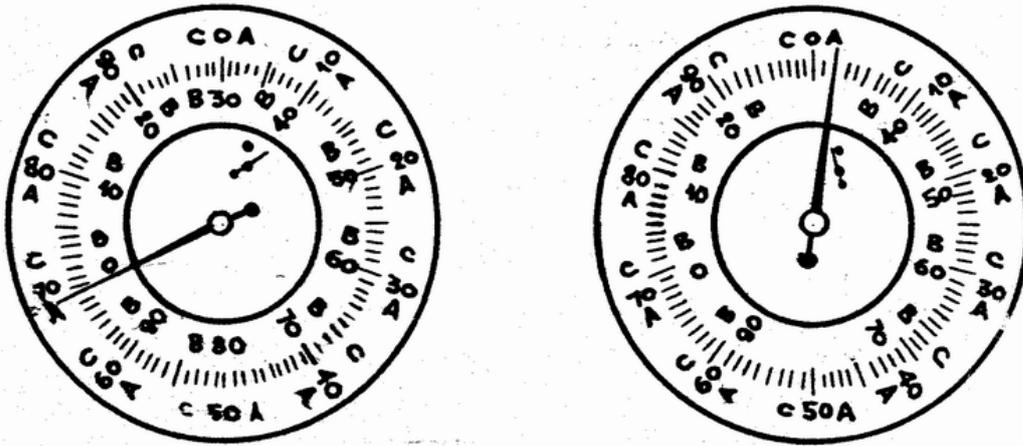


Рис.4.5. Послідовність переміщення стрілок на індикаторі приладу ТК-2 (Роквелл) при втискуванні алмазного конуса

Число твердості вказується безпосередньо за символом, що позначав метод вимірювання і відповідну шкалу: HRC80, HRB90, HRC<sub>E</sub>50. Матеріали та межі вимірювання твердості наведені в табл.4.4. Вибір шкали залежить від оцінки твердості матеріалу.

Таблиця 4.4.

Матеріали та межі вимірювання твердості

Позначення шкал	Величина твердості	Індентор	Навантаження			Межа вимір. твердості	Матеріал
			P <sub>0</sub>	P <sub>1</sub>	P		
А-чорна зовнішня	HRA=100-e	Алмазний конус	100	500	600	70...85	Тверді сплави, тонкі листи, тонкі шари поверхні.
С-чорна зовнішня	HRC=100-e	Алмазний конус	100	1400	1500	20...67	Термічно оброблені поверхні.
В-червона внутрішня	HRB=130-e	Кулька	100	900	1000	25...100	М'які кольорові метали, чорні відпалені метали

Числа твердості за Роквеллом можна наближено перевести в числа твердості за Брінелем (додаток 2). В цій таблиці твердість HRC вказана в числах до введення спеціального еталона. Перевід чисел твердості HRC в числа твердості HRC<sub>E</sub> наведені в додатку 3.

### Методика роботи на твердомірі Роквелла

1. Підготувати твердомір Роквелла ТК-2 (рис.4.6) для роботи, для чого в залежності від умов випробування встановити відповідний індентор 1, необхідний вантаж 2 і ввімкнути електродвигун приладу.

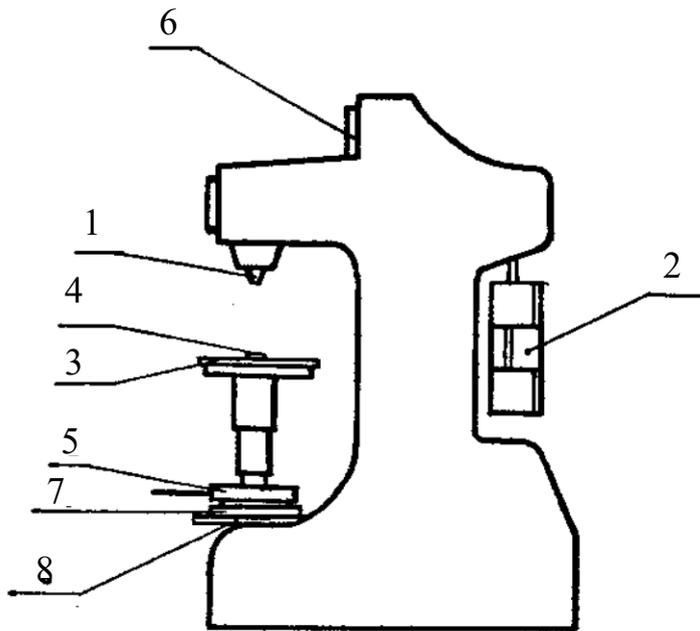


Рис.4.6. Твердомір

Роквелла ТК-2:

- 1 – індентор;
- 2 – вантажі;
- 3 – столик;
- 4 – зразок;
- 5 – маховик;
- 6 – індикатор;
- 7 – барабан;
- 8- ручка пуску

2. Розміщений на столі 3 зразок 4 обертанням за годинниковою стрілкою маховика 5 привести до дотику з індентором 1, і подальшим підйманням стола разом з зразком прикласти попереднє навантаження  $P_0=10$  кГс, при цьому мала стрілка повинна суміститися з червоною точкою на індикаторі 6 (рис.4.5). Велика стрілка при цьому не повинна відхилитись від вертикального положення більше, ніж на 5 поділок в ту чи іншу сторону. У випадку відхилення великої стрілки більше, ніж на 5 поділок вправо, попереднє навантаження потрібно зняти, а вимірювання твердості проводити в іншій точці зразка.

3. Обертанням барабана 7, зв'язаного з шкалою індикатора - тросиком, сумістити нуль чорної шкали з великою стрілкою.

4. Натисненням на клавішу 8 створюється загальне навантаження, після закінчення втискування загальне навантаження автоматично знімається; велика стрілка індикатора вказує на відповідній шкалі число твердості за Роквеллом.

5. Обертанням проти годинникової стрілки маховика 5 опустити стіл 3, вивільнити зразок 4.

6. Випробування кожного зразка провести не менше 3 разів.

7. Визначити твердість  $HRC_E$  за таблицею еталонів.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з методикою роботи на твердомірі Роквелла.
2. Одержати набір зразків і визначити їх твердість. Результати занести до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5.

Величина твердості за Роквеллом

Матеріал і товщина зразка	Індентор	Навантаження Р, Н	Шкала	Величина вимірюв. твердості	Твердість, середнє значення	Число твердості за Брінелем, МПа

### 3. Контрольні запитання

1. Що називають твердістю металів?
2. Вкажіть порядок вимірювання твердості за Брінелем.
3. Порівняйте області застосування різних способів вимірювання твердості.
4. Які індентори застосовують на твердомірі Брінеля?
5. Від чого залежить вибір розміру індентора при випробуванні за Брінелем?
6. Чому при випробуванні за Брінелем з допомогою кульок різного діаметру використовують різне навантаження?
7. Яка розмірність твердості за Брінелем? Як знаходять величину твердості?
8. Як вимірюють твердість за Роквеллом?
9. Чим визначається вибір індентора при випробуванні за Роквеллом?
10. Яку величину показує індикатор приладу Роквелла?
11. Скільки вимірів потрібно виконати на приладах Брінеля та Роквелла для одержання достовірних значень твердості зразка?
12. Яка залежність між твердістю за Брінелем і межею міцності на розрив?

## Додаток 1.

## Визначення числа твердості за Брінелем

Діаметр відбитку d10 або 2d5, або 4d2,5 мм	Число твердості HB при навантаженні P, Н			Діаметр відбитку y d10 або 2d5, або 4d2,5 мм	Число твердості HB при навантаженні P, Н		
	300 D <sup>2</sup>	100 D <sup>2</sup>	25 D <sup>2</sup>		300 D <sup>2</sup>	100 D <sup>2</sup>	25 D <sup>2</sup>
2,90	4440	-	-	4,50	1790	595	149
2,95	4290	-	-	4,55	1740	581	145
3,00	4150	-	346	4,60	1700	568	142
3,05	4010	-	334	4,65	1670	555	139
3,10	3880	1290	323	4,70	1630	543	136
3,15	3750	1250	313	4,75	1590	530	133
3,20	3630	1210	303	4,80	1560	519	130
3,25	3520	1170	293	4,85	1520	507	127
3,30	3410	1140	284	4,90	1490	496	124
3,35	3310	1100	276	4,95	1460	486	122
3,40	3210	1070	267	5,00	1430	475	119
3,45	3110	1040	259	5,05	1400	465	116
3,50	3020	1010	252	5,10	1370	455	114
3,55	2930	977	245	5,15	1340	446	112
3,60	2850	950	237	5,20	1310	437	109
3,65	2770	923	231	5,25	1280	428	107
3,70	2690	897	224	5,30	1260	419	105
3,75	2620	872	218	5,35	1230	410	103
3,80	2550	849	212	5,40	1210	402	101
3,85	2480	826	207	5,45	1180	394	98,6
3,90	2410	804	201	5,50	1160	386	96,6
3,95	2350	783	196	5,55	1140	379	94,6
4,00	2290	763	191	5,60	1110	371	92,7
4,05	2230	743	186	5,65	1090	364	91,0
4,10	2170	724	181	5,70	1070	357	89,3
4,15	2120	706	176	5,75	1050	350	87,6
4,20	2070	688	172	5,80	1030	343	85,9
4,25	2010	671	168	5,85	1010	337	84,3
4,30	1970	655	164	5,90	992	331	82,6
4,35	1920	639	160	5,95	973	324	81,1
4,40	1870	624	156	6,00	955	318	79,6
4,45	1830	609	152				

Примітка. Розмірність твердості подана в МПа. Діаметр відтисків дані для кульки діаметром 10 мм. Для визначення за таблицею числа твердості при випробуванні кулькою діаметром 5 мм діаметр відтиску потрібно помножити на 2, а при випробуванні кулькою діаметром 2,5 мм – на 4.

Додаток 2  
Співвідношення числа твердості за Брінелем і Роквеллом

Твердість за Брінелем *		Твердість за Роквеллом			Твердість за Брінелем *		Твердість за Роквеллом		
Діаметр відбитку, мм	HB	HRC	HRB	HRA	Діаметр відбитку, мм	HB	HRC	HRB	HRA
2,20	7800	72	-	84	4,00	2290	20	100	61
2,30	7120	68	-	82	4,10	2117	17	98	60
2,40	6530	64	-	80	4,20	2070	14	95	59
2,50	6010	60	-	78	4,30	1970	12	93	58
2,60	5550	56	-	77	4,40	1870	9	91	57
2,70	5140	52	-	75	4,50	1790	7	90	56
2,80	4770	49	-	74	4,60	1700	4	88	55
2,90	4440	4	-	73	4,70	1630	2	86	53
3,00	4150	43	-	72	4,80	1560	0	84	52
3,10	3880	41	-	71	4,90	1490	-	82	-
3,20	3630	39	-	70	5,00	1430	-	80	-
3,30	3410	36	-	68	5,10	1370	-	78	-
3,40	3210	33	-	67	5,20	1310	-	76	-
3,50	3020	31	-	66	5,30	1260	-	74	-
3,60	2850	29	-	65	5,40	1210	-	72	-
3,70	2690	27	-	64	5,50	1160	-	70	-
3,80	2550	25	-	63	5,60	1110	-	67	-
3,90	2410	23	102	62	5,70	1070	-	65	-

\* Діаметр кульки 10 мм, навантаження 30 000Н; розмірність твердості в МПа

## Лабораторна робота № 5

### ВИВЧЕННЯ РІЗНИХ ТИПІВ ДІАГРАМ СТАНУ ПОДВІЙНИХ СПЛАВІВ

Мета роботи – ознайомитись з основними типами діаграм стану подвійних систем, набути практичних навиків вивчення перетворень, які відбуваються при кристалізації сплавів.

#### 1. Теоретичні відомості

**Діаграми стану сплавів графічно показують залежність стану сплавів даної системи від концентрації (хімічного складу) та температури.** Вони дозволяють визначити не лише температури кристалізації та плавлення, а й визначити, які саме перетворення можуть відбуватись у сплавах за різних температур, тобто характеризують стан сплаву.

Їх будують на основі результатів і експериментів з використанням методів термічного, металографічного та інших аналізів в координатах “температура-концентрація”.

Побудова діаграм стану сплавів базується на експериментальному одержанні серії графіків охолодження розплавів з різним (заданим) співвідношенням (вмістом) компонентів системи та визначення за ними критичних температур (точок) фазових перетворень. Температури початку кристалізації сплаву називають *точками ліквідус* (від лат. *liquid* – рідкий), а закінчення кристалізації – *солідус* (від лат. *solid* – твердий).

**Система** – це сукупність металів або металевих сплавів, обраних для спостереження впливу на них певних факторів (температури, і тиску, концентрації).

**Під компонентами** зазвичай розуміють хімічні елементи (метали і неметали) або хімічні сполуки, які не розпадаються в досліджуваному інтервалі температур. Отже, чисті метали – це однокомпонентні системи, сплави з двох елементів – двокомпонентні системи і т. д.

**Фаза** – це хімічно однорідна частина системи, яка має свою будову, хімічний склад, властивості та відокремлена від інших частин (фаз) поверхнею розділу.

Закономірності всіх змін системи, залежно від внутрішніх і зовнішніх умов, підпорядковані *правилу фаз Гіббса*. Цей математичний вираз умов рівноваги системи визначає залежність між кількістю фаз, компонентів і числом ступенів вільності системи. Для металевих систем :

$$C = K + 1 - \Phi \quad (6.1)$$

де  $C$  – число ступенів вільностей;  $K$  – кількість компонентів;  $\Phi$  – кількість фаз.

**За характером взаємодії компонентів сплави можуть бути: твердий розчин, механічна суміш та хімічне з'єднання.**

Основні види діаграм стану двокомпонентних сплавів.

Розглянемо діаграми стану в загальному вигляді для пар компонентів, які умовно позначимо  $A$  і  $B$ . Залежно від взаємодії металів  $A$  і  $B$  у твердому стані вони утворюють діаграми стану різних типів.

Діаграма стану сплавів, які утворюють у твердому стані кристалічні тверді розчини з необмеженою взаємною розчинністю компонентів. У процесі охолодження таких сплавів з розплаву випадають кристали твердого розчину з різним співвідношенням компонентів. Верхня крива  $m$  (рис. 6.1) – ліквідус, нижня  $n$  – солідус. Вище лінії ліквідус всі сплави знаходяться у рідкому стані, нижче лінії солідус у – твердому. Внаслідок процесів дифузії концентрація сплаву вирівнюється (найактивніше – при повільному охолодженні). Прикладом таких сплавів може слугувати система сплавів  $\text{Cu} - \text{Ni}$ .

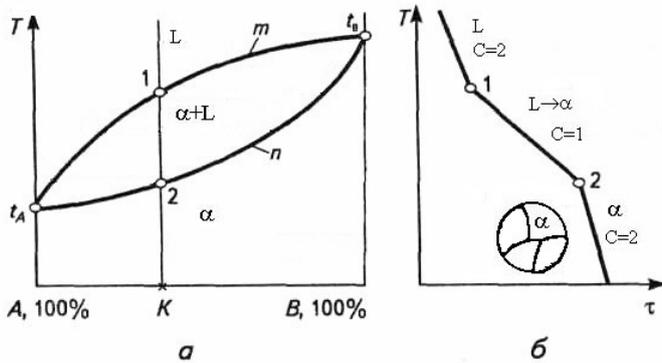


Рис.6.1. Діаграма стану (а) та крива охолодження (б) сплавів з необмеженою розчинністю компонентів в рідкому і твердому станах

В областях даної системи існує дві фази: ліква (рідкий стан сплаву) та твердий розчин.

Твердим розчином називається сплав, в якому один з компонентів зберігає свою кристалічну ґратку, а інший розчиняється в ній.

За характером розподілу компонентів тверді розчину можуть бути: заміщення та проникнення.

Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють тверді розчини з змінною розчинністю. Така діаграма характерна, наприклад, для системи сплавів  $\text{Cu} - \text{Ag}$ . Крива  $AEB$  – ліквідус, крива  $ADECB$  – солідус (рис. 6.2).

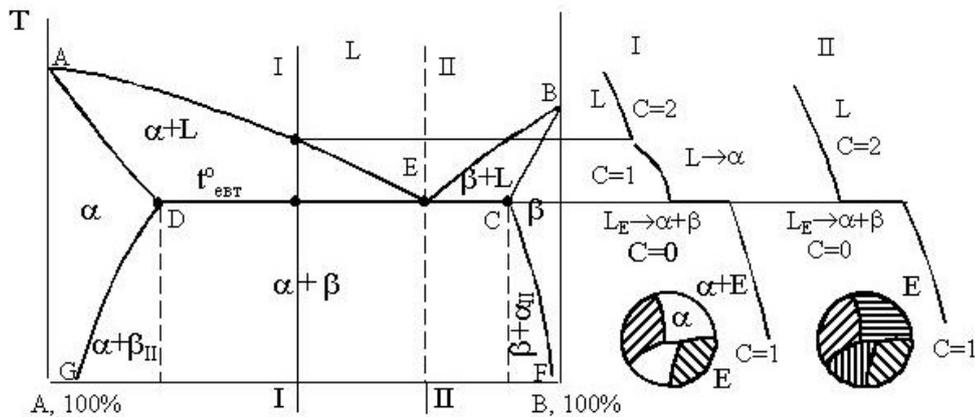


Рис. 6.2. Діаграма стану з утворенням евтектики. Показано криві охолодження і структури для сплавів I і II.

Кристали твердого розчину проникнення атомів компонента  $B$  у кристалічній ґратці компонента  $A$  ( $\alpha$ -твердий розчин) виділяються при температурах відповідно лінії  $AD$ . При температурах і концентраціях компонентів, що відповідають лінії  $CB$ , кристалізуються тверді розчини проникнення атомів компонента  $A$  у кристалічній ґратці компонента

$B$  ( $\beta$ -твердий розчин). Сплав, склад якого відповідає точці  $E$  на діаграмі, кристалізується з утворенням евтектики ( $\alpha + \beta$ ).

**Евтектикою називається механічна суміш дрібнодисперсних різнорідних кристалів, які утворюються одночасно при сталій температурі з рідини.**

**Механічною сумішшю називають сплав, в якому сила взаємодії між однорідними атомами є вища ніж сила взаємодії між різнорідними.**

Сплави між точками  $D$  і  $C$  після кристалізації з розплаву складаються з кристалів  $\alpha$ -твердого розчину і евтектики ( $\alpha + \beta$ ), а між точками  $C$  і  $E$  – з кристалів  $\beta$ -твердого розчину і евтектики ( $\alpha + \beta$ ). сплави з вмістом компонента  $B$ , меншим ніж у точці  $D$ , закінчують кристалізацію по лінії  $AD$  і складаються з кристалів  $\alpha$ . При зниженні температури (лінії  $DF$ ) ці кристали стають пересиченими щодо компонента  $B$ , тому з твердого  $\alpha$ -розчину утворюються кристали  $\beta_{II}$ -твердого розчину. Таку кристалізацію з твердого розчину називають *вторинною*, а з рідкого розчину – *первинною*

*Діаграма стану з перитектичним перетворенням.* Процес утворення нової твердої фази  $\alpha$  в результаті взаємодії старої твердої фази  $\beta$  з ліквою  $L$  називається перитектичним. На рис.6.3 показана діаграма стану для випадку утворення твердого розчину  $\alpha$  за перитектичною реакцією. Такі перитектичні перетворення спостерігаються в сплавах:  $Cu - Zn$ ,  $Cu - Sn$ ,  $Cd - Hg$  та інших.

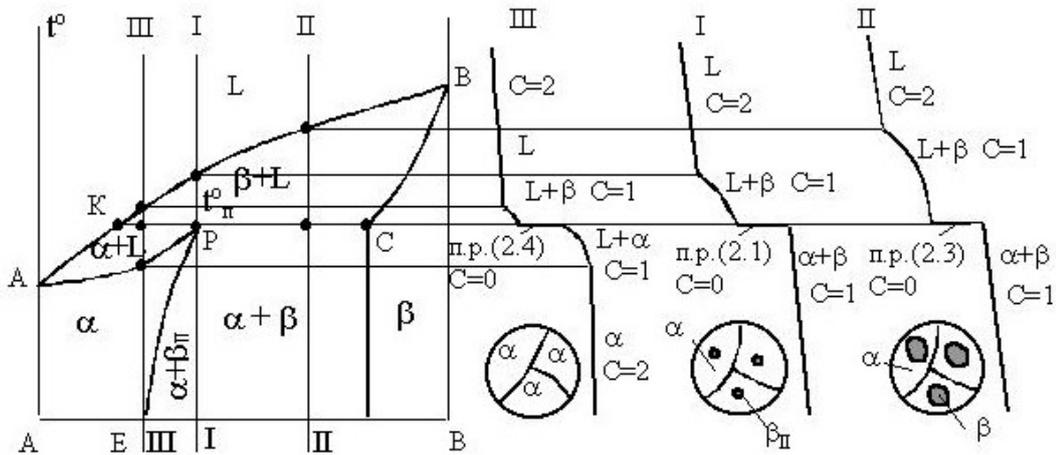


Рис. 6.3. Діаграма стану з утворенням перитектики.  
Показано криві охолодження і структури для сплавів I, II, III.  
(п.р. – перитектична реакція)

Розглянемо і запишемо таку реакцію для сплаву I – I. При зниженні температури від точки ліквідусу  $AKB$  до  $t_p$  з лікви виділяються кристали  $\beta$ . При сталій температурі  $t_p$  (по лінії  $KPC$ ) відбувається реакція:



За умови, що відношення мас лікви і кристалів  $\beta$  відповідає співвідношенню (за правилом відрізків):

$$\frac{m_L}{m_B} = \frac{PC}{KP} \quad (6.3)$$

де  $L_K$  - ліква з концентрацією т.К;

$\beta_C$  - кристали В(А) з концентрацією т.С;

$\alpha_P$  - кристали А(В) з концентрацією т.Р (або нова хімічна сполука компонентів А і В).

При подальшому зниженні температури внаслідок зменшення розчинності А в В по лінії РЕ з новоутворених кристалів  $\alpha$  будуть випадати вторинні дисперсійні кристали  $\beta_{II}$ . Структура цього сплаву показана на рис.1 під кривою охолодження I – I.

Для сплаву II – II співвідношення мас  $\frac{m_L}{m_B} = \frac{MC}{KM} < \frac{PC}{KP}$ , тобто тепер буде замало лікви (або забагато кристалів  $\beta$ ), щоб реакція протікала за зразком (1), і реакція буде відбуватися таким чином:



Результуюча структура буде виглядати як показано на рис.6.2 під кривою охолодження II – II.

Для сплаву III – III співвідношення мас  $\frac{m_L}{m_B} = \frac{NC}{KN} > \frac{PC}{KP}$ , тобто тепер буде забагато лікви (або замало кристалів  $\beta$ ), щоб реакція протікала за зразком (1), і реакція буде відбуватися таким чином:



Результуюча структура буде виглядати, як показано на рис.7.2 під кривою охолодження III – III.

Діаграма стану сплавів з утворенням хімічної сполуки. Таки й тип діаграми (рис. 6.4) характерний, наприклад, для сплавів системи Mg–Ca.

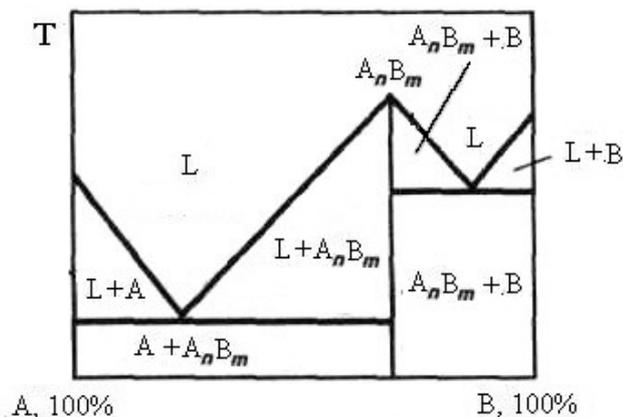


Рис. 6.4. Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічну сполуку

Хімічною сполукою називають сплав, в якому сила взаємодії між різнорідними атомами є вища ніж сила взаємодії між однорідними. Сплав хімічна сполука має наступні особливості:

- будова сплаву відрізняється від будови компонентів, що утворюють сплав;
- має свою температуру плавлення;
- відмінні фізико-механічні властивості.

Хімічну сполуку  $A_nB_m$  ( $Mg_4Ca_3$ ) можна розглядати як третій компонент, що поділяє діаграму стану системи  $A-B$  ( $Mg-Ca$ ) на дві діаграми першого типу: системи  $L-A_nB_m$  ( $Mg-Mg_4Ca_3$ ) та  $A_nB_m-B$  ( $Mg_4Ca_3-Ca$ ).

## 6.2. Порядок виконання роботи

1. Побудувати задану викладачем діаграму стану подвійних сплавів.
2. Позначити всі лінії діаграми, відмітити лінію ліквідус і солідус.
3. Провести структурний і фазовий аналіз діаграми і описати всі нон варіантні перетворення в сплавах.
4. Побудувати криву охолодження для заданого викладачем сплаву, пояснити всі перетворення які відбуваються в цьому сплаві, вказати число ступеней вільності для кожної ділянки та замалювати мікроструктуру.
5. Зробити висновки і написати звіт.

## 6.3. Контрольні запитання

1. Що таке сплав, система, компонент, фаза?
2. За якими принципами будуються діаграми стану?
3. Як записується правило фаз Гіббса?
4. Що таке твердий розчин, механічна суміш, хімічна сполука?
5. Які основні типи діаграм стану двокомпонентних сплавів?
6. Що означає поняття “кристалізація твердого розчину за перитектичною реакцією”?
7. Поясніть правило відрізків.

## Лабораторна робота № 6

### ПРАКТИЧНЕ ВИВЧЕННЯ ДІАГРАМИ СТАНУ $Fe - Fe_3C$

**Мета роботи** – розглянути діаграму стану  $Fe - Fe_3C$ , проаналізувати перетворення, які відбуваються в системі, навчитись визначати фазовий і структурний склад сплавів в залежності від температури і концентрації.

#### Теоретична частина

Діаграма стану системи  $Fe - Fe_3C$  графічно зображує фазовий стан залізобуглецевих сплавів залежно від вмісту вуглецю та температури за умови дуже повільного їх охолодження або нагрівання (рис. 7.1). Основою для побудови такої діаграми є дослідження Д. К. Чернова, пов'язані з відкриттям критичних температур (точок), що залежать від вмісту вуглецю у сплаві, а також уявлень про закономірності зміни при певних температурах структурного стану і властивостей залізобуглецевих сплавів.

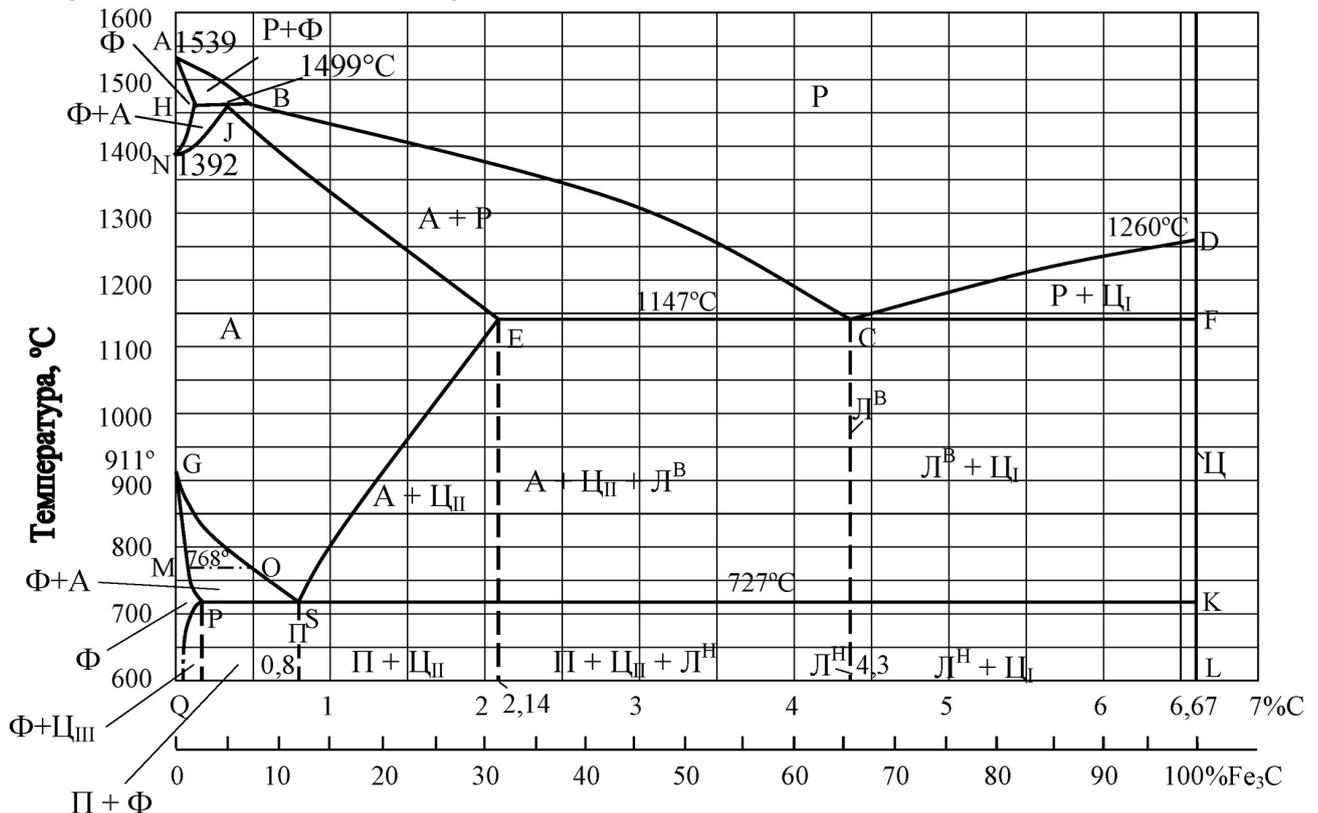


Рис. 7.1. Діаграма фазової рівноваги залізобуглецевих сплавів

Діаграма  $Fe - C$  (рис. 7.1) показана лише для інтервалу концентрації вуглецю від 0 до 6,67 %, тобто до утворення хімічної сполуки  $Fe_3C$  (цементит). Лише ця частина діаграми має практичне значення, оскільки сплави з більш високим вмістом вуглецю дуже крихкі.

При охолодженні залізобуглецевих сплавів вуглець може не тільки хімічно взаємодіяти із залізом, утворюючи  $Fe_3C$ , але й виділятися у вільному стані у вигляді графіту. Тому розрізняють дві діаграми стану: залізо - цементит ( $Fe - Fe_3C$ ) і залізо - графіт ( $Fe - C$ ).

На діаграмі перша зображена суцільними лініями, друга – штриховими. Оскільки цементит за певних умов розпадається з утворенням вільного вуглецю

(графіту), то діаграму в системі Fe - Fe<sub>3</sub>C називають нестабільною (метастабільною), а у системі Fe - C – стабільною.

Основні фази залізовуглецевих сплавів.

Фазою називають відокремлену частину системи, яка має свою, тільки їй притаманну, структуру, і свої властивості. Фаза відмежована від решти системи. Розрізняють такі фази в системі Fe – Fe<sub>3</sub>C.

Рідина (P) – рідкий розчин вуглецю та заліза.

Аустеніт ( $A = Fe_{\gamma}(C)$ ), – твердий розчин проникнення вуглецю на основі гранецентрованої кубічної ґратки (ГЦК)  $\gamma$ -заліза. Розчинність вуглецю в  $\gamma$ -залізі при зростанні температури підвищується і досягає максимуму (2,14 % C) при 1147 °С. Аустеніт пластичний, немагнітний, твердість його 170 НВ.

Ферит ( $\Phi = Fe_{\alpha}(C)$ ) - твердий розчин вуглецю на основі об'ємноцентрованої кубічної ґратки (ОЦК) заліза. Високотемпературний  $\delta$ -ферит містить максимальну кількість вуглецю – 0,1 %. У низькотемпературному  $\alpha$ -фериті максимальна розчинність вуглецю становить 0,025 % при 727 °С, а при зниженні температури зменшується практично до нуля (0,006%). Ферит м'який (80... 100 НВ), пластичний, нижче 768 °С магнітний.

Цементит ( $\Psi = Fe_3C$ ) - хімічна сполука, яка утворюється в залізовуглецевих сплавах, карбід заліза Fe<sub>3</sub>C. Це найбільш тверда (780 НВ) і крихка фаза в системі залізо – вуглець, нижче 217 °С магнітна. Цементит містить 6,68 % C, має складну орторомбічну кристалічну ґратку з дванадцятьма атомами заліза і чотирма вуглецю, температура плавлення становить близько 1260 °С.

Існують різновиди  $\Psi$ :

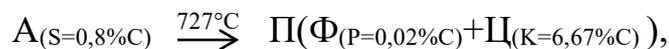
Цементит первинний ( $\Psi_I$ ) – виділяється з рідини при охолодженні нижче температур лінії CD;

Цементит вторинний ( $\Psi_{II}$ ) – виділяється з аустеніту (A) внаслідок зменшення розчинності C в  $Fe_{\gamma}(C)$  при зниженні температурі від 1147°С до 727°С (нижче лінії ES).

Цементит третинний ( $\Psi_{III}$ ) – виділяється з фериту  $\Phi$  внаслідок зменшення розчинності C в  $Fe_{\alpha}(C)$  при зниженні температури від 727°С до кімнатної з фериту низькотемпературного ( $Fe_{\alpha}$ ) при охолодженні нижче температур лінії PQ.

Нонваріантні перетворення на діаграмі Fe–Fe<sub>3</sub>C

При температурі 727 °С в системі протікає евтектоїдне перетворення



в результаті якого утворюється евтектоїдна (механічна) суміш фериту та цементиту, яка утворюється при 727 °С і вмісті вуглецю 0,8 %, та має назву **перліт** (П). Залежно від будови перліту змінюються і його властивості. Так, пластинчастий перліт більш твердий, крихкий та міцніший за зернистий (160...230 НВ;  $\sigma_b = 600...800$  МПа;  $\delta = 15...20\%$ ).

При температурі 1147 °С відбувається евтектичне перетворення



в результаті якого утворюється евтектична суміш аустеніту і цементиту (вище 727 °С) і називається **високотемпературний ледебурит** ( $L^B$ ), або перліту і цементиту (нижче 727 °С) – **низькотемпературний ледебурит** ( $L^H$ ). Він утворюється при вмісті вуглецю 4,3 % за температури 1147 °С, твердий (800 НВ) і крихкий. Це – структурна складова білих чавунів.

### Основні лінії діаграми

Лінії діаграми стану системи Fe - Fe<sub>3</sub>C (див. рис. 7.1) показують (визначають), за яких температур в залізовуглецевих сплавах відбуваються перетворення.

Лінія *ABCD*, що об'єднує точки початку кристалізації розплавів з різним вмістом вуглецю, називається *лінією ліквідусу*.

Лінія *AHIECF*, що відповідає точкам закінчення кристалізації, називається *лінією солідусу*.

*GOS* – лінія верхньої границі області рівноваги α- і γ-фаз. При охолодженні по цій лінії починається виділення α-фази (при нагрівання – γ- фази).

*SE* – лінія початку перетворення аустеніту з утворенням цементиту.

*PQ* – лінія початку виділення цементиту (третинного) при охолодженні або розчинення третинного цементиту при нагріванні.

Однофазні області δ-фериту, α-фериту та аустеніту обмежені відповідно лініями *AHN*, *GPQ* і *NIESG*.

Сплави по лінії *ECF*, що відповідає евтектичній температурі 1147 °С, складаються з рідини, аустеніту і цементиту.

Сплави на лінії *PSK*, яка відповідає евтектоїдній температурі 727 °С, складаються з аустеніту, фериту і цементиту. При температурах 768 °С (лінія *MO* для сталі) і 210 °С (для чавуну) спостерігається магнітне перетворення відповідно фериту і цементиту.

### Характерні точки

Ці точки відповідають певним температурам і концентраціям вуглецю (мас. %).

Точка *A* відповідає температурі плавлення (або тверднення) чистого заліза (1539 °С).

Точка *C* вказує на вміст вуглецю (4,3 %) у рідкій фазі в стані рівноваги з аустенітом при евтектичній температурі (1147 °С).

Точка *E* відповідає 2,14 % C в аустеніті, що перебуває в рівновазі з цементитом при евтектичній температурі.

Точка *S* відповідає 0,8 % C в аустеніті, який перебуває в рівновазі з перлітом (ферит + цементит) при евтектоїдній температурі (727 °С).

Точка *P* відповідає 0,02 % C – граничній кількості вуглецю, розчиненого у фериті, що перебуває у рівновазі з аустенітом і цементитом при евтектоїдній температурі.

## Практична частина

1. Побудувати діаграму стану залізовуглецевих сплавів.
2. Позначити буквами її вказати значення температур і вміст вуглецю.
3. Описати фази і структурні складові сплавів, вказати їх області на діаграмі.
4. Записати і пояснити реакції утворення фаз і структурних складових в залізовуглецевих сплавах згідно їх діаграмі.
5. Побудувати криву охолодження для заданого викладачем сплаву, пояснити всі перетворення які відбуваються в цьому сплаві, вказати число ступіней вільності для кожної ділянки та замалювати мікроструктуру.
6. Зробити висновки і написати звіт.

## Контрольні запитання.

1. Чим відрізняються сталь і чавун?
2. Чим відрізняються метастабільна і стабільна діаграма стану системи залізо-вуглець?
3. Вкажіть основні лінії діаграми залізовуглецевих сплавів системи  $Fe - Fe_3C$ .
4. Вкажіть особливі точки на діаграмі залізовуглецевих сплавів системи  $Fe - Fe_3C$ .
5. Які основні фази утворюються в залізовуглецевих сплавах (сталях, чавунах)?
6. Які перетворення відбувається в залізовуглецевих сплавах згідно діаграмі?
7. Які поліморфні модифікації заліза ви знаєте?

## Лабораторна робота № 7

### ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ, БІЛИХ І СІРИХ ЧАВУНІВ

**Мета роботи** - ознайомитись з мікроструктурою і твердістю вуглецевих сталей в рівноважному стані, та з мікроструктурами білих і сірих чавунів

#### Основні положення і зміст роботи ВУГЛЕЦЕВІ СТАЛІ

Під рівноважним розуміється стан, який відповідає мінімальному значенню вільної енергії. Він досягається при дуже малих швидкостях охолодження.

Сталями називаються залізо - вуглецеві сплави при вмісті вуглецю до 2,14%. Технічні сталі мають постійні  $Mn, Si, P, S$  і заховані ( $O, N, H$ ) домішки. Але фазовий і структурний стани залізобуглецевих сплавів у рівноважному стані досить точно вказує подвійна діаграма стану залізо - вуглець. Існує дві діаграми стану залізобуглецевих сплавів: стабільна (залізо – графіт) і метастабільна (залізо – цементит).

Найбільше значення має метастабільна діаграма залізо - цементит. При вивченні діаграми необхідно відрізнити поняття: компоненти, фази і структурні складові.

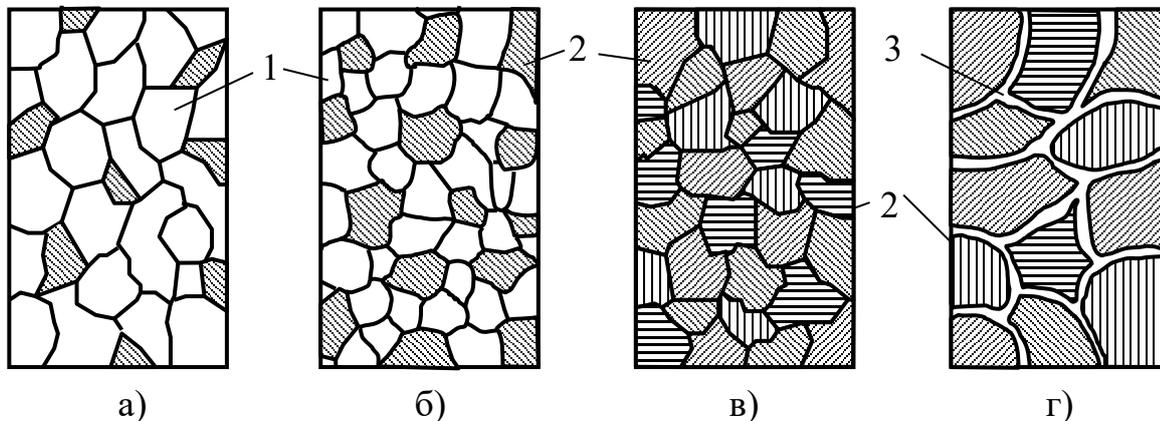


Рис. 8.2. Схема мікроструктури вуглецевих сталей:

а, б - доєвтектоїдні (сталь 20 та сталь 45); в - евтектоїдна (У8); г - заєвтектоїдна (У12). Структурні складові: 1 - ферит, 2 - перліт, 3 - цементит (вторинний)

Сталь з вмістом вуглецю 0,8% називається евтектоїдною. Сталі, що містять вуглецю від 0,02 до 0,8%, належать до доєвтектоїдних. Заєвтектоїдні сталі містять вуглецю від 0,8 до 2,14%.

При охолодженні доєвтектоїдних сталей в інтервалі температур між лініями GS та PS з аустеніту утворюється ферит, який містить мало вуглецю. Для визначення концентрації вуглецю у фериті і відповідно в аустеніті користуються правилом відрізків (відповідно проєкціями точок  $a$  і  $c$  на вісь концентрації), а співвідношення між фазами визначається як  $\Phi : A = bc : ab$  (див. рис. 8.1).

Внаслідок утворення фериту при подальшому охолодженні доєвтектоїдних сталей концентрація вуглецю в аустеніті збільшується і при 727°C становить 0,8%. Створюються всі умови для проходження евтектоїдного перетворення, після закінчення якого структура цих сталей складається з фериту і перліту (рис. 8.2, а, б). Кількість перліту в сталі змінюється пропорційно вмісту вуглецю.

Структура заевтектоїдних сталей складається з перліту і вторинного цементиту, при повільному охолодженні вторинний цементит кристалізується по межах зерен аустеніту (внаслідок зменшення розчинності вуглецю в аустеніті - лінія ES), утворюючи тверду й крихку оболонку, яку у вигляді сітки можна побачити під мікроскопом (рис. 8.2,г).

### БІЛІ ТА СІРІ ЧАВУНИ

Чавуном називаються такі залізовуглецеві сплави, які вміщують від 2,14 до 6,67% вуглецю. Чавуни за структурою поділяють на білі, сірі та половинчасті.

Білі - це чавуни, у яких практично весь вуглець знаходиться у вигляді цементиту, а сірі - чавуни, в яких вуглець повністю або частково знаходиться у вигляді графіту.

#### Мікроструктура білих чавунів

Діаграма стану залізо - цементит показує стан і перетворення в білих чавунах (див.рис. 8.1). Тут відбувається евтектичне перетворення, в результаті якого утворюється ледебурит - евтектична механічна суміш, яка складається з аустеніту і цементиту, утворюється з рідкої фази при 1147 °С. Нижче 727 °С ледебурит складається з перліту і цементиту. Вміст вуглецю в ледебуриті дорівнює 4,3%.

За своєю структурою білі чавуни поділяються на такі класи: 1) доевтектичні, що містять вуглецю від 2,14 до 4,3%. Структура їх складається з перліту, вторинного цементиту й ледебуриту (рис. 8.3,а);

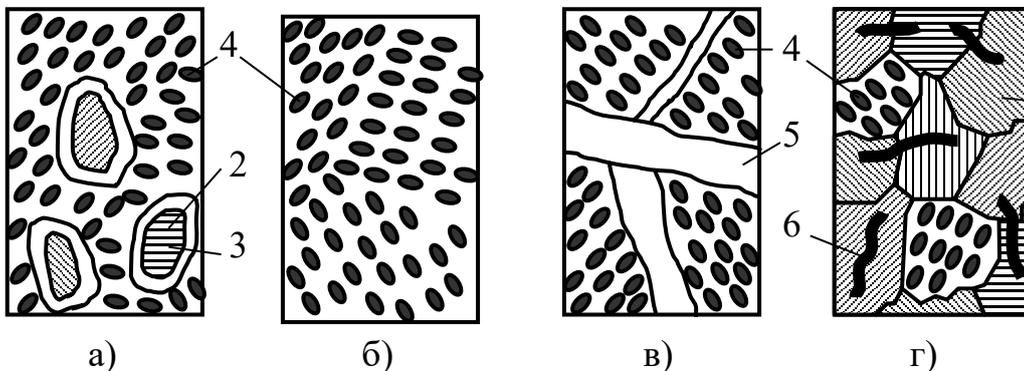


Рис. 8.3. Схема мікроструктур білих чавунів:

а - доевтектичний, б - евтектичний, в - заевтектичний, г - половинчастий. Структурні складові: 2 - перліт, 3 - цементит, (вторинний), 4 - ледебурит, 5 - цементит первинний, 6 - графіт пластинчастий.

2) евтектичний, що містить 4,3% вуглецю. Структура його складається з ледебуриту (рис. 8.3.б);

3) заевтектичні чавуни, що містять вуглецю від 4,3 до 6,67%. Структура їх складається з первинного цементиту та ледебуриту (рис.8,3,в).

У зв'язку з тим, що в білих чавунах весь вуглець знаходиться в складі цементиту, білі чавуни дуже крихкі й тверді і не піддаються обробці різанням.

Чисті білі чавуни в машинобудуванні не застосовуються, вони звичайно переробляються на сталь або використовуються для одержання ковкого чавуну. З метою підвищення стійкості проти спрацювання виливок із сірого чавуну в поверхневому шарі створюється структура білого або відбіленого чавуну (рис. 8.3, г).

### Мікроструктури сірих чавунів

Сірі звичайні, високоміцні та ковкі чавуни характеризуються тим, що в них весь вуглець або частина його знаходиться у вільному стані у вигляді графіту, форма виділень графіту у них різна. За структурою (металічною основою) ці чавуни можуть бути: а) феритні, структура їх буде складатися з фериту і графіту; б) феритно-перлітні зі структурою фериту, перліту та графіту; в) перлітні зі структурою перліту та графіту.

Отже, структура сірих чавунів відрізняється від структури сталі наявністю вільного графіту.

Графіт у сірих чавунах може бути у трьох основних формах: пластинчастій, кулястій і пластівчастій.

У звичайному сірому чавуні графіт утворюється у вигляді листочків; такий графіт називається пластинчастим. На рис. 8.4,а та 8.4,б показана структура звичайного сірого чавуну з феритною і відповідно перлітною основою.

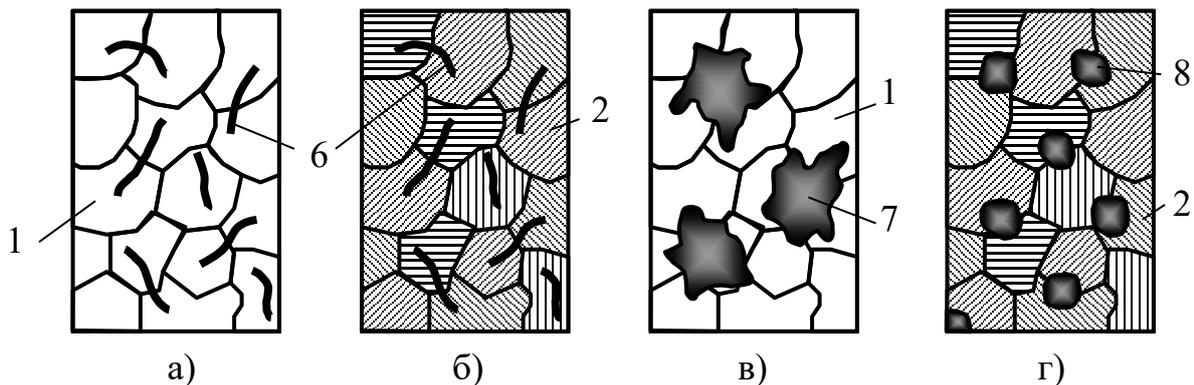


Рис.8.4. Схема мікроструктур сірих чавунів:

а – сірого феритного; б – сірого перлітного; в – ковкого феритного; г – високоміцного перлітного. Структурні складові: 1 – ферит; 2 – перліт; 6 – графіт пластинчастий; 7 – графіт пластівчастий (графіт відпалу), 8 – графіт кулястий

Чавуни з пластинчастим графітом називають звичайними сірими чавунами.

Якщо при виливанні одержати білий чавун, а потім, використовуючи нестійкість цементиту, шляхом відпалу його розкласти, то утворений графіт одержує компактну, майже рівновісну, але не округлу форму (форму крижинок). Такий графіт називається пластівчастим, або вуглецем відпалу. Мікроструктура феритного чавуну з пластівчастим графітом показана на рис. 8.4,в.

Чавун із пластівчастим графітом називається ковким.

Чавун з кулястим графітом називається високоміцним. У сучасних так званих високоміцних чавунах, виплавлених з домішками невеликої кількості магнію, графіт має форму кулі. На рис.8.4, г показана мікроструктура перлітного чавуну з кулястим графітом.

#### 8.2. Порядок виконання роботи

1. Дослідити під мікроскопом і замалювати мікроструктури білих чавунів.
2. Дослідити під мікроскопом і замалювати мікроструктури сірих чавунів.

#### 8.3. Контрольні запитання

1. Які вуглецеві сплави називаються чавунами?
2. Чим відрізняється білий чавун від сірого?
3. На які класи за структурою поділяються білі чавуни?
4. Що таке ледебурит?
5. У яких формах буває графіт у сірих чавунах?
6. Яка металічна основа може бути в сірих чавунах?
7. Що таке звичайний сірий чавун, ковкий чавун і високоміцний чавун?

## Лабораторна робота № 8 ЗАГАЛЬНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ

**Мета роботи:** ознайомитись з технологією проведення різних видів термообробки (ТО) сплавів, практично виконати процес гартування вуглецевої конструкційної сталі в різних охолоджуючих середовищах.

### 10.1. Основні положення і зміст роботи

#### 1. Класифікація основних видів ТО сплавів

Термообробку в машинобудуванні поділяють на три великих класи:

- термічну (звичайну) обробку (ТО);
- хіміко-термічну обробку (ХТО);
- термомеханічну (ТМО).

Звичайна **термічна обробка** включає чотири основні види: відпал, гартування, відпускання, старіння.

**Відпалом** – це вид ТО, при якому формується структура сплаву (сталі), що наближена до рівноважної (стабільної).

**Гартування** – це процес, при якому сплав нагрівають до температур, вищих за фазові перетворення, витримують та швидко охолоджують для отримання нестійкого (метастабільного) стану. В залежності від виду діаграми стану сплавів гартування може приводити до збільшення їх твердості, чи навпаки її зменшення.

Гартування сталей та чавунів завжди приводить до значного збільшення їх твердості та зменшення пластичності. Це викликано формуванням в структурі загартованої сталі чи чавуну пересиченого твердого розчину – мартенситу. Гартування деяких сплавів кольорових металів викликає навпаки зменшення їх твердості та підвищення пластичності.

**Відпускання** – це процес, який проводять з метою отримання більш стійких структур загартованої сталі чи чавуну. Відпускання, таким чином, виконують лише після гартування. Цей процес полягає у повторному нагріванні загартованої сталі до невисоких температур (140...650 °С) та певної витримки. При цьому сталь набуває більшої пружності, в'язкості менш схильна до крихкого руйнування, тобто стає більш міцною. Твердість загартованої сталі після відпускання зменшується.

**Старінням** називають процес розпаду перенасичених загартованих твердих розчинів, в яких при гартуванні поліморфних перетворень не відбувалось. Такі розчини властиві більшості сплавам кольорових металів, відповідно, старіння

частіше проводять для сплавів кольорових металів. Старіння полягає у тривалій витримці загартованих сплавів при звичайних чи підвищених температурах, тобто без нагріву чи з повторним нагріванням до невисоких температур. Відповідно до цього старіння буває природнім (без нагрівання) та штучним (з нагріванням). Після старіння м'які загартовані сплави стають твердішими та більш міцними.

**Хіміко-термічна обробка** поєднує теплову дію з хімічною, в результаті чого в поверхневих шарах змінюється і хімічний склад, і структура сплаву. Найчастіше ХТО застосовують до сталей та чавунів. Хімічна дія полягає у насиченні поверхні сталі, при високих температурах, елементами: С, N, В, Cr, Al, Si та ін.

**Термомеханічна обробка** поєднує в собі процеси нагріву та пластичної деформації. Розрізняють високотемпературну термомеханічну обробку (ВТМО) та низькотемпературну (НТМО). При ВТМО сплав нагрівають вище фазових перетворень, проводять деформування і відразу піддають гартуванню. При НТМО сплав нагрівають вище фазових перетворень, різко охолоджують до  $T \approx T_{\text{рекр.}}$  та піддають деформуванню і наступному гартуванню.

## 2. Відпал I та II-го роду. Нормалізація

У практиці термічної обробки розрізняють два види відпалу:

- відпал I-го роду;
- відпал II-го роду.

Для більшості видів відпалу, після нагріву та витримки, сплави охолоджують дуже повільно.

Відпал I-го роду може проводитись вище чи нижче критичних температур ( $A_1$ ,  $A_2$  для сталей) і не пов'язаний з проходженням фазових перетворень. Метою цього відпалу є гомогенізація (досягнення хімічної однорідності), рекристалізація, пониження твердості, зняття внутрішніх напружень у деталях.

Гомогенізаційний відпал застосовують для усунення дендритної, хімічної ліквіації чи для виправлення литої структури злитків. Для виконання цього відпалу сплави нагрівають до високих температур, щоб досягнути інтенсивної дифузії атомів. Для сталевих деталей та злитків це 1100...1150 °С. Час витримки залежить від завершення дифузійних процесів і може становити 10...16 годин. Після витримки, охолодження деталей проводять дуже повільно (разом з пічним обладнанням). Після цього відпалу сплави стають більш пластичними.

Рекристалізаційний відпал застосовують до холоднодеформованих металів та сплавів з метою зняття наклепу, волокнистості структури та поновлення пластичності. Нагрів виконують до  $T \geq T_{\text{рекр.}}$

Відпал для зняття внутрішніх напружень та пониження твердості проводять при невисоких температурах (200...300 °С). Його застосовують, наприклад, до зварних з'єднань.

Відпал II-го роду обов'язково пов'язаний з фазовими перетвореннями сплавів. Відповідно деталі чи вироби нагрівають до температур фазових перетворень, як правило на декілька градусів вище критичних точок. Так, для сталей це нагрів до температур  $A_{c1}$ ,  $A_{c3} + 20...30$  °С. При цих температурах сталь витримують та охолоджують таким чином, щоб утворились перлітні структури.

До відпалу II-го роду відносять:

- повний відпал;
- неповний відпал;
- ізотермічний відпал;
- нормалізацію.

Повний та неповний відпал (рис. 10.1) пов'язані з перекристалізацією сталі, їх застосовують для виправлення чи подрібнення структури.

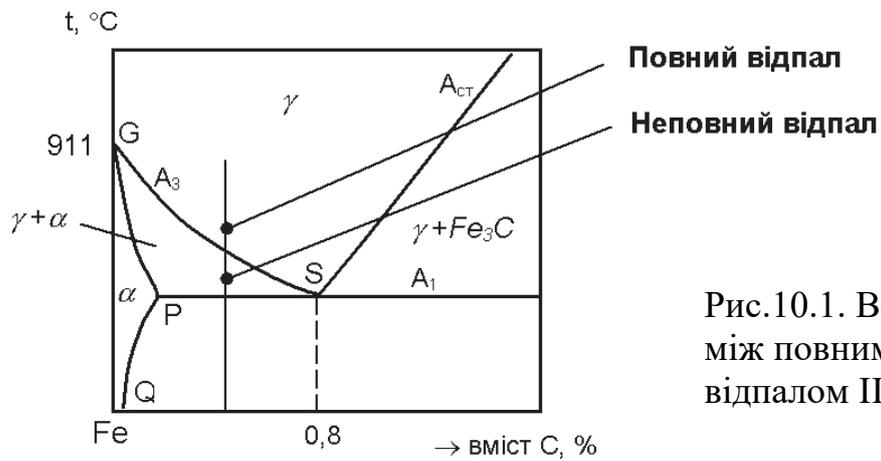


Рис.10.1. Відмінності між повним та неповним відпалом II-го роду.

Ізотермічний відпал застосовують для отримання перлітної структури сталі необхідного ступеня дисперсності (сорбіт, троостит). Сталь нагрівають до температур повного відпалу, витримують та швидко переносять в ізотермічне середовище, що має температуру на 100...150 °С нижче температури  $A_1$ .

Нормалізація – це обробка, яка забезпечує отримання нормального зерна в сталі. Сталь нагрівають до температури  $A_{c3}$ ,  $A_{c1}+20...30$  °С витримують та охолоджують на повітрі, тобто прискорено. Нормалізація зменшує крупнозернистість сталі, сприяє покращенню властивостей. Частіше її застосовують для заевтектоїдних сталей з метою усунення цементитної сітки по границям зерен перліту.

### **3. Гартування. Види гартування. Загартованість та прогартованість сталі**

Гартування – це операція нагрівання сплавів до температур вище фазових перетворень, витримки та наступного швидкого охолодження для отримання метастабільних структур.

При гартуванні сталей та чавунів утворюється метастабільна структура високої твердості – мартенсит.

**Мартенсит** – це перенасичений твердий розчин карбону у  $\alpha$ -залізі ( $Fe_\alpha$ ). Мартенсит має тетрагональну кристалічну ґратку.

Розрізняють два основних види гартування: повне та неповне. При повному гартуванні нагрів виконують до температур  $A_{c3}+20...30$  °С, його застосовують для доевтектоїдних сталей. При неповному гартуванні нагрів виконують до температур  $A_{c1}+20...30$  °С, його застосовують для евтектоїдних та заевтектоїдних сталей.

Для прискореного охолодження, при виконанні гартування, використовують рідинні середовища: вода, технічна олива, соляні розчини та розплави.

Основною метою гартування сталей та чавунів є досягнення високої твердості деталей. При цьому важливим параметром є загартованість сталі. Загартованістю називають здатність сталі отримувати найвищу твердість після гартування. Більшу загартованість мають сталі з більшим вмістом карбону. Висока твердість загартованих сталей забезпечує високу зносостійкість поверхні деталей, але міцність, в деяких випадках, може бути невисокою внаслідок низької їх в'язкості.

Результати гартування залежать від розмірів деталей та виробів. При великих розмірах, висока твердість характерна лише поверхневим шаром деталі, а серцевина може залишитись незагартованою. Для оцінки цього явища користуються параметром, який називають прогартованістю. Прогартованість – це здатність сталі отримувати структуру мартенситу на певну глибину. Прогартованість характеризують критичною швидкістю охолодження, яка визначена для кожної марки сталі. Якщо реальна швидкість охолодження перевищує критичну, то деталь прогартується на всю товщину.

Для підвищення в'язкості та міцності загартованих сталей їх піддають відпусканню.

#### 4. Низьке, середнє та високе відпускання. Поліпшення сталі

При відпусканні загартованих сталей їх повторно нагрівають до температур нижче критичної температури  $A_1$  (температури перлітного перетворення). Мета відпускання – переведення нерівноважної структури загартованої сталі у більш рівноважний стан. Відпусканням також знімають внутрішні напруження, які виникають під час гартування. Основний вплив на властивості сталі має температура відпускання. Залежно від температури розрізняють три види відпускання:

- низьке відпускання;
- середнє відпускання;
- високе відпускання.

**Низькотемпературне (низьке) відпускання** здійснюють при нагріванні сталі до 150...250 °С протягом 1,5...3 год. При цьому тетрагональний мартенсит гартування перетворюється на мартенсит відпуску (кубічний), дещо знижується твердість і крихкість, зменшуються внутрішні напруження гартування. Такому відпуску піддають різальні та вимірвальні інструменти з вуглецевих і легованих сталей.

**Середньотемпературне (середнє) відпускання** здійснюють при 300...450 °С для обробки деталей, що працюють за умов тертя і динамічних навантажень (пружини, ресори, штампи). Структура сталі після середнього відпускання – троостит відпуску або троостито-мартенсит, твердість сталі 40...50 HRC. Це забезпечує високий поріг пружності, в'язкості та опір розриву сталі.

**Високотемпературне (високе) відпускання** проводять при 500...680 °С. При цьому відбувається збільшення розміру і сфероїдизація дисперсних карбідних часток ( $Fe_3C$ ), зростає феритне зерно і утворюється сорбіт відпуску. Високе відпускання створює найкраще співвідношення міцності й в'язкості сталі. Тому термічну обробку, яка складається з гартування та високого відпускання, називають поліпшенням.

#### 10.2. Контрольні запитання

1. Класифікація основних видів ТО.
2. Відпал I та II роду.
3. Що таке нормалізація?
4. Що таке гартування? Які види гартування знаєте?
5. Відпуск сталей. Що таке поліпшення?

## Лабораторна робота № 9

### ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРИ, ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПРИНЦИПІВ МАРКУВАННЯ ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

#### Основні положення і зміст роботи

1. Загальна характеристика легованих сталей. Вплив легуючих елементів на залізовуглецеві сплави

Легованими називають сталі, в яких з метою зміни їх структури та властивостей введено спеціальні хімічні елементи. Ці елементи прийнято називати легуючими. Більшість легуючих елементів, які вводять у сталі та чавуни є металами. Легуванню піддають, як правило, якісні або високоякісні сталі.

При легуванні залізовуглецевих сплавів суттєво змінюється їх структурний стан. Це пов'язано з сильним впливом легуючих елементів на поліморфізм заліза і, відповідно, на вид діаграми стану Fe-C (рис.12.1). За впливом на діаграму стану залізовуглецевих сплавів легуючі елементи поділяють на  $\alpha$ -стабілізуючі (феритні – розширюють область існування фериту) та  $\gamma$ -стабілізуючі (аустенітні – розширюють область існування аустеніту).

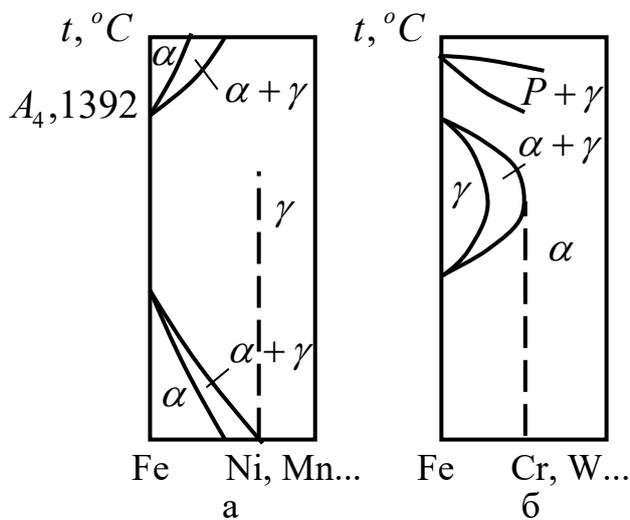


Рис.12.1. Вплив легуючих елементів на поліморфізм заліза:  
а – аустенітні (Ni, Mn, Cu ін.);  
б – феритні (Cr, V, Mo, Si, W ін.)

Легуючі елементи також впливають на положення точок S та E на діаграмі Fe-C. Зменшуючи розчинність вуглецю в аустеніті, легуючі елементи зсувають точку E (граничний вміст вуглецю між сталями і чавунами) вліво (рис. 12.2). Це призводить до того, що легована сталь, в якій міститься менше ніж 2,14% C, буде мати в литій структурі ледебурит - складову білих чавунів. Такі сталі називають ледебуритними.

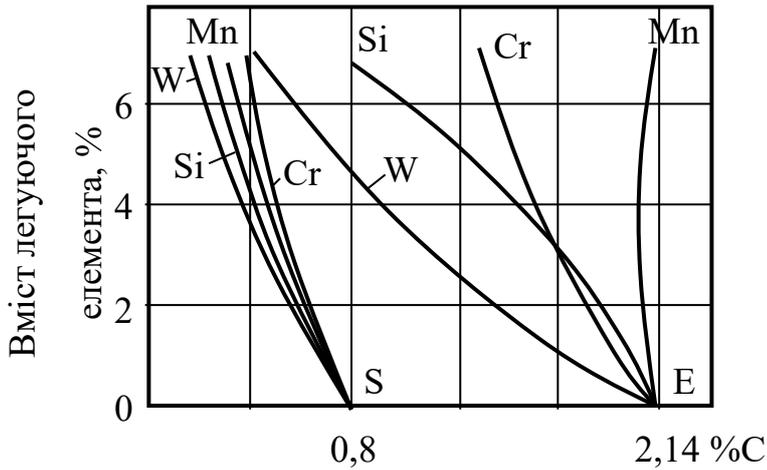


Рис.12.2. Вплив легуючих елементів на положення точок S та E діаграми залізо – вуглець

Розчиняючись у твердих розчинах (ауспеніті та фериті), а також проникаючи в цементит, легуючі елементи суттєво змінюють їх властивості. Зокрема, твердість фериту та ауспеніту підвищується, разом з тим зростає їх міцність. Відповідно, це впливає і на загальні властивості сталей. Проте, слід пам'ятати що деякі елементи можуть зменшувати в'язкість сталей (КСУ). Так впливає кремній, тому його вміст у конструкційних легованих сталях рідко перевищує 2 %.

## 2. Принципи маркування легованих сталей

Леговані сталі маркують за буквено-цифровою системою, відповідно до якої легуючі елементи позначають російськими літерами:

Mn (манган)	– Г	Cr	– Х	N	– А (в середині марки)
Al	– Ю	Ti	– Т	Zr	– Ц
Cu	– Д	V	– Ф	Nb	– Б
Ni	– Н	W	– В	B	– Р
Si	– С	Mo	– М	Se	– Е
		Co	– К	P	– П

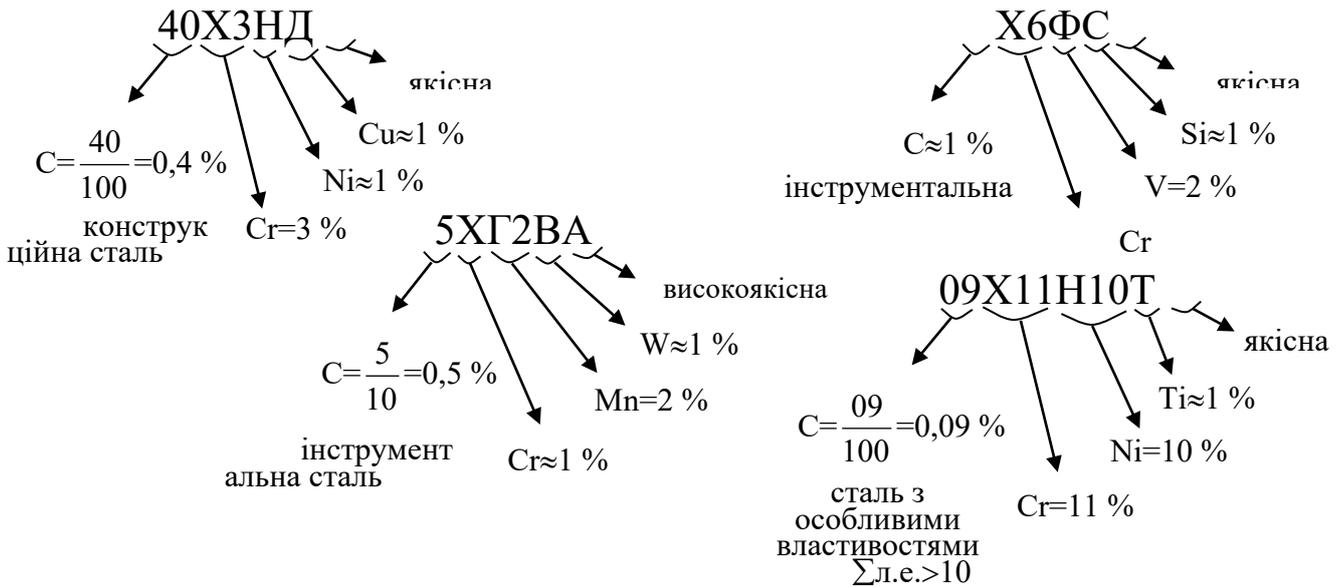
Вміст вуглецю в сталі завжди ставиться попереду марки. Якщо вміст вуглецю становить близько 1 %, то цифру не ставлять. У конструкційних легованих сталях чи сталях з особливими властивостями вміст вуглецю вказують двома цифрами, які показують соті частки відсотка. Якщо сталь інструментальна, вміст вуглецю позначають одною цифрою, яка показує вміст вуглецю в десятих частках відсотка. Слід пам'ятати, що більшість інструментальних сталей є високовуглецевими, тому якщо цифри попереду марки немає ( $C \approx 1\%$ ), то це інструментальна сталь. У випадку коли перед вмістом вуглецю стоїть буква А, необхідно пам'ятати, що це автоматна конструкційна сталь.

Вміст легуючих елементів завжди ставлять після відповідного буквеного позначення. Причому, цифри відповідають цілим одиницям відсотка. Якщо вміст легуючого елемента близький до 1 %, то цифру не ставлять. В легованих сталях з особливими властивостями сумарний вміст легуючих елементів ( $\Sigma \text{л.е.}$ ) часто перевищує 10 %.

Високоякісні леговані сталі позначають буквою А в кінці марки. Це вказує на дуже малий вміст шкідливих домішок S, P. Якщо букви А в кінці марки

немає, то сталь є якісною.

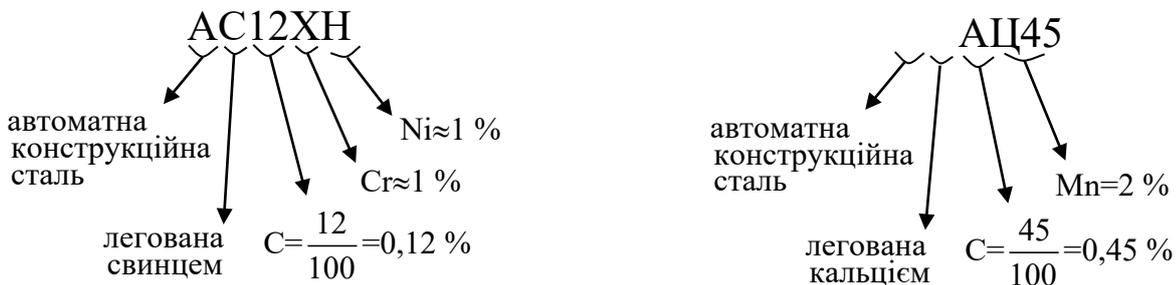
Приклади маркування більшості легованих сталей:



Деякі марки легованих сталей виділено в окремі групи. Їх маркування відрізняється від загальних принципів. Зокрема, до таких сталей відносять: автоматні, підшипникові, швидкорізальні, електротехнічні, магнітні. Ці сталі попереду марки позначають буквами:

- А – автоматні
- Ш – підшипникові
- Р – швидкорізальні
- Э – електротехнічні
- Е – магнітні

Автоматні леговані сталі додатково легують свинцем (позначають буквою С), селеном (Е), кальцієм (Ц). Ці елементи покращують обробку різанням. Решта легуючих елементів позначаються за загальними правилами.



Підшипникові сталі використовують для виготовлення деталей підшипників кочення. Вміст вуглецю в них завжди однаковий і становить близько 0,9 %, в марці сталі його не ставлять. Всі підшипникові сталі легують хромом, який підвищує контактну міцність. Треба пам'ятати, що його вміст в цих сталях не перевищує 2,5 %. Його вміст в марці сталі вказують після відповідного буквеного позначення цифрами, які відповідають десятим долям відсотка. В підшипникових сталях можуть бути інші легуючі елементи, які позначають за загальними правилами. Наприклад  
 ШХ6 – підшипникова конструкційна сталь;  $C = 0,9\%$ ;  $Cr = 0,6\%$ ; якісна.  
 ШХ15СГ – підшипникова конструкційна сталь;  $C = 0,9\%$ ;  $Cr = 1,5\%$ ;  $Si \approx 1\%$ ;  $Mn \approx 1\%$ .

**Швидкорізальні сталі** відносять до інструментальних. З них виготовляють інструмент, що працює при великих швидкостях різання і зазнає інтенсивного нагрівання. Всі швидкорізальні сталі легують вольфрамом, який підвищує теплостійкість. Теплостійкість – це здатність інструментальних сталей зберігати твердість при підвищених температурах (450...550 °С). Швидкорізальні сталі маркують буквою Р попереду марки (Р – “rapid” з англ. “швидкий”). Після букви Р вказується вміст вольфраму у цілих одиницях відсотка. Вміст вуглецю в цих сталях може коливатись в межах 0,55...0,85 % (в марці не вказується). Інші легуючі елементи позначаються за загальними правилами. Наприклад

Р9 – швидкорізальна інструментальна сталь; C=0,55...0,85%; W=9 %; якісна.

Р6М5 – швидкорізальна інструментальна сталь; C=0,55...0,85%; W=6 %; Mo=5%; якісна.

Р18ФК5А – швидкорізальна інструментальна сталь; C=0,55...0,85%; W=18%; V≈1%; Co=5%; високоякісна.

**Електротехнічні сталі** використовують для виготовлення осердь трансформаторі, дроселів та ін. Їх маркують російською буквою Э. Ці сталі мають підвищений вміст кремнію (0,5...5 %). Вміст вуглецю в цих сталях невисокий 0,05...0,15 %. Це сталі марок Э42, Э45. Перша цифра вказує на вміст Si, може бути: 1, 2, 3, 4. Чим більша цифра тим більший вміст кремнію (4 – Si=3,8...4,8 %). Друга цифра вказує на рівень електротехнічних властивостей. Інколи цифр може бути чотири Э2112, Э4213. Останні дві цифри вказують на технологію виготовлення.

**Магнітні сталі** використовують для виготовлення постійних магнітів. Вони мають мати велике значення залишкової індукції. Їх використовують в литому стані. Вміст вуглецю в цих сталях вказується після букви Е у сотих частках відсотка. Це сталі Е12, Е25Х5 (Cr=5 %) та ін.

**Сталь Гатфільда** містить багато марганцю, який стабілізує аустеніт при кімнатній температурі. Відповідно ці сталі за структурою є аустенітними. Вміст вуглецю в цих сталях коливається в межах 1...1,5 %, вказується у сотих відсотка (якщо цифри немає C≈1%). Сталі Гатфільда застосовують для деталей що зазнають абразивного спрацювання (виготовляють котки землеробної техніки, траки гусениць тракторів, зуби ковшів екскаваторів тощо). Приклади маркування

Г13 – сталь Гатфільда C≈1%; Mn=13 %, якісна

110Г15 – сталь Гатфільда C=1,1%; Mn=15 %, якісна.

Якщо в будь-якій марці сталі в кінці стоїть буква Л, то це означає, що деталі та вироби з цієї сталі переважно отримують методами лиття. У випадку коли вміст вуглецю в сталі дуже малий попереду марки ставлять один або два нулі: 0Х15 (C≤0,08%), 00Х18Т10 (C≤0,05%).

## Класифікація легованих сталей

Основна ознака класифікації	Класифікація	Група сталі	Приклади марок сталей
1. За хімічним складом	за вмістом вуглецю	низьковуглецеві $C \leq 0,25 \%$	10X17, 18ХГТ, 20X, 25ХГ
		середньовуглецеві $0,25\% < C \leq 0,6 \%$	30ХГСА, 40X, 55С2
		високовуглецеві $C > 0,6 \%$	X, 7ХФ, Х3М, Х12М
	за ступенем легування	низьколеговані $\Sigma \text{л.е.} \leq 2 \%$	40ХН, 35ГС, 6ХФ
		середньолеговані $2 \% < \Sigma \text{л.е.} \leq 10 \%$	ХГТ, 3Х3М3Ф, 30ХГС
		високолеговані $\Sigma \text{л.е.} > 10 \%$	20X13, Х18Н9Т, 12X15Н10Т2А
	За складом легування (в залежності від присутності легуючих елементів)	хромисті	20X, 45X, 30X
		хромомарганцеві	20ХГ, 50ХГ
		хромомарганцекремнієві	30ХГСА, 18ХГС
		та ін.	
2. За призначенням	конструкційні	<u>машинобудівні</u>	
		- цементовані	20X, 18ХГТ, 20ХГР
		- поліпшувані	30X, 40X, 40ХФА
		- ресоропружинні	50С2, 60СГ, 70С3А
		- для холодного штампування	08Ю, 10Фкп, 16ГФР
		- автоматні	АС12ХН, АЦ30Х
		- підшипникові	ШХ6, ШХ15С, ШХ20
		<u>будівельні</u>	
		- арматурні	35ГС, 25ГС2, 80С
		- для конструкцій та споруд	09Г2, 14Г2, 17ГС
	інструментальні	сталі для ріжучого інструменту	7ХФ, 8ХФ, ХВГ
		швидкорізальні сталі	Р9, Р18, Р10ФК5
		сталі для штампувального інструменту	9ХС, Х12М, 5ХНМ, 3Х8В2Ф, 3Х3М3Ф
		сталі для вимірювального інструменту	X, ХГ, 38ХВФЮА, 4Х13
		сталі з особливими властивостями	
	нержавіючі		10X13, 20X13, 10X18Н10
		жароміцні	Х18Н10Т, 4Х14Н14В2М
		зносостійкі	110Г13, 0X14А, Г13
		магнітні	ЕХ3, ЕХ5К5
		електротехнічні	Э42, Э12, Э34
3. За структурою	за структурою в рівноважному стані (після відпалювання)	доевтектоїдні	15X, 18ХГТ, 40X
		евтектоїдні	70С3А, 7ХФ
		заевтектоїдні	X, ХВСГ
		ледебуритні	Р18, Р9, Р9Ф5, Х12
	за структурою в нормалізованому стані (при охолодженні на повітрі)	перлітного класу	20X, 40X, 9ХС, ХВГ
		мартенситного класу	20X2Н4А, 20X13, Р9
		аустенітного класу	Х18Н9Т, Г13
		карбідного класу	Р18, Х12, Х12Ф
		феритного класу	Э42

## 12.2. Порядок виконання роботи

1. Засвоїти теоретичну частину.
2. Досконало вивчити принципи маркування легованих сталей.
3. Роздивитись під мікроскопом і замалювати мікроструктури легованих сталей відповідно до їх класифікації в рівноважному стані. Розшифрувати марки сталей, 18 ХГГ - доевтектоїдна конструкційна; 9 ХС - заевтектоїдна інструментальна; РІ8 - ледебуритна швидкорізальна інструментальна; 12 ХІ8Н10Т - аустенітна корозієстійка, жаростійка.
4. Роздивитись під мікроскопом і замалювати мікроструктури легованих сталей відповідно до їх класифікації в нормалізованому стані: 40ХНМА - перлітна конструкційна; Р9 - мартенситна швидкорізальна інструментальна; Г13 - аустенітна сталь високої стійкості проти спрацювання.

## 12.3. Контрольні запитання

1. Недоліки вуглецевої сталі.
2. Що таке легуючі елементи?
3. Які сталі називаються легованими?
4. Як легуючі елементи впливають на поліморфізм заліза, діаграму ізотермічного перетворення аустеніту і термічну обробку, на критичні точки S і E, на температуру мартенситного перетворення?
5. Як леговані елементи впливають на перетворення аустеніту при гартуванні?
6. Класи мікроструктур легованих сталей в рівноважному стані і в стані після нормалізації.

## Лабораторна робота № 10

### ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СТАЛІ (ІС)

**Мета роботи** – Ознайомлення з властивостями інструментальних сталей і сплавів, вивчення впливу легуючих елементів, фаз і структурних складових на формування структури інструментальних сталей та на їх механічні, теплові, експлуатаційні і технологічні властивості

#### 13.1. Основні положення і зміст роботи

Характерною умовою експлуатації інструментів (особливо різальних і штампових) є високі контактні напруги в тиски, що виникають в робочій крайці, викликають її зношення, яке супроводжується нагріванням до високої температури. В зв'язку з тим ІС повинні мати певні механічні, теплові та експлуатаційні властивості, а саме:

- високу твердість (в 2-3 рази більшу, ніж в оброблювального матеріалу);
- теплостійкість, що характеризується здатністю зберігати твердість при підвищених температурах і визначається температурою, при якій зберігається твердість  $\geq 60$  HRC;
- високу міцність (в зв'язку з виникненням підвищених напружень на згин і кручення та високих контактних напружень і питомих тисків в робочій крайці);
- стійкість проти зношення (зносостійкість);
- значну теплопровідність;
- здатність зберігати задану форму і точні розміри робочої поверхні.

Матеріал для інструмента, що піддається ударному навантаженню (штампи, фрези) повинен мати, крім вище згаданих властивостей, ще й значну в'язкість.

Для забезпечення роботоздатності інструмента перевага часто надається окремим властивостям або поєднанню кількох з них, бо забезпечити на високому рівні всі вимоги просто неможливо (наприклад, важко поєднати високу твердість і в'язкість).

Форма інструмента нерідко буває дуже складною, в зв'язку з чим ІС повинні мати відповідні технологічні властивості:

- достатню оброблюваність при різанні, тиску і шліфуванні;
- загартовуваність і прогартовуваність;
- здатність зберігати розміри і форму під дією прикладених напруг та при загартовуванні;
- незначну чутливість до перегрівання і до зниження вмісту вуглецю.

Переважно ІС (вуглецеві і леговані) мають значний вміст вуглецю (0,7-1,2%) і відносяться по структурі до заевтектоїдного і ледебуритного класів. І лише для штампів гарячого деформування використовуються доевтектоїдні сталі (0,3-0,6%С) підвищеної в'язкості. За вмістом легуючих елементів ІС діляться на низьколеговані ( $\leq 2,5\%$ ), середньолеговані (2,5-10%) і високолеговані ( $\geq 10\%$ ), а за вмістом шкідливих домішок – на якісні ( $S \leq 0,03\%$ ,  $P \leq 0,03\%$ ) і високоякісні ( $S \leq 0,02\%$ ,  $P \leq 0,03\%$ ).

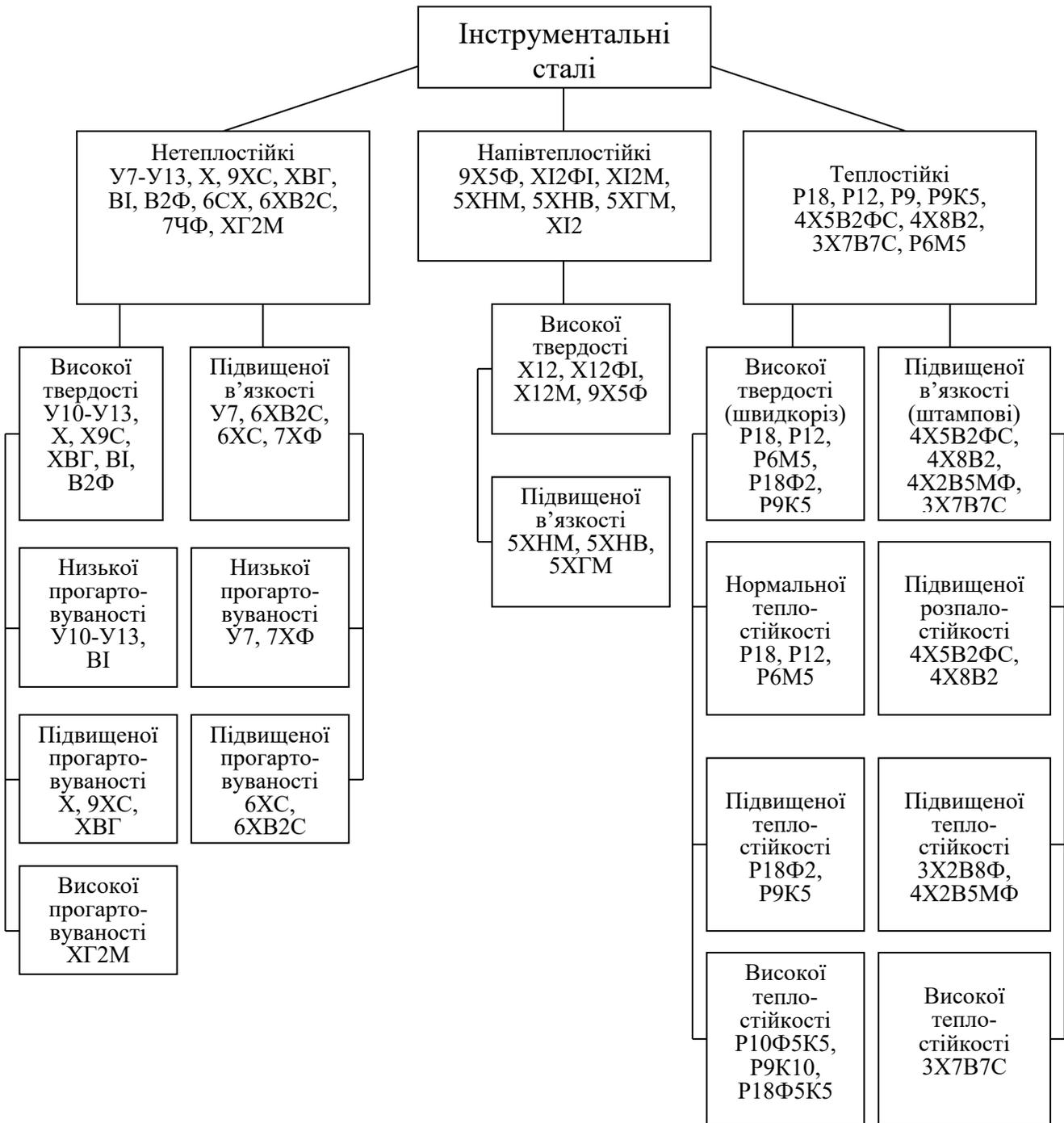


Рис.13.1 Схема класифікації інструментальних сталей

### Маркування ІС.

Вуглецеві ІС маркують буквою “У” (“углеродистая”), цифра за нею (У7, У10) показує середній вміст вуглецю в десятих долях відсотка, буква “А” в кінці (У10А) – означає, що сталь високоякісна.

Цифра на початку марки легованих ІС (9Х, 6ХВГ, Х, В2Ф, 11ХВ) показує середній вміст вуглецю в десятих долях відсотка, якщо його вміст  $\geq 1\%$ . При вмісті вуглецю  $\approx 1\%$  цифру часто не пишуть. Далі букви означають відповідні легуючі елементи, а цифри – їх вміст у відсотках.

Швидкорізальні сталі маркуються буквою “Р” (“рапід” - швидкий), після якої вказують вміст (%) W; наявність Mo, Co і позначена відповідно буквами

М,К і Ф, після кожної з них вказують вміст (%) елемента. Вміст Cr порядку 4% і V до 2% в марці не вказуються. Наприклад, P10K5Ф5, P6AM5, 11P3AM3Ф2.

### **Класифікація інструментальних сталей.**

Для кращої орієнтації при виборі сталей для інструменту проводять класифікацію ІС за двома ознаками: за властивостями та за призначенням. На рис.13.1 наведена схема класифікації ІС за властивостями, запропонована Ю.А.Геллером, на якій вказані деякі марки сталей по групах. За основну властивість тут прийнята теплостійкість, крім цього, береться до уваги твердість, в'язкість і прогартовуваність.

Інструментальні сталі призначені для виготовлення інструментів таких типів: 1) різальних; 2) вимірних; 3) штампів холодного деформування; 4) штампів гарячого деформування.

### **Вуглецеві і леговані сталі для різальних інструментів**

Чим більша швидкість різання, переріз стружки, а також міцність і в'язкість оброблювального матеріалу, тим вища температура нагріву ріжучої крайки інструмента, тим вищу теплостійкість, яка і визначить роботоздатність інструмента і продуктивність процесу різання, повинен мати матеріал.

#### ***Сталі низької прогартовуваності***

До таких відносяться вуглецеві сталі якісні У7, У8... У13 і високоякісні У7А, У8А... У13А (вміст Mn 0,15-0,40% і Cr 0,15%).

Низька твердість в стані поставки (2000 НВ) дозволяє виготовляти з них інструмент способом різання і деформації.

Висока твердість (62-65 HRC) різального інструмента досягається шляхом загартування з температури  $t^0 = A_{c1} + 20^0\text{C}$  в розчинах солей та лугів, що забезпечує велику швидкість охолодження. Оскільки стійкість аустеніту вуглецевих сталей невисока, то продуктивність їх мала ( $d_{кр} \leq 15\text{ мм}$ ). Ці сталі застосовують для виготовлення дрібного інструмента (зубил, плашок і матриць) з поперечним перерізом до 25 мм з незагартованою серцевиною. Незагартована серцевина збільшує стійкість інструмента при ударних навантаженнях, а також сприяє зменшенню деформації при загартуванні.

Загартування цих сталей від температур  $t^0 > A_{cm}$  небажане, бо викликає короблення (деформацію) інструмента і веде до збільшення кількості залишкового аустеніту, для переведення якого в мартенсит потрібна додаткова обробка холодом.

Після загартування інструмент піддають низькотемпературному відпуску: для збереження високої твердості (62...63 HRC) при 150-180<sup>0</sup>С, 1-2 год., а для збільшення в'язкості – при 220-250<sup>0</sup>С, при ньому твердість становить 55-60 HRC.

До сталей низької прогартовуваності відносять ряд низьколегованих сталей ХРА, В2Ф, 9ХФ, 11ХВ з вмістом 0,4-0,7% Cr і 1,15-0,30% V, а також сталі з вольфрамом. Хром трохи підвищує прогартовуваність ( $d_{кр} = 15-25\text{ мм}$ ), ванадій забезпечує стійкість до перегріву, а вольфрам збільшує твердість і зносостійкість завдяки присутності карбиду W<sub>6</sub>C.

За структурою ці сталі відносяться до заевтектоїдних перлітного класу, їх хімічний склад, режим ТО і твердість приведена в табл. 1 дод. Сталь В2Ф

застосовують для виготовлення пилок по металу, а з сталей ХВ4, 9ХФ виготовляють різальний інструмент (різці, фрези).

Недоліком сталей низької прогартовуваності є їх низька теплостійкість: виготовлений з них інструмент втрачає твердість при нагріванні вище 200<sup>0</sup>С, в зв'язку з чим різання слід проводити лише при невеликих швидкостях.

### ***Сталі підвищеної прогартовуваності***

Сталі цієї групи мають більшу прогартовуваність ( $d_{кр} \geq 25$  мм), завдяки легування хромом (1,3-1,6%), марганцем (0,3-1,1%), кремнієм (0,2-1,65), вольфрамом, ванадієм та іншими елементами (табл.1 додатку). З цих сталей виготовляють крупний різальний інструмент і загартовують його в маслі, що зменшує деформацію і не допускає утворення тріщин та короблення. Для збереження високої твердості проводять відпуск при 150-160<sup>0</sup>С, а для збільшення в'язкості призначають відпуск при підвищеній температурі (до 300<sup>0</sup>С), при цьому забезпечується твердість 55-60 HRC.

Прикладом можуть бути сталі Х, 11ХВ, 13Х, В2Ф, ХВ4, 9ХС, ХВГ, ХВСГ, вища теплостійкість і твердість (62-69 HRC) яких, порівняно з вуглецевими, забезпечується легуванням цементитом і карбідом хрому  $Cr_7C_3$ , які затримують розпад мартенситу при нагріванні.

Однак сталі цієї групи, як і вуглецеві, мають порівняно низьку теплостійкість (200-250<sup>0</sup>С, деякі до 300<sup>0</sup>С), а тому придатні для різання м'яких матеріалів (наприклад, дерева) при невеликих і середніх швидкостях.

### ***Швидкорізальні сталі***

До цієї групи відносяться високолеговані сталі, з яких виготовляють різальний інструмент високої продуктивності. Основна їх властивість – висока теплостійкість (600-650<sup>0</sup>С), яка забезпечується значним вмістом вольфраму разом з другими елементами ( $M_0$ , Cr, V), що утворюють карбіди, а також кобальтом (табл.1 додатку). W і  $M_0$  утворюють леговані карбіди змінного складу  $(Fe, W)_3C$ , типу  $M_6C$ , і затримують розпад мартенситу. Cr утворює карбід  $Cr_{23}C_6$ , V утворює карбід VC дуже високої твердості і зносостійкості. Со карбідів не утворює, але збільшує теплопровідність і дисперсність карбідів других легуючих елементів, завдяки чому значно підвищує теплостійкість.

Швидкорізальні сталі містять в своєму складі порівняно мало вуглецю (0,7-0,95%) і до 25% легуючих елементів.

Вважається, що оптимальним (завдяки економії W) є хімічний склад, в якому сума  $W+1,5M_0=12-13\%$ , що має місце в сталі Р6М5, об'єм виробництва якої складає 80% від усього виробництва швидкорізальних сталей.

Групу швидкорізальних сталей підрозділяють на сталі нормальної теплостійкості (Р18, Р9, Р6М5, Р9Ф5, Р12 – теплостійкість 620<sup>0</sup>С, HRC > 58) та сталі підвищеної теплостійкості (Р18К5Ф2, Р9К10, Р9М4К8, Р9Ф5, Р2АМ9К5, Р6М5К5, теплостійкість 650<sup>0</sup>С, 64 HRC), що містять > 2% V.

Ще вищу теплостійкість (до 650–700<sup>0</sup>С) можна одержати шляхом додаткового введення ванадію і кобальту (Р9К10, Р18К5Ф5, Р10Ф5К5).

Сталі підвищеної теплостійкості менш міцні і пластичні, ніж сталі нормальної теплостійкості, мають більшу вартість, і використовуються для обробки різанням важкооброблювальних матеріалів (корозійностійких сталей з аустенітною структурою).

За структурою після відпалу швидкорізальні сталі відносяться до ледебуритного класу і в зливках містять крихку ледебуритну евтектику (рис.13.2,а). Загальна кількість карбідів (первинних і вторинних) в цих сталях

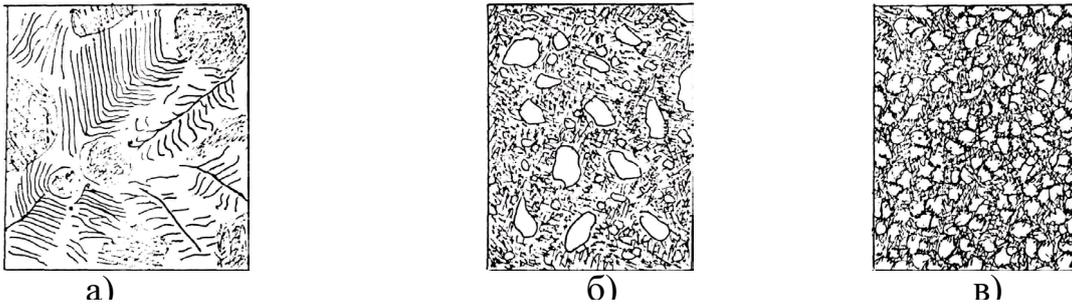


Рис.13.2. Мікроструктура швидкорізальної сталі

а) в литому стані; б) після деформування; в) після термічної обробки.

складає 22-28 %. Карбідна ліквация знижує стійкість інструмента і збільшує його крихкість. Усунути цей недолік можна шляхом подрібнення первинних карбідів при гарячому деформуванні (куванні) (рис.13.2,б).

Підготовку до обробки різанням і до загартування швидкорізальної сталі проводять шляхом відпалу при 840-880<sup>0</sup>С (сталь Р6М5 – при 800-830<sup>0</sup>С), що веде до зниження твердості (2500-3000 НВ). Структура відпаленої сталі – дрібнозернистий перліт (сорбіт) + надлишкові карбіди (в основному М<sub>6</sub>С). Саме в карбідах знаходиться більша частина легуючих елементів.

### Штампові сталі

Штампові сталі відносяться до теплостійких і напівтеплостійких.

#### *Сталі для штамів холодного деформування*

Основні вимоги: висока твердість, зносостійкість, міцність, опір пластичній деформації (збереження форми) і підвищена в'язкість.

Штампі холодного деформування працюють в умовах ударних навантажень, в процесі деформування нагріваються до 200...300<sup>0</sup>С, і повинні зберігати твердість при цих температурах.

Для виготовлення штамів невеликих розмірів (до 20 мм) використовуються вуглецеві сталі. Після загартування з непрогартованою серцевиною і відпуску на твердість 58 НРС вони мають високу зносостійкість і ударну в'язкість.

Для більш крупних штамів застосовуються сталі підвищеної прогартовуваності (Х,ХГС, ХВГ) або сталі з нижчим вмістом вуглецю (6ХС, 7ХФ, 7ХГ2ВМ), які після термічної обробки (загартування з 870 ...900<sup>0</sup>С, відпуск при 450<sup>0</sup>С) мають твердість 45...50 НРС.

Згадані вище сталі відносяться до нетеплостійких (до 220<sup>0</sup>С).

Особливу групу складають сталі з підвищеним вмістом хрому (від 6 до 12%): Х6ВФ, Х12, Х12М. Ці сталі відносяться до ледебуритного класу, мають високу твердість після загартування і прогартовуваність до 300 мм. Вони являються напівтеплостійкими, а сталь Х12Ф4М, крім згаданих вище властивостей, має ще і високу зносостійкість.

Штампи для пересування виготовляються також із теплостійких швидкорізальних сталей (Р6М5 і др.), які мають високу твердість і зносостійкість при понижений в'язкості.

Для виготовлення тих чи інших штамтів рекомендується відповідна сталь: а) для висаджування У10, У12, Х, ХВГС; б) для пресування – Х12М, Х12Ф, Р12, Р6М5, 5ХВ2С; для витягання – У10, У12, Х, ХГ2ВМ, Х12ФІ, Х6ВФ; г) для вирубання – Х12ФІ, Х:ВФ, Р12, 4Х5Ф, Х12Ф4М, 7ХГ2ВМ.

Після загартування з температурою 860...1100<sup>0</sup>С в оливі та відпуску 150 – 200<sup>0</sup>С (табл.1 додатку) штампи мають твердість 60... 62 НРС.

### **Сталі для штамтів гарячого деформування**

Штампи для гарячого деформування працюють у важких умовах навантаження і при підвищених температурах. Деякі з них мають великі розміри і тривало контактують з гарячим металом. Тому до сталей, викладених в п.1.1; ставлять додаткові вимоги, а саме:

- стійкість проти утворення тріщин при циклічному нагріванні і охолодженні – розпалостійкість;
- окалиностійкість;
- висока прогартовуваність, висока теплопровідність для відводу тепла.

Крупні молотові штампи нагріваються до температур 500...550<sup>0</sup>С, їх виготовляють з напівтеплостійких сталей 5ХВМ, 5ХНВ і т.п., після загартування в оливі з 850<sup>0</sup>С та відпуску при 550<sup>0</sup>С їх твердість – до 45 НРС.

Інструмент середнього навантаження, що працює при температурах 400.600<sup>0</sup>С, виготовляють з окалиностійких сталей 4Х5В2ФС та 4Х5МФІС, які мають велику розпалостійкість і в'язкість.

Для штамтів, що працюють при температурі 600...700<sup>0</sup>С, використовуються сталі підвищеної теплостійкості 3Х2В8Ф, 5Х3В3МФС, 3Х12В12Ф, 3Х7В7С. З них виготовляють пресформи для лиття під тиском мідних сплавів, пуансони для прошивки і ін.

Таблиця 13.1

Вибір сталі для виготовлення штамтів гарячого деформування та іншого інструмента

Вид інструмента	Рекомендовані марки
Молотові штампи	5ХНВ, 5ХНМ, 5ХГМ, 4Х5В2ФС, 4Х3ВМФ
Штампи для висадки	7Х3, 4Х5В2ФС, 4Х2СВ2М9
Штампи для пресування, прошивання, протяжки	4Х5МС, 4Х5В4ФСМ, 3Х2В8Ф, 2Х8В8М2К8
Ножі і пилки для гарячого різання	4Х5В2ФС, 4Х3ВМС, 6ХС, 4Х5В4ФСМ
Прес-форми для лиття під тиском	Для Mg- сплавів-4Х5МС, 4Х3ВМФС Для Al-сплавів-4Х5В8ФС, 4Х5МС Для Cu- сплавів-3Х2В8Ф, 4Х5В4ФСМ, 3Х12В12Ф

Прес-форми для пресування пластмас	2Х1В1Ф, 55Г, 6ХС, Х12М, Х, Х12Ф, 5ХВ2С, 4Х3ВМФС (12ХН3А-після цементації)
------------------------------------	---

Штampi гартують і відпускають на твердість 45.. 50 HRC, після чого вони мають структуру троосто – сорбіту. Часто їх піддають азотуванню, боруванню та хромуванню для підвищення зносостійкості.

#### Сталі для вимірного інструмента.

Сталі для вимірного інструмента повинні довгий час зберігати незмінні розміри і добре шліфуватися. Зміна розмірів відбувається в результаті старіння, причиною якого є частковий розпад мартенситу, перетворення залишкового аустеніту і релаксація внутрішніх напруг.

Для виготовлення вимірних інструментів використовують сталі вуглецеві 55, 50, 20 та низьколеговані Х, ХГ, ХВГ, 9ХС, 12Х1. Для попередження старіння інструмент гартують в оливі з низьких температур (860<sup>0</sup>С), проводять обробку холодом та довготривалий (до 48 год.) відпуск при 120...140<sup>0</sup>С. Нерідко з метою уникнення ефектів старіння проводять цементування низьковуглецевих сталей, загартування за допомогою струмів високої частоти та азотування на високу твердість (62... 64 HRC).

#### Тверді сплави

Тверді сплави складаються з дуже твердих і тугоплавких карбідів вольфраму (WC), титану (TiC) і танталу (TaC), з'єднаних металевим в'язучим – кобальтом (Co). Сплави і вибори з них у вигляді пластин виготовляють методом порошкової металургії: порошки карбідів змішують з порошком Co, пресують і спікають при 1500<sup>0</sup>С. одержані таким чином матеріали складаються з 80-95% карбідних частинок, з'єднаних в'язучим, і мають дуже високу твердість (87... 92 HRC), зносостійкість і теплостійкість (до 800... 1000<sup>0</sup>С).

Пластинки із твердих сплавів кріплять механічно чи припаюють до різців, свердел, фрез та іншого різального інструмента.

Залежно від складу карбідної основи спечені тверді сплави випускають трьох груп. (табл.13.2).

Підвищення вмісту кобальту викликає зниження твердості, підвищення міцності і в'язкості.

Сплави групи ВК застосовуються для виготовлення:

- різального інструмента (ВК3... ВК8) обробка матеріалів з ламкою стружкою – чавун, кераміка, кольорові метали;
- інструмента для волочіння і буріння (Вк10, ВК15);
- арматури штампного інструменту (ВК20, ВК25).

Таблиця 13.2

Хімічний склад і властивості твердих сплавів

Група	Марка	WC, %	TiC, %	TaC, %	Co, %	Твердість, HRC	Опір на згин, МПа	Тепло- стійкість
ВК	ВК3	97	-	-	3	89	1000	до

	BK6	94	-	-	6	88	1300	800 <sup>0</sup> C
	BK8	92	-	-	8	87,5	1400	
	BK20	80	-	-	20	84	1800	
ВТК	T5K10	85	5	-	10	88,5	1200	900... 1000 <sup>0</sup> C
	T15K6	79	15	-	6	90	1100	
	T30K6	64	30	-	6	92	900	
ТТВК	ТТ8К6	86	6	2	6	90,5	1250	900... 1000 <sup>0</sup> C
	ТТ10К8	82	7	3	8	92	1000	

Сплави групи ВТК застосовують для чистового різання сталей при великих швидкостях.

Група ТТВК має підвищений опір щодо вібрацій і викришування, а тому застосовуються за найбільш важких умов різання (чорнова обробка зливків) . перше в число в марці сплавів цієї групи визначає сумарний вміст TiC і TaC.

Недоліком надтвердих матеріалів є висока вартість та їх підвищена крихкість, в результаті чого вони не витримують ударних навантажень.

### **Надтверді матеріали**

До таких відносять алмаз (100000 HV, теплостійкість до 800<sup>0</sup>C) та нітрид бору з кубічною ґраткою (залежно від технології випускають ельбор і боразон – 90000 HV, теплостійкість до 1200<sup>0</sup>C).

Алмаз і нітрид бору у вигляді порошку застосовують переважно для виготовлення абразивного інструмента (кругів для шліфування, для заточування інструмента з твердих сплавів, надфілів, тощо) з бакелітовим або металевим в'язучим. Меншою мірою ці сплави використовуються для виготовлення різців (обробка деталей годинників) та філь'єрів для протягування дроту з твердих і дорогоцінних металів.

### **13.2. Порядок виконання роботи**

1. Опрацювати теоретичні відомості.
2. Ознайомитися з зразками різального та іншого інструмента.
3. Спостерігати і змалювати мікроструктуру швидкорізальної сталі та твердого сплаву.
4. Виміряти твердість зразків.
5. Підібрати матеріал для виготовлення інструмента (по завданню викладача).

### **13.3. Питання для самоперевірки**

1. Які властивості повинні мати інструментальні сталі?
2. Що таке теплостійкість матеріалу?
3. Які фактори впливають на теплостійкість?
4. Назвіть марки сталей з низькою теплостійкістю.
5. Назвіть марки сталей з підвищеною теплостійкістю.
6. Чому вуглецеві сталі мають низьку теплостійкість?
7. Який режим ТО інструмента зі швидкорізальної сталі?
8. Як маркуються інструментальні сталі?
9. Який режим зміцнення інструмента зі сталі з високим вмістом хрому для одержання підвищеної твердості?
10. Назвіть марки сталей для молотових штампів.
11. Які сталі мають підвищену розпалостійкість?

12. Сталі яких марок застосовуються для штамів холодного деформування за умов ударних навантажень?
13. Яка структура швидкорізальної сталі після ТО? Які структурні складові забезпечують теплостійкість цих сталей?
14. Принципи маркування спечених твердих сплавів. Переваги і недоліки цих сплавів.
15. Які матеріали мають найвищу теплостійкість?
16. Вплив карбідної фази на властивості інструментальних сталей.
17. Які легуючі елементи вводять в сталь для підвищення прогартовуваності?
18. Назвіть марки сталей підвищеної прогартовуваності. для виготовлення якого інструмента їх використовують?
19. Які вам відомі надтверді матеріали? Їх застосування?
20. Які вимоги ставляться до інструментальних матеріалів?

## Лабораторна робота №11 АЛЮМІНІЙ ТА ЙОГО СПЛАВИ

Мета роботи : вивчити маркування, склад, мікроструктури, властивості і застосування алюмінію та найбільш поширених сплавів на основі алюмінію.

### 14.1. Основні положення і зміст роботи

Алюміній – метал срібно-білого кольору. Він не має поліморфних перетворень і кристалізується в гратці гранецентрованого куба з періодом  $a=4.041\text{Å}$ . Найбільш характерні властивості чистого алюмінію: невелика густина  $2.7\text{г/см}^3$  і низька температура плавлення ( $660^\circ\text{C}$ ), висока пластичність і мала міцність. Прокатаний і відпалений алюміній високої чистоти має  $\sigma_{\text{в}}=80\dots 100\text{МПа}$ ;  $\sigma_{0.2}=20\text{МПа}$ , твердість 25НВ,  $\psi=85\%$ ,  $\delta=40\%$ .

Залежно від вмісту домішок первинний алюміній ділиться на три класи:

- особливої чистоти А 999 ( $\leq 0.001\%$  домішок);
- високої чистоти А 995, А99, А97, А95 (0.005, 0.01, 0.03, 0.05% домішок);
- технічної чистоти А85, А8 і ін. (0.15, 0.2 до 1% домішок).

### Сплави на основі алюмінію

Сплави, в яких основним компонентом є алюміній, називаються *алюмінієвими*. Вони володіють малою густиною ( $2.65\text{--}2.9\text{г/см}^3$ ), високою тепло- і електропровідністю і мають порівняно високі механічні властивості. Буква „А” на початку марки сплаву – технічний алюміній (АД0, АД1).

Алюмінієві сплави діляться на дві основні групи: деформівні і литі.

З литих сплавів деталі виготовляють литтям під тиском.

З деформівних сплавів отримують напівфабрикати одним з методів обробки тиском (прокаткою, пресуванням, ковкою).

Основою поділу сплавів на деформівні і литі є діаграма алюміній- легуючий елемент. (рис.14.1).

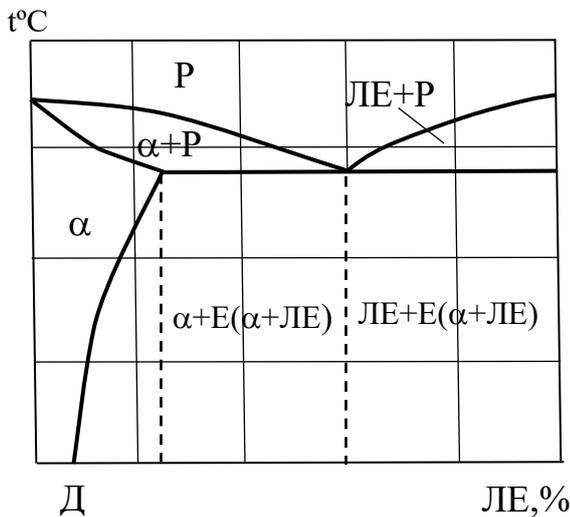


Рис. 14.1. Діаграма стану Al-ЛЕ

В якості легуючих елементів використовують мідь, марганець, цинк, кремній і ін. метали, які обмежено-розчинні в алюмінії у твердому стані. Сплави з концентрацією легуючих елементів до точки О є деформівні. Сплави з концентрацією легуючих елементів більше точки О і з евтектикою в структурі – литі.

#### Деформівні алюмінієві сплави

Деформівні алюмінієві сплави є поширеними конструкційними матеріалами. З них шляхом гарячої чи холодної обробки тиском виготовляють листи, труби, дрiт, плити і різні профілі.

На основі діаграми стану (див. рис.14.1) деформівні сплави поділяють на такі, що не зміцнюються термічною обробкою (з концентрацією легуючих елементів до т. Д) і такі, що зміцнюються термічною обробкою (з концентрацією легуючих елементів від т. Д до т. О). Промислове використання знаходять як подвійні деформівні сплави алюмінію з міддю, магнієм, марганцем, так і багатокомпонентні сплави систем Al-Cu-Mg (дуралюміни), Al-Cu-Si (авіалі), високоміцні сплави системи Al-Zn-Mg-Cu і ін. Мікроструктура цих сплавів в рівноважному стані визначається відповідними діаграмами стану подвійних, потрійних і багатокомпонентних систем.

1. Сплави, що не зміцнюються термічною обробкою, використовуються у відпаленому, або наклепаному стані (нагартованому). Їх механічні властивості покращуються в основному за рахунок легування твердого розчину і в результаті наклепування, але при цьому знижується пластичність. До цієї групи сплавів відносяться подвійні сплави на основі системи Al-Mg (2...7 % Mg), так звані магналії, і системи, Al-Mn (1...1.6 % Mn) - алюмінієво-марганцеві сплави.

Магналії та алюмінієво-марганцеві сплави маркують буквами АМг та АМц відповідно після яких стоїть буква, що означає порядковий номер сплаву за ДЕСТом.

Сплави алюмінієво-марганцеві - АМц в відпаленому стані із структурою  $\alpha$ -твердого розчину і виділеннями фази  $Al_6Mn$  характеризуються високою пластичністю, але малою міцністю ( $\sigma_b = 110 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 30\%$ ). Міцність сплавів АМц так само, як і міцність магналію, можна підвищити (для АМц до 220 МПа) холодною деформацією - нагартовкою. АМц застосовують для виготовлення деталей, що працюють в агресивних середовищах.

2. До сплавів, що зміцнюються термічною обробкою, відносяться складні алюмінієві сплави

Значне місце серед алюмінієвих сплавів займають дуралюміни. Вони маркуються буквою Д і цифрами, які характеризують порядковий номер сплаву за ДЕСТом. На початку марки сплаву ставиться буква „А”- сплав на основі алюмінію. „АК”- алюмінієвий ковочний сплав. Часто на початку марки сплаву ставиться буква „В”-високоміцний. Після порядкового номера часто є позначення, що характеризує стан сплаву: „М”-м'який (відпалений), „Т”-

термічно оброблений (загартування і старіння), „Н”-нагартований, П- (напівнагартований) і т.д. Наприклад, Д16М-дуралюмін відпалений, Д16Н-дуралюмін загартований зістарений і додатково нагартований.

Найбільш поширеним деформівним алюмінієвим сплавом є Д1.

Хімічний склад дуралюміну марки Д1: 3.8-4.8%Cu, 0.4-0.8%Mg, 0.4-0.8%Mn,  $\leq 0.7\%$ Si,  $\leq 0.7\%$ Mn,  $\leq 0.7\%$ Si,  $\leq 0.7\%$ Fe, останнє Al.

Мідь, магній і марганець вводяться в сплав спеціально. Залізо і кремній є неминучими домішками в алюмінії при його виробництві. Як видно з хімічного складу, дуралюмін являє собою багатокомпонентний сплав.

Дуралюмін можна розглядати як сплав на Al-Cu-Mg основі.

Високоміцний алюмінієвий сплав В95 є високоміцним легким сплавом на основі Al-Zn-Mg-Cu. Він застосовується в літакобудуванні у вигляді листів і профілів. Порівняно з дуралюміном і його аналогами сплав дає більш високу міцність ( $\sigma_b$  і HB).

Сплав В95 не є аналогом дуралюміну, оскільки містить значну кількість цинку (5-7%). До недоліків цього сплаву можна віднести знижені порівняно з дуралюміном опір корозії (корозія під напруженням) і ударна в'язкість  $a_k$  на зразках з надрізом. Пластичні властивості ( $\delta$  і  $\psi$ ) також нижчі, ніж в дуралюміні.

Деякі деформівні алюмінієві сплави є жароміцними. До жароміцних алюмінієвих сплавів, які використовуються для поршнів теплових двигунів, відноситься сплав АК4. Він володіє більш високими міцністю і твердістю при підвищених температурах, ніж дуралюмін. В цьому сплаві міститься нікель, котрий з алюмінієм і міддю дає потрійне з'єднання AlCuNi, а з алюмінієм і залізом потрійне з'єднання Al<sub>9</sub>FeNi, нерозчинні в твердому алюмінії. Ці з'єднання підвищують жароміцність сплаву, роблячи структуру більш гетерогенною і перешкоджають розвитку процесу рекристалізації.

Хімічний склад сплаву АК4 наступний: 2.2%Cu, 1.6%Mg, 1.25%Ni, 1.35%Fe, 0.85%Si,  $\leq 0.1\%$ Ti, останнє Al. Присадка Ti в кількості менше 0,1% сприяє утворенню дрібнокристалічної структури (створює додаткові центри кристалізації).

#### *Ливарні сплави алюмінію*

Ливарні алюмінієві сплави, в яких розчинність легованих елементів у твердому алюмінії змінюється із зміною температури, можна термічно обробляти, тобто піддавати гартуванню з подальшим старінням, внаслідок чого міцність сплаву може бути підвищена.

Структура ливарних сплавів порівняно з деформівними сплавами грубозерниста, груба, тому, щоб перевести при гартуванні належну кількість інтерметалідних з'єднань в твердий розчин, для ливарних сплавів вимагається більш тривала витримка, ніж для деформівних.

Маркуються ливарні алюмінієві сплави буквами „АЛ” і цифрами, які характеризують порядковий номер сплаву згідно ДСТУ.

Найбільш поширеними ливарними алюмінієвими сплавами є силуміни. Сплави алюмінію з 8-14% кремнію називаються силумінами. Вони володіють високими ливарними властивостями - добре заповнюють форму, мають малу усадку і не схильні до тріщиноутворення. Про те силуміни схильні до утворення газової пористості.

Більшість силумінів, що використовуються, є доевтектичними сплавами, оскільки заевтектичні сплави, що містять в структурі крупні первинні кристали кремнію, які дуже крихкі та володіють малою міцністю.

Модифікація дає різке підвищення механічних властивостей: межа міцності  $\sigma_b$ , і видовження  $\delta$  ростуть одночасно. Термічна обробка простих силумінів дає дуже мале зміцнення, тому вони термічно не обробляються.

Найпростішим подвійним ливарним силуміном є сплав АЛ2, що містить 10-13%Si.

На рис.14.2 показана структура немодифікованого силуміну АЛ2. Структура складається з  $\alpha$ -твердого алюмінієвого розчину (основний світлий фон шліфа) і евтектики  $\alpha$ +Si (темні ділянки), в якій кремній знаходиться у вигляді крупних голок. Структура сплаву груба.

На рис. 14.3 показана структура силуміну АЛ2 після модифікації.

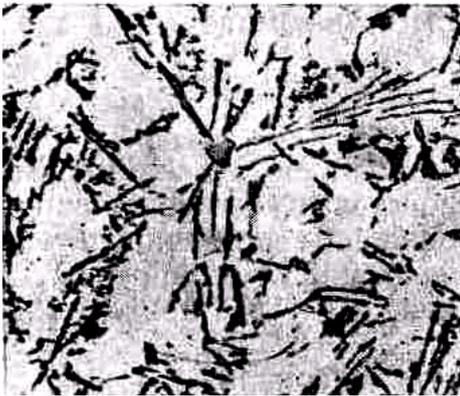


Рис.14.2. Немодифікований силумін АЛ2. Трав. 0.5%розчин HF.  $\times 100$

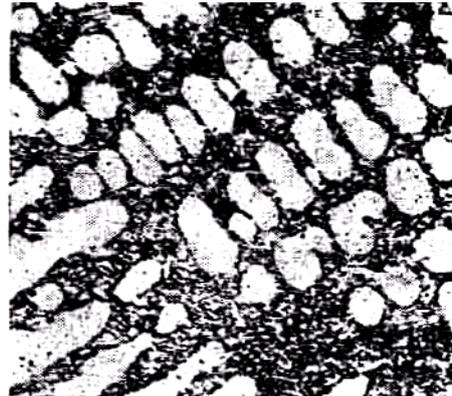


Рис.14.3. Модифікований силумін АЛ2. Трав. 0.5%розчин

Структура дрібнозерниста. Видно первинні дендрити  $\alpha$ -твердого розчину (світлий фон) і дрібна (дисперсна) евтектика  $\alpha$ +Si (темний фон). Механічні властивості модифікованого силуміну:  $\alpha \geq 160$  МПа,  $\delta \geq 2\%$ ,  $HB \geq 50$ .

Сплав алюмінію з міддю АЛ12. Сплав АЛ12 є ливарним алюмінієвомідним сплавом, що містить 10-14%Cu. За механічними властивостями він поступається силуміну, але в литві має одну перевагу перед ним – утворює меншу кількість окисних плівок.

Сплав АЛ12 є доевтектичним і при кімнатній температурі в рівноважному стані має структуру алюмінієвий твердий розчин  $\alpha$  і евтектику ( $\alpha$ +CuAl<sub>2</sub>). Сплав АЛ12 частіше застосовується без термічної обробки.

Сплав алюмінію з магнієм АЛ8. Цей сплав алюмінію з 9,5-11,5%Mg називається магналієм. Він застосовується в авіабудуванні для стикових вузлів шасі, вилок хвостових коліс і т.д., оскільки він має високі механічні і антикорозійні властивості. Ливарні властивості сплаву невисокі.

## 14.2. Порядок виконання роботи

1. Вивчити теоретичні відомості.

2. Замалювати діаграму стану Al-LE та вказати як поділяються алюмінієві сплави згідно з діаграмою.
3. Отримати колекцію шліфів та провести аналіз мікроструктури під мікроскопом.
4. Замалювати схему структур, що спостерігаються.
5. Вказати до якого типу належать дані сплави.

### 14.3. Контрольні запитання

1. Як поділяються алюмінієві сплави?
2. Які сплави називаються дуралюмінами ?
3. Які сплави називаються ливарними?
4. Які маркуються ливарні алюмінієві сплави?
5. Які групи сплавів відносять до деформівних?
6. Які групи сплавів належать до литих?

## Лабораторна робота № 12 МІДЬ ТА СПЛАВИ НА ЇЇ ОСНОВІ

**Мета роботи:** вивчити маркування, склад, мікроструктуру, властивості і застосування мідних сплавів.

### 15.1. Основні положення і зміст роботи

За обсягами виробництва мідь посідає третє місце після заліза та алюмінію. Мідь має ГЦК-кристалічну ґратку, температура плавлення становить 1038 °С, густина  $\rho=8,9$  г/см<sup>3</sup>.

Чиста мідь має 11 марок – М006, М1р, М3р, М2, М3 та ін. Залежно від механічних властивостей розрізняють також тверду (нагартовану) мідь – МТ і м'яку (відпалену) – ММ. Цінними властивостями міді є її висока електро- та теплопровідність, пластичність, низька окислюваність. Половина всієї міді використовується в електротехніці. Для електротехнічних потреб чисту мідь постачають у вигляді дроту, прутка, стрічки, листа, смуги і труб. У зв'язку з низькою міцністю як конструкційний матеріал використовують не чисту мідь, а лише сплави міді з оловом, цинком, алюмінієм, кремнієм, марганцем тощо. Легування міді підвищує її механічні, технологічні та експлуатаційні властивості. Залежно від хімічного складу розрізняють три основні групи сплавів міді: бронзи, латуні і сплави міді з нікелем.

**Бронзи** – це сплави міді з оловом, алюмінієм, марганцем, кремнієм, берилієм, свинцем. Залежно від основного легуючого елемента бронзи називають олов'янистими, алюмінієвими, берилієвими та ін. Для підвищення механічних і особливих властивостей бронзи додатково легують Fe, Ni, Ti, Zn, P, для підвищення корозійної стійкості – Mn, пластичності – Ni, міцності – Fe, оброблюваності різанням – Pb.

Маркують бронзи літерами Бр, далі літерами позначають елементи, що входять до складу бронзи. Після цього цифрами вказують середній вміст елементів у процентах (вміст міді цифрами не вказують).

***Олов'яні бронзи*** (БрО3, БрОб, БрОС25-8 та інші). Однофазні бронзи пластичні і добре піддаються деформуванню, з них виготовляють фольгу, сітки,

дріт, прутки, стрічки тощо у нагартованому (твердому) і відпаленому (м'якому) станах.

Двофазні олов'янисті бронзи з більшим вмістом олова (до 15...20 %) використовують як ливарні матеріали для виготовлення різних фасонних виливків. Їх також додатково легують цинком (4...10 %), свинцем (3...6 %), фосфором (0,4...1,0 %). Олов'янисті бронзи корозійно стійкі у морській воді, NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, не стійкі у розчинах HNO<sub>3</sub> і HCl, мають досить високі механічні властивості:  $\sigma_b = 150...350$  МПа,  $\delta = 3...5$  %, твердість 60...90 НВ, добре обробляються різанням.

*Алюмінієві бронзи* (4...11 % Al) мають високу корозійну стійкість, високі механічні та технологічні властивості (БрАЖ9-4, БрАЖН 10-4-4, БрКМц3-1, БрСЗО та інші). Однофазні бронзи вмістом алюмінію до 8...9 % добре обробляються тиском у гарячому і холодному стані. Двофазні бронзи ( $\alpha$ -твердий розчин + Si<sub>2</sub>Al) з вмістом алюмінію 9...11 %, а також заліза, нікелю, марганцю мають більшу міцність, піддаються обробці тиском у гарячому стані.

З алюмінієвих бронз виготовляють арматуру трубопроводів для різних середовищ (окрім морської води) і температур до 250°C (БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л); деталі для експлуатації в середовищі морської води, гвинти, лопасті (БрАМц9-2Л); втулки, підшипники ковзання (БрАМцЮ-2); фланці, шестерні та інші відповідальні деталі (БрАЖМц10-3-1,5).

*Марганцеві бронзи* (БрМц5 БрМцС20-5) мають порівняно невисокі механічні властивості, але високу пластичність, корозійну стійкість, жароміцність. З них виготовляють деталі для теплоелектростанцій, котли, вентиля, засувки, арматуру тощо.

*Берилієві бронзи* містять у своєму складі 2...2,5 % Be (БрБ2), мають дуже цінний комплекс властивостей: високу хімічну стійкість, теплостійкість, високий поріг пружності, добре обробляються різанням, мають високі механічні властивості ( $\sigma_b = 1100...1300$  МПа, твердість 370 НВ,  $\delta = 1$  %).

Використовують берилієву бронзу для виготовлення виробів відповідального призначення: пружні контакти, пружини, мембрани, безіскровий інструмент для ведення вибухонебезпечних гірничих робіт.

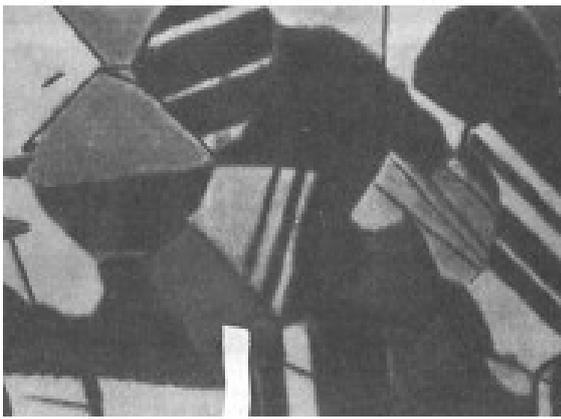
*Кремнієві бронзи* містять у своєму складі 1...3 % Si (БрКН1-3, БрКМц3-1), слугують заміниками олов'янистих бронз (наприклад, БрОЦС6-6-3). Вони мають високі ливарні властивості, корозійну стійкість, пружність, допускають гарячу обробку тиском і обробку різанням. З кремнієвих бронз виготовляють прутки, смугу, виливки, заготовки для виробів, які працюють за температур до 500 °C.

*Свинцева бронза* (БрС30) широко використовується у машинобудуванні як антифрикційний матеріал.

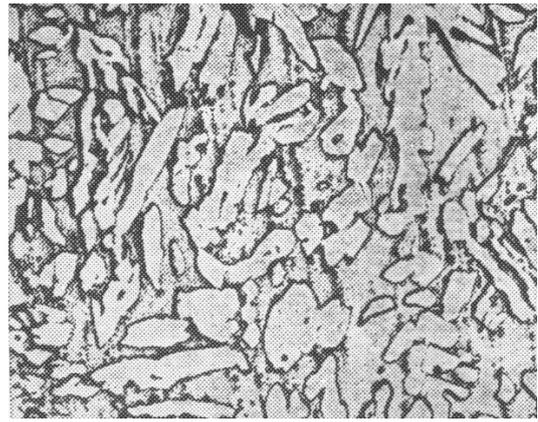
Латуні – це подвійні або багатокомпонентні сплави міді, у яких основним легуючим елементом є цинк (до 45 %). При більшому вмісті цинку в латуні знижується міцність і зростає крихкість. Вміст інших легуючих елементів у спеціальних латунях не перевищує 7...9 %.

Маркують латуні літерою Л, після якої цифрою вказують вміст міді у процентах (наприклад, сплав Л62 містить 62 % Си і 38 % Zn). Якщо у складі латуні окрім міді і цинку є ще інші елементи, то для їхнього позначення після літери Л пишуть початкові літери назв цих елементів (О – олово, С – свинець, Ж – залізо, Ф – фосфор). Процент вмісту кожного з цих елементів показують відповідні цифри, які стоять після кількісного показника міді в латуні. Наприклад, сплав ЛАЖ60-1-1 містить 60 % Си, 1 % А1, 1 % Fe і 38 % Zn.

Залежно від вмісту Zn і структури при кімнатній температурі латуні поділяють (рис. 15.1) на однофазні  $\alpha$ -латуні (до 39 % Zn) і двофазні  $\alpha + \beta$ -латуні (більше 39 % Zn). Якщо цинку в сплаві більше 39 %, утворюється крихка  $\beta$ -фаза – твердий розчин на основі електронної сполуки типу CuZn з ОЦК-граткою.



а



б

Рис. 15.1. Схема мікроструктур латуней в литому стані: однофазні (а), двофазні (б).

*Однофазні латуні* (Л62, Л68, Л80) пластичні, легко деформуються. Постають їх у вигляді напівфабрикатів – прутки, дріт, смуга, стрічки тощо.

З латуней типу Л62, Л68 виготовляють стрічки, гільзи патронів, радіаторні трубки, дріт, фольгу. Латунь марки Л80 (томпак) має колір золота. Використовують її при виготовленні ювелірних і декоративних виробів, а також для відповідальних деталей. Механічні властивості однофазних латуней (Л68, Л80, Л90) такі:  $\sigma_{\text{в}} = 260 \dots 320$  МПа,  $\delta = 45 \dots 55$  %, твердість 53...55 НВ.

*Двофазні  $\alpha + \beta$ -латуні* малопластичні, і вироби з них виготовляють в основному методом лиття. З ливарних латуней виробляють арматуру, фасонне лиття, втулки (ЛС59-1Л); антифрикційні деталі (ЛМц58-2-2); корозійностійкі деталі (ЛА67-2,5); гребні гвинти, лопасті, арматуру, що експлуатується до 300 °С (ЛМцЖ55-3-1); черв'ячні гвинти для важких умов праці (ЛАЖМц66-6-3-2).

Механічні властивості таких латуней залежать не лише від їхнього складу, але й від умов тверднення у ливарних формах.

Додаткове легування латуней різними елементами підвищує їхні експлуатаційні властивості. Так, легування 1...2 % свинцю поліпшує оброблюваність сплаву різанням (ЛС59 – автоматна латунь); олово підвищує

корозійну стійкість у морській воді; алюміній і нікель підвищують механічні властивості (ЛАН59-3-2) тощо.

*Сплави міді з нікелем* (основний легуючий елемент) використовують як конструкційні та електротехнічні матеріали.

*Куналі* (Си – Ni – Al) містять у своєму складі 6...13 % Ni, 1,5...3 % Al, решта – мідь. Такі сплави піддають термічній обробці – гартуванню з наступним старінням. Куналі використовують для виробництва деталей підвищеної міцності, виготовлення пружин, а також різних електромеханічних виробів.

*Нейзильбери* (Си – Ni – Zn) містять у своєму складі до 15 % Ni, до 20 % Zn, решта – мідь. Мають колір, близький до срібла, стійкі до атмосферної корозії. Ці сплави використовують у приладобудуванні, виробництві годинників тощо.

*Мельхіори* (Си – Ni + невеликі добавки до 1 % Fe і Mn) мають високу корозійну стійкість, зокрема у морській воді. Використовуються для виготовлення теплообмінних апаратів, посуду, декоративних штампованих і карбованих виробів.

*Копель* (Си – Ni – Mn) містить у своєму складі 45 % Ni, 0,5 % Mn, решта – мідь. Сплав з високим питомим електроопором використовують в електротехніці, а також для виготовлення електронагрівальних елементів.

*Манганін* (Си – Ni – Mn) – МНМц3-12 відносять до реостатних сплавів, використовують в електротехніці. Таке саме застосування має і константан.

*Константан* (Си – Ni – Mn) – 40...43 % Ni, 0,5...1,5 % Mn, решта — мідь (МНМц40-1,5).

## 15.2. Порядок виконання роботи

1. Вивчити теоретичні відомості.
2. Вказати як поділяються мідні сплави в залежності від легуючого елементу.
3. Отримати колекцію шліфів та провести аналіз мікроструктури під мікроскопом.
4. Замалювати схему структур, що спостерігаються.
5. Вказати до якого типу належать дані сплави.

## 15.3. Контрольні запитання

1. Назвіть основні сплави на основі міді.
2. Що таке латунь, її властивості і застосування?
3. Що таке бронза, її властивості і застосування?
4. Яка система маркування бронз і латуней?
5. Які сплави міді з нікелем використовують як конструкційні і електротехнічні матеріали?

## Лабораторна робота №13 ПЛАСТМАСИ

**Мета роботи:** ознайомитися зі складом, класифікацією, властивостями пластмас, з окремими їх видами, сферами застосування.

**Матеріали та обладнання:** демонстраційний набір пластмас та готових виробів, прилад для зварювання пластмас струменем гарячого повітря, клеї для склеювання пластмас.

**Виконання роботи:** ознайомитися з різними видами пластмас та схемами їх переробки в готові вироби. Виконати зварювання та склеювання пластмас.

### 1. Основні положення і зміст роботи

Пластмасами називають штучні композитні матеріали, одержувані на основі полімерних в'язучих (синтетичних смол, ефірів та інших сполук).

Характерні особливості пластмас:

- мала густина  $\rho = 1 \dots 2 \text{ г/см}^3$  (у пористих пластмас - 0,01...0,8);
- висока хімічна стійкість;
- низька теплопровідність;
- хороші ізоляційні властивості (діелектрики);
- значне теплове розширення;
- висока питома міцність ( $\sigma_B / \rho$ )
- низька міцність, пружність і термостійкість (порівняно з металами), хоча в окремих пластмас ці характеристики не гірші, ніж у металів;
- висока технологічність (крім обробки різанням);
- декоративний вигляд виробів;
- старіння, зниження механічних властивостей з часом.

Склад пластмас приведений в таблиці 17.1.

### Будова і властивості полімерів

Полімерами називають речовини, ланцюги-макромолекули яких складаються з багатьох елементарних ланок (мономерів), тому їх молекулярна маса може сягати до  $10^6$ . В ланцюгах атоми зв'язані ковалентними зв'язками, між ланцюгами діють в 10 раз слабші міжмолекулярні сили. Макромолекули можуть бути лінійними (рис.17.1,а), розгалуженими (рис.17.1,б) і сітчастими (рис.17.1,в), а також впорядкованими (регулярними) і нерегулярними. Такі макромолекули утворюють складніші структури: клубки (глобули), стрічки, пластинки, в яких розташування макромолкул на окремих ділянках може бути впорядкованим (кристалічним) або аморфним (рис.17.2).

## СКЛАД ПЛАСТМАС

<u>Назва</u>	<u>Характеристика</u>	<u>Приклади</u>
<b>1. Полімерна в'язуча</b>	Основа будь-якої пластмаси, яка визначає її властивості	Диолформальдегідна, фенольадегідна, поліефірна смоли
<b>2. Наповнювачі</b>	Вводять 40-80% для підвищення міцності, зносостійкості, теплостійкості та інші властивості пластмас, зниження вартості.	
2.1. порошки		Слюда, кварц, азбест, сажа, графіт
2.2. волокна		Скловолокно, бавовна, полімерне волокно
2.3. листи		Тканина, папір, дерев'яний шпон
<b>3. Пластифікатори</b>	Вводять 10-20%, полегшують формуванню виробів з пластмас, підвищують пластичність, еластичність	Гліцерин, касторове або парафіноване масло
<b>4. Стабілізатори</b>	Сповільнюють старіння та руйнування пластмаси під впливом дії теплоти, світла та інших факторів	Сажа, сірчані сполуки, феноли
<b>5. Твердники</b>	Вводять 1-10%, утворюють просторові молекулярні сітки	
<b>6. Інгібітори</b>	Запобігають самовільному затвердінню пластмас	
<b>7. Пігменти (барвники)</b>	Вводять для отримання бажаних кольорів, малюнка, світлопрозорості виробів	Органічні і азобарвники (містять азот), охра, крон, родамін
<b>8. Порофори</b>	Виділяють гази, утворюються пори	Пірофори
<b>9. Спеціальні добавки</b>	Знижують тертя, горючість, статичні заряди, підвищують провідність	Віск, стеарин, оклеїнова кислота

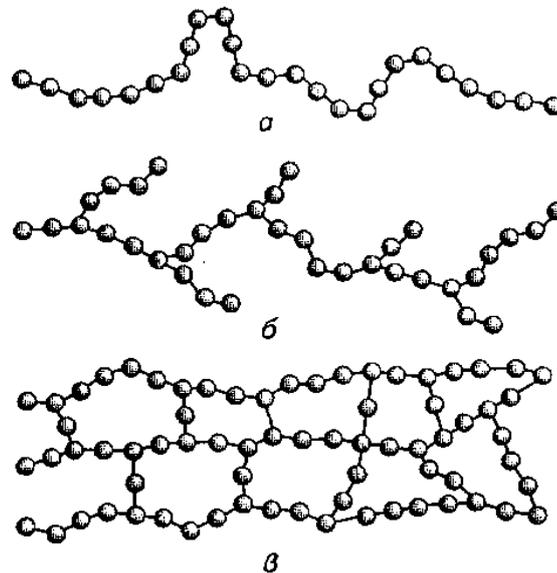


Рис.17.1. Типи макромолекул полімерів.

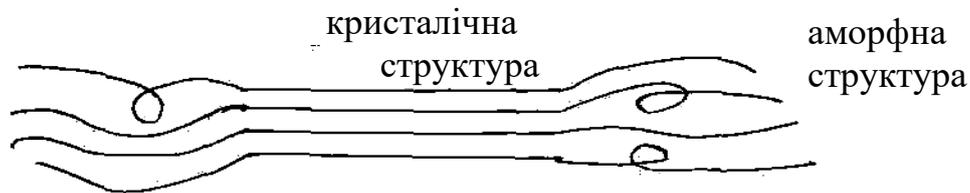


Рис.17.2. Впорядкована та аморфна структура макромолекул

Наявність полярних зв'язків, які здійснюються з допомогою електричних диполів, характерна для полярних полімерів і надає їм жорсткості та теплостійкості. Неполарні полімери /на основі вуглеводнів/ непровідні і зберігають свої властивості при низьких температурах.

За відношенням до нагріву полімери поділяють на термопластичні і терморективні:

- *термопластичні* полімери при нагріванні розм'якшуються (навіть плавляться), а при охолодженні тверднуть. Цей процес є зворотним. Структура макромолекул таких полімерів лінійна або розгалужена. Типовими представниками термопластів є поліетилен, полістирол, поліамід та інші;

- *терморективні* полімери на першій стадії утворення мають лінійну структуру і при нагріванні розм'якшуються, потім внаслідок хімічних реакцій тверднуть (утворюють просторову структуру) і надалі залишаються твердими. Твердий стан полімеру називається *термостабільним*. Прикладом терморективних полімерів можуть слугувати фенолоформальдегідна, гліфталева та інші смоли.

Механічні властивості полімерів (міцність, пружність) залежать від структури, фізичного стану, температури тощо. Полімери можуть знаходитися в трьох фізичних станах: склоподібному, високоеластичному і в'язкотекучому:

- *склоподібний* стан характеризується тим, що атоми, які входять до складу молекулярного ланцюга, здійснюють коливальні рухи навколо положення рівноваги; рух ланцюгів і переміщення макромолекул не відбувається;

- *вискоеластичний* стан властивий тільки високополімерам і характеризується здатністю матеріалу до великих зворотних змін форми при невеликих навантаженнях (ланцюги коливаються і макромолекула набуває здатності згинатися);

- *в'язкотекучий* стан нагадує рідкий стан, але відрізняється від нього дуже великою в'язкістю. Зі зміною температури лінійний або розгалужений полімер може перейти з одного фізичного стану в інший.

Графічна залежність деформації, що розвивається за певний час при заданому напруженні, від температури називається *термомеханічною кривою* (рис. 17.3).

При температурі нижче  $t_{кр}$  полімери є крихкими. Температура  $t_c$  відповідає температурі їх склування. Полімери з просторовою структурою перебувають тільки в склоподібному стані. Дрібносітчаста структура дозволяє отримувати полімери в склоподібному і високоеластичному станах.

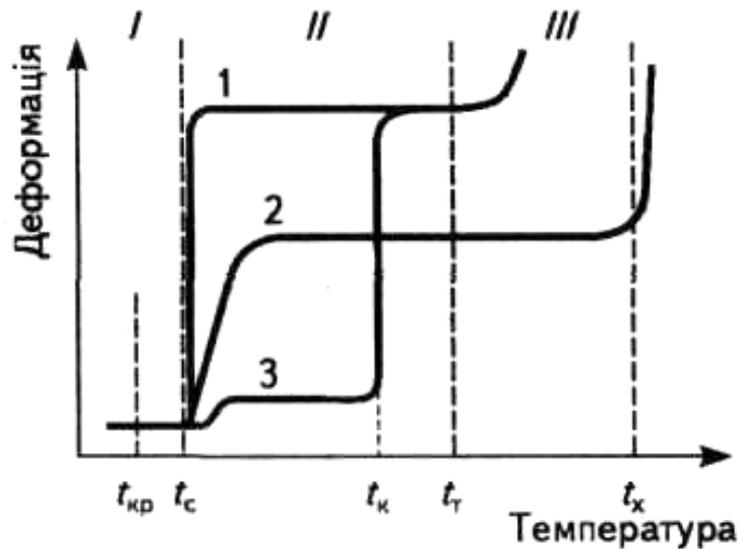


Рис. 17.3. Термомеханічні криві некристалічного лінійного (1), кристалічного (2), дрібно сітчастого (3) полімерів.

( $t_{кр}$ ,  $t_c$ ,  $t_k$ ,  $t_T$ ,  $t_x$  відповідно температури крихкого руйнування, силування, початку в'язкої текучості та початку хімічного розкладу. Ділянки I – III відповідно склоподібного, високо еластичного та в'язкотекучого стану).

Вискоеластичний стан характеризується значними зворотними деформаціями. На ділянці, що відповідає цьому стану, розвиваються пружна і високоеластична деформації. Кристалічні полімери при температурі нижче температури плавлення (кристалізації)  $t_k$  є твердими. Поблизу точки  $t_T$ , крім пружної і високоеластичної, виникає також пластична деформація. Для кристалічних полімерів (поліетилен, поліамід, поліетилен – терефталат тощо) залежність напруження від деформації визначається температурою. Зі зміною температури характер кривих змінюється, і при  $t < t_c$  він подібний до кривих, характерних для склоподібних полімерів.

Усі полімери в температурному інтервалі  $t_c$  —  $t_T$  перебувають у високоеластичному стані.

Температура  $t_x$  відповідає хімічному розкладу дрібносітчастого полімеру (гуми).

На властивості полімерів впливає їх структура. Наприклад, орієнтація молекул при повільному розтягу підвищує міцність в напрямку розтягу в 2-5 рази. Якщо полімерний зразок знаходиться під навантаженням, яке викликало його деформацію, то після зняття навантаження має місце релаксація (зворотна повзучість), що проявляється у відновленні попередньої форми, може протікати протягом тривалого часу (десятки діб) і з неповним відновленням форми (гістерезис).

Під дією тепла, світла, вологи, атмосфери відбувається старіння полімерів, що обумовлюється структурними змінами, проявляється в підвищенні твердості, крихкості, втраті еластичності.

У результаті міжмолекулярної взаємодії тіл, приведених у контакт, має місце їх злипання - адгезія. Здатність полімерів до адгезії використовується при виготовленні з них клеїв, фарб, покриттів.

Класифікація пластмас в залежності від поведінки до нагрівання, від областей застосування та від наповнювачів наведена на рис. 17.4.

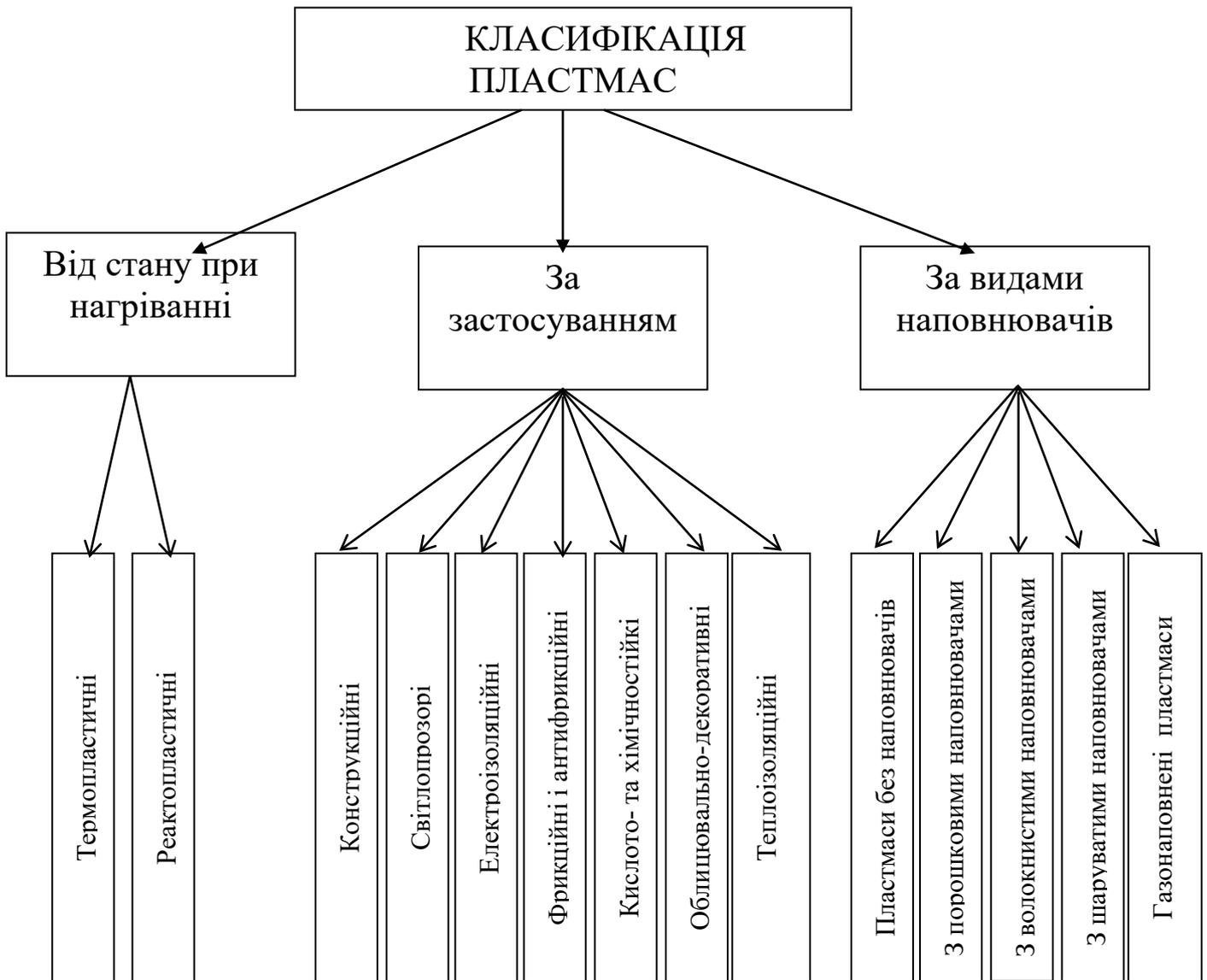


Рис. 17.4. Схема класифікації пластмас

## Термопласти

Розглянемо окремі види термопластичних пластмас.

Поліетилен  $(-CH_2 - CH_2 -)_n$  залежно від умов полімеризації (тиск, температура) буває високого і низького тиску. Властивості цих видів поліетилену, їх робочі температури наведені в додатку "Пластмаси" (табл. 1).

Поліетилен використовується для виготовлення плівок, труб, електроізоляції, захисту металів від корозії. Піддається старінню.

Поліпропілен  $(-CH_2 - CHCH_3 -)_n$  має кращі фізико-механічні властивості, ніж поліетилен (міцність сягає до 40 МПа), застосовується для виготовлення труб, конструкційних деталей, корпусів, плівки, волокна, тканин. Піддається старінню.

Полістирол  $(-CH_2 - CH -)_n$  - твердий, жорсткий, прозорий. Старіє, має низьку теплостійкість ( $t_{роб} \leq 90^\circ C$ ). Йде на виготовлення листів, конструкційних деталей автомобіля /з добавкою каучуку для підвищення еластичності/.

Фторопласт - 4  $(-CF_2 - CF_2 -)_n$  - вискоеластичний (до температур -  $259^\circ C$ ), хімічно стійкий, деструкція починається при  $t > 415^\circ C$ , низький коефіцієнт тертя  $f = 0,04$ , повзе при низьких температурах, високоякісний діелектрик,  $t_{роб}$  до  $250^\circ C$ . З нього виготовляють труби, антифрикційні покриття, плівки, електро- та радіодеталі.

Фторопласт -3  $(-CF_2 - CFCl -)_n$  - теплостійкий до  $150^\circ C$ , легко формується, стійкий до дії кислот. З нього виготовляють труби, шланги, клапани, насоси, покриття.

Механічні властивості і температурні дані стосовно фторопластів -3, 4 наведені в додатку "Пластмаси" (табл. 2).

Органічне скло  $\left( \begin{array}{c} CH_3 \\ | \\ -CH_2 - C - \\ | \\ COOCH_3 \end{array} \right)_n$  - поліметилметакрилат прозорий,

пропускає ультрафіолет, пластичний при температурі  $105-150^\circ C$ , хімічно стійкий,  $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$ , технологічний,  $t_{роб} = -50...80^\circ C$ . Застосовується в літако-, автомобілебудуванні.

Полівінілхлорид  $(-CH_2 - CHCl)_n$  - хімічно стійкий, хороший електроізолятор, не горить, його різновид вініпласт (без пластифікаторів) використовується в будівництві, комунальному господарстві, харчовій промисловості,  $t_{роб} = -40...170^\circ C$ . З іншого його різновиду пластикату (з ефірними пластифікаторами) виготовляють електроізоляцію, лінолеум, плівку, футеровку хімічних вмістищ,  $t_{роб} = -40...170^\circ C$ .

Поліамід  $(-NH - CO -)_n$  - має низький коефіцієнт тертя, високу еластичність, міцність і зносостійкість. Гігроскопічний. З нього виготовляють

паси, канати, сітки, волокно (капрон, нейлон), підшипники, вкладки, електроізоляцію, покриття.

Поліуретани  $(-NH-COO-)_n$  - мають високу еластичність, стійкість в атмосфері,  $t_{роб} = -70...150^{\circ}C$ , йдуть на виготовлення плівок, волокон, поролону.

Поліетилентерефталат (лавсан) - складний полієфір, гнучкий, міцний і жорсткий в кристалічному стані, йде на виготовлення тканин, волокна, плівки, канатів, шестерень, вмістищ.  $t_{роб} = -70...100^{\circ}C$ .

Полікарбонат (дифлон) - складний полієфір, включає бензольне кільце, жорсткий, міцний і гнучкий. З нього виготовляють плівку, деталі машин, деталі криогенної техніки,  $t_{роб} = -250^{\circ}C$ .

Пентопласт - простий полієфір  $\left( \begin{array}{c} CH_2Cl \\ | \\ -CH_2 - C - CH_2 - O - \\ | \\ CH_2Cl \end{array} \right)_n$ ,  $t_{роб} = \leq 180^{\circ}C$ ,

електроізолятор, водостійкий. Йде на виготовлення труб, клапанів, деталей машин, плівки, захисних покриттів.

Поліформальдегід -  $(-CH_2 - O -)_n$  - простий полієфір, кристалічний, має високу твердість, пружність, значну ударну в'язкість. З нього виготовляють деталі автомобілів, шестерні, підшипники, деталі конвеєрів.

Термостійкі пластики (ароматичний поліамід, полісульфон, поліаміди, полібензімідозали) - мають підвищену теплостійкість,  $t_{роб}$  до  $400^{\circ}C$ , високі фізико-механічні властивості (міцність, пластичність, ударна в'язкість), стійкі по відношенню до розчинників, бензину, технічних олив. Ідуть на виготовлення деталей машин, автомобілів, плівок, волокон, тканин.

Термопласти з наповнювачами (порошками, волокнами, тканинами, листами) мають підвищену міцність, зносостійкість і нижчу повзучість.

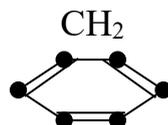
### Термореактопласти

Це композити з наповнювачами на основі фенолформальдегідних, фенолальдегідних, поліепоксидних, полієфірних смол та полісилоксанів (кремнійорганічних сполук). Після затвердіння їх фізико-механічні властивості мало змінюються з температурою. В якості наповнювачів (які вводяться до 70%) використовуються:

- порошки (деревне борошно, слюда, кварц, каолін, азбест, сажа);
- волокна (азбест, бавовна, скловолокно, полімерне волокно);
- листи (тканина, склотканина, деревний шпон, папір та ін.)

Серед різноманітних термореактопластів слід відзначити пресматеріали з порошками-наповнювачами, волокніти, гетинакс, текстоліт, деревний шаруватий пластик (ДШП), СВМ.

Фенопласти містять фенольне кільце



На їх основі виготовляють пресові матеріали з порошкоподібними наповнювачами, які формуються методом пресування при температурі 180°C і тиску  $p=30\text{...}40$  МПа і при цьому отримують значну (до 40%) усадку. З них виготовляють корпуси приладів, моделі, деталі приладів і т.п.

Пластмаси з волокнистими наповнювачами:

- волокніти - композити з волокнами бавовни;
- азбоволокніти - наповнювачем в азбест, в'язуче - фенолформальдегідна смола, мають підвищену теплостійкість (до 200°C) і коефіцієнт тертя 0,35. З них виготовляють гальма.
- скловолокніти - композити з довгим скловолокном, мають підвищену міцність на розтяг  $\sigma_p = 600\text{...}3500$  МПа.
- скловолокніти з коротким волокном - йдуть на виготовлення корпусів, кузовів автомобілів, човнів тощо.

Пластмаси з шаруватими (листовими) наповнювачами.

В якості в'язучого використовують переважно фенолформальдегідні, карбамідні та інші смоли. Розглянемо основні з них.

- Гетинакс - одержують методом пресування листів паперу, просочених смолою. Розрізняють електротехнічний гетинакс (для монтажу електро- та радіосхем) та декоративний гетинакс (для облицювання кабін, вагонів, приміщень).

- Текстоліт - одержують пресуванням просочених смолою бавовняних тканин. Розрізняють текстоліти конструкційні (для виготовлення деталей машин, шестерень), електротехнічні та для прокладок.

Деревошаруватий пластик (ДШП). Наповнювачем для нього служить деревний шпон. З нього виготовляють деталі машин, обшивку вагонів, човнів (як водостійка фанера).

Азботекстоліт - містить до 60% азбесту. З нього виготовляють гальма, фрикційні диски, оскільки має високий коефіцієнт тертя  $f = 0,3\text{...}0,4$ .

Склотекстоліт - наповнювачем тут служить склотканина. Має високі електроізоляційні властивості, тепло- і морозостійкість. СВАМ - скловолокнистий анізотропний матеріал, має дуже високі механічні властивості (міцність, пружність, ударну в'язкість), що досягаються спеціальним формуванням джгутів із скловолокна та їх орієнтованою укладкою.

### **Газонаповнені (пористі) пластмаси**

В'язучим для них можуть бути як термопласти, так і реактопласти, "наповнювачем" є пори, пустоти, які створюються за допомогою газуючих речовин - порофорів. Розглянемо їх основні види.

Пінопласти мають пори, комірки яких ізольовані одна від одної, їх густина  $\rho = 20\text{...}300$  кг/м<sup>3</sup>, використовуються як теплоізолятори, а також звукоізолятори і амортизатори.

Поропласти - губчасті матеріали з порами, що з'єднуються. Їх густина та об'єм легко змінюються,  $\rho=20\text{...}500$  кг/м<sup>3</sup> Використовуються як амортизатори сидінь в авіабудуванні, залізничному транспорті та автомобільній промисловості.

Сотопласти мають порівняно великі пори, що створюються під час їх формування з пластмаси: - термогекіта. Мають високі теплоізоляційні та електроізоляційні властивості та прозорість для радіохвиль. Використовуються для теплоізоляції, обшивки, оздоблення тощо.

#### **Використання пластмас:**

- в якості антифрикційних матеріалів для виготовлення підшипників ковзання (текстоліт, деревопласт, фторопласт, капрон з графітом, епоксидні смоли з графітом тощо);
- для виготовлення деталей машин (зубчасті передачі, паси, корпуси приладів, кришки і т.п. – термо- і реактопласти);
- в якості фрикційних матеріалів для виготовлення фрикційних передач (реактопласти з азбестом та SiO<sub>2</sub>);
- муфти, прокладки в з'єднаннях (текстоліт, капрон, фторопласт);
- ущільнювачі, амортизатори (полівінілхлорид, текстоліт, фторопласт, скловолокніт, пористі пластмаси);
- труби (поліетилен, полівінілхлорид, фторопласт);
- покриття вмістищ для захисту від корозії в харчовій та хімічній, промисловості, антифрикційні покриття і т.п.;
- електроізоляція в електротехнічній промисловості.

### **17.2. Порядок виконання роботи**

1. Ознайомитися з наявними зразками пластмасової сировини з термо- і реактопластів.
2. Ознайомитися з видами пластмасових напівфабрикатів (листами, трубами, плівками, пористими пластмасами, покриттями). Визначити, якими методами вони одержані.
3. Визначити, в якому стані перебуває термопласт залежно від температури.

### **17.3. Контрольні запитання**

1. Що таке пластмаси?
2. Як поділяють пластмаси?
3. Які сфери використання пластмас?
4. Вкажіть характерні особливості пластмас?
5. Наведіть приклади і охарактеризуйте термореактопласти?
6. Опишіть складники пластмас.
7. Як поділяють пластмаси за областями застосування?
8. Як поділяють пластмаси в залежно від наповнювачів?

## Лабораторна робота №14 МАТЕРІАЛИ З ДЕРЕВИНИ

**Мета роботи:** ознайомитися з різними видами порід дерев та матеріалів, що з них виготовляють. Навчитись розрізняти різні породи деревини

**Матеріали та обладнання:** демонстраційний набір порід дерев та готових виробів.

### 18.1. Основні положення і зміст роботи

Роль деревини як будівельного матеріалу досить велика. Але й у машинобудуванні ці матеріали знаходять велике застосування (борта, підлога вантажних автомобілів, деталі конструкції вагонів, шестірні, підшипники й ін.). Особливо важливі ці матеріали як допоміжні при виготовленні модельного оснащення для виробництва фасонних виливків. Досить широко використовується деревина як матеріал для тари (пакувальні ящики).

Деревина – природний матеріал рослинного походження. Вона складається з 43...54 % целюлози ( $C_6H_{10}O_5$ ), 19...29 % лігніну, інше – низькомолекулярні вуглеводні й інші компоненти.

Перевагами деревини як конструкційного матеріалу є мала густина, досить висока питома міцність  $\sigma_B/\gamma$ , високий опір ударним і вібраційним навантаженням, мала теплопровідність, малий коефіцієнт температурного розширення (в 2...3 рази менше, ніж у сталі), висока стійкість до ряду кислот, солей, масел. Деревина має гарні технологічні властивості: легко обробляється, допускає можливість з'єднання деталей дерев'яних конструкцій клеєм, цвяхами, шурупами.

Недоліками деревини є гігроскопічність, що змінює розміри, форму й міцність дерев'яних деталей, схильність до загнивання, відсутність вогнестійкості.

Для захисту деревини від загнивання дерев'яні елементи конструкції ізолюють від контакту з водою лакофарбовими пластмасовими покриттями. Дерев'яні деталі, що стикаються з бетоном, металом, на яких конденсується волога з повітря, ізолюють гідроізоляційними прокладками. З хімічних способів захисту застосовується антисептування дерев'яних виробів шляхом обприскування або просочення розчинами солей Na,  $ZnCl_2$ ,  $CuSO_4$  і ін.

Для зниження займистості здійснюють просочення деревини антипіренами, якими є алюмінієві солі, солі фосфорної або борної кислот. Застосовуються також вогнезахисні фарби й лаки.

Деревина має низьке значення модуля пружності й анізотропією властивостей через волокнисту будову.

Знання особливостей будови деревини дозволяє істотно знизити природні недоліки її як конструкційного матеріалу. Тому що деревина є волокнистим матеріалом, то вивчення її будови й властивостей проводять по трьох розрізах (рис.18.1,а): торцевому 1 (поперечному, перпендикулярному волокнам; радіальному 2, що проходить через вісь стовбура, і тангенціальному 3, що йде уздовж стовбура на деякій відстані від осі.

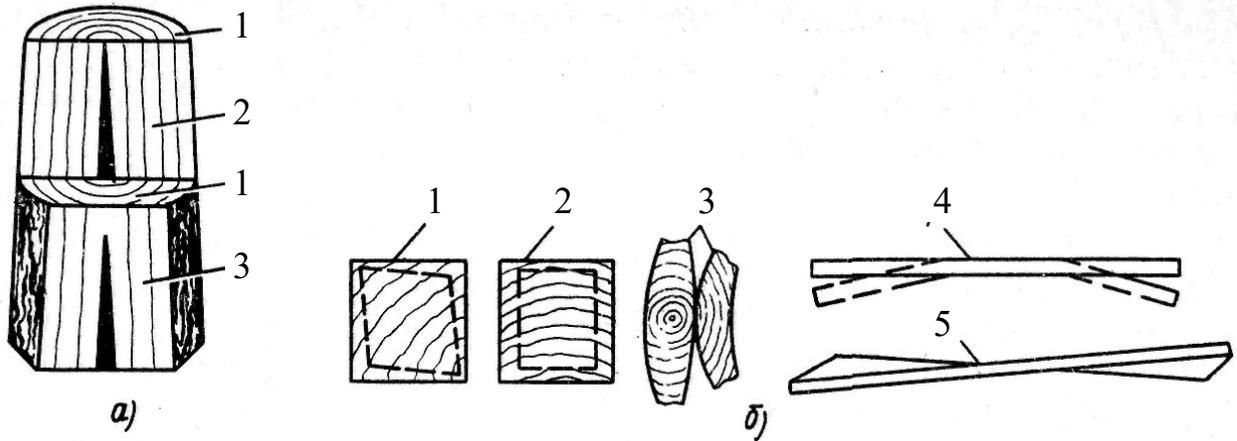


Рис. 18.1. Розрізи деревини й пиломатеріали:

- а – основні розрізи стовбура дерева: 1 – поперечний або торцевий; 2 – радіальний; 3 – тангенціальний;  
 б – види жолоблення пиломатеріалів: 1 і 2 – зміна форми поперечного переріза брусків; 3 – поперечне жолоблення дощок; 4 – поздовжнє жолоблення дощок; 5 – жолоблення косошарової дошки

На поперечному розрізі дерева помітні річні кільця, які складаються з волокон, що мають різну товщину стінок; вони визначають основні механічні властивості деревини. Крім поздовжніх волокон, що становлять основну масу деревини, є поперечні волокна, названі серцеподібними променями. Вони складаються з тонкостінних механічно слабких кліток; кількість їх становить 4...30 % об'єму стовбура дерева. Хвойні породи деревини мають також вертикальні й горизонтальні смоляні ходи діаметром близько 0,1 мм.

У деяких порід (дуб, ясен) є великі судини, зосереджені у весняній зоні річного кільця, і дрібні судини, розташовані в літній зоні кільця. Такі породи називаються кільцесудинними. Ті породи, у яких судини розташовані рівномірно по кільцю (береза, липа), називаються розсіяно-судинними. Будова кілець, вміст літньої деревини в них обумовлюють механічну міцність як хвойних, так і листяних порід.

**Вади деревини.** До найважливіших вад відносяться: 1) сучки, які викликають різку зміну напрямку волокон, завдяки чому міцність деревини при розтязі, згині різко падає; 2) тріщини, які можуть бути внутрішні, радіальні (м'яток); кільцеві тріщини по річному шарі (відлуц); зовнішні поздовжні тріщини на стовбурі, що виникають при різкій зміні температури (морозобоїна); у зрубаній деревині тріщини виникають від усущки й мають вигляд зовнішніх тріщин досить різної довжини. Тріщини мало впливають на міцність при розтязі уздовж волокон. Вони знижують на 5...10% міцність на стиск і особливо різко знижують міцність при сколюванні уздовж волокон; 3) косошаруватість, що характеризується спіральним розташуванням волокон відносно осі стовбура. Оскільки в пиломатеріалі косошаруватість викликає перерізання волокон, то знижується міцність виробу; 4) до паразитних пороків ставляться грибні (мікологічні). Грибок розвивається в повітряному вологому середовищі

(30...60 % і температура 2...40°C). У воді без доступу повітря грибок не розвивається. При грибковій поразці деревина руйнується, перетворюючись у потерть, гнилизну. При ушкодженні комахами (червоточина) знижується сортність деревини.

**Властивості деревини.** Важливою характеристикою деревини є вологість  $W$ , що визначається за формулою:

$$W = \frac{G - G_0}{G_0} \cdot 100\%$$

де  $G$  – маса вологого зразка, г;  $G_0$  – маса зразка в абсолютно сухому стані; за  $G$  приймається маса деревини, висушеної при  $(100 \pm 5)^\circ\text{C}$ .

Вологість деревини залежить від навколишніх умов: мокра деревина, що довго перебуває у воді, має вологість близько 100%, свіжозрубана - 50...100%, повітряно-суха – 10...20 % у кімнатних умовах вологість деревини 7...10%. Для можливості порівняння всі властивості деревини встановлюються при стандартній вологості  $W=15\%$ . Вологість, що відповідає умовам виробничого приміщення, називається виробничою вологістю. Остання повинна бути рівною експлуатаційній вологості або на 2 % нижче за неї (інакше деревина в конструкції буде всихати).

Усушкою ( $U$ ) називається зменшення лінійних розмірів або об'єму деревини при висиханні. Усушка виражається у відсотках. На практиці для оцінки усушки використовують коефіцієнт усушки  $K$ , що являє собою середню усушку при зміні вологості на 1 % і визначається за формулою

$$K = \frac{U}{W}.$$

У силу анізотропності деревини усушка залежить від напрямку. Для різних порід дерева усушка в радіальному напрямку  $K_p = 0,09...0,31\%$ , усушка в тангенціальному напрямку  $K_T = 0,17...0,49\%$ .

Усушка уздовж волокон мала (0,1...0,35 %) і практично не враховується. Коефіцієнт об'ємної усушки  $K_{об} = 0,17...0,7\%$ . Врахування можливої усушки при зберіганні й експлуатації деревини має важливе значення, тому що різна усушка в різних напрямках приводить до виникнення в деревині внутрішніх напружень, наслідком чого є жолоблення й розтріскування дерева. На рис. 18.1,б представлені схеми типової деформації пиломатеріалів, яку можна використати при конструюванні деталей з деревини.

Набрякання деревини пов'язане з водопоглиненням. Іноді це явище має негативні наслідки. Наприклад, набрякання дерев'яних моделей веде до спотворення форми й зміні розмірів виливків. Нерівномірне набрякання по перерізу також може бути наслідком жолоблення й розтріскування деревини.

Важливою характеристикою деревини є об'ємна маса  $\gamma$ . Для порівняння об'ємну масу деревини різної вологості приводять до стандартної (15%) вологості  $\gamma_{15}$  ( $\gamma_{15} = 0,34...0,98 \text{ г/см}^3$ ).

З розповсюджених застосовуваних порід більше легкими є сосна, ялина, липа, осика, вільха, дуже важкими - граб, груша, самшит. Чим щільніше деревина, тим вища її міцність.

Модулі пружності при розтяганні й стиску деревини уздовж волокна приблизно рівні й коливаються в межах  $1,1 \cdot 10^{-1} \dots 1,5 \cdot 10^{-3}$  МПа.

Міцність деревини залежить від часу навантаження; так, значення  $\sigma_{3z}$  може змінюватися від 100 МПа при короткочасному навантаженні до 60 МПа при навантаженні протягом 60 діб. При подальшому збільшенні часу навантаження міцність залишається незмінною.

Твердість деревини визначає оброблюваність і зносостійкість деревини. Торцева твердість значно вище радіальної. У табл. 18.1 наведені механічні властивості при статичному навантаженні для різних порід дерева ( $W = 15\%$ ).

При циклічному напруженні відбувається втомне руйнування деревини. Границя витривалості  $\sigma_{-1}$  при циклічному згині пов'язана з межею статичної міцності  $\sigma_B$  у наступній наближеній залежності:  $\sigma_{-1} / \sigma_B = 0,24 \dots 0,38$ .

**Матеріали з деревини.** Натуральна деревина використовується у вигляді пиломатеріалів. Залежно від розмірів поперечного перерізу (товщини  $h$  і ширини  $b$ ) розрізняють бруси ( $b/h \leq 2$ ), дошки ( $b/h > 2$ ).

**Шпон** – широка, тонка (0,55...1,5 мм) рівна стружка деревини, одержувана луценням або струганням. Шпон є напівфабрикатом для виготовлення фанери, деревних шаруватих пластиків (ДСП) і клеєння гнутих деталей. Шпон дуба, бука, горіха, клена, що має гарну текстуру, широко використовується як лицювальний матеріал для меблів, стін приміщень і ін. Шпона з кедрів й вільхи використовується для сепараторів свинцевих акумуляторів.

**Фанера** – аркушевий матеріал, одержуваний склеюванням аркушів шпону. Аркуші шпону в суміжних шарах мають взаємно перпендикулярний напрямок волокон. Товщина фанери 1...12 мм. Більше товсті клеєні конструкції називаються плитами. Водостійкість фанери залежить від застосовуваного для з'єднання шпону клею: фанера ФСФ на фенолформальдегідному клеї має підвищену водостійкість; фанера ФК на карбомідному і ФБА на альбуміноказеїновому клеях мають середню водостійкість, фанера ФБ на білкових клеях - обмеженою водостійкістю.

Пресована деревина виходить пресуванням у нагрітих прес-формах дерев'яних заготовок. Міцність пресовок зростає при розтяганні до 2 разів, при вигині й стиску - до 3 разів. Ударна в'язкість - 600...800 МПа. Така деревина використовується як заміник металу; з неї виготовляють сегменти зубчастих передач, підшипники, втулки, човники й ін.

Дерев'яностружкові плити виготовляють гарячим пресуванням стружок з в'язкими смолами (фенолформальдегідної і ін.). Плити бувають одношарові, тришарові (у середині звичайна стружка, на поверхні - спеціальна тонка), облицьовані шпоном, фанерою, картоном, пластиком. Дерев'яностружкові (а також тирсові) плити - прекрасний приклад раціонального використання відходів деревини, що дає дуже великий економічний ефект. Такі плити використовуються як тепло- і звукоізоляційні в будівельних конструкціях, при виробництві меблів і т.д.

Механічні властивості різних порід дерева при статичних випробуваннях

Таблиця 18.1

Порода деревини	Об'єм— на маса, г/см <sup>3</sup>	Коефіцієнт усушки, %			Границя міцності, МПа, при				Твердість, МПа			Модуль пружності при розтягу		
		радіальної	тангенційної	об'ємної	стисненні вздовж волокон	розтязі вздовж волокон	згині	сколювання вздовж волокон		радіальна	тангенційна	торцева		
								радіаль- них	танген- ційних					
Хвойні породи														
Листвениця	0,68	0,21	0,40	0,62	54	122,3	98	9,4	8,2	28,0	27,8	40,3	1,45	—
Сосна	0,51	0,18	0,31	0,51	41	100	75	6,9	6,7	21,7	22,3	26,2	1,17	0,051
Ялина	0,46	0,18	0,32	0,52	40	106	70	6,2	6,2	17,3	16,8	24,1	1,43	0,062
Кедр сибірський	0,44	0,13	0,28	0,42	36	82	65	6	6,4	—	—	20,3	—	—
Смерека	0,39	0,13	0,32	0,46	34	76	60	5,3	5,7	16,7	16,4	24,8	1,25	—
Листоїні породи														
Граб	0,81	0,24	0,35	0,61	53	134	120	14,1	17	70,1	71,7	82,5	—	—
Дуб	0,76	0,18	0,28	0,48	52	—	90	11	12,5	53,6	56,8	65,3	1,4	0,11
Клен	0,7	0,2	0,32	0,54	52	—	105	11,3	12,9	50,6	53,7	69,0	—	—
Бук	0,68	0,18	0,35	0,55	47	118	95	10,6	13,2	39,4	40,3	55,6	—	—
Береза	0,64	0,28	0,34	0,64	46	160	96	8,5	10	33,6	30,0	42,3	1,81	0,06
Липа	0,5	0,23	0,33	0,58	40	116	77	7,8	7,4	15,6	16,3	23,4	—	—
Осика	0,5	0,15	0,3	0,47	37	120	68	5,7	7,8	17,5	18,3	24,1	1,54	—

**18.2. Порядок виконання роботи**

1. Отримати заготовку та встановити які вона містить розрізи.
2. Розглянути набір різних порід деревини та визначити кожен з них.
3. Виявити дефект отриманої дошки.

**14.3. Контрольні запитання**

1. Що являє собою деревина?
2. Які переваги деревини перед іншими матеріалами?
3. Назвіть недоліки деревини.
4. Як захищають деревину від контакту з водою?
5. Як зменшити займистість деревини?
6. Від чого залежить вологість деревини?
7. Яка різниця між брусом та дошкою?
8. Що являє собою шпон?
9. Яка будова фанери?

**Список використаної літератури**

1. Василь Попович. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Навчальний посібник у 2-х кн. Книга 1 (Частина I, II і III). Львів: В-во "Папуга", 2003.- 264 с.
2. Матеріалознавство та конструкційні матеріали. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 163 «Біомедична інженерія» для всіх спеціалізацій / І. Ю. Худецький, К. В. Ляпіна, Ю. В. Антонова-Рафі ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 147 с.
3. Композитні та порошкові матеріали: навчальний посібник / П.П. Савчук, В.П. Кашицький, М.Д. Мельничук, О.Л. Садова; за заг. ред. П.П. Савчука. [Рукопис] – Луцьк: Видавець: ФОП Теліцин О.В., 2017. – 368 с.
4. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів : конспект лекцій для студ. напряму підготов. 6.70106 "Автомобільний транспорт" денної та заоч. форм навч. / уклад.: П.П. Савчук, М.Д. Мельничук, І.В. Боярська. – Луцьк : Луцький НТУ, 2015. – 77 с.
5. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів : метод. вказівки до лабораторних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітніх програм «Агроінженерія» спец. 208 Агроінженерія, галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство та «Галузеве машинобудування» спец. 133 Галузеве машинобудування, галузь знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад.: О.Л. Садова, В.П. Кашицький. – Луцьк : Луцький НТУ, 2022. – 75 с.
6. Матеріалознавство та технологія конструкційних матеріалів : метод. вказівки до викон. практичних занять для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньо-професійних програм освітніх програм «Агроінженерія» спец. 208 Агроінженерія, галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство та «Галузеве машинобудування» спец. 133 Галузеве машинобудування, галузь знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад.: О.Л. Садова, В.П. Кашицький. – Луцьк : Луцький НТУ, 2022. – 57 с.
7. Опальчук А.С. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Лабораторний практикум / Опальчук А.С., Котречко О.О., Роговський Л.Л., Семеновський О.Є., Роговський І.Л., 2015. - 426 с.
8. Хільчевський В.В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. Навчальний посібник, К.: Либідь, 2002. - 328 с.
9. <https://ltk.lntu.org.ua/>
10. <https://lib.lntu.edu.ua/uk>