

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ»

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

З ДИСЦИПЛІНИ «ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ  
І МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З РОЗДІЛУ  
«ВПЛИВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ І ТЕМПЕРАТУРИ НА ФАЗОВИЙ СТАН  
ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ»

ДЛЯ СТУДЕНТІВ І–ІІІ КУРСІВ УСІХ ФОРМ НАВЧАННЯ

Затверджено на засіданні  
кафедри матеріалознавства  
Протокол № 11 від 05.06.2013

Методичні вказівки з дисципліни “Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство” до виконання лабораторного практикуму з розділу “Вплив хімічного складу і температури на фазовий стан залізобуглецевих сплавів” для студентів I–III курсів усіх форм навчання / Укл.: Трофименко В.В., Клименко О.П., Овчаренко В.І. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2014. – 46 с.

Укладачі: В.В. Трофименко, канд. техн. наук  
О.П. Клименко, канд. техн. наук  
В.І. Овчаренко, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск О.Б. Гірін, д-р техн. наук

#### Навчальне видання

Методичні вказівки з дисципліни “Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство” до виконання лабораторного практикуму з розділу “Вплив хімічного складу і температури на фазовий стан залізобуглецевих сплавів” для студентів I–III курсів усіх форм навчання

Укладачі: ТРОФИМЕНКО Віталій Васильович  
КЛИМЕНКО Олександр Павлович  
ОВЧАРЕНКО Володимир Іванович

Редактор Л.М. Тонкошкур  
Коректор В.П. Синицька

Підписано до друку 26.03.14. Формат 60×84 1/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.  
Умов. друк. арк. 2,09. Обл.-вид. арк. 2,17. Тираж 100 прим. Зам. № 160.  
Свідоцтво ДК № 303 від 27.12.2000.

---

ДВНЗ УДХТУ, 49005, м. Дніпропетровськ, 5, просп. Гагаріна, 8

Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

## ВСТУП

У сучасній техніці, незважаючи на створення великої кількості неметалевих матеріалів, головним чином, пластмас, найважливішими та найпоширенішими, як і раніше, залишаються металеві сплави. Передусім це сплави на основі заліза, що зумовлено можливістю отримання в них комплексу високих експлуатаційних властивостей, які не вдається забезпечити в інших матеріалах, а також широким розповсюдженням заліза у земній корі та відносно низькою вартістю і простотою одержання сплавів. За обсягом виробництва залізовуглецеві сплави складають не менше 85% сучасних конструкційних матеріалів. У машинобудуванні найбільш широко використовуються сплави заліза з вуглецем – сталі та чавуни. Визначити структури цих сплавів у стані рівноваги, температури фазових перетворень, вибрати температуру термічної обробки дозволяють діаграма стану Fe–C.

Важливіша з діаграм стану металевих систем – діаграма стану Fe–C сплавів – була одночасно і важкою для розробки. Причинами труднощів, як виявилось пізніше, були поліморфізм заліза та наявність метастабільних фаз. У процесі дослідження системи Fe–C формувались основи металознавства та розвивались методи вивчення сплавів. Історію вивчення діаграми Fe–C можливо з повним правом розглядати як історію металографії. Початок створення діаграми стану сплавів заліза з вуглецем був покладений Д.К. Черновим у 1868 році з встановленням критичних точок для сталей. У подальшому із вдосконаленням засобів і методик та розширенням їх достовірності уточнювалися критичні точки для всього спектру залізовуглецевих сплавів, починаючи від чистого заліза і закінчуючи сплавом, що містить 6,67% вуглецю. Сплави з більшим вмістом вуглецю дуже крихкі і практичного застосування не мають.

Однією з особливостей є те, що високовуглецева фаза може бути стабільною у вигляді графіту, і метастабільною – у вигляді карбіду заліза (цементиту – Fe<sub>3</sub>C). Сучасна діаграма є подвійною враховуючи незалежне існування двох різних систем: метастабільної (залізо-цементит) і стабільної (залізо-графіт). Вигляд подвійної діаграми стану “залізо-вуглець” наведений на рис. А1 (додаток А): метастабільний стан “залізо-цементит” (Fe–Fe<sub>3</sub>C) – суцільні лінії, стабільний стан “залізо-вуглець” (Fe–C) – пунктирні лінії. Позначення точок на діаграмі стандартизовані в усіх країнах (табл. А1, додаток А).

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## МІКРОАНАЛІЗ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ У РІВНОВАЖНОМУ СТАНІ

**Мета роботи:** вивчити метастабільну діаграму стану системи залізо–цементит, структурні перетворення в залізовуглецевих сплавах залежно від їх хімічного складу та температури, а також вплив складу та структури на властивості сплавів.

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

#### 1.1. КОМПОНЕНТИ І ФАЗИ У СПЛАВАХ СИСТЕМИ ЗАЛІЗО–ВУГЛЕЦЬ

Компонентами залізовуглецевих сплавів є два хімічних елементи – залізо та вуглець.

**Залізо** – метал VIII групи періодичної системи, світло-сріблястого кольору, який має густину  $7,86 \text{ г/см}^3$  і температуру плавлення  $1536^\circ\text{C}$ . Це метал, в якому відбувається температурне поліморфне перетворення. Залізо двічі змінює свою гратку – при  $911^\circ\text{C}$  і при  $1392^\circ\text{C}$ . Нижче  $911^\circ\text{C}$  залізо має об'ємноцентровану кубічну гратку (ОЦК). Таке залізо називається  $\alpha\text{-Fe}$ , або  $\text{Fe}_\alpha$ . При нагріванні до температури вище  $911^\circ\text{C}$  гратка заліза змінюється на гранецентровану кубічну (ГЦК). Це  $\gamma$ -залізо ( $\gamma\text{-Fe}$ , або  $\text{Fe}_\gamma$ ). При  $1392^\circ\text{C}$  відбувається ще одне поліморфне перетворення: ГЦК-гратка знову перетворюється на ОЦК, яка зберігається до температури плавлення. Високотемпературне залізо з ОЦК-граткою називають  $\delta$ -залізом ( $\delta\text{-Fe}$  або  $\text{Fe}_\delta$ ). Під час охолодження відбуваються зворотні процеси перетворення граток (рис. 1.1).

Площинки на кривій відповідають критичним точкам температури кристалізації заліза **A** ( $1536^\circ\text{C}$ ) та температурам поліморфних перетворень **A<sub>4</sub>** і **A<sub>3</sub>**. Поруч з кривою схематично показані кристалічні гратки  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\delta\text{-Fe}$ .

У залізі також відбувається магнітне перетворення при температурі  $768^\circ\text{C}$  (критична точка **A<sub>2</sub>** – точка Кюрі), пов'язане з внутрішньоатомними змінами і не викликає перебудови гратки, а тільки призводить до зміни магнітних властивостей. Тому на кривій охолодження при даній температурі відсутній горизонтальний відрізок.

Технічно чисте залізо, яке вміщує до 0,2% домішок, в тому числі до 0,05% вуглецю, має добру пластичність, невисоку міцність і низьку твердість.

**Вуглець** – неметал, належить до IV групи періодичної системи і існує у природних умовах у вигляді двох полімерних модифікацій: графіту і метастабільної модифікації алмазу (рис. 1.2).

Графіт має гексагональну пошарову кристалічну гратку, м'який і невеликої міцності ( $\sigma_{\text{в}}=20 \text{ МПа}$ ). З підвищенням температури міцність графіту зростає і при  $2500^\circ\text{C}$  графіт міцніше всіх тугоплавких металів.

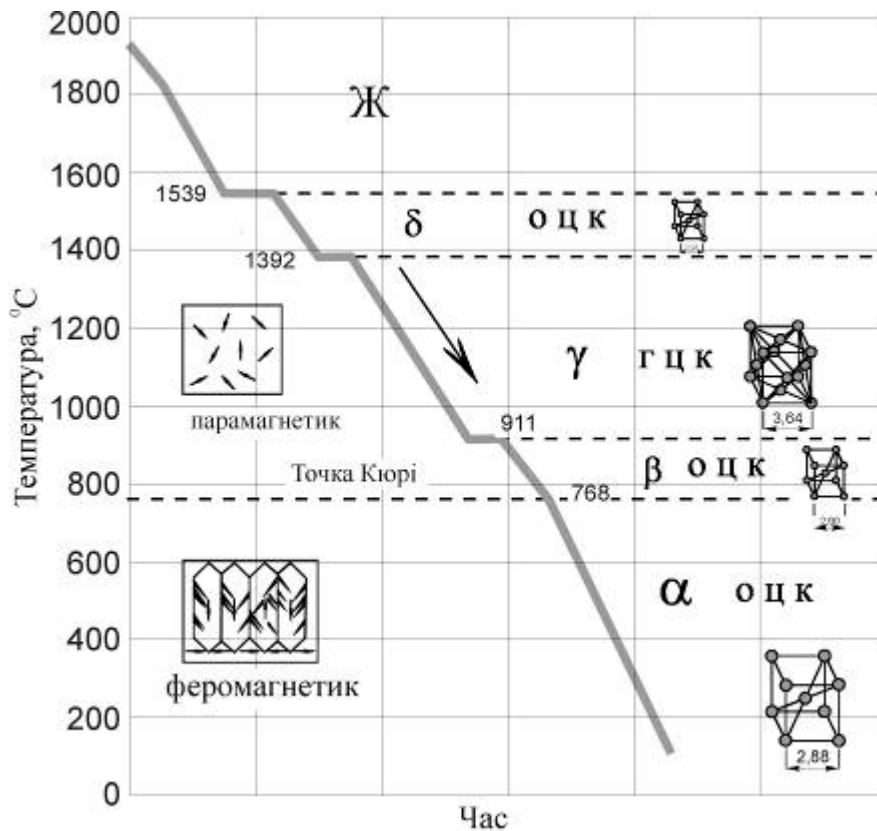


Рис. 1.1. Крива охолодження та критичні точки чистого заліза

Густина графіту  $2,25 \text{ г/см}^3$ , температура плавлення  $3500^\circ\text{C}$ . Графіт поєднує високу жароміцність і кислотостійкість, електропровідність і теплопровідність.

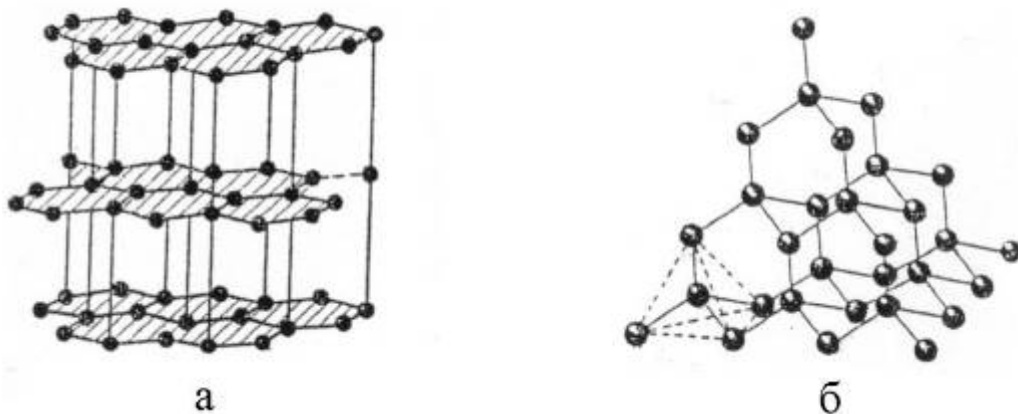


Рис. 1.2. Схематичне зображення ґраток графіту (а) та алмазу (б)

Вуглець у залізовуглецевих сплавах може кристалізуватися у вільному стані у вигляді графіту або взаємодіяти із залізом, утворюючи тверді розчини і хімічну сполуку  $\text{Fe}_3\text{C}$  – цементит.

**У системі залізо-вуглець можлива присутність наступних шістьох фаз:**

– *рідкий розчин Р* – однорідна рідина, що складається із заліза та вуглецю, існує як окрема фаза над лінією ліквідус;

– *трьох твердих розчинів* проникнення вуглецю у кристалічну ґратку відповідної модифікації заліза:

- на базі  $\alpha$ -Fe (ферит,  $\Phi$ );
- на базі  $\gamma$ -Fe (аустеніт,  $\Lambda$ );
- на базі  $\delta$ -Fe ( $\delta$ -ферит,  $\delta\text{-}\Phi$ )
- двох високовуглецевих фаз:
  - хімічної сполуки заліза з вуглецем  $\text{Fe}_3\text{C}$  (цементит,  $\Pi$ );
  - графіту ( $\Gamma$ )

## 1.2. МЕТАСТАБІЛЬНА ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗО–ЦЕМЕНТИТ

Діаграма стану системи з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані, обмеженою розчинністю у твердому стані, з перитектичним, евтектичним, евтектоїдним і поліморфними перетвореннями

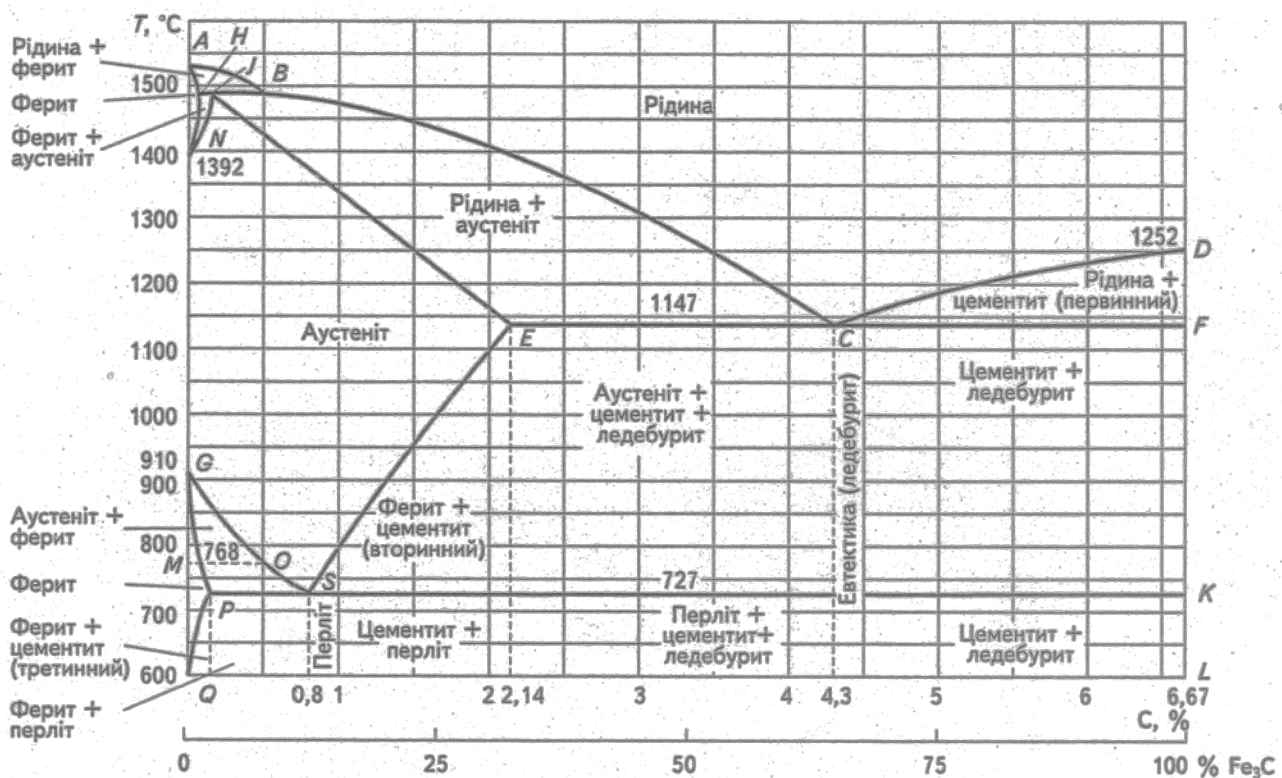


Рис. 1.3. Метастабільна діаграма рівноважного стану системи Fe–Fe<sub>3</sub>C

Складність діаграми Fe–Fe<sub>3</sub>C (рис. 1.3) зумовлена тим, що у залізобуглецевих сплавах, окрім первинної кристалізації (*рідина*→*тверда фаза*) відбуваються процеси вторинної кристалізації в твердому стані, які пов'язані з поліморфними перетвореннями заліза та зменшенням розчинності вуглецю у фериті та аустеніті.

### Точки та лінії діаграми:

На рис. 1.3. по ординаті відкладена температура, по абсцисі нанесені дві шкали: верхня характеризує масовий вміст вуглецю від 0% (100% заліза) до 6,67% (100% Fe<sub>3</sub>C), нижня – кількість цементиту.

Точка А на лівій ординаті – це температура плавлення чистого заліза (1536°C), точка Д на правій ординаті – температура плавлення цементиту

(1252°C), **ABCD** – лінія ліквідусу, вище якої всі сплави перебувають у рідкому стані, **АНJESF** – лінія солідуса, нижче якої всі сплави знаходяться у твердому стані.

Точки **N** (1392°C, 0%С) та **G** (911°C, 0%С) – температури поліморфного перетворення в залізі. Інші точки діаграми будуть описані при розгляді фазових та структурних перетворень у різних сплавах.

*Лінії діаграми – це геометричне місце точок, що характеризують хімічний склад фаз, які знаходяться у рівновазі, температури початку та кінця фазових перетворень.* З теорії кристалізації відомо, що перехід від рідкого стану в твердий відбувається не при температурі рівноваги  $T_0$  для цих фаз, а при деякому переохолодженні  $\Delta T$ . Тому далі при розгляді перетворень, що проходять в реальних умовах при охолодженні (нагріванні), буде матися на увазі, що вони відбуваються при деякому переохолодженні (перегріванні) відносно температур рівноваги  $T_0$ .

**Первинна кристалізація.** За лінією ліквідусу **ABCD** починається кристалізація з рідкої фази:  $\delta$ -фериту  $\Phi_\delta$  (**AB**), аустеніту **A** (**BC**) та цементиту первинного  $\Pi_1$  (**CD**). Лінія **АН** – температурна межа двофазної зони “рідина +  $\Phi_\delta$ ”, нижче цієї лінії – однофазна зона  $\Phi_\delta$ . **НJB** – лінія поліморфного перетворення за перитектичною реакцією (1.1):



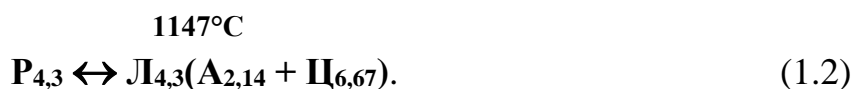
При переохолодженні нижче 1499°C внаслідок взаємодії рідини складу **B** (0,51%С) з кристалами  $\delta$ -фериту складу точки **H** (0,1%С) утворюється аустеніт складу точки **J** (0,16%С).

Лінія **JE** – температурна межа двофазної зони **P+A**, кінець кристалізації аустеніту, нижче цієї лінії – однофазна зона аустеніту.

Оскільки при температурі вище 911°C залізо існує в модифікації  $\text{Fe}_\gamma$ , нижче лінії **AC** з рідкого розчину починає кристалізуватись твердий розчин вуглецю в  $\text{Fe}_\gamma$  – аустеніт (**A**). Нижче лінії **CD** з рідкого розчину виділяється цементит, який називають *первинним* ( $\Pi_1$ ).

Точка **C** – *евтектична точка*, якій відповідає вміст вуглецю 4,3%. Під час кристалізації сплаву такого складу при температурі 1147°C з рідкого розчину одночасно виділяються кристали аустеніту і цементиту, тобто утворюється евтектика (суміш **A+ $\Pi_1$** ). концентрація вуглецю в аустеніті дорівнює 2,14% (точка **E**), в цементиті 6,67%. Така евтектика отримала назву ледебурит на честь німецького вченого-металурга А. Ледебура.

Лінія **ESF** (1147°C) – *лінія евтектичного перетворення*: при такій температурі в усіх сплавах з концентрацією вуглецю більше 2,14% кристалізація закінчується утворенням ледебуриту. *Ледебурит* (**L**) однорідна механічна суміш аустеніту і цементиту, яка формується при постійній температурі 1147°C (1.2):



Структура сплавів з концентрацією вуглецю від 2,14% до 4,3% безпосередньо нижче лінії **ES** складається з аустеніту і ледебуриту. Аустеніт виділяється з рідкого розчину в інтервалі температур між лініями ліквідусу і солідусу, а ледебурит утворюється при температурі 1147°C (на евтектичній горизонталі **ESF**).

У сплавах з концентрацією від 4,3%С до 6,67%С первинна кристалізація теж закінчується формуванням ледебуриту, і структура цих сплавів нижче 1147°C складається з ледебуриту і первинного цементиту, який виділився з рідкого розчину раніше – при температурах між лініями **CD** і **CF**.

Сплави з вмістом вуглецю менше 2,14% після закінчення первинної кристалізації мають структуру аустеніту.

**Вторинна кристалізація.** Лінія **NH** та **NJ** – температури початку та кінця поліморфного перетворення  $\delta$ -фериту в аустеніт у сплавах до 0,16%С. У сплавах із 0,16...0,51%С це перетворення відбувається при постійній температурі 1499°C.

У залізовуглецевих сплавах відбуваються структурні зміни і в твердому стані. Вони зумовлені поліморфізмом заліза і зменшенням розчинності вуглецю в твердих розчинах (аустеніті і фериті) при зниженні температури. Це *вторинна кристалізація* або *перекристалізація*.

Оскільки аустеніт є твердим розчином проникнення, вуглець в ньому розчиняється обмежено. Як видно з діаграми, максимальна розчинність вуглецю в аустеніті досягається при температурі 1147°C і дорівнює 2,14% (точка **E**). Зі зниженням температури розчинність вуглецю в залізі зменшується відповідно з лінією **ES** і при температурі 727°C досягає 0,8% (точка **S**). Лінія **ES** є лінією обмеженої розчинності вуглецю в  $Fe_{\gamma}$  і при кожній температурі характеризує максимальний вміст цього елемента в аустеніті. При 727°C максимальна кількість вуглецю, який може розчинитися в аустеніті, дорівнює 0,8%. Лінії **GS** та **GPS** – температури початку та кінця поліморфного перетворення  $A \rightarrow \Phi$ , яке відбувається в інтервалі температур при безперервному охолодженні в сплавах із вмістом вуглецю до 0,8%.

**PSK** – лінія поліморфного перетворення  $A \rightarrow \Phi$  при постійній температурі в сплавах із 0,02...6,67%С за евтектоїдною реакцією (1.3):



При переохолодженні нижче 727°C з аустеніту евтектоїдної концентрації утворюється перліт.

Лінії **ES** та **PQ** – лінії граничної розчинності вуглецю в аустеніті та фериті, відповідно. У зв'язку зі зменшенням (збільшенням) вмісту вуглецю в цих фазах при охолодженні (нагріванні) лінії **ES** та **PQ** відповідають початку утворення (кінцю розчинення) цементиту вторинного в аустеніті та третинного у фериті.



### 1.3. СТРУКТУРНІ СКЛАДОВІ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

Залежно від температури та вмісту вуглецю Fe–C сплави утворюють ряд структурних складових:

- три тверді розчини проникнення ( $\Phi$ , А,  $\delta$ -ферит);
- дві високовуглецеві фази (Ц, Г);
- евтектика – ледебурит (4,3% С) Л;
- евтектоїд – перліт (0,8%С) П.

Ферит, аустеніт, цементит можуть існувати у сплавах в структурновільному стані або входити до складу ледебуриту чи перліту.

**Ферит** ( $\Phi$ ) – твердий розчин проникнення атомів вуглецю в  $\alpha$ -Fe ОЦК гратці (рис. 1.4).

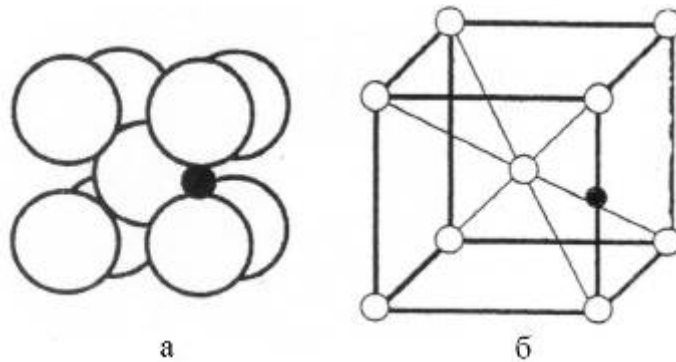


Рис. 1.4. Елементарна комірка фериту: а – модель; б – схема

Розрізняють низькотемпературний  $\alpha$ -ферит з граничною розчинністю вуглецю 0,02% при 727°C та високотемпературний  $\delta$ -ферит (0,1%С при 1499°C) При 20°C у фериті розчиняється 0,006%С. Під мікроскопом ферит виявляється у вигляді зернистої структури (рис. 1.5).

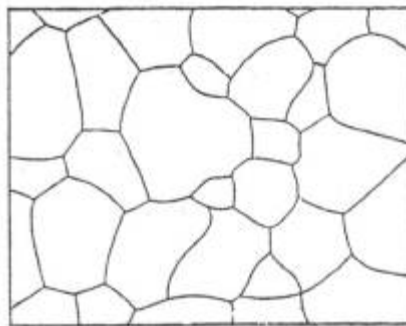


Рис. 1.5. Схема мікроструктури фериту, x150

Низька розчинність вуглецю в фериті обумовлена малим радіусом порожнин в ОЦК гратці (0,037 нм). Ферит – м'яка пластична складова з властивостями, близькими до технічно чистого заліза:  $\sigma_B = 200\text{--}250$  МПа,  $\delta = 40\text{--}50\%$ ,  $\psi = 70\%$ .

**Аустеніт** (А) – твердий розчин проникнення атомів вуглецю в  $\gamma$ -Fe ГЦК гратці, радіус міжатомних порожнин дорівнює 0,052 нм. Цим обумовлена підвищена, в порівнянні із феритом, розчинність вуглецю в аустеніті – 2,14% при 1147°C, а при 727°C – 0,8%.

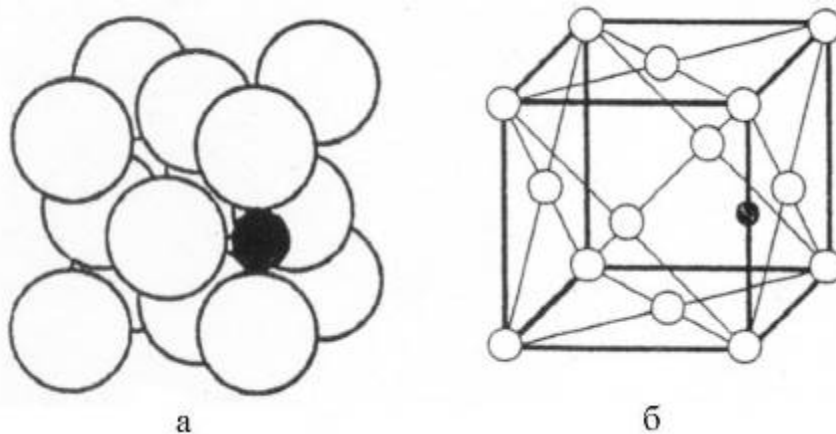


Рис. 1.6. Елементарна комірка аустеніту: а – модель; б – схема

Мікроструктура аустеніту (рис. 1.7) – поліедричні зерна з двійниками. Аустеніт є парамагнітний, високопластичний, але має твердість і міцність вище, ніж ферит:  $\sigma_B = 500-800$  МПа,  $\delta = 50...60\%$ ,  $160...200$  НВ.

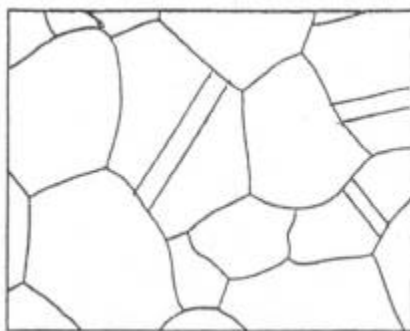


Рис. 1.7. Схема мікроструктури аустеніту, x150

І в фериті, і в аустеніті тверді розчини проникнення, окрім вуглецю, можуть утворювати азот і водень (атомні радіуси  $0,072$  нм та  $0,0056$  нм, відповідно), частково бор, а тверді розчини заміщення – кремній, марганець, хром, нікель, молібден, вольфрам тощо.

**Цементит (Ц)** – хімічна сполука  $Fe_3C$ , що містить  $6,67\%C$ . Гратка – складна ромбічна, характеризується металевим та іонним зв'язком між атомами вуглецю та заліза (рис. 1.8) і на діаграмі йому відповідає вертикальна лінія, що проходить через точки **F** та **K**.

Тому цементит має високу твердість ( $HB \geq 800$ ), крихкість і практично нульову пластичність. Цементит – метастабільна фаза у високовуглецевих сплавах ( $>2,14\%C$ ) при дуже повільному охолодженні замість нього може утворитися графіт.

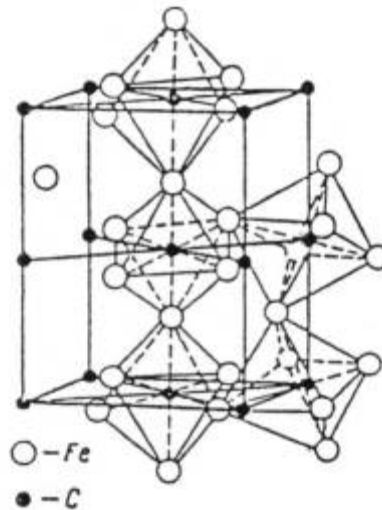


Рис. 1.8. Кристалічна структура цементиту

Залежно від умов утворення розрізняють цементит первинний (**Ц<sub>I</sub>**), який утворюється із рідини при затвердінні розплаву (лінія **ДС**); вторинний (**Ц<sub>II</sub>**) – утворюється при розпаді аустеніту (лінія **ES**).

Зменшення розчинності вуглецю у  $Fe_{\alpha}$  приводить до виділення з фериту надлишкового вуглецю у вигляді третинного цементиту (лінія **PQ**).

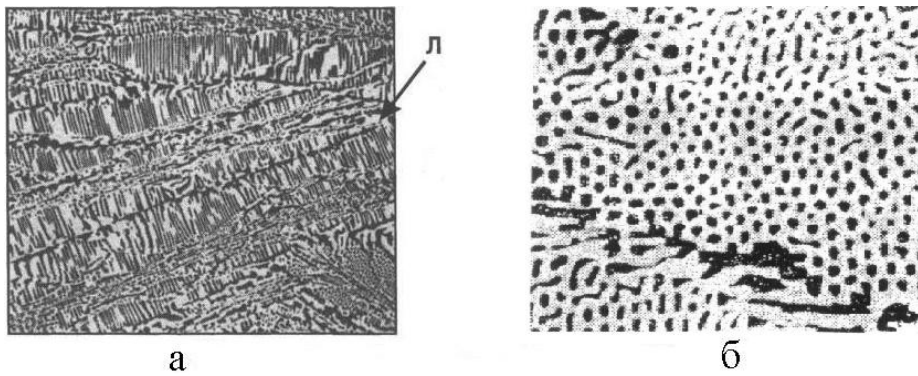
Хоча його кількість невелика, в деяких випадках він може суттєво впливати на властивості маловуглецевих сплавів.

Слід підкреслити, що всі види цементиту (первинний, вторинний і третинний) мають однакові властивості та відрізняються один від одного тільки своєю морфологією. Тому при розгляді структури конкретного сплаву, як правило, не деталізується вид цементиту. Утворює тверді розчини заміщення, в яких вуглець заміщується неметалами (O, N), а залізо – металами (Mn, Cr, W тощо). Твердий розчин заміщення на основі ґратки цементиту має назву *легований цементит*.

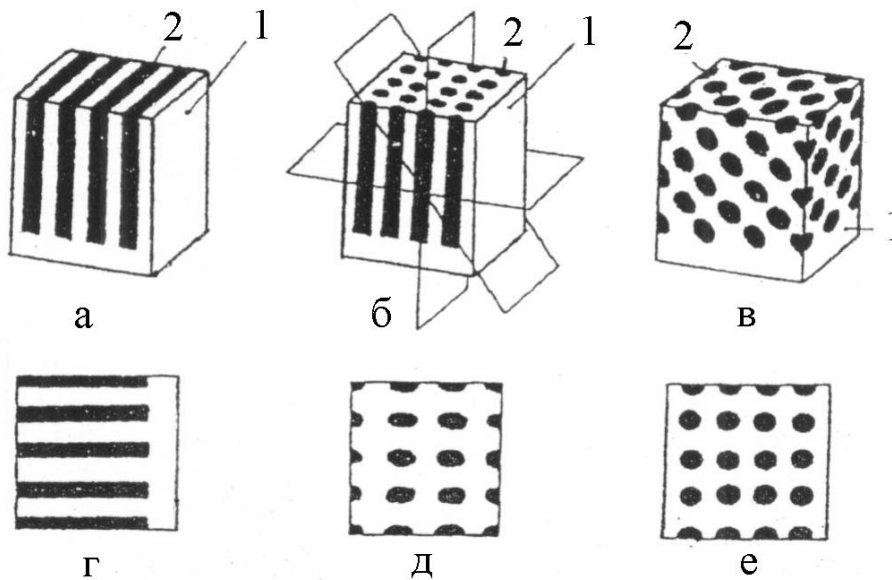
Сплави на основі цементиту у чистому вигляді не використовуються. Чим більше цементиту, тим твердість залізобуглецевого сплаву вище.

**Графіт** (**Г**) – стабільна модифікація вуглецю, має складну гексагональну ґратку (рис. 1.2,а). Відстань між атомами в одному шарі складає 0,1415 нм, між шарами – значно більше – 0,34 нм. У першому випадку зв'язок реалізується за рахунок ковалентних сил, у другому – за рахунок слабких Ван-дер-Ваальсових. Густина графіту 2,26 г/см<sup>3</sup>. Твердість 3...5 НВ, значна крихкість, пластичність практично відсутня.

**Ледебурит** (**Л**) – евтектична фазова суміш цементиту та аустеніту в інтервалі температур 1147...727°С, перліту і цементиту – при температурах нижче 727°С. Середній вміст вуглецю в ледебуриті 4,3%. Ледебурит утворюється в залізобуглецевих сплавах, що містять більше 2,14%С. Ледебурит містить 64% цементиту. Тому він твердий (НВ≥600) та крихкий. Евтектичний чавун з 4,3%С має ледебуритну структуру (рис. 1.9, рис. 1.10).

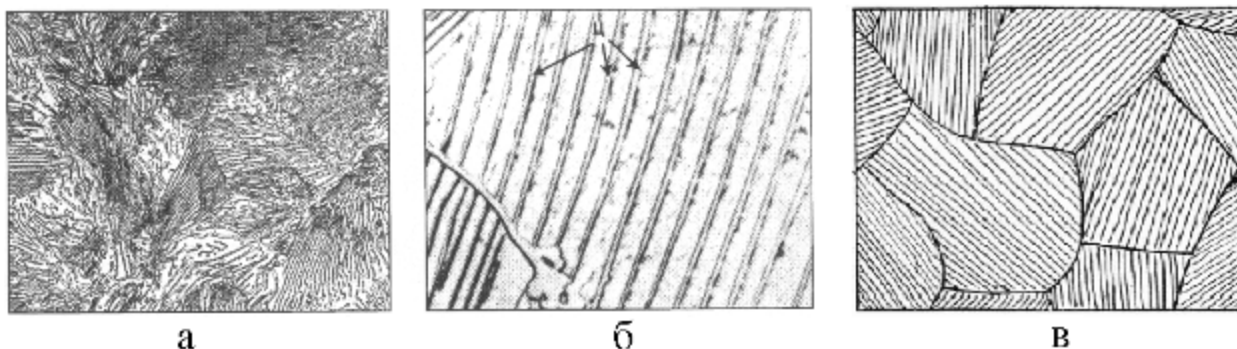


а  
 б  
 Рис. 1.9. Евтектичний білий чавун з 4,3% С – ледебурит:  
 а – мікроструктура, х100; б – схема мікроструктури



а  
 б  
 в  
 г  
 д  
 е  
 Рис. 1.10. Схема будови евтектичної колонії:  
 1 – матриця, 2 – включення у вигляді пластин (а); стрижнів (б) та  
 глобулів (в); розріз колонії уздовж (г), під кутом (д) та перпендикулярно стрижню (е)

**Перліт (П)** – евтектоїдна фазова суміш фериту і цементиту, що містить 0,8%С, утворюється при температурі 727°C в результаті вторинної кристалізації або перекристалізації (розпаду)аустеніту в процесі його охолодження ( $A_S \rightarrow \Phi_P + \Psi$ ). Цей розпад називається евтектоїдним, а перліт – евтектоїдом. Структура перліту – пластини фериту і цементиту, що поперемінюються (рис. 1.11).



а  
 б  
 в  
 Рис. 1.11. Евтектоїдна сталь з 0.8%С - перліт:  
 а, б – мікроструктура, х500 і х2000; б – схема мікроструктури

Властивості перліту залежать від дисперсності ферито-цементитної суміші та форми цементиту. Грубопластинчастий перліт має властивості:  $\sigma_B = 500\text{--}600$  МПа,  $\delta = 8\text{...}15\%$ ,  $160\text{...}250$  НВ. Більш дисперсний перліт має більшу міцність та меншу пластичність.

#### 1.4. КЛАСИФІКАЦІЯ СТАЛЕЙ ЗА СТРУКТУРОЮ В СТАНІ РІВНОВАГИ

Залізовуглецеві сплави, які містять до 0,02% С, мають назву “технічне залізо”. Якщо вміст вуглецю складає від 0,02% до 2,14%, то такі сплави називаються сталями, а вище 2,14% – чавунами.

Діаграма стану Fe–Fe<sub>3</sub>C дозволяє визначити структуру сталі в стані рівноваги, тобто після дуже повільного охолодження. На практиці структури, що близькі до рівноваги, досягаються при відпалюванні з повільним охолодженням разом з піччю. Залежно від вмісту вуглецю сталі зі структурою в рівноваговому (відпаленому) стані (рис. 1.12) поділяються на наступні групи:

– *технічне залізо* ( $\leq 0,02\%$  С). Структура – ферит (рис. 1.12,а) або ферит з цементитом (третинним) (рис. 1.12,б). Технічне залізо, що вміщує менш ніж 0,0002% С при кімнатній температурі, має структуру фериту (рис. 1.5). При збільшенні вмісту вуглецю до 0,02%С на межах зерен з’являються прошарки третинного цементиту. Його поява знижує пластичність заліза. Цементит, як і ферит, після травлення розчином азотної кислоти у спирті залишається світлим, протравлюються тільки границі зерен. Для посилення контрасту між цементитом та феритом мікрошліф протравлюють пікратом натрію, який надає цементиту темного кольору.

– *доевтектоїдні сталі* ( $0,02\% < C < 0,8\%$ ). Структура – ферит (світлого кольору) та перліт (темного) (рис. 1.12,в,г). З підвищенням вмісту вуглецю частка перлітної складової зростає, а фериту – зменшується. При великому збільшенні перліт виглядає під мікроскопом як набір світлих пластин фериту та цементиту, які чергуються і мають темні границі між собою. При невеликому збільшенні (у 100...200 разів) границі таких пластин зливаються, що надає перліту темного забарвлення.

– *евтектоїдна сталь* (0,8%С). Структура – перліт, при невеликих збільшеннях мікроскопа – це темного кольору складова частина структури. При збільшенні 500 крат і більше виявляється двофазна будова перліту (Ф+Ц) (рис. 1.12,д).

– *заевтектоїдні сталі* ( $0,8\% < C < 2,14\%$ ). Структура – перліт і цементит (вторинний), що утворюється при повільному охолодженні по межах зерен у вигляді цементитної сітки (рис. 1.12,е,з).

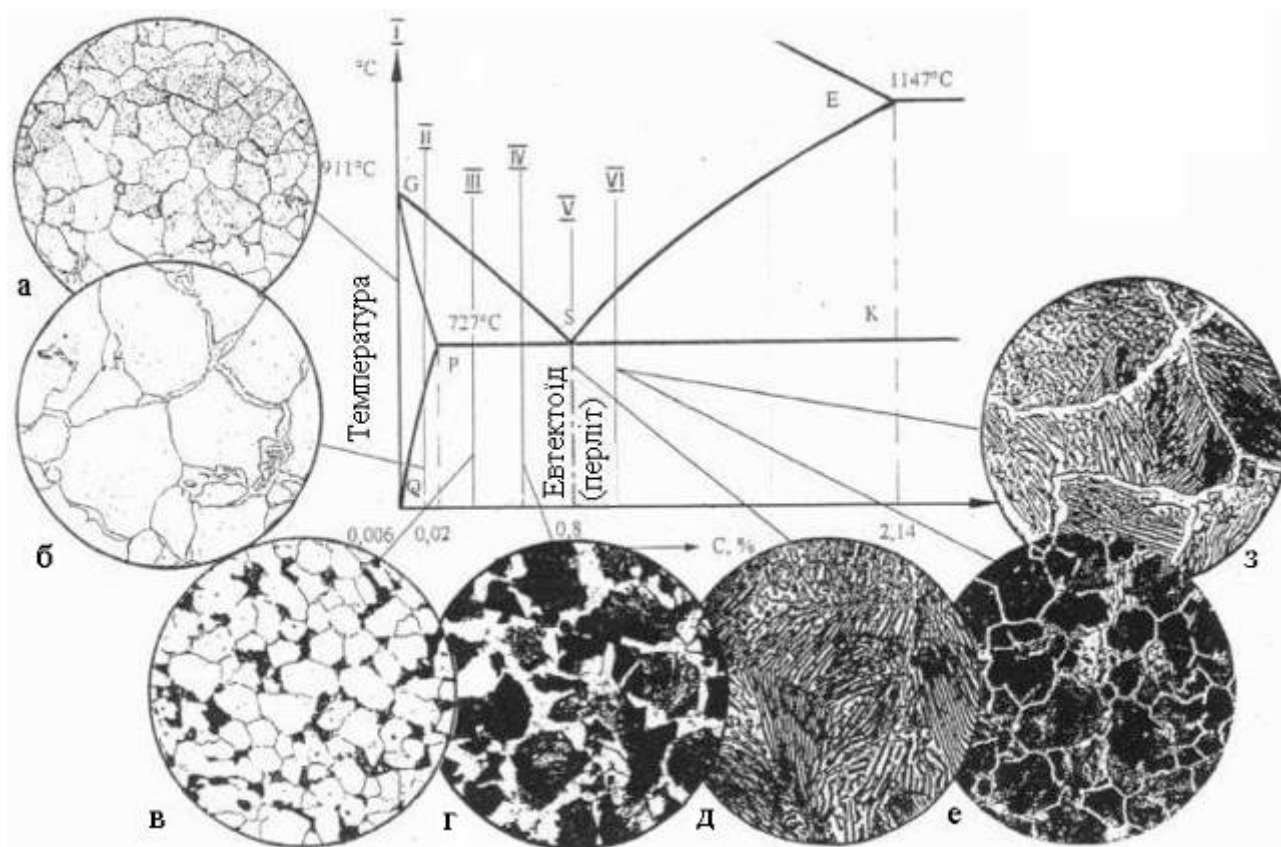


Рис. 1.12. Класифікація сталей за структурою в стані рівноваги

Властивості сталі, як і структура, залежать від вмісту вуглецю. Структуру сталей формують дві фази: пластичний та м'який ферит (80...100 НВ) і крихий, твердий цементит (800 НВ).

Із збільшенням вмісту вуглецю в сталі кількість цементиту зростає, що і зумовлює підвищення твердості та зниження пластичності та в'язкості (рис. 1.13).

Часточки цементиту збільшують опір переміщенню дислокацій, тобто збільшують границю міцності та границю текучості. Проте при вмісті вуглецю понад 0,8...1,0% границя міцності зменшується, що пояснюється виділенням в таких сталях по межах перлітних зерен суцільної сітки дуже крихкого вторинного цементиту. При випробуваннях на розтяг у цій сітці з'являються високі напруги і має місце руйнування зразка при відносно невеликому навантаженні. Мікроструктурний аналіз дає можливість більш-менш точно визначити вміст вуглецю в сталі. Якщо не враховувати дуже малого вмісту вуглецю в фериті, можна вважати, що в доевтектоїдних сталях весь вуглець міститься в перліті.

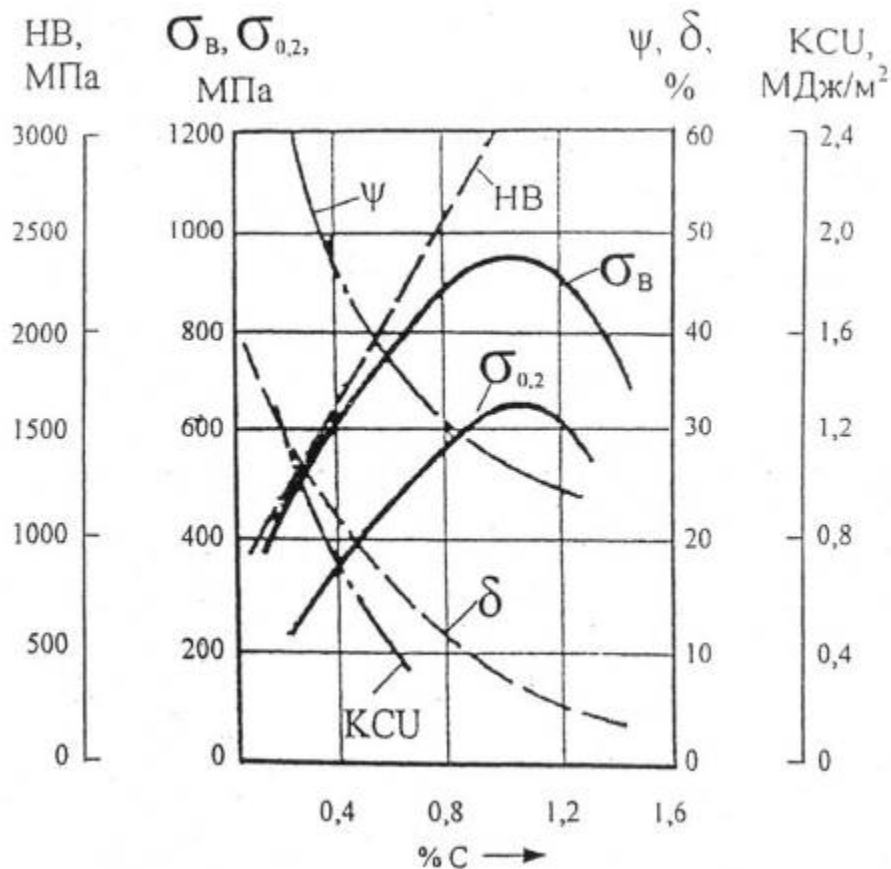


Рис. 1.13. Залежність механічних властивостей сталей від вмісту вуглецю

При необхідності можна розрахувати вміст вуглецю в таких сталях (1.4):

$$\%C = \frac{P\% \cdot 0,8}{100\%}, \quad (1.4)$$

де  $P\%$  – площа, яку займає перліт.

Вміст вуглецю в заевтектоїдних сталях (1.5):

$$\%C = \frac{P\% \cdot 0,8\% + C\% \cdot 6,67\%}{100\%}, \quad (1.5)$$

де  $C\%$  – площа, яку займає цементит.

## 1.5. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТ

Робота виконується на зразках технічно чистого заліза, відпалених вуглецевих сталей 10, 45, 65, У8, У13. Для дослідження структури – оптичні металографічні мікроскопи МИМ-7, фотографії мікроструктур відповідних сталей.

## 1.6. ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Накреслити діаграму Fe–Fe<sub>3</sub>C (на всю сторінку). Позначити точки, концентрації, температури. В усіх зонах діаграми вказати фази (P, A, Ф, Ц) та структурні складові (П, Л) залізовуглецевих сплавів, перитектичну, евтектичну та евтектоїдну реакції.

2. Описати, що таке ферит, аустеніт, цементит, перліт і ледебурит. Вказати їх властивості.

3. Провести мікроскопічне дослідження шліфів. Шляхом порівняння мікроструктури зразків з фотографіями мікроструктур різних залізовуглецевих сплавів визначити вміст вуглецю (за формулами 1.4 та 1.5) та марку вуглецевої сталі користуючись довідковими даними.

4. Схематично зобразити структури переглянутих сплавів, визначити структурні складові технічного залізу, доевтектоїдних, евтектоїдної та заевтектоїдних сталей.

5. Накреслити графік залежності механічних властивостей сталей від вмісту вуглецю.

## 1.7. ЗМІСТ І ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

У звіті необхідно:

1. Вказати порядковий номер і назву лабораторної роботи та висвітити мету роботи.
2. Накреслити метастабільну діаграму Fe–Fe<sub>3</sub>C.
3. Стисло охарактеризувати компоненти, фази і структурні складові у сплавах системи залізо–вуглець.
4. Навести три фазових перетворення в залізовуглецевих сплавах залежно від їх складу та температури в процесах первинної та вторинної кристалізації.
5. Намалювати та описати структури: фериту або фериту з цементитом (третинним), фериту і перліту, двофазної будови перліту, перліту і цементиту.
6. Побудувати для сталей графік залежності механічних властивостей від вмісту вуглецю.
7. Зробити висновок щодо класифікації вуглецевих сталей залежно від структури в стані рівноваги.

## 1.8. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. На діаграмі стану Fe–Fe<sub>3</sub>C позначити положення ліній стабільної рівноваги Fe–C.
2. Що означають на діаграмі Fe–Fe<sub>3</sub>C точки A, C, D, E, S, G, P, Q?
3. Назвіть лінії ліквідусу та солідусу для сплавів системи Fe–Fe<sub>3</sub>C.
4. Чим відрізняється евтектика від евтектоїда?
5. Які поліморфні перетворення відбуваються в залізі?



6. Що таке ферит, аустеніт, цементит? Вказати їх властивості.
7. Що таке перліт? Що таке ледебурит?
8. Які лінії відповідають евтектичній та евтектоїдній горизонталям?
9. Назвіть лінії обмеженої розчинності вуглецю в аустеніті та фериті.
10. Як визначити за мікроструктурою залізовуглецевого сплаву вміст вуглецю?
11. Які перетворення проходять при охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури в доевтектоїдному, евтектоїдному та заевтектоїдному сплавах?
12. Що таке сталь, яким чином вуглець впливає на структуру та властивості сталей після відпалювання?
13. Яким чином класифікують вуглецеві сталі залежно від структури в стані рівноваги?
14. Яка максимальна розчинність вуглецю у фериті та аустеніті?
15. Які процеси відбуваються при температурах, що відповідають лініям **GS** та **ES**?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ Й ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

**Мета роботи:** вивчити хімічний склад, будову та класифікацію вуглецевих сталей, освоїти принципи маркування та основи їх вибору для деталей та інструментів.

#### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

##### 2.1. КЛАСИФІКАЦІЯ СТАЛЕЙ

**Сталі** класифікують за такими ознаками (рис 2.1):

- за хімічним складом – *вуглецеві й леговані*;
- за якістю, що визначається вмістом шкідливих домішок S і P;
- за способом виробництва;
- за ступенем розкислення – *киплячі (кп), спокійні (сп) й напівспокійні (нс)*;
- за структурою у відпаленому стані;
- за загальним призначенням – *конструкційні (будівельні й машинобудівні), інструментальні та спеціального призначення*.

В лабораторній роботі №1 вже було обумовлено класифікацію сталей за структурою в рівноважному стані:

- **доевтектоїдні** – феритні й ферито-перлітні з вмістом вуглецю від 0,025 до 0,8%;
- **заевтектоїдні** – перлітно-цементитні з вмістом вуглецю від 0,8 до 2,14%;
- **евтектоїдна** – перлітна сталь з вмістом вуглецю 0,8%.

Структурні властивості сталей визначаються вмістом вуглецю та постійних домішок.

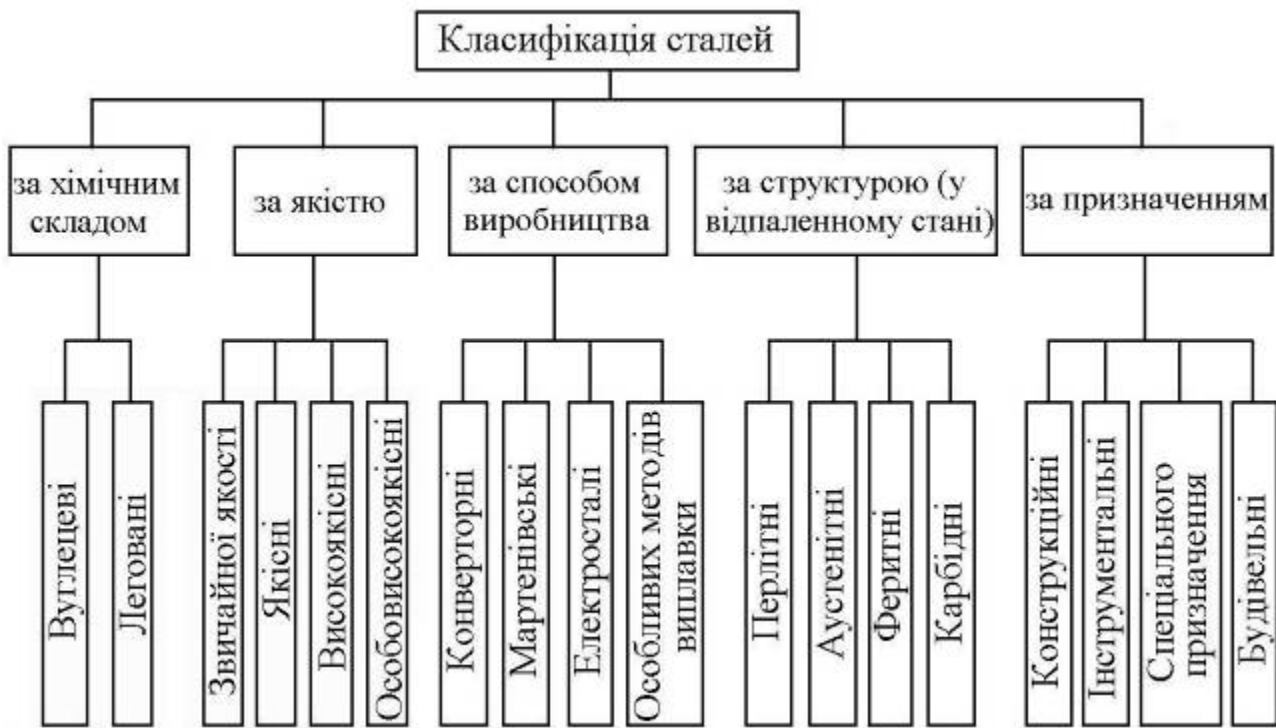


Рис. 2.1. Класифікація сталей

За вмістом вуглецю сталі поділяють на **низьковуглецеві** (<0,3% C), **середньовуглецеві** (~0,3...0,6% C) та **високовуглецеві** (>0,6% C).

## 2.2. ВПЛИВ ВУГЛЕЦЮ ТА ПОСТІЙНИХ ДОМІШОК НА ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ

Сталь – це багатокомпонентна система, в якій крім заліза й вуглецю завжди присутні постійні або технологічні (обумовлені особливостями виробництва) домішки: марганець, кремній, сірка, фосфор, гази та ін. Всі вони суттєво впливають на властивості сталі.

**Вуглець** – це найважливіший елемент, який обумовлює структуру і властивості сталі, її поведінку при виготовленні, обробці та експлуатації деталей.

Як було вказано, структура сталі після охолодження складається з двох фаз – фериту і цементиту. З підвищенням концентрації вуглецю зменшується кількість м'якого фериту і зростає частка твердого та крихкого цементиту. Завдяки цьому твердість і міцність сталі зростають, відносно подовження і відносно звуження, а також ударна в'язкість зменшуються. Вуглець також знижує в'язкість руйнування сталі і підвищує поріг холодноламкості (див. лаб. роб. №1, рис. 1.13).

Збільшення концентрації вуглецю змінює і технологічні властивості: погіршується здатність до штампування, зварюваність, оброблюваність різанням, але покращуються ливарні властивості.

Доевтектоїдні сталі поєднують достатньо високу пластичність і міцність, тому їх використовують для виготовлення деталей машин і металоконструкцій. Заевтектоїдні сталі мають високу твердість і міцність, але низьку пластичність, їх в основному використовують для інструменту.

**Сірка і фосфор** – це шкідливі домішки, які потрапляють у сталь з вихідної сировини (металобрухту, чавуну).

**Сірка** із залізом утворює хімічну сполуку – сульфід заліза FeS, який при кристалізації входить до складу легкоплавкої евтектики (Fe+FeS) з температурою плавлення 988°C. Евтектика розміщується на границях зерен і під час гарячого пластичного деформування сталі (штампування, прокатування, волочіння, кування) при температурі 1100–1200°C розплавляється. Це порушує зв'язок між зернами, виникають надриви або тріщини, що призводить до окрихчення. Окрихчення сталі при високих температурах називають **червоноламкістю**.

Крім цього, сірчані сполуки значно знижують ударну в'язкість, пластичність, границю витривалості, а також погіршують зварюваність, і корозійну стійкість сталі. Тому кількість сірки у сталях обмежують (не більше 0,06%), але залежно від якості сталі її вміст зазвичай менший.

**Фосфор** розчинюється у фериті та аустеніті і сильно спотворює кристалічну ґратку, що призводить до підвищення порогу холодноламкості. Кожна 0,01% фосфору підвищує поріг холодноламкості сталі на 20–25°C. При цьому значно знижується пластичність і в'язкість, зменшується робота розвитку тріщин, тобто сталь стає крихкою. Максимальний допустимий вміст фосфору в сталі 0,045%.

*Концентрація сірки і фосфору в сталі є головними показниками, які регламентують якість сталі.*

За якістю сталі поділяють на **сталі звичайної якості, якісні, високоякісні і особливо високоякісні**. В основу цієї класифікації покладена кількість шкідливих домішок – сірки і фосфору (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Вміст сірки і фосфору в сталях різної якості, %

Сталі	S	P
Звичайної якості	<0,06	<0,045
Якісні	≤0,035	≤0,030
Високоякісні	<0,025	<0,025
Особливо високоякісні	<0,015	0,015

**Марганець і кремній** – це домішки, які додають у сталь для її розкислення у процесі виплавлення.

Вуглецева сталь містить 0,5–0,8% марганцю. В такій кількості він повністю розчиняється у фериті, дещо підвищуючи міцність та пружність і практично не знижуючи пластичності сталі.

Марганець також нейтралізує шкідливий вплив сірки щодо червоноламкості. Він має більшу спорідненість із сіркою, ніж залізо, і зв'язує їх у сполуку MnS, яка плавиться при температурі 1600°C. Внаслідок цього границі зерен не оплавляються при гарячій пластичній деформації.

Концентрація кремнію у сталі залежить від ступеня її розкислення: в киплячій сталі S ~0,01–0,03%, в напівспокійній – 0,03–0,17%, у спокійній – 0,17–0,37%. Кремній значно підвищує границю текучості і пружності сталі,

знижуючи пластичність. Тому в сталях, які призначені для глибокого штампування та складної витяжки, наприклад, для виготовлення кузовів автомобілів і тракторів, вміст кремнію має бути мінімальним. Як правило, для такого призначення використовують киплячу сталь.

**Гази** (азот, кисень, водень) присутні в сталі в незначній кількості: кисень і азот – 0,002–0,0008%, водень до 0,0007%. Вони можуть входити до неметалевих включень (оксиди FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, нітриди Fe<sub>4</sub>N тощо), бути розчиненими у фериті і знаходитись у вільному стані в дефектних місцях металу (тріщинах, раковинах та ін.). Ці домішки відносно мало впливають на міцність, але сильно знижують опір крихкому руйнуванню, різко підвищують поріг холодноламкості, знижують температурний запас в'язкості, ударну в'язкість і пластичність сталі. Водень не утворює сполук із залізом, а розчинюється у фериті. При охолодженні сталі розчинність водню у твердому розчині зменшується і він накопичується у мікропорах, що призводить до появи невеликих тріщин овальної форми – *флокенів*, які значно погіршують властивості сталі. Метал із флокенами використовувати не можна.

Кількість домішок в сталі, тобто її якість залежить від способу виробництва. Як видно з рис. 2.2, на якому кількість домішок наведена у *p.p.m.* (кількість атомів домішки на мільйон атомів основного компонента), найкращою є сталь, виплавлена в електропечах.

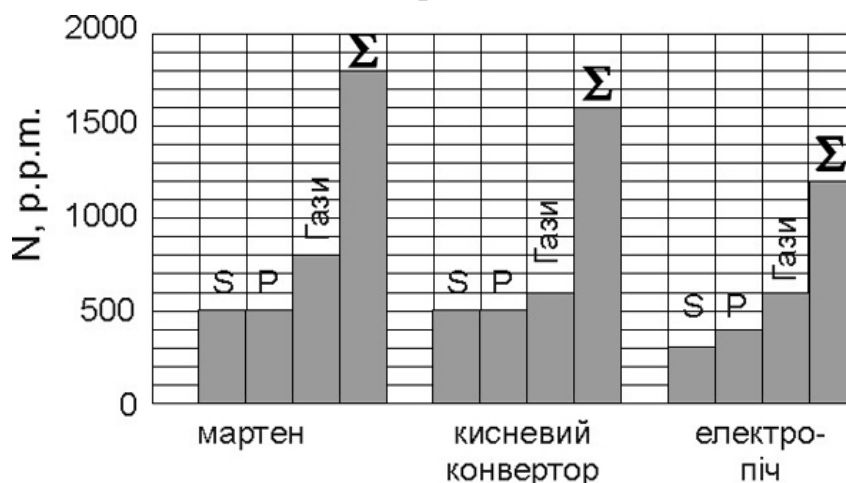


Рис. 2.2. Вплив способу виробництва сталі на кількість в ній домішок

Найефективнішими способами очищення сталі від шкідливих домішок є виплавлення і розливання сталі у вакуумі, електрошлаковий та електропроменевий переплави.

### 2.3. МАРКУВАННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

На вуглецеві сталі припадає ~85% від загального обсягу виробництва сталі. Ці сталі дешеві, поєднують задовільні механічні властивості ( $\sigma_B$  до 1000 МПа при достатній пластичності та ударній в'язкості) з добрими технологічними показниками (легко оброблюються різанням і тиском).

За ступенем розкислення сталі виплаваються спокійними (розкислені марганцем, кремнієм та алюмінієм), киплячими (розкислені тільки марганцем) і

напівспокійні (розкислені марганцем та кремнієм). Киплячі сталі містять багато оксидів та неметалевих включень, більш схильні до корозії, хоча і мають переваги за здатністю до холодного деформування. В спокійних сталях менше кисню і неметалевих включень, їх якість вища, ніж киплячих. Напівспокійні сталі за властивостями є проміжними між спокійними і киплячими. Сьогодні виявляється тенденція до їх ширшого використання, оскільки вони дешевші за спокійні, а за якістю кращі ніж киплячі.

Ступінь розкислення позначають в марці сталі літерами сп (спокійна), кп (кипляча), пс (напівспокійна). Наприклад, 08кп, 10пс. Якщо ступінь розкислення в марці сталі не позначений, така сталь є спокійною.

Залежно від вмісту вуглецю сталі поділяються на конструкційні (0,02...0,8% С) та інструментальні (0,7...1,3% С). Умовною межею між ними вважають вміст вуглецю 0,7% С. В дійсності сталі з 0,7...0,8% С можуть бути як інструментальними, так і конструкційними (наприклад, ресорно-пружинна).

Конструкційні сталі підрозділяють на сталі звичайної якості (загального призначення) та сталі якісні. В особливу групу віднесені автоматні сталі, або сталі підвищеної оброблюваності різанням.

### ***2.3.1. ВУГЛЕЦЕВІ КОНСТРУКЦІЙНІ СТАЛІ ЗВИЧАЙНОЇ ЯКОСТІ***

Сталі звичайної якості поставляють згідно з ДСТУ 2651-94, вони найдешевші, в них допускається підвищена концентрація шкідливих домішок ( $S < 0,06\%$ ,  $P < 0,045\%$ ).

Сталі звичайної якості маркують літерами «Ст» і цифрами 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 (номер марки сталі). Наприкінці марки позначають ступінь розкислення сталі, наприклад: Ст1кп, Ст3сп, Ст3пс. У деяких марках сталі стоїть літера «Г», яка вказує на підвищену кількість марганцю – до 1,1–1,2% (Ст5Гпс).

Чим більший номер марки, тим вища концентрація вуглецю в сталі та її міцність, а пластичність нижча. Але слід мати на увазі, що номер марки не співпадає з кількістю вуглецю у сталі. Так, вміст вуглецю збільшується від 0,12% у сталі Ст1 до 0,49% у сталі Ст6. При цьому тимчасовий опір зростає від 300 до 600 МПа, а відносне звуження зменшується від 30 до 15%.

Зі сталей звичайної якості виготовляють гарячекатаний прокат (прутки, швелери, кутики, балки, листи, труби), а також поковки. Ці сталі широко застосовують для виготовлення будівельних зварювальних, клепаних і болтових конструкцій (сталі Ст1, Ст2, Ст3, Ст4). Зі сталей Ст5, Ст6 виготовляють малонавантажені й менш відповідальні деталі машин (осі, втулки, шайби, болти, гайки).

Киплячі сталі через підвищену кількість кисню і неметалевих включень мають високий поріг холодноламкості, погано зварюються. Але в цих сталях низький вміст кремнію, завдяки чому вони дуже пластичні. Їх використовують для деталей, які виготовляють холодним штампуванням. Для більш відповідальних конструкцій і деталей застосовують спокійні сталі.

Група вуглецевих сталей звичайної якості, їх маркування та призначення наведені у додатку Б.

### 2.3.2. ВУГЛЕЦЕВІ КОНСТРУКЦІЙНІ ЯКІСНІ СТАЛІ

Якісні сталі поставляють згідно з ГОСТ 1050-88. Ці сталі містять менше шкідливих домішок ( $S < 0,35\%$ ,  $P < 0,03\%$ ) і неметалевих включень. До них ставлять більш жорсткі вимоги відносно складу шихти, умов виплавляння та розливання, однорідності макро- і мікроструктури порівняно зі сталями звичайної якості.

Якісні сталі маркують двома цифрами, що вказують середню кількість вуглецю у сотих частках відсотка: сталь 05, 08, 10, 15, 20, 25, 30 і далі через 0,05% до сталі 85.

Сталі марок 05, 08, 10 мають низьку міцність ( $\sigma_B$  до 330 МПа,  $\sigma_{0,2}$  до 210 МПа) і високу пластичність ( $\delta \sim 31\text{--}33\%$ ,  $\psi \sim 55\text{--}60\%$ ). Їх без термічної обробки використовують для малонавантажених деталей і зварних з'єднань, а також деталей машин, зміцнення яких здійснюється за рахунок цементації.

Середньовуглецеві сталі марок 30, 35, 40, 45, 50, 55 після термічної обробки мають високий комплекс властивостей – достатньо високі міцність ( $\sigma_B \sim 490\text{--}700$  МПа,  $\sigma_{0,2} \sim 295\text{--}380$  МПа), пластичність ( $\psi \sim 50\text{--}35\%$ ), в'язкість (КСУ  $\sim 78\text{--}35$  Дж/см<sup>2</sup>). Вони малочутливі до концентраторів напружень, тому їх використовують, головним чином, для деталей, працездатність яких зумовлюється опором втомі, а саме шатунів, різних валів (колінчастих, розподільних, карданних, валів коробки передач, водяної помпи та ін.), маховиків, шестерень, зірочок, осей тощо.

Високовуглецеві сталі марок 60, 65, 70, 75, 80, 85 поставляють за ГОСТ 14959-79. Ці сталі після первинної термічної обробки мають високу міцність і значну пружність ( $\sigma_B \sim 1000\text{--}1100$  МПа,  $\sigma_{0,2} \sim 800\text{--}1000$  МПа), тому їх використовують для пружин, ресор, тросів, торсіонних валів. Такі сталі належать до групи *ресорно-пружинних*.

Група якісних вуглецевих конструкційних сталей наведена у додатку В.

### 2.3.3. АВТОМАТНІ СТАЛІ

*Автоматні сталі, або сталі підвищеної оброблюваності різанням* (ГОСТ 1414-75), використовують у масовому виробництві кріпильних виробів (болти, гвинти, гайки тощо) та деяких невідповідальних деталей на верстатах-автоматах з великою швидкістю різання.

Оброблюваність різанням оцінюють, з одного боку, продуктивністю процесу і стійкістю інструменту, з іншого – якістю оброблюваної поверхні. Чим вищі ці показники, тим краща оброблюваність.

Поліпшення оброблюваності різанням досягається в тому разі, якщо стружка стає ламкою і легко відокремлюється від поверхні виробу. Це запобігає накопиченню тепла у зоні різання, полегшує умови роботи інструменту й з'являється можливість виконувати обробку з високою швидкістю і отримувати високу якість (меншу шорсткість) оброблюваної поверхні. Тому хімічний склад автоматних сталей передбачає отримання короткої ламкої стружки, що досягається різними способами.

*Сталі з підвищеним вмістом сірки і фосфору.* Як говорилося, сірка і фосфор окрихчують сталь, через що стружка стає ламкою, а м'які сульфіди зменшують коефіцієнт тертя. В автоматних сталях цієї групи вміст сірки може сягати 0,3%, фосфору 0,15%.

Такі сталі маркують літерою А (автоматні) і цифрами, що вказують на середню кількість вуглецю у сотих частках відсотка: сталь А12, А20, А30, А40Г. Літера Г позначає підвищений вміст марганцю (до 1,2%), який додається для зменшення червоноламкості. До недоліків цих сталей належить значна крихкість, низькі пластичність і в'язкість, підвищена схильність до корозії, знижена границя витривалості. Такі сталі використовують для невідповідальних малонавантажених виробів.

*Сталі зі свинцем.* У сталях цієї групи для покращення оброблюваності різанням додають свинець у кількості 0,15–0,3%. Свинець під час різання плавиться ( $t_{пл}=327^{\circ}\text{C}$ ), що окрихчує стружку, зменшує коефіцієнт тертя і зусилля різання. Сталі зі свинцем маркують, додаючи після літери А літеру С (свинець): сталь АС14, АС40 (число показує вміст вуглецю 0,14 і 0,40% відповідно). Ці сталі менш крихкі, ніж сталі з високим вмістом S і P. До них інколи додають інші елементи, які поліпшують оброблюваність різанням, наприклад, телур.

*Сталі з селеном* містять 0,04–0,1% Se, який позначається літерою Е в кінці марки (сталь А45Е). Селен утворює неметалеві включення, що полегшує відокремлення стружки, дозволяє знизити витрати різального інструменту і на 20–30% скоротити час обробки. Недоліком цих сталей є їх висока вартість (селен дефіцитний елемент). Тому частіше за все селен для покращення оброблюваності додають в леговані сталі.

*Сталі з кальцієм.* Залишкова кількість кальцію в цих сталях невелика – 0,003%, але через утворення крихких неметалевих включень стійкість інструменту збільшується у 1,5-3 рази при значному підвищенні швидкості обробки різанням. Кальцієві сталі дешевші, їх маркують АЦ20, АЦ60 (Ц – кальцій, число показує вміст вуглецю у сотих частках відсотка).

Останнім часом для покращення оброблюваності різанням використовують комплексні добавки (сірка та селен, свинець та кальцій тощо). Але слід пам'ятати, що всі домішки (S, Ca, Pb, Se) значно знижують конструкційну міцність автоматних сталей, що не дозволяє використовувати їх для деталей, які працюють в умовах складного напруженого стану і значних концентрацій напружень.

Група автоматних сталей, їх маркування та призначення наведені у додатку Г.

#### **2.3.4. ВУГЛЕЦЕВІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СТАЛІ**

Вуглецеві інструментальні сталі (ГОСТ 1435-74) позначають літерою У і числом, що вказує на середній вміст вуглецю у десятих частках відсотка від 0,7 до 1,3% (У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13). Такі сталі виготовляють якісними і високоякісними.

Якісні сталі містять не більше 0,028% сірки і 0,030% фосфору,

високоякісні – сірки не більше 0,018% і фосфору 0,025%, що позначаються літерою А в кінці марки (У7А–У13А).

Вуглецеві інструментальні сталі не можна використовувати для інструменту, який працює з великою швидкістю різання або оброблює тверді матеріали, оскільки твердість цих сталей різко знижується при нагріванні інструменту вище 200°C.

Із цих сталей виготовляють, насамперед, столярний і слюсарний інструмент. Сталі з меншою кількістю вуглецю (У7, У8) мають достатню в'язкість, тому їх використовують для виготовлення молотків, зубил, викруток тощо. Сталі У9–У12 застосовують для свердел, стамесок, мітчиків, ножівок. Із сталі У13 виготовляють напилки, бритви, калібри, шабери. Ці інструменти працюють без ударів, в процесі роботи істотно не розігріваються і повинні мати тверду зносостійку поверхню. Група вуглецевих інструментальних сталей, їх маркування та призначення наведені у додатку Г.

## **2.4. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ**

Металографічні мікроскопи МІМ-7, мікрошліфи конструкційних та інструментальних вуглецевих сталей у відпаленому стані, атлас фотографій мікроструктур.

## **2.5. ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ**

1. Отримайте набір протравлених мікрошліфів конструкційних та інструментальних сталей.

2. Розгляньте за збільшенням у 100...200 разів та схематично зарисуйте характерні мікроструктури зразків за допомогою фотографій мікроструктур.

3. Визначте тип сталі, структурні та фазові складові у мікроструктурі кожного зразку.

4. За структурою відпаленої сталі розрахуйте вміст вуглецю в ній, класифікуйте за структурою та призначенням, наведіть властивості.

5. Вкажіть можливі галузі застосування досліджуваних сталей.

## **2.6. ЗМІСТ І ВИМОГИ ДО ЗВІТУ**

У звіті необхідно:

1. Вказати порядковий номер і назву лабораторної роботи.

2. Сформулювати мету роботи.

3. Сформулювати основні поняття про будову та принципи класифікації вуглецевих сталей.

4. Подати схематичні рисунки мікроструктур зразків досліджуваних сталей з позначенням структурних і фазових складових.

5. Кожний рисунок супроводжувати підписом та коментарем, в якому вказати хімічний склад сталі, класифікувати сталь за структурою та призначенням, охарактеризувати особливості її будови, властивості та застосування.



## 2.7. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які сплави називають сталями?
2. Охарактеризуйте хімічний склад сталей.
3. Чим можна пояснити зміну механічних властивостей сталей залежно від вмісту в них вуглецю?
4. На яких етапах виробництва сталі до її складу потрапляють манган і кремній та як вони впливають на її властивості?
5. Чому сірка та фосфор є шкідливими домішками у сталі та який спосіб зменшує їх шкідливу дію?
6. Як впливають приховані домішки – кисень, азот, водень на властивості сталі?
7. Охарактеризуйте розподіл сталей залежно від їх структури.
8. Які дефекти можуть утворюватися в сталях? Як вони впливають на їх властивості та як можна виправити дефекти структури?
9. Як впливають неметалеві часточки на конструкційну міцність сталі?
10. Що визначає якість сталі?
11. Як і за якими ознаками класифікують та маркують вуглецеві сталі?
12. Охарактеризуйте основні типи конструкційних та інструментальних сталей.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### *СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ Й ЗАСТОСУВАННЯ ЧАВУНІВ*

**Мета роботи:** Вивчити структурні перетворення в чавунах у залежності від їх хімічного складу та температури, а також вплив складу та структури на властивості чавунів; освоїти принцип маркування чавунів та основи їх вибору для деталей і конструкцій.

### ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Чавуни – це залізовуглецеві сплави, що містять більше 2,14% С. Як і сталь, це багатокомпонентний сплав, який, крім заліза та вуглецю, містить 1-3,5% Si, 0,5-1,4% Mn, а також сірку, фосфор, газу. Сірка, як і в сталі, є шкідливою домішкою, її вміст обмежений ~0,03%. Допустима кількість фосфору дещо вища – до 0,4–0,5%, оскільки цей елемент покращує рідкотекучість, а чавуни – це ливарні сплави. Вони найпоширеніші конструкційні матеріали на основі заліза, що використовуються для виготовлення виливків. Це пояснюється порівняно невеликою вартістю й добрими технологічними властивостями чавунів – високою рідкотекучістю й незначною (~1%) усадкою під час охолодження. Для одержання виливків використовують ливарний чавун, частка якого становить більш як 15% доменного виробництва.

Чавуни досить широко застосовують в машинобудуванні не тільки як дешеві ливарні сплави, але і завдяки високим механічним властивостям, оброблюваності різанням, можливості зміни структури термообробкою й легуванням. Проте через малу пластичність вони не підлягають обробці тиском, а їх газове чи електродугове зварювання вимагає особливих технологій.

Властивості чавуна визначаються в першу чергу структурою, яка формується при кристалізації, у процесі охолодження в твердому стані та при термічній обробці.

### 3.1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА СТРУКТУРА ЧАВУНІВ

*Залежно від хімічного складу та умов кристалізації вуглець в чавунах може кристалізуватися як у вільному стані у вигляді графіту, так і у вигляді сполуки із залізом – цементиту.*

**Графіт** має гексагональну шарувату кристалічну ґратку, дуже низьку пластичність, міцність і твердість (див. лаб. роб. №1).

**Цементит** – це хімічна сполука заліза із вуглецем (карбід заліза  $Fe_3C$ ), що містить 6,67% вуглецю. Він має складну ромбічну кристалічну ґратку із щільним упакуванням атомів (рис. 1.8), плавиться при  $1227^{\circ}C$ , крихкий та твердий (твердість близько 800 НВ).

Графіт на відміну від метастабільного цементиту є стабільною фазою, і тому його кристалізація з розплаву термодинамічно вигідніша, оскільки забезпечує нижчий рівень вільної енергії сплаву. Виділенню графіту в чавунах, тобто **графітизуванню**, сприяють:

- повільне охолодження;
- підвищення вмісту вуглецю та графітизувальних елементів – Si, Cu, Ni.

За швидкого охолодження рідкого чавуну атоми вуглецю не встигають продифундувати в достатній кількості для утворення зародків графіту (потрібно 100% вуглецю), і тому кристалізація проходить з утворенням цементиту, що містить значно менше вуглецю (6,67%). Цей процес виділення вуглецю у вигляді цементиту називають **віблюванням**. Крім швидкого охолодження, виблюванню сприяють Mn, Cr та інші карбідоутворюючі елементи, а також S.

Оскільки цементит у чавунах за атмосферного тиску є метастабільним, то за високих температур він схильний до розкладання на залізо й стабільний графіт. Отже, графітизування чавунів може відбуватися не тільки під час охолодження з розплаву й твердого розчину (аустеніту), але і внаслідок розкладання раніше утвореного цементиту під час тривалого високотемпературного витримування чавуну.

Залежно від стану, в якому перебуває вуглець в чавунах, їх класифікують на *білі* та *машинобудівні чавуни*. Через високу крихкість білі чавуни обмежено використовують на практиці. В машинобудуванні для виготовлення деталей застосовують головним чином *графітизовані* чавуни, в яких весь або частина вуглецю виділяється у вигляді графіту різної форми.

### 3.1.1. Білі Чавуни

У білих чавунах весь вуглець перебуває в цементиті. Завдяки цементиту такі чавуни мають білий блискучий злам, від кольору якого і походить їх назва.

Фазові перетворення в білих чавунах відбуваються за метастабільною діаграмою фазової рівноваги залізо – цементит. Основним структурним складником білих чавунів є евтектика – **ледебурит** (рис. 1.9), який нижче температури евтектоїдного перетворення ( $A_1$ ) складається з перліту (евтектоїдна суміш цементиту й фериту) та цементиту і називається **ледебуритом перетвореним**.

За структурою, залежною від вмісту вуглецю, згідно з метастабільною діаграмою Fe–Fe<sub>3</sub>C білі чавуни поділяють на:

– **доевтектичні**, що містять від 2,11 до 4,3% С. Їх структура складається з перліту, цементиту вторинного (виділеного з аустеніту) й ледебуриту перетвореного (рис. 3.1,а);

– **евтектичні**, що містять близько 4,3% С і структура яких складається тільки з ледебуриту перетвореного (рис. 3.1,б);

– **заевтектичні**, що містять більше ніж 4,3 % С і структура яких складається з ледебуриту перетвореного й цементиту первинного (виділеного з розплаву) (рис. 3.1,в).

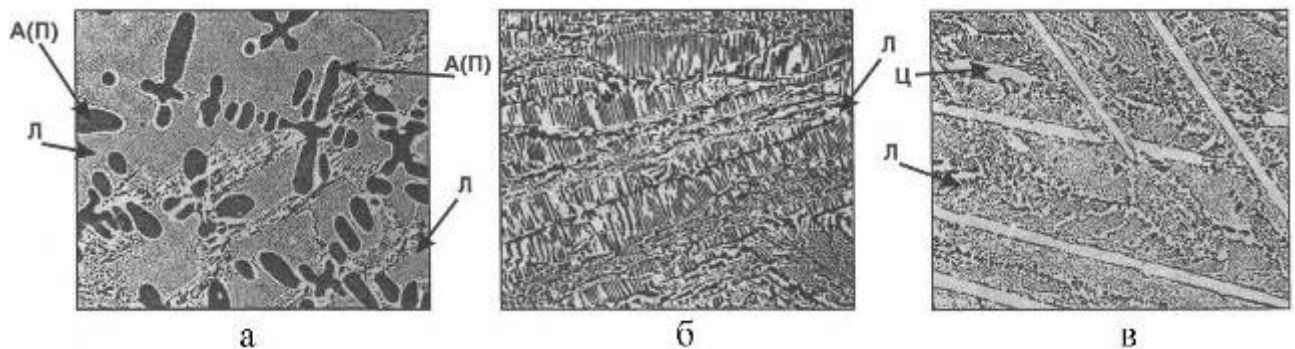


Рис. 3.1. Мікроструктури білих чавунів, x100:

а – доевтектичний чавун; б – евтектичний чавун; в – заевтектичний чавун;  
А – аустеніт, П – перліт, Л – ледебурит перетворений, Ц – цементит

Ледебурит перетворений формується в структурі у вигляді окремих колоній, кожна з яких складається з цементитної основи, яку пронизують пластинки чи стрижні перліту приблизно однакової орієнтації (рис. 3.1,б). У структурі білого доевтектичного чавуну окремі темні колонії перліту успадковують від аустеніту, з якого вони утворилися, дендритне розташування (рис. 3.1,а). Цементит вторинний чітко виявляється у вигляді дрібних прошарків лише в доевтектичних чавунах з малим вмістом вуглецю. Зі зростанням вмісту вуглецю, а, отже, і ледебуриту, він стає непомітним, через те що зливається з цементитом ледебуриту. Кристалізація заевтектичних чавунів розпочинається з утворення великих призматичних кристалів цементиту, навколо яких внаслідок евтектичного перетворення формуються колонії ледебуриту (рис. 3.1,в).

Отже, структуру білих чавунів у рівноважному стані нижче  $A_1$  творять дві фази – ферит та цементит. За рахунок твердого цементиту, кількість якого збільшується зі збільшенням вмісту вуглецю, білі чавуни мають високу твердість (450...550 НВ), дуже крихкі, практично не підлягають різанню лезовим інструментом. Їх велика твердість забезпечує підвищену зносостійкість в умовах абразивного зношування. Відливки з відбіленого чавуну мають у поверхневому шарі структуру білого чавуну, а в серцевині – сірого або високоміцного. Із білого та відбіленого чавунів виготовляють прокатні валки, кулі млинів для помелу руди. Білі та відбілені чавуни не маркуються, використання їх обмежене й вони не стандартизовані. Їх використовують тільки як зносотривкий матеріал. Для підвищення зносотривкості та міцності білі чавуни легують хромом, манганом, молібденом, нікелем, а також термічно обробляють (гартують) на мартенситну структуру. Такі леговані чавуни застосовують для виготовлення зносотривких деталей шламових насосів, гідроциклонів, доменних печей, кульових млинів для розмелювання руд.

Половинчасті чавуни займають проміжне положення між білими та сірими. Понад 80%С у цих чавунах зв'язано у вигляді  $Fe_3C$ ; їх структура – перліт, ледебурит і графіт.

### **3.1.2. МАШИНОБУДІВНІ ЧАВУНИ**

Машинобудівні чавуни одержують, забезпечуючи в процесі їх виробництва повний або частковий перебіг графітизування, внаслідок чого весь вуглець або його частина перебуває в чавуні у вигляді графіту. Тому властивості цих чавунів визначаються не тільки структурою металевої основи, але й формою, розмірами, кількістю й характером розташування в основі графітних включень.

**Графітні включення.** Оскільки графіт має дуже низькі механічні властивості (твердість за шкалою Мооса – 1,  $\sigma_v = 15...35$  МПа), то машинобудівні чавуни наближено можна розглядати як металеву основу (зі структурою сталі), помережану порожнинами у формі графітних включень. Що більше в чавуні графітних включень, що більші їх розміри та гостріші краї, то менша міцність і пластичність чавуну.

Разом з тим, графіт поліпшує деякі експлуатаційні та технологічні властивості чавунів:

- підвищує зносотривкість та антифрикційні властивості за рахунок мастильної дії в зоні тертя ковзанням;
- поліпшує здатність чавуну оброблятися різанням (окрихчення стружки, мастильна дія);
- гасить вібрації й резонансні коливання;
- робить чавун практично нечутливим до поверхневих дефектів і надрізів.

Залежно від способу виробництва, який визначає форму графіту, машинобудівні чавуни класифікують на чавуни з *пластинчастим* графітом

(сірі), чавуни з кулястим графітом (**високоміцні**), чавуни з пластівчастою формою графіту (**ковкі**). Виробляють ще один вид графітизованого чавуну – з вермикулярним графітом, який, порівняно з сірим, дещо грубіший і має округлені краї пластинок. Цей чавун менш поширений.

**Структура металевої основи.** За структурою металевої основи, яка залежить від повноти графітизування, машинобудівні чавуни поділяють на:

*феритні*, в яких майже весь вуглець чавуну міститься у графіті;

*феритно-перлітні*, в яких від 0,1 до 0,7% вуглецю витрачається на утворення цементиту, що входить до складу перліту, а решта вуглецю утворює графіт;

*перлітні*, в яких близько 0,77% вуглецю утворює цементит перліту, а решта вуглецю – графіт;

*половинчасті*, в яких більше 0,9...1,0% вуглецю виділяється у вигляді цементиту, а решта – у вигляді графіту. Структура металевої основи цих чавунів складається з перліту, вторинного цементиту, а також ледебуриту перетвореного, якщо вуглецю в цементиті більше ніж 2%.

Структура металевої основи визначає твердість чавунів. Натомість такі властивості, як границя міцності на розтягування, пластичність, ударна в'язкість, залежать як від властивостей металевої основи, так і характеристик графітних виділень. Механічні властивості основних структурних складників металевої основи чавунів наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Механічні властивості основних структурних складників металевої основи машинобудівних чавунів

Структурний складник	Границя міцності $\sigma_b$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Твердість, НВ
Ферит	250...400	35...50	110...140
Перліт	800...1000	15...20	200...250
Цементит	30...50	–	750...800

**Чавуни з пластинчастим графітом.** Вироби з чавунів з пластинчастим графітом одержують безпосередньо заливанням розплавленого металу в ливарні форми. Наявність у структурі вільного графіту зумовлює матовий сірий колір зламу, від якого походить інша назва цих чавунів – *сірі чавуни*.

(ГОСТ 1412-85). У сірих чавунах графіт на площині шліфа має пластинчасту форму. Кристалізація та структурні перетворення в цих чавунах відбуваються відповідно до стабільної діаграми (Fe-C) (рис. 3.2). При температурі нижче 1153°C утворюється аустенітно-графітна евтектика, а нижче 738°C – ферито-графітний евтектоїд. Технічні сплави заліза та вуглецю, містять кремній, марганець, алюміній тощо, тобто є багатокомпонентними сплавами, в яких евтектичне та евтектоїдне перетворення відбуваються в інтервалі температур.

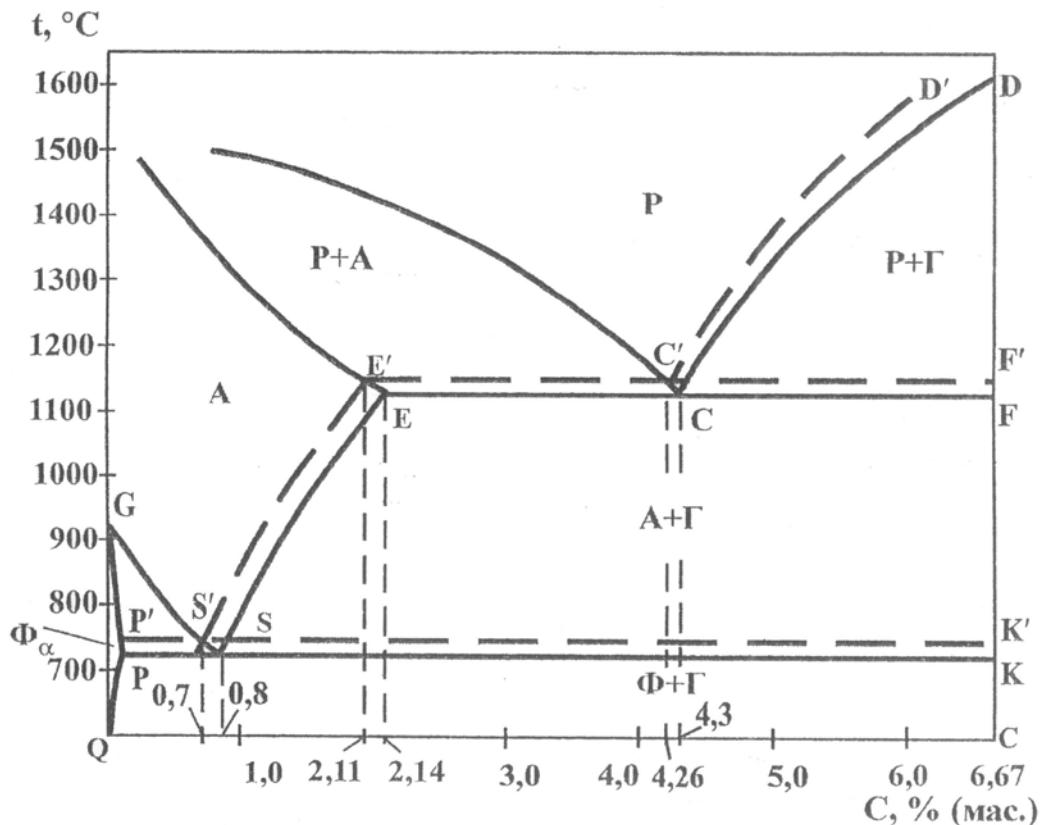


Рис. 3.2. Стабільна діаграма стану залізо–графіт (штрихові лінії)

В реальних умовах охолодження перетворення відрізняються від перетворень з безмежно малою швидкістю охолодження (тобто рівновагових). Структура відливок залежить від хімічного складу та швидкості охолодження при кристалізації та евтектоїдному перетворенні. Елементи-графітизатори (кремній, нікель, мідь, алюміній) сприяють збільшенню кількості графіту, а карбідоутворювачі (хром, ванадій, марганець тощо) – підвищенню кількості цементиту (відбілюванню чавуну).

Через те, що в цементиті вміст вуглецю 6,67%, а в графіті 100%, кінетично більш ймовірно утворення  $Fe_3C$ , не дивлячись на те, що термодинамічно стабільною фазою є графіт (правило Освальда). Тому при швидкому охолодженні можливо утворення цементиту та структури білого чавуну. Зменшення швидкості охолодження сприяє процесу графітизації, тобто діє аналогічно уведенню кремнію та алюмінію.

Структура чавунних відливок визначається за допомогою діаграм, що показують залежність структури від хімічного складу чавуну та товщини (швидкості охолодження) відливок. **Залежно від структури металевої основи сірі чавуни поділяються на:**

- **феритні:** структура основи – ферит, практично весь вуглець (за винятком розчиненого у фериті) знаходиться у графіті (рис. 3.3,а);
- **ферито-перлітні:** структура основи – ферит і перліт. У зв'язаному стані знаходиться  $\leq 0,7\%$  вуглецю (в цементиті перліту) (рис. 3.3,б);
- **перлітні:** структура основи – перліт. У цих чавунах  $0,7\%$  вуглецю знаходиться в цементиті перліту (рис. 3.3,в).

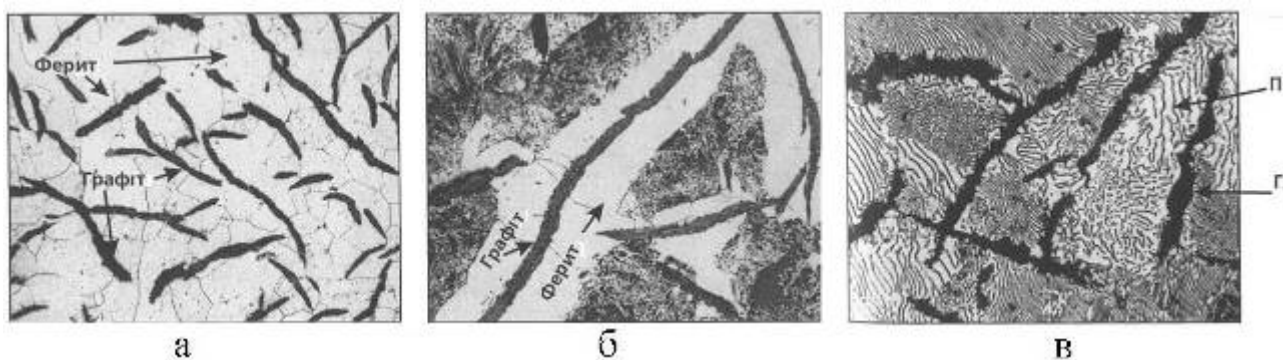


Рис. 3.3. Мікроструктури сірих чавунів, х 100:  
 а – феритний чавун; б – феритно-перлітний чавун; в – перлітний чавун;  
 Г – графіт пластинчастий; П – перліт

Графіт під час кристалізації формується у вигляді вигнутих пелюсток, що виростають зі спільних центрів, утворюючи розгалужені кристали. Такий графіт називають *пластинчастим*. У перерізі мікрошліфа він має вигляд прямих або звивистих зміжок з відношенням довжини до товщини від 10 до 100 (рис. 3.3,а). Пластинчастий графіт порушує суцільність металевої основи, створює на краях пелюсток зони сильної концентрації напружень, і тому сірі чавуни характеризуються низькою міцністю на розтягування, згинання, скручування й дуже низькою пластичністю ( $\delta < 0,5\%$ ). їх рекомендується використовувати для виробів, що підлягають переважно стисканню. Та завдяки пластинчастому графіту в сірих чавунах вдало поєднуються добрі антифрикційні властивості, зносотривкість, здатність гасити вібрації та мала чутливість до концентраторів напружень.

Що більше перліту в структурі, що він дисперсніший, то більша твердість, міцність і зносостійкість сірих чавунів. Наявність фериту тільки знижує ці властивості, не збільшуючи пластичності й ударної в'язкості чавуну. Не допускається присутність у структурі *евтектичного цементиту*, який різко погіршує різання виливків. Натомість наявність в структурі за високого вмісту фосфору, *фосфідної евтектики*, складником якої є фосфід заліза  $Fe_3P$ , підвищує зносотривкість чавуну.

Отже, експлуатаційні властивості чавунів з пластинчастим графітом визначаються насамперед структурними ознаками, які оцінюють за:

- співвідношенням фериту й перліту;
- дисперсністю перліту;
- розмірами, розташуванням, кількістю пластинчастого графіту;
- будовою, розташуванням, діаметром комірок сітки фосфідної евтектики;
- кількістю евтектичного цементиту.

Для запобігання вибілюванню в тонких перерізах виливків, забезпечення подрібнення та рівномірного розташування пластинчастого графіту, що підвищує міцність чавуну, рідкий чавун перед заливанням у форму модифікують феросиліцієм, силікокальцієм чи іншими графітізуювальними модифікаторами. Такі *модифіковані* чавуни використовують для виготовлення

відповідальних деталей, що працюють в умовах високих навантажень чи зношування.

В окремих випадках застосовується така термічна обробка сірих чавунів:

– низькотемпературний відпал приблизно від 750°C для поліпшення оброблюваності різанням;

– відпружувальний відпал для усунення ливарних залишкових напружень та небезпеки деформацій;

– гартування або поліпшення (гартування й відпуск) для підвищення зносотривкості.

**Модифікування** – це введення спеціальних добавок при розплавленні або при розливанні сплавів з метою поліпшення їх структури та властивостей.

За впливом на процеси кристалізації розрізняють *модифікатори 1 та 2 типу*. *Модифікатори 1 типу* у вигляді тугоплавких дисперсних частинок оксидів, нітридів, карбідів тощо – це додаткові центри кристалізації (графітизації). Вони зумовлюють утворення дрібного зерна або частинок графіту в стопі. Для чавунів модифікатори 1 типу це – силікокальцій, алюміній; для сталей – титан, цирконій, ніобій, ванадій, алюміній.

*Модифікатори 2 типу* – це поверхнево-активні речовини. Їх атомний розмір набагато перевищує розмір атомів заліза, тому вони знаходяться не в твердому розчині, а на міжфазній поверхні. Внаслідок цього поверхнево-активні елементи зменшують поверхневу енергію межі поділу “рідина–тверда фаза”, що зменшує критичний розмір зародка та змінює форму. Так, наприклад, введення в ківш, в струмінь розплаву або в ливарну форму поверхнево-активних елементів *магнію, церію* сприяє глобуляризації часток графіту у чавуні.

**Чавуни з кулястим графітом** (ДСТУ 3925-99). Чавуни з кулястим графітом порівняно з іншими чавунами мають вищу пластичність, ударну в’язкість й одночасно міцність (за що їх називають *високоміцними*), що насамперед зумовлено глобулярною формою графітних включень, які хоч і є концентраторами напружень, але значно менш активними, ніж графітні включення з пластинчатою формою в сірих чавунах. Щоб отримати кулеподібний графіт, рідкий чавун перед розливом модифікують, тобто вводять у нього магній чи церій у невеликій кількості (до 0,02...0,08%).

Така форма графіту сприяє одночасному підвищенню характеристик міцності та пластичності. Відносне видовження високоміцних чавунів залежно від марки може змінюватися від 2 до 12%.

Структура металевої основи високоміцних чавунів може бути феритною, ферито-перлітною або перлітною (рис. 3.4). Найвища пластичність ( $\delta \leq 12\%$ ) характерна для феритних, а найбільша твердість і міцність ( $\sigma_v \geq 500$  МПа) – для перлітних високоміцних чавунів. Високоміцні чавуни ефективно замінюють сталь у багатьох виробках та конструкціях. Чавуни з кулястим графітом за своїми механічними властивостями близькі до литих вуглецевих сталей, але мають кращу рідкоплинність, меншу усадку (~1%), вищу зносостійкість та оброблюваність різанням.



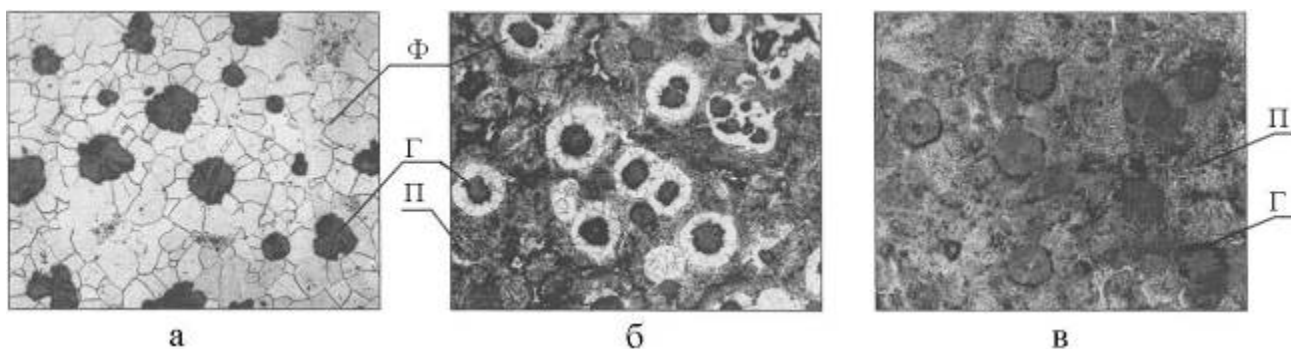


Рис. 3.4. Мікроструктури високоміцних чавунів, х 100:  
 а – феритний чавун; б – феритно-перлітний чавун; в – перлітний чавун;  
 Г – графіт кулястий; П – перліт; Ф – ферит

Легування та термічна обробка ефективно поліпшують властивості чавунів з кулястим графітом. Відпал феритних чавунів зменшує їх твердість, підвищує пластичність, ударну в'язкість, полегшує різання. Нормалізація перлітних й, особливо, гартування бейнітного чавуну підвищують твердість, міцність, зносостійкість. Відпускання після гартування усуває залишкові напруження в деталях та забезпечує оптимальне поєднання міцності й пластичності.

Висока герметичність у поєднанні з ударо- та корозієстійкістю забезпечили високоміцним чавунам з кулястим графітом ефективне застосування як найекономнішого матеріалу напірних труб для води, нафти, агресивних рідинних та газових середовищ. Відцентрово відлиті труби становлять майже половину світового виробництва цих чавунів. Подібні за механічними властивостями до сталевих чавунні труби в 3...8 разів триваліші в експлуатації.

Розподільні й колінчасті вали, блок-картери, головки циліндрів, корпуси коробок передач, задніх мостів, шатуни, поршні, поршневі кільця в автомобілебудуванні; столи, супорти, шпинделі, муфти, зубчасті колеса у верстатобудуванні; плити підштампові гідравлічних пресів, поршні, повзуни механічних пресів, букси, поршневі кільця молотів, напрямні та плунжери ливарних машин – ось далеко не повний перелік виливків з чавунів з кулястим графітом.

**Чавуни з вермикулярним графітом (ДСТУ 3926-99).** Чавуни з вермикулярним графітом одержують, як і чавуни з кулястим графітом, – модифікуванням магнієвими лігатурами, тільки в меншій кількості, що зумовлює утворення *вермикулярного* (від лат. *vermiculus* – гробачок) графіту. Подібно до пластинчастого графіту вермикулярний має форму графітних пелюсток, тільки менших розмірів, грубіших (з відношенням довжини до товщини від 2 до 10) і з заокругленими краями (рис. 3.5).

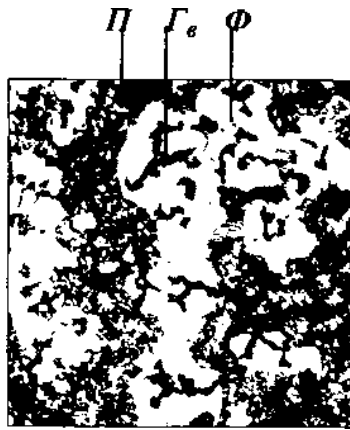


Рис. 3.5. Мікроструктура феритно-перлітного чавуну з вермикулярним графітом, х300:  
Г<sub>в</sub> – графіт вермикулярний, П – перліт, Ф – ферит

При однаковій структурі металевої основи механічні властивості чавунів з вермикулярним графітом проміжні між властивостями сірих з пластинчастим та високоміцних з кулястим графітом. Вони переважають сірі чавуни за пластичністю, ударною в'язкістю, корозійною тривкістю, герметичністю, а високоміцні – за здатністю гасити вібрації, оброблятися різанням, за розмірною стабільністю в умовах теплових змін, меншою вартістю (дешевші на 20...30%). Чавуни з вермикулярним графітом мають меншу усадку та схильність до вибілювання у порівнянні як з сірими, так і високоміцними чавунами. Тому вони особливо ефективні для виливків великої маси й складної форми.

У машинобудуванні з чавунів з вермикулярним графітом виливають головки циліндрів морських дизельних двигунів, високошвидкісних дизель-генераторів електростанцій, махові колеса, гідросільні деталі гідронасосів високого тиску, ексцентрикові зубчасті колеса, кришки коробки передач, картери, гальмівні колодки тощо.

**Ковкі чавуни.** Графітні включення у формі пластівців, що є характерною ознакою ковких чавунів, утворюються під час відпалу білих доєвтектичних чавунів. Такий графіт на відміну від пластинчастого менше знижує механічні властивості. Тому ковкий чавун порівняно з сірим більш міцний та пластичний (відносне видовження досягає значень 2...8%).

Структура білих чавунів, призначених для відпалювання на ковкі: ледебурит, перліт і цементит вторинний. Їх хімічний склад відрізняється від сірих чавунів меншим вмістом вуглецю та кремнію. Невисокий вміст вуглецю дає змогу одержати невелику кількість графітових включень і запобігти утворенню пластинчастого графіту.

Відпал при високій температурі спричиняє розкладання метастабільного цементиту з утворенням графіту компактної форми з кошлатими краями, так званого *графіту відпалу*. За впливом на механічні властивості чавуну такий графіт займає проміжне положення між пластинчастим і кулястим графітом. Структура металевої основи ковких чавунів – феритної, феритно-перлітної та перлітної – залежить від хімічного складу та режиму термічної обробки виливків з білого чавуну.

Схема режиму відпалу білого чавуну на ковкий наведена на рис. 3.6.

Суть процесу графітизації при відпалі білих чавунів полягає в розпаді цементиту.

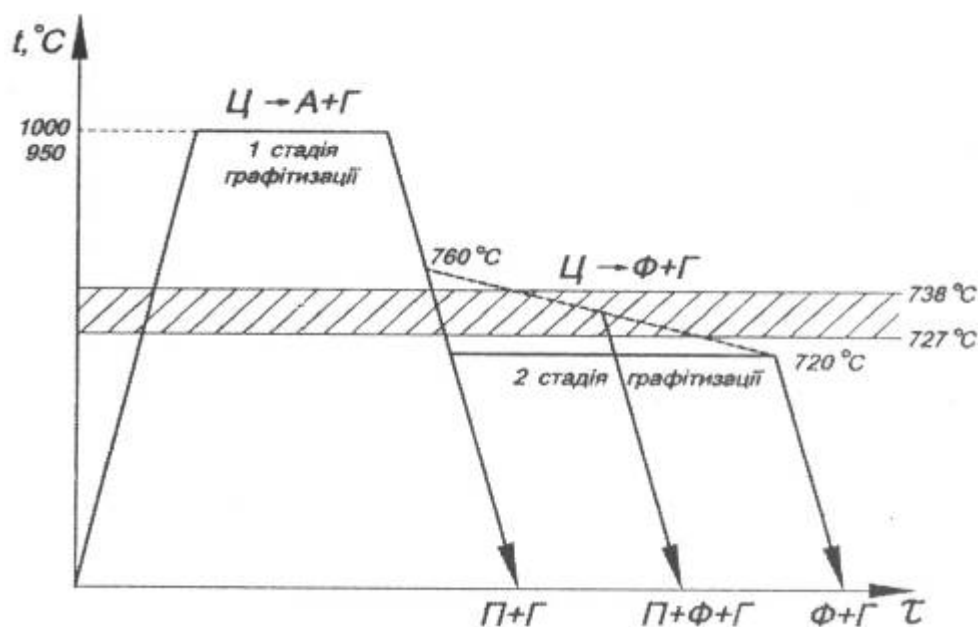


Рис. 3.6. Схема режиму відпалу білого чавуну на ковкий

Відпалювання, що графітизує, проводять у дві стадії: відливки, запаковані в ящики або завантажені в піч із захисною атмосферою, нагрівають до температури першої стадії 950...1000°C. На початку ізотермічної витримки структура відливок  $A+L+Ц_{II}$ . Через те, що термодинамічно стабільною є фазова суміш  $A+Г$ , а не  $A+Ц$ , у процесі витримки внаслідок розчинення  $Fe_3C$  флукуційно з'являються та ростуть зародки графіту. При охолодженні від 1000°C надлишок вуглецю виділяється з аустеніту (згідно лінії діаграми  $ES$ ), який нашаровується на графітних частинках чи утворює цементит вторинний. Перетворення останнього ( $Fe_3C \rightarrow A+Г$ ) призводить до росту графітних часток (проміжна стадія). Під час тривалої (10...15 год) витримки цементит ледебуриту й надлишковий цементит вторинний розкладаються з утворенням аустеніту та графіту відпалу.

При прискореному охолодженні після першої стадії графітизації аустеніт перетворюється в перліт – так отримують ковкий чавун на перлітній основі (рис. 3.7,в). Для одержання ковкого чавуну на феритній основі проводять другу стадію графітизації або при дуже повільному охолодженні в евтектоїдному інтервалі температур, або при тривалій витримці (25...30 год) трохи нижче температури евтектоїдного перетворення (720...740°C). В результаті цього має місце розпад вторинного цементиту (якщо він встиг утворитися) та цементиту перліту.

Такий режим термообробки призводить до отримання ковкого чавуну на феритній основі (рис. 3.7,а). Якщо другу стадію графітизації до кінця не доводити, то можна одержати ковкий чавун на ферито-перлітній основі (рис. 3.7,б).

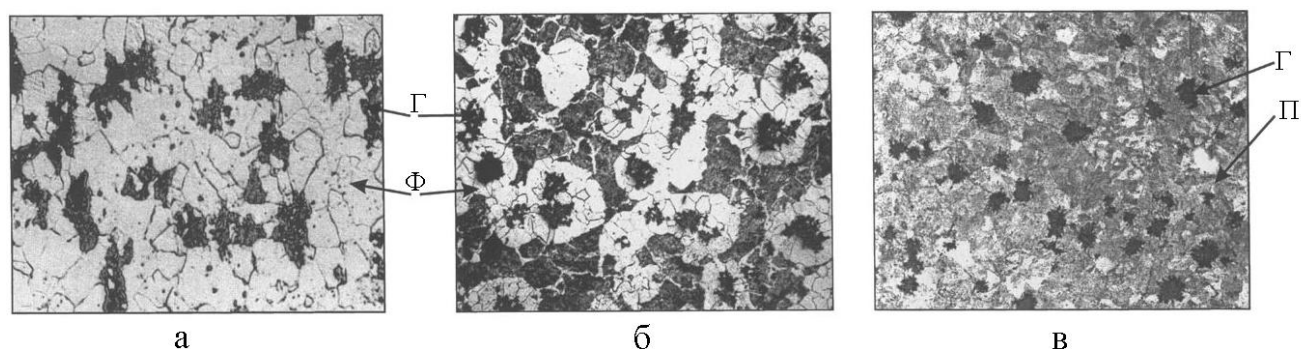


Рис. 3.7. Мікроструктури ковких чавунів, х 100:  
 а – феритний чавун; б – феритно-перлітний чавун; в – перлітний чавун;  
 Г – графіт відпалу; П – перліт; Ф – ферит

Істотним недоліком виробів з ковких чавунів є висока вартість внаслідок тривалого високотемпературного відпалу та обмеження розмірів. Виливки з білого чавуну мають бути тонкостінними (завтовшки близько 50 мм), щоб уникнути під час кристалізації утворення в осерді замість цементиту пластинчастого графіту, що послаблює чавун більше за графіт відпалу. З цією ж метою вихідні білі чавуни повинні містити якнайменше вуглецю й кремнію.

Тому в промисловості існує стабільна тенденція до заміни виливків з ковкого чавуну виливками з високоміцного, який до того ж має кращі ливарні властивості.

### 3.1.3. МАРКУВАННЯ ГРАФІТИЗОВАНИХ ЧАВУНІВ

*Графітизовані чавуни* маркують згідно з відповідними стандартами (додаток Д).

*Сірі чавуни* з пластинчастим графітом (ГОСТ 1412-85) позначаються літерами СЧ (С – сірий, Ч – чавун) і числами, які відповідають мінімально допустимим значенням границі міцності на розтягування у МПа·10<sup>-1</sup>. Для виготовлення виливків стандартом визначені такі марки: СЧ 10 ( $\sigma_B = 100 \dots 150$  МПа), СЧ 15 ( $\sigma_B = 150 \dots 200$  МПа), СЧ 20 ( $\sigma_B = 200 \dots 250$  МПа), СЧ 25 ( $\sigma_B = 250 \dots 300$  МПа), СЧ 30 ( $\sigma_B = 300 \dots 350$  МПа), СЧ 35 ( $\sigma_B > 350$  МПа) та за вимогою споживача СЧ 18, СЧ 21, СЧ 24. Вміст основних компонентів в чавунах цих марок змінюється в таких межах: 2,9...3,7% С, 1,0...2,6% Si, 0,5...1,1% Mn, не більше 0,3% P і 0,15% S, решта Fe.

Ці чавуни широко застосовують в автотракторобудуванні (в конструкціях автомобілів, тракторів маса виливків з сірих чавунів становить 15...25% від загальної маси), верстатобудуванні, санітарно-технічній промисловості. Так, з них виготовляють:

- з феритного СЧ 10 (рис. 3.3,а) – секції опалювальних радіаторів та котлів, ванни;
- з феритного СЧ 15 – картери, шківи, диски зчеплення, гальмівні колодки автомобілів, корпуси електродвигунів;
- з феритно-перлітних СЧ 20, СЧ 25 (рис. 3.3,б) – блоки, головки, гільзи циліндрів автомобільних двигунів, деталі станин завтовшки до 50 мм;

– з перлітних модифікованих СЧ 30, СЧ35 (рис. 3.3,в) – розподільні вали (з легованих чавунів), маховики двигунів, станини та столи верстатів.

*Ковкі чавуни з пластівчастим графітом (ГОСТ 1215-79)* позначають літерами КЧ (К – ковкий, Ч – чавун), після яких вказуються мінімально допустимі значення границі міцності на розтяг у МПа·10<sup>-1</sup> й через дефіс – відносного видовження у відсотках. Приклад позначення вилівка з ковкого чавуну з мінімальними значеннями границі міцності на розтяг 300 МПа і відносного видовження 6% та з феритною металевою основою: вилівок КЧ 30-6 – Ф ГОСТ 1215-79.

Феритні ковкі чавуни КЧ 35-10, КЧ 37-12 використовують для виготовлення деталей, що підлягають значним статичним і динамічним навантаженням (картери редукторів, фланці, муфти). Перлітні ковкі чавуни КЧ 50-5, КЧ 60-3, КЧ 70-2, КЧ 80-1,5 та інші високоміцні, зносостійкі в експлуатації з мастилом, тому з них виготовляють деталі конвеєрних ланцюгів, вилки карданних валів, шатуни, кронштейни.

*Високоміцні чавуни з кулястим графітом (ДСТУ 3925-99)* визначаються показниками границі міцності на розтягування ( $\sigma_b$ ), умовною границею текучості ( $\sigma_{0,2}$ ) та відносним видовженням ( $\delta$ ). Умовне позначення марки містить літери ВЧ (В – високоміцний, Ч – чавун), цифрове позначення мінімального допустимого значення  $\sigma_b$  у МПа та через дефіс –  $\delta$  у відсотках. Отже, чавун з кулястим графітом з мінімальними значеннями ( $\sigma_b = 600$  МПа та  $\delta = 3\%$ ) позначається так: ВЧ 600-3 ДСТУ 3925-99.

Для виготовлення виливків стандартом призначені такі марки чавуну з кулястим графітом: ВЧ 350-22, ВЧ 400-15, ВЧ 420-12, ВЧ 450-10, ВЧ 450-5, ВЧ 500-7, ВЧ 500-2, ВЧ 600-3, ВЧ 700-2, ВЧ 800-2, ВЧ 900-2, ВЧ 1000-2. Хімічний склад цих чавунів змінюється в таких межах: 2,7...3,8% С; 1,9...2,9 % Si; 0,2...0,9 % Mn; P не більше 0,1 %, а S – 0,02 %, решта Fe.

Усі марки чавунів з кулястим графітом охоплюють широкий спектр механічних й технологічних властивостей. *Феритні* чавуни (рис. 3.4,а) марок ВЧ 350-22, ВЧ 400-15 характеризуються найвищою пластичністю й ударною в'язкістю, забезпечують виливкам холодостійкість, ударостійкість, здатність добре оброблятися різанням та зварюватися. *Перлітні* чавуни (рис. 3.4,в) ВЧ 600-3, ВЧ 700-2, ВЧ 800-2, ВЧ 900-2 і *бейнітний* ВЧ 1000-2 – зносостійкі, здатні чинити високий опір статичним і циклічним навантаженням.

Чавуни з вермикулярним графітом (ДСТУ 3926-99) позначаються літерами ЧВГ (Ч – чавун, В – вермикулярний, Г – графіт), після яких вказуються мінімально допустимі значення границі міцності на розтяг у МПа і через дефіс – відносного видовження в %. Отже, за стандартом марка чавуну з вермикулярним графітом з мінімальними значеннями границі міцності на розтяг 400 МПа і відносного видовження 4 % позначається так: ЧВГ 400-4 ДСТУ 3926-99. Крім цих властивостей, стандарт нормує значення твердості в НВ та умовної границі плинності  $\sigma_{0,2}$  в МПа.

Для виготовлення виливків призначені такі марки чавунів: ЧВГ 300-4, ЧВГ 300-5, ЧВГ 400-4, ЧВГ 500-1. Рекомендований стандартом хімічний склад кожної з цих марок чавунів перебуває в таких межах: 3,1...3,9% С; 2,0...2,8% Si;

0.2... 1.2% Mn, не більше 0,08 % P і 0,025 % S, решта Fe.

Сірі, ковкі та високоміцні чавуни можуть використовуватися як антифрикційні матеріали (втулки, підшипники ковзання, поршневі кільця тощо). Такі чавуни маркують літерами АЧ (антифрикційний чавун), далі вказують вид чавуну (С – сірий, В – високоміцний, К – ковкий) та порядковий номер (1-6), наприклад: АЧС-1, АЧВ-2, АЧК-3 (ГОСТ 1585-85).

При певних умовах експлуатації використовують леговані чавуни зі спеціальними властивостями (зносостійкі, корозійностійкі, жаростійкі тощо). Такі чавуни легують хромом, кремнієм, алюмінієм, нікелем, міддю. Їх маркують таким чином: літера “Ч” (чавун), за якою йде літера, що позначає легувальний елемент (як у сталях), число (вміст елемента у відсотках). Якщо вкінці марки стоїть “Ш”, це означає графіт кулястої форми (від російського “шаровидный”). Приклади марок чавунів зі спеціальними властивостями (ГОСТ 7769-82): ЧХ22, ЧХ32 – зносостійкі; ЧС5Ш, ЧЮ22Ш – жаростійкі до 800°C та 1000°C відповідно; ЧС15 (феросилід) та ЧН15Д7 (нірезист) – стійкі проти корозії у розчинах солей, лугів, кислот.

### 3.2. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ

Металографічні мікроскопи МИМ-7, комплексна система: мікроскоп ЕРИQUANT–відеокамера–комп’ютер, зразки доевтектичного, евтектичного та заевтектичного білих чавунів, комплект мікро шліфів машинобудівних чавунів: СЧ10, СЧ25, СЧ35, ВЧ350-22, ВЧ500-7, ВЧ800-2, КЧ30-6, КЧ37-12, КЧ70-2, атлас з мікроструктурами чавунів, державні стандарти.

### 3.3. ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Перегляньте в полі зору мікроскопа за збільшення в 100...200 разів протравлені мікрошліфи білих чавунів, чавунів з пластинчастим, кулястим, вермикулярним графітом та з графітом відпалу (ковкі). Для машинобудівних чавунів методом порівняння з еталонними шкалами за ГОСТ 3443-77 оцініть вид структури металевої основи, співвідношення фериту і перліту, дисперсність перліту, будову, характер розташування й розмір комірок фосфідної евтектики, кількість та розмір ізольованих часточок вторинного цементиту чи цементиту ледебуриту перетвореного.

2. Дайте визначення білих чавунів. Вивчить, зарисуйте і поясніть їх мікроструктуру. Вкажіть хімічний склад. Опишіть процес структуроутворення білих чавунів. Опишіть властивості і назвіть галузі практичного застосування білих чавунів.

3. Схематично зарисуйте мікроструктури переглянутих мікрошліфів чавунів. Схеми зарисовок мікроструктури різних типів машинобудівних чавунів показані на рис. 3.8. Стрілками з відповідними символами позначте на рисунках фази та структурні складові (Г – графіт, Ц – цементит, Ф – ферит, П – перліт, Л – ледебурит).

4. Біля кожної схеми структури запишіть розгорнуту характеристику

відповідного чавуну:

- доберіть можливу марку чавуну;
- коротко опишіть спосіб виробництва деталей з цього чавуну;
- укажіть орієнтовний хімічний склад чавуну;
- опишіть мікроструктуру чавуну, оцініть графіт і структуру металевої основи за еталонними шкалами ГОСТ 3443-77;
- охарактеризуйте механічні й технологічні властивості чавуну;
- укажіть можливе застосування вибраної марки чавуну.

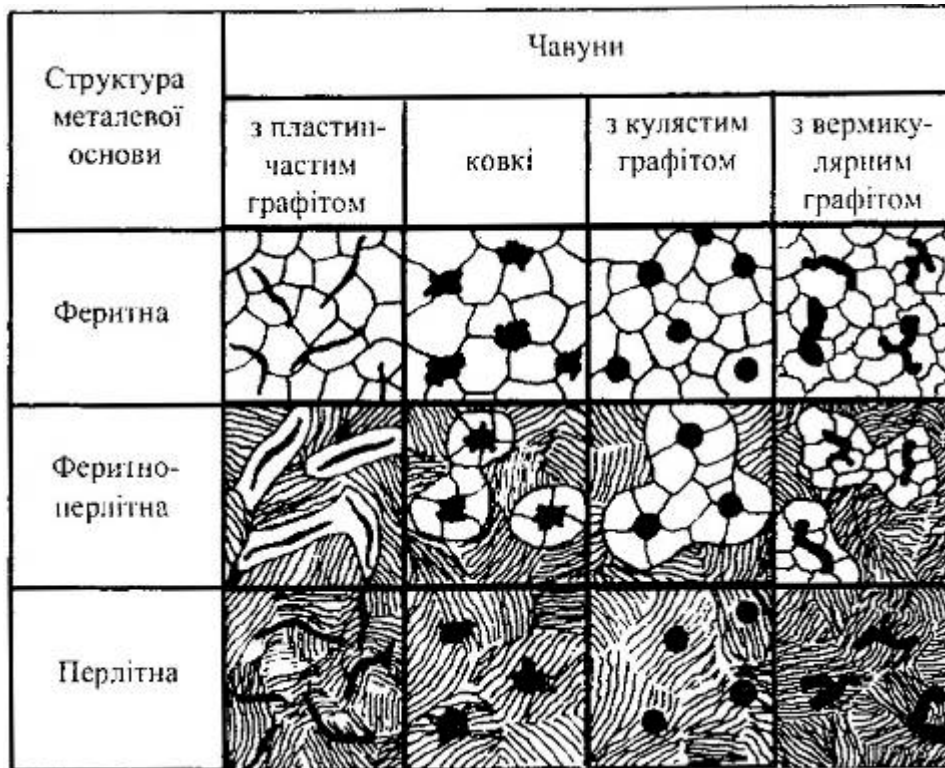


Рис. 3.8. Схеми зарисовування мікроструктури різних типів чавунів

### 3.4. ЗМІСТ І ВИМОГИ ДО ЗВІТУ

У звіті необхідно:

1. Вказати порядковий номер і назву лабораторної роботи.
2. Сформулювати мету роботи.
3. Накреслити діаграму Fe–C; описати властивості графіту, вплив його форми та розмірів на властивості чавунів.
4. Коротко охарактеризувати класифікацію чавунів за різними ознаками, способи одержання, маркування, структуру, властивості, застосування машинобудівних чавунів.
5. Зарисувати схеми структур переглянутих мікрошліфів чавунів та охарактеризувати ці чавуни.

### 3.5. КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Завдяки яким властивостям чавун знаходить широке застосування як конструкційний матеріал ?
2. Як класифікують чавуни залежно від форми графіту та структури металевої основи? Їх вплив на властивості чавуну.
3. Властивості білих чавунів, їх призначення. Згідно з якою діаграмою стану кристалізується білий чавун?
4. Фактори, що впливають на структуру металевої основи чавуну?
5. Що називається графітизуванням та які чинники впливають на цей процес?
6. Що називається вибілюванням та які чинники впливають на цей процес?
7. Охарактеризуйте структуру, властивості й застосування білих чавунів.
8. Охарактеризуйте вплив графіту на властивості машинобудівних чавунів.
9. Згідно з якою діаграмою стану кристалізується сірий чавун?
10. Що таке модифікування чавунів? Які елементи відносяться до модифікаторів 1 та 2 типів?
11. Які фазові перетворення відбуваються на першій та другій стадіях графітизуючого відпалювання?
12. Від яких чинників залежить структура металевої основи машинобудівних чавунів та як вона впливає на їх властивості?
13. Охарактеризуйте спосіб одержання виробів, структуру, властивості, маркування й застосування чавунів з пластинчастим графітом.
14. Охарактеризуйте спосіб одержання виробів, структуру, властивості, маркування й застосування чавунів з вермикулярним графітом.
15. Охарактеризуйте спосіб одержання виробів, структуру, властивості, маркування й застосування чавунів з кулястим графітом.
16. Охарактеризуйте спосіб одержання виробів, структуру, властивості, маркування й застосування ковких чавунів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бялік О.М. Матеріалознавство [Текст]: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.Н. Москаленко – 2-е вид., перероб. і доп. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2008. – 384 с.
2. Металлографія железа. Том II структура сталей [Текст]: Атлас микрофотографий / Перев. с англ. под. ред. Ф.Н. Тавадзе. Изд-во “Металлургия”, 1972. – 284 с.
3. Большаков В.И. Атлас структур металлов и сплавов [Текст]: справ. изд. / В.И. Большаков, Г.Д. Сухомлин, Н.Э. Погребная. – Днепропетровск: GAUDEAMUS, 2001. – 114 с.



4. Попович В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство [Текст]: Практикум. Навч. посібник / В. Попович, А. Кондир, Е. Плешаков та ін. – Львів: Видавництво “Папуга”, 2004. – 422 с.

5. Справочник по конструкционным материалам [Текст]: справочник / под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.

6. Бунин, К. П. Основы металлографии чугуна [Текст]: монография / К.П. Бунин, Я.Н. Малиночка, Ю.Н. Таран. – М.: «Металлургия», 1969. – 416 с.

## Додаток А

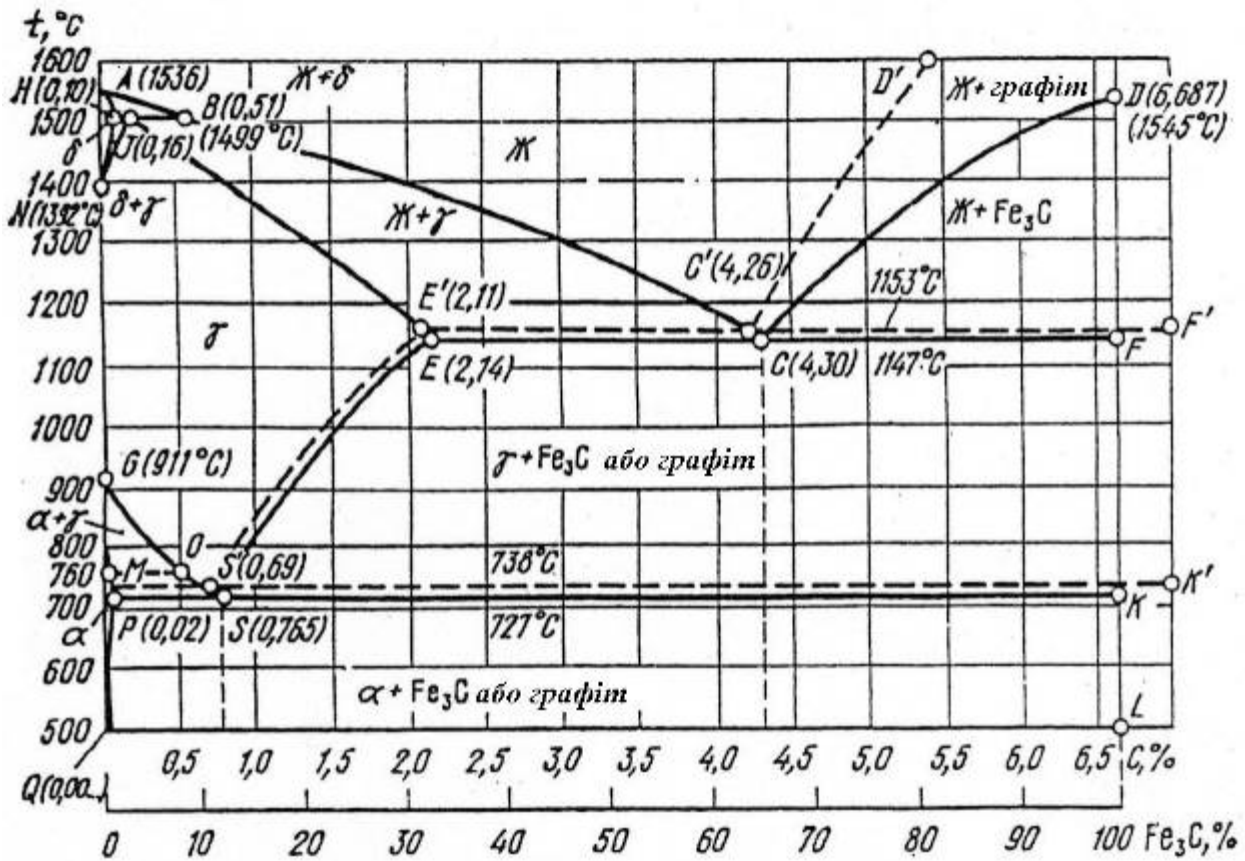


Рис. А.1. Діаграма фазової рівноваги Fe–C:  
 метастабільний стан “залізо-цементит” (Fe–Fe<sub>3</sub>C) – суцільні лінії,  
 стабільний стан “залізо-вуглець” (Fe–C) – пунктирні лінії

Таблиця А.1

Координати точок діаграм стану залізо-вуглець

Точка	Температура, °C	Масова концентрація вуглецю, %	Точка	Температура, °C	Масова концентрація вуглецю, %
<b>Стабільний та метастабільний стан</b>					
A	1536	0,00	H	1499	0,11
B	1499	0,53	N	1392	0,00
I	1499	0,16	G	911	0,00
<b>Метастабільний стан</b>					
C	1147	4,30	P	727	0,0
D	~1260	6,67	S	727	0,80
E	1147	2,14	K	727	~6,67
<b>Стабільний стан</b>					
C'	1153	4,23	P'	738	0,03
D'	4000	100	S'	738	0,69
E'	1153	~2,11	K'	738	~100
F'	1153	~100	Q'	20	0,006

## Додаток Б

Таблиця Б.1

### Перелік Держстандартів на сталі та чавуни

1. Сталь	
Вуглецева звичайної якості	ГОСТ 380-71
Вуглецева якісна	ГОСТ 1050-74
Легована, конструкційна, якісна, ресорно-пружинна	ГОСТ 1050-74
Вуглецева інструментальна	ГОСТ 1435-74
Легована інструментальна	ГОСТ 5950-73
Підшипникова	ГОСТ 801-78
Швидкоріжучі сталі	ГОСТ 19265-73
Конструкційні підвищеної та високої обробки різанням	ГОСТ 1414-75
Жаростійкі та жароміцні	ГОСТ 5632-72
Корозійностійкі	ГОСТ 5632-72
Сплави тверді спечені	ГОСТ 3882-74
Магнітотверді (для постійних магнітів)	ГОСТ 6862-71
Електротехнічні	ГОСТ 21427.0-75... ГОСТ 21427.3-75
2. Чавун	
Сірий	ГОСТ 1412-79
Ковкий	ГОСТ 1215-79
Високоміцний	ГОСТ 7293-85
Жаростійкий	ГОСТ 7769-75

Таблиця Б.2

### Сталі вуглецеві конструкційні звичайної якості

Марка сталі	Вміст елементів, %					Використання
	C	Mn	Si	≤P	≤S	
Ст.0	≤0,23	-	-	0,07	0,06	Конструкції невідповідального призначення: загородження, прокладки, шайби тощо. Добра зварюваність.
Ст.1кп	0,06	0,25	0,05	0,04	0,05	Для деталей, що вимагають високої в'язкості та низької твердості: анкерні болти, арматура тощо. Добра зварюваність.
	0,12	0,50				
Ст.3сп	0,14	0,4	0,15	0,04	0,05	Балки, ферми, корпуси посудин, що працюють під тиском; деталі, що цементують: шестерні, вісі тощо. Добра зварюваність.
	0,22	0,15				
Ст.5Гпс	0,22	0,8	0,15	0,04	0,05	Для деталей, що витримують невеликі напруги: вали, вісі, серги ресор тощо.
	0,30	1,2				
Ст.6сп	0,38	0,5	0,15	0,04	0,05	Деталі підвищеної міцності: вісі, вали, тяги, пальці траків, шпинделі тощо.
	0,49	0,8				

*Примітка:* Цифри при маркуванні не відображають вміст вуглецю в сталі, однак зі зростанням цифри підвищується концентрація вуглецю в сталі, отже твердість і міцність. Літери в кінці марки означають спосіб розкислення сталі: спокійна (сп), напівспокійна (пс) та кипляча (кп).

## Додаток В

Таблиця В.1

### Сталі вуглецеві конструкційні якісні

Група сталі	Маркування	Використання
Низьковуглецеві (0,05...0,08)% С	05, 08	Мають малу міцність та високу пластичність, використовуються без термічної обробки для холодного штампування, холодного вичавлювання: кузови автомобілів, корпуси приладів, прокладки, трубки тощо.
Маловуглецеві (0,10...0,30)% С	10, 15, 20, 25	Для деталей, що піддають цементації (ціануванню) та працюють на зношування без великих навантажень: втулки, осі кулачкових валиків, кільця ланцюгів тощо.
Середньовуглецеві (0,30...0,50)% С	30, 35, 40, 45, 50	Після нормалізації, термічного поліпшення чи поверхневого гартування для деталей, що зазнають згинання, крутіння, зношування, ударне навантаження: колінчасті та розподільвальні вали, плунжери, шестерні та вали редукторів тощо.
З вмістом вуглецю 0,55-0,80%	55, 60, 65, 70, 75, 80	Після гартування та середньотемпературного відпускання мають високі пружні властивості та використовуються для виготовлення пружин, ресор тощо.

*Примітка:* Вміст сірки  $\leq 0,04\%$ , фосфору  $\leq 0,035\%$ .

Таблиця В.2

### Хімічний склад і властивості вуглецевих конструкційних якісних сталей

Марка сталі	Вміст елементів, %				Властивості після нормалізації					КСУ, Дж/см <sup>2</sup>
	С	Mn	Si	Cr	$\sigma_B$ , Мпа	$\sigma_{0,2}$ , Мпа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	НВ	
										Не більше
08	0,05-0,12	0,35-0,65	0,17-0,37	0,10	320	196	33	60	131	-
10	0,07-0,14	0,35-0,65	0,17-0,37	0,15	330	205	31	55	143	-
15	0,12-0,19	0,35-0,65	0,17-0,37	0,25	370	225	27	55	149	-
20	0,17-0,24	0,35-0,65	0,17-0,37	0,25	410	245	25	55	163	-
25	0,22-0,30	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	450	275	23	50	170	88
30	0,27-0,35	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	490	295	21	50	179	78
35	0,32-0,40	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	530	315	20	45	207	69
40	0,37-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	570	335	19	45	217	59
45	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	600	355	16	40	229	49
50	0,47-0,55	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	630	375	14	40	241	38
55	0,52-0,60	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	650	380	13	35	255	-
60	0,57-0,65	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	680	400	12	35	255	-
65	0,62-0,70	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	710	420	10	30	255	-
70	0,67-0,75	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	730	430	9	30	269	-
75	0,72-0,80	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	1100	900	7	30	285	-
80	0,77-0,85	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	1100	950	6	30	285	-

*Примітки:* У сталях допускається не більше 0,04% S; 0,035% P; 0,25% Ni; 0,25% Cu; 0,08% As

## Додаток Г

Таблиця Г.1

### Сталі вуглецеві інструментальні

Група	Маркування	Використання
1	У7, У7А, У8, У8А	Інструменти для слюсарно-монтажних робіт та обробки дерева: сокири, пили, фрези, молотки тощо
2	У9, У9А, У10, У10А	Штампи для холодного штампування, фрези, зенкери, викрутки, калібри
3	У12, У12А, У13, У13А	Інструменти, що не піддаються ударним навантаженням: напилки, шабери, інструмент для гравірування.

*Примітка:* У маркуванні «У» позначає інструментальну вуглецеву сталь, цифри вказують на середній вміст вуглецю в десятих частках відсотка. Літера «А» в кінці марки означає, що сталь – високоякісна і має знижений вміст сірки та фосфору.

Таблиця Г.2

### Хімічний склад і механічні властивості вуглецевих інструментальних сталей

Марка сталі	Вміст елементів, %			Властивості після відпалу					Властивості після гартування та відпускання				
	С	Мn	Si	$\sigma_B$ , Мпа	$\sigma_{0,2}$ , Мпа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	НВ	$\sigma_B$ , Мпа	$\sigma_{0,2}$ , Мпа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	НRC
У 7	0,65-0,74	0,20-0,40	0,15-0,35	630	390	16	30	187	1420	1220	9	8	63
У8	0,75-0,84	0,20-0,40	0,15-0,35	710		17	24	187	1400		10	37	63
У8Г	0,80-0,90	0,35-0,60	0,15-0,35	750				187					
У9	0,85-0,94	0,15-0,35	0,15-0,35	750				192					63
У10	0,95-1,04	0,15-0,35	0,15-0,35	750	300			197	1600				68
У11	1,05-1,14	0,15-0,35	0,15-0,35	650				207	1720				
У12	1,15-1,24	0,15-0,35	0,15-0,35	650	325	28	50	207	1720	1370	9	24	64
У13	1,25-1,35	0,15-0,35	0,15-0,35					217					
У7А	0,65-0,74	0,15-0,30	0,15-0,30	690				187	1590	1370			63
У8А	0,75-0,84	0,15-0,30	0,15-0,30	730				187	1420	1230			63

## Додаток Д

Таблиця Д.1

### Властивості і використання чавунів у промисловості

Структура	Марки	Властивості			Призначення
		$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	НВ	
<i>Сірі</i>					
Ф	СЧ10	100	-	90	супорти, картери, маховики, диски зчеплення, кришки, гальмові барабани, фланці
	СЧ15	150		140	
Ф+П	СЧ20	200	-	230	блоки і гільзи циліндрів, станини верстатів, поршні циліндрів, зубчасті колеса, фундаментні плити
	СЧ25	250		245	
П модиф	СЧ30	300	-	260	розподільні вали, гільзи блоків циліндрів, деталі гідроприводів, зубчасті колеса, корпуси насосів
	СЧ35	350		275	
<i>Ковкі</i>					
Ф	КЧ30-6	294	6	100-163	глушники, фланці, муфти, гайки, картери редукторів, важелі, водяна та газова арматура
	КЧ33-8	323	8	100-163	
Ф+П	КЧ35-10	333	10	100-163	
	КЧ37-12	362	12	110-163	
	КЧ45-7	441	7	150-207	
П	КЧ50-5	490	5	170-230	вилки карданних валів, шатуни, кронштейни, кільця ланцюгів, ступиці, гальмові колодки, деталі кермового управління
	КЧ70-2	686	2	241-285	
	КЧ80-1,5	784	1,5	270-320	
<i>Високоміцні</i>					
Ф	ВЧ350-22	350	22	140-170	валки гарячого прокатування, станини і рами прокатних станів і пресів, колінчасті вали дизельних двигунів, розподільні вали, блок-картери, головки циліндрів, шатуни, поршні, поршневі кільця, зубчасті колеса, ковальсько-пресове обладнання, труби
	ВЧ400-15	400	15	140-202	
Ф+П	ВЧ450-10	450	10	140-225	
	ВЧ500-7	500	7	153-245	
П	ВЧ600-3	600	3	192-277	
	ВЧ800-2	800	2	228-302	
	ВЧ 1000-2	1000	2	270-360	
	гарт, на бейніт				