

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

АРМАТУРА ДЛЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Конспект лекцій
у трьох частинах
для студентів освітнього рівня «бакалавр»
спеціальності 192 «Будівництво і цивільна інженерія»
ОП «Технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів»

Частина 1
Метали і сплави

Київ 2023

УДК 624.012

A83

Автори: Є. М. Петрикова, канд. техн. наук, доцент;
А. А. Майстренко, канд. техн. наук, доцент;
Н. О. Амеліна, канд. техн. наук, доцент;
О. Ю. Резник, канд. техн. наук, доцент

Рецензент О. П. Константиновський, канд. техн. наук, доцент

Затверджено на засіданні на засіданні навчально-методичної ради КНУБА, протокол № 7 від 13 квітня 2023 року.

Арматура для залізобетонних конструкцій : конспект лекцій
A83 у 2 ч. – Ч. 1. Метали і сплави / Є. М. Петрикова та ін. – Київ : КНУБА, 2023. – 68 с.

Розглянуто основи класифікації металів і металевих сплавів, основні властивості металів, принципи будови металів і сплавів. Наведено класифікацію, властивості, характеристики та структуру залізобетонних сплавів і перетворення в системі Fe – Fe₃C. Розглянуто основи термічної обробки металевих сплавів.

Призначено для студентів освітнього рівня «бакалавр» спеціальності 192 «Будівництво і цивільна інженерія» спеціалізації 192.04 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів» для поглибленого засвоєння теоретичного курсу та підготовки до контролю знань із дисципліни «Арматура для залізобетонних конструкцій».

УДК 624.012

© Є. М. Петрикова, А. А. Майстренко,
Н. О. Амеліна, О. Ю. Резник, 2023
©КНУБА, 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Лекція 1. Metали і сплави. Класифікація. Основні властивості металів. Будова металів і сплавів	
1.1. Metали і сплави.....	5
1.1.1. Metали.....	5
1.1.2. Metалеві сплави.....	6
1.2. Класифікація металів і сплавів.....	10
1.3. Основні властивості металів.....	11
1.4. Будова металів і сплавів.....	15
1.4.1. Види кристалічних ґраток (решіток).....	16
1.4.2. Види зв'язку в металах і металевих сплавах.....	18
1.4.3. Будова сплавів на субмікро-, мікро- і макроскопічному рівнях.....	19
1.4.4. Анізотропність і спайність кристалів. Алотропія металів	24
1.4.5. Кристалізація металів.....	26
Лекція 2. Залізовуглецеві сплави: класифікація, характеристика, структура	
2.1. Залізо.....	30
2.2. Чавун і феросплави.....	31
2.3. Сталь.....	40
Лекція 3. Діаграми стану системи залізо – вуглець. Перетворення в системі Fe – Fe₃C	
3.1. Загальні положення.....	47
3.2. Діаграма «залізо – вуглець».....	48
3.2.1. Структурні складові (фази) залізовуглецевих сплавів в системі Fe – Fe ₃ C.....	51
3.2.2. Перетворення в системі Fe – C (Fe – Fe ₃ C).....	55
Лекція 4. Основи термічної обробки сплавів	
4.1. Загальні положення.....	58
4.2. Види термічної обробки сплавів.....	64
Список літератури	67

ВСТУП

Конспект лекцій призначено для допомоги студентам спеціальності 192 «Будівництво і цивільна інженерія» спеціалізації 192.04 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів» у поглибленому засвоєнні теоретичного курсу та підготовці до контролю знань із дисципліни «Арматура для залізобетонних конструкцій».

З метою поліпшення засвоєння лекційного матеріалу за дисципліною пропонується скорочений конспект у вигляді трьох частин, підпорядкований робочій програмі курсу «Арматура для залізобетонних конструкцій».

Перша частина містить лекції, присвячені основам теоретичних знань стосовно будови та властивостей металів і металевих сплавів та дає змогу здобувачам ознайомитися зі структурою та властивостями залізовуглецевих сплавів. Головну увагу в цій частині конспекту лекцій приділено вивченню особливостей будови залізовуглецевих сплавів, закономірностей процесів кристалізації та фазових перетворень у твердому стані, принципів легування сталей і чавунів, видів і режимів термічної обробки сталей.

Наведений у лекціях теоретичний матеріал дасть змогу сформувати знання, які сприятимуть засвоєнню сучасних уявлень про взаємозв'язки між хімічним складом, режими металургійного процесу і подальшої обробки, структуру та властивості залізовуглецевих сплавів.

За результатами вивчення конспекту лекцій (частина 1. Метали і сплави) студент повинен

знати:

- особливості структуру залізовуглецевих сплавів;
- вплив складових на властивості залізовуглецевих сплавів;
- закономірності процесів кристалізації та фазових перетворень у твердому стані залізовуглецевих сплавів;
- властивості залізовуглецевих сплавів;
- види та режими термічної обробки сталей;

уміти:

- будувати взаємозв'язки між хімічним складом, структурою та властивостями залізовуглецевих сплавів;
- визначати структурні складові залізовуглецевих сплавів за допомогою діаграми стану системи залізо – вуглець.

ЛЕКЦІЯ 1

Метали і сплави. Класифікація. Основні властивості металів. Будова металів і сплавів

1.1. Метали і сплави.

1.1.1. Метали.

1.1.2. Металеві сплави.

1.2. Класифікація металів і сплавів.

1.3. Основні властивості металів.

1.4. Будова металів і сплавів.

1.4.1. Види кристалічних ґраток (решіток).

1.4.2. Види зв'язку в металах і металевих сплавах.

1.4.3. Будова сплавів на субмікро-, мікро- і макроскопічному рівнях.

1.4.4. Анізотропність і спайність кристалів. Алотропія металів.

1.4.5. Кристалізація металів.

1.1. Метали і сплави

1.1.1 Метали

Металами називають речовини, характерними ознаками яких за звичайних умов є висока міцність, пластичність, тепло- і електропровідність, особливий блиск, що має назву металевого.

До металів належить більшість хімічних елементів періодичної системи Менделєєва (рис. 1.1). У твердому та рідкому станах вони відрізняються від елементів – неметалів – характерними металічними міжатомними зв'язками з узагальненими й рухливими електронами. Такі зв'язки зумовлюють електро- і теплопровідність металів, їх міцність; металам властиві також пластичність і ковкість, непрозорість і металічний блиск.

Метали, що використовують у техніці, називають **технічними**. До них належать залізо, алюміній, магній, мідь, свинець, цинк, олово, нікель, титан.

У ряді випадків метали використовують майже в чистому вигляді, у технічно чистому вигляді, тобто з малим умістом домішок, наприклад залізо, мідь і алюміній в електро- і радіотехніці. Інші метали, наприклад тантал, ніобій, гафній, цирконій, використовують у надчистому вигляді,

тобто з мільйонними частками відсотка всіх домішок, у приладобудуванні й атомній техніці.

	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VIB	VIB	VIB	IB	IB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIA	VIIA
1	H	неметали																He
2	Li	Be	метали										B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg	метали										Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo
	*ЛАНТАНИДИ		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
	**АКТИНИДИ		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	

Рис. 1.1. Метали та неметали в періодичній системі Менделєєва

Здатністю металів до утворення з'єднань із різними фізико-механічними властивостями обумовлені сприятливі умови для отримання сплавів. Металічні сплави застосовують незрівнянно ширше й різноманітніше. У практиці використовують понад 10 тис. сплавів.

1.1.2. Металеві сплави

Металічними (металевими) сплавами називають сполучення двох або кількох металів і неметалів, у яких зберігаються металічні властивості.

Більшість сплавів отримують у рідкому стані (сплавленням), проте їх можна створювати також методом спікання, електролізу, конденсації (згущення) з пароподібного стану тощо.

Компонентами сплавів називають речовини, що утворюють систему. Системою називають сукупність речовин у твердому, рідкому й газоподібному станах.

Системи бувають прості і складні. Прості системи складаються з одного компонента. Складна система містить кілька компонентів і являє собою всі можливі кількісні сполучення їх за різних температур.

Для металевих сплавів *системою* називають метали та металеві сплави. Компонентами можуть бути хімічні елементи (метали і неметали) або їх сполуки у складі сплаву.

За кількістю компонентів сплави поділяють на подвійні, потрійні і т. д. Чистий метал є однокомпонентною системою.

Залежно від природи компонентів, з яких складається сплав, розрізняють:

- сплав – механічну суміш компонентів;
- сплав – твердий розчин компонентів;
- сплав – хімічну сполуку компонентів.

Сплави – механічні суміші неоднорідні і являють собою найдрібнішу суміш кристалітів компонентів.

Сплави – тверді розчини і сплави – хімічні сполуки, однорідні, причому одні можуть утворюватися за різного співвідношення компонентів, а інші – тільки в разі суворо визначеного вагового співвідношення компонентів, як будь-яка хімічна сполука.

У *сплавах – твердих розчинах* атоми розчинної речовини заміщують атоми розчинника в кристалічній ґратці (рис. 1.2, *а*) або впроваджуються в неї (рис. 1.2, *б*);

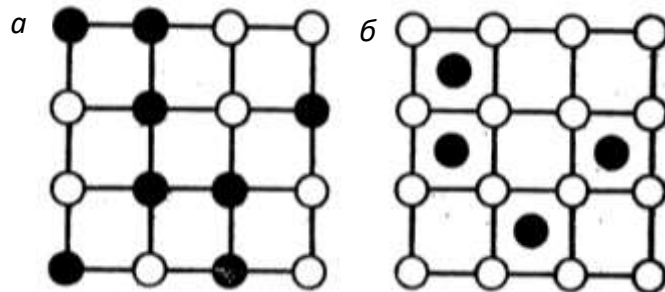


Рис. 1.2. Схематичне зображення кристалічної ґратки металевих сплавів:
а – з атомами заміщення; *б* – з атомами вбудовування (впровадження)

Сплави – хімічні сполуки – утворюють нову особливу кристалічну решітку (ґратку).

Фазою називають однорідну частину системи, відділену від інших складових (фаз) поверхнею поділу. Отже, фазами можуть бути:

- хімічні елементи,
- тверді й рідкі розчини;
- хімічні сполуки.

У рідкому стані однорідна система містить одну фазу; у разі затвердіння завжди є дві фази – рідка і тверда. Після затвердіння

утворюється або одна фаза (хімічний елемент, хімічна сполука, твердий розчин), або сплав, який містить суміш фаз.

З переходом через поверхню розділу фаз міняється хімічний склад сплаву і його будова.

У твердих металевих сплавах фази можуть складатися:

- із зерен чистого металу;
- твердого розчину;
- хімічних сполук декількох компонентів.

Фази чистого металу складаються з одного хімічного елемента (Fe, Al, Cu та інші), кристали якого не мають сторонніх включень у вигляді атомів інших хімічних сполук (рис. 1.3).

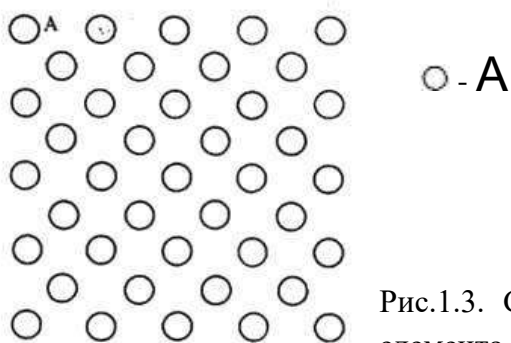


Рис.1.3. Схема розміщення атомів у системі з чистого елемента (металу)

Фази твердих розчинів утворюються з кількох хімічних елементів, що входять до сплаву із закономірним розташуванням атомів у кристалевій решітці.

При цьому зберігається кристалева ґратка (решітка) основного хімічного елемента (наприклад, заліза, міді, алюмінію), що є розчинником, а хімічні елементи – домішки, які розчиняються, втрачають свою кристалічну будову й у вигляді окремих атомів розподіляються в решітці основного металу (рис. 1.4).

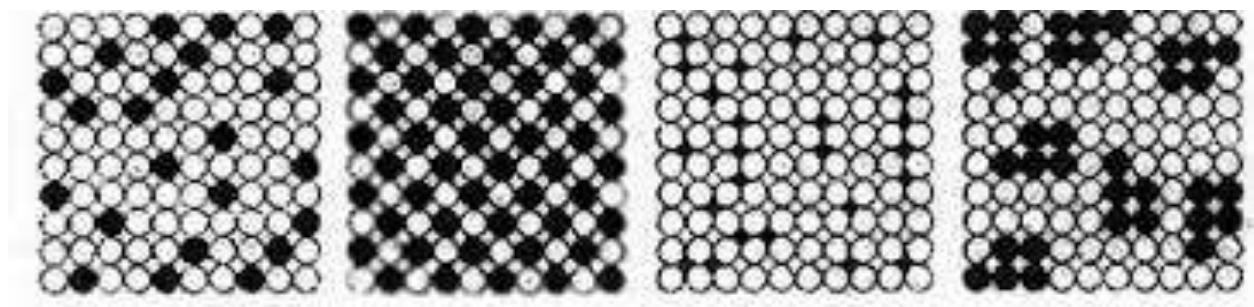
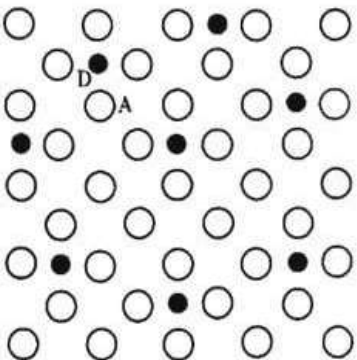
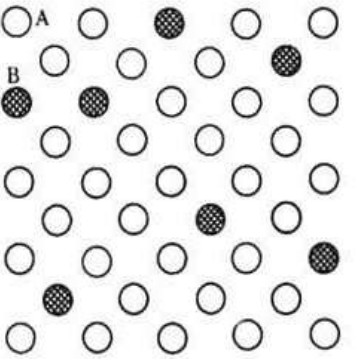
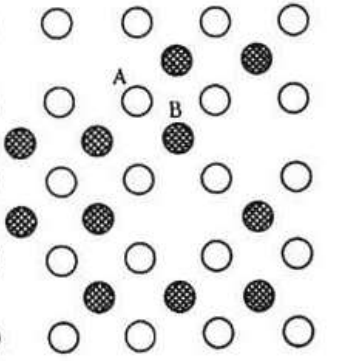


Рис. 1.4. Схеми розміщення атомів у металевих сплавах

Розрізняють три типи твердих розчинів:

- вбудовування («внедрения» – рос.);
- заміщення;
- віднімання («вычитания» – рос.).

Тип твердого розчину	Схематичне зображення структури	Характеристика
вбудовування («внедрения» – рос.)		<p>У розчині вбудовування атоми розчинного елемента вбудовуються між атомами розчинника, спотворюючи його ґратку. До таких елементів належать металоїди – вуглець, водень, азот, бор та інші, концентрація яких у твердому розчині може становити 1–2 %</p>
заміщення		<p>У розчині заміщення атоми розчинного елемента займають місце атомів розчинника в кристалевій решітці. При цьому розміри атомів основного металу й домішки повинні відрізнятися не більше ніж на 15 %. Наприклад, добре заміщуються атоми Fe і Cr, Cu і Ni, Ti і V та інші</p>
віднімання («вычитания» – рос.)		<p>У розчині віднімання в кристалічній ґратці основного металу залишаються незаповнені місця</p>

Фази хімічного з'єднання мають такі основні особливості:

- атоми хімічних елементів з'єднання значно відрізняються своїми властивостями (розміщуються в таблиці Менделєєва далеко один від одного);
- мають строго визначене співвідношення (стехіометричні пропорції), що виражено видом A_nB_m ;
- мають свою кристалічну ґратку і свою закономірність розташування в ній атомів;
- мають властивості, які помітно відрізняються від властивостей вихідних хімічних компонентів.

1.2. Класифікація металів і сплавів

Усі метали й отримані з них сплави поділяють на чорні та кольорові.

До чорних належать залізо (Fe), що є найважливішим промисловим металом, у чистому вигляді і у сплавах із вуглецем (C) та іншими елементами.

До сплавів цієї групи належать сталь, чавун і феросплави («феро» – від латинської назви заліза «ферум»).

На долю чорних металів припадає близько 94–95 % металопродукції, що виробляється у світі. Вони є основним конструкційним матеріалом у машинобудуванні й одним з основних у будівництві. Через це технічний рівень народного господарства країни характеризується насамперед кількістю чорних металів, що виплавляється.

Решта металів та їх сплавів належать *до групи кольорових металів* (рис. 1.5). Їх поділяють на *легкі* (густина до 3 г/см^3) (наприклад, на основі алюмінію, магнію) і *важкі* (на основі міді). Чим менша атомна маса металу і чим більший радіус атома металу, тим менша густина. Найлегший метал – літій (густина – $0,53 \text{ г/см}^3$), найважчий – осмій (густина – $22,6 \text{ г/см}^3$).

Розрізняють також *благородні* та *рідкісні* метали. Виділяють групу *тугоплавких* металів – на основі молібдену, ванадію.

Кольорові метали поділяють на такі групи:

- рідкісні (літій, рубідій, цезій, берилій, молібден, вольфрам, цирконій, гафній, ванадій, ніобій, тантал та ін.);
- рідкісноземельні (скандій, ітрій, лантан і лантаноїди);
- розсіяні (галій, індій, талій і германій);

- лужні (літій, натрій, калій, рубідій, цезій, францій);
- лужноземельні (кальцій, стронцій, барій, радій);
- благородні (золото, срібло, платина, паладій, родій, іридій, рутеній та осмій);
- радіоактивні (технецій, прометій, полоній, францій, радій, актиній і актиноїди) тощо.

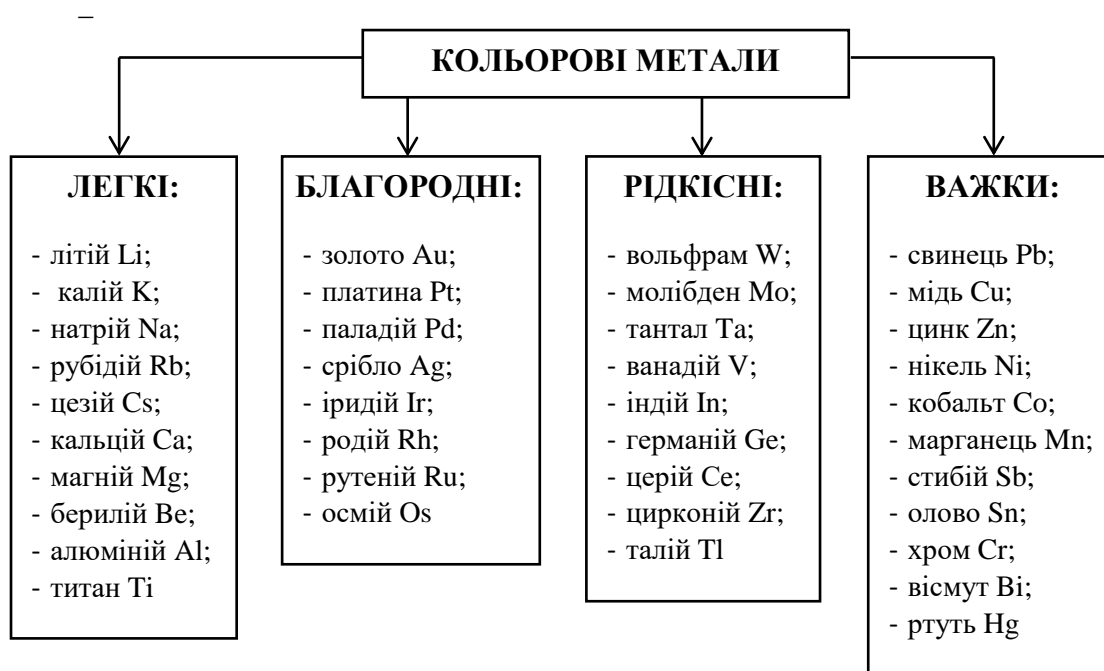


Рис. 1.5. Основна класифікація кольорових металів

Із кольорових металів важливе промислове значення мають мідь Cu, алюміній Al, магній Mg, свинець Pb, цинк Zn, олово Sn, титан Ti. Крім перелічених, промислове застосування мають також такі кольорові метали: хром Cr, нікель Ni, марганець Mn, молібден Mo, кобальт Co, ванадій V, вольфрам W, цирконій Zr, тантал Ta, ніобій Nb, реній Re, індій In і напівпровідники – германій Ge, селен Se, телур Te.

Але цінність кольорових металів порівняно з чорними дуже висока, через що в усіх випадках, коли це допустимо, їх намагаються замінити чорними металами або пластмасами.

1.3. Основні властивості металів

У металів виділяють *механічні, технологічні, фізичні та хімічні властивості*.

До *фізичних* властивостей належать: колір, щільність, температура плавлення, електропровідність, магнітні властивості, теплопровідність, теплоємність, розширення і стиск під час нагрівання, охолодження та в разі фазових перетворень.

Усі метали, крім ртуті та францію, за звичайної температури – це тверді речовини кристалічної будови.

У кристалічному стані вони добре відбивають світло й тому непрозорі, мають характерний металічний блиск. Найкраще відбивають світло індій і срібло, тому їх використовують для виготовлення дзеркал у прожекторах і рефлекторах.

Майже всі метали (за винятком золота та міді) мають білий або сірий колір із різними відтінками. У порошкоподібному стані більшість металів набувають чорного або темно-сірого кольору.

Усі метали добре проводять електричний струм і теплоту.

Метали – пластичні речовини.

Здатність плавитися під час нагрівання використовують для виготовлення відливків заливанням розплавленого металу у форми. Деякі складні сплави мають настільки низьку температуру плавлення, що розплавляються в гарячій воді. Такі сплави застосовують для відливання друкарських матриць, у приладах, призначених для запобігання пожегам тощо.

Метали з високою електропровідністю (мідь, алюміній) використовують в електромашинобудуванні, для спорудження ліній електропередачі, а сплави з високим електроопором – для ламп розжарювання, електронагрівальних приладів.

Магнітні властивості металів відіграють першорядну роль в електромашинобудуванні (електричні генератори, електродвигуни, трансформатори) і приладобудуванні (телефонні та телеграфні апарати) тощо.

Теплопровідність металів дає змогу рівномірно нагрівати їх для оброблення тиском, термічної обробки; вона забезпечує також можливість паяння металів, зварювання їх тощо.

Деякі сплави металів мають коефіцієнт лінійного розширення, близький до нуля; такі сплави застосовують для виготовлення точних приладів. Розширення металів треба брати до уваги під час будівництва довгих споруд, наприклад мостів, трубопроводів. Треба також враховувати,

Перша вимога, яка ставиться до кожного виробу, – це достатня міцність. Metали – міцні матеріали, тому навантажувані деталі машин, механізмів і споруд здебільшого виготовляють із металів.

Твердістю називається здатність матеріалу чинити опір деформації в поверхневому шарі за місцевої силової контактної дії.

Пружність – здатність матеріалу відновлювати свою форму після того, як перестануть діяти зовнішні сили, які спричинили зміну форми (деформацію).

Пластичність – властивість металу деформуватися без руйнування під впливом зовнішніх сил і зберігати нову форму після того, як ці сили перестануть діяти. Пластичність – властивість, протилежна пружності. Пластичність металів дає змогу обробляти їх тиском (кувати, прокатувати, волочити).

В'язкістю матеріалу називають здатність його поглинати механічну енергію і при цьому проявляти значну пластичність аж до руйнування. В'язкість – властивість, протилежна крихкості. В'язкі метали застосовують у тих випадках, коли деталі під час роботи зазнають ударних навантажень.

Експлуатаційні властивості. Багато виробів, крім загальної міцності, повинні характеризуватися ще й особливими властивостями. Наприклад, різальні інструменти повинні мати високу твердість. Для виготовлення різальних та інших інструментів застосовують інструментальні сталі і сплави, а для ресор і пружин – сталі і сплави, які мають високу пружність.

Технологічні властивості мають важливе значення за тих або інших видів обробки. До технологічних властивостей належать прогартовуваність, рідкоплинність, ковкість, зварюваність, оброблюваність різанням.

Сучасними методами випробовування металів є механічні випробовування, хімічний, спектральний, металографічний і рентгенографічний аналізи, технологічні проби, дефектоскопія, а також випробовування на оброблюваність різанням, корозійні випробовування металів та ін. Ці випробовування дають змогу отримати уявлення про природу металів, їх будову, склад і властивості, а також визначити якість готових виробів.

1.4. Будова металів і сплавів

Речовини у твердому стані мають кристалічну або аморфну будову (рис. 1.7).

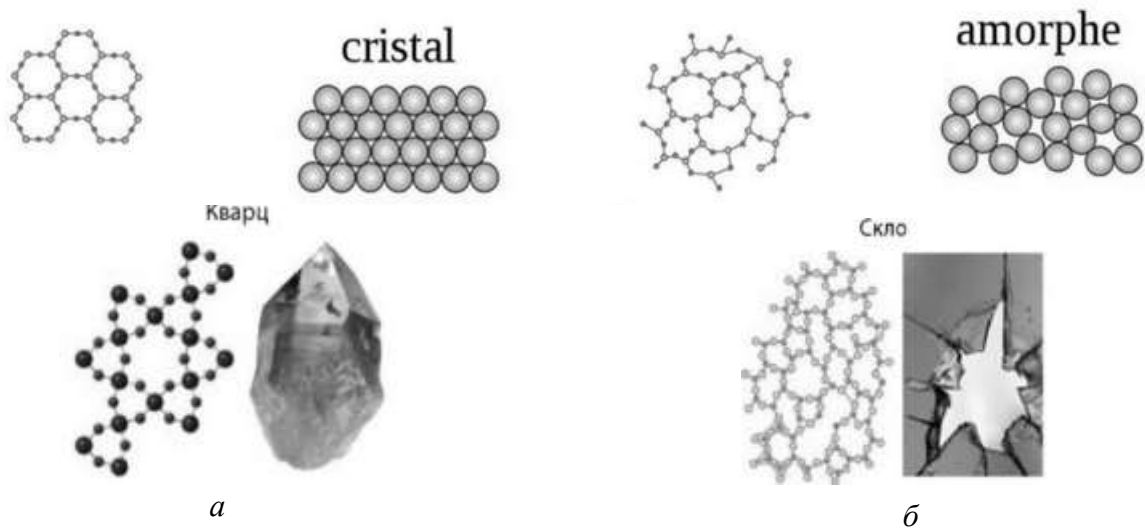


Рис. 1.7. Схеми будови речовин:
a – кристалічна; *б* – аморфна

В ідеальній кристалічній речовині атоми розташовані за геометрично правильною схемою і на певній відстані один від одного, в аморфному ж (склі, каніфолі) атоми розташовані безладно.

Основна більшість елементів (близько 80) із 92, що зустрічаються у природних умовах, належать до металів, властивості яких обумовлені особливістю їх внутрішньої будови. У всіх металів і їх сплавів будова кристалічна.

На рис. 1.8 показано мікроструктуру чистого заліза. Кристалічні зерна невизначеної форми не схожі на типові кристали-многогранники, тому їх називають кристалітами, зернами або гранулами. Проте будова кристалітів настільки ж закономірна, як і в розвинутих кристалів.

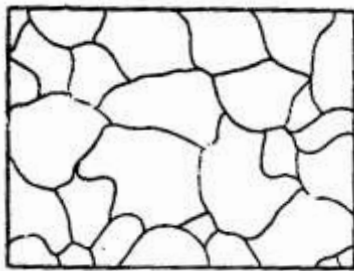


Рис. 1.8 Схематичне зображення мікроструктури чистого заліза

1.4.1. Види кристалічних ґраток (решіток)

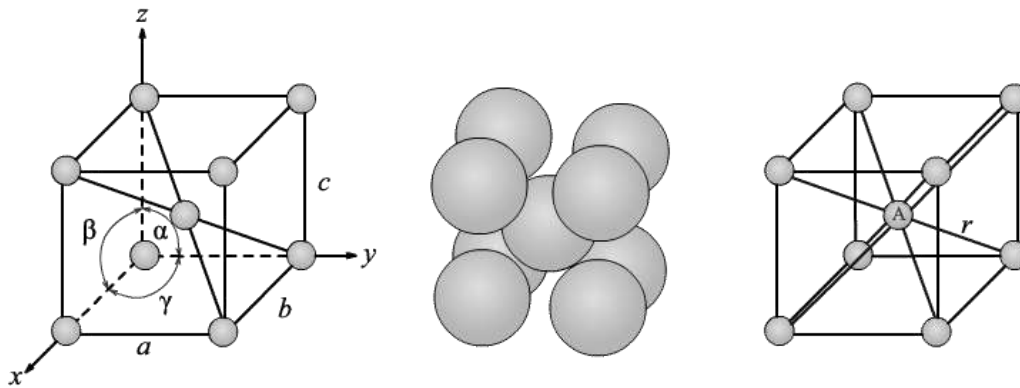
Із затвердінням атоми металів утворюють кристали, які можна розглядати як геометрично правильні системи, побудовані у вигляді кристалічних решіток (ґраток).

Ідеальна кристалічна решітка характеризується певним, закономірним розташуванням атомів у просторі (площини a , b , c). Ряд взаємно паралельних площин утворюють просторову кристалічну решітку. У вузлах перетинання площин розміщуються атоми металу. Порядок розташування атомів у решітці може бути різним.

Кристалічна решітка металів і сплавів характеризується формою комірки (чарунки), розміром решітки, щільністю упаковки й координаційним числом.

Форми кристалічної решітки (чарунки) більшості металів:

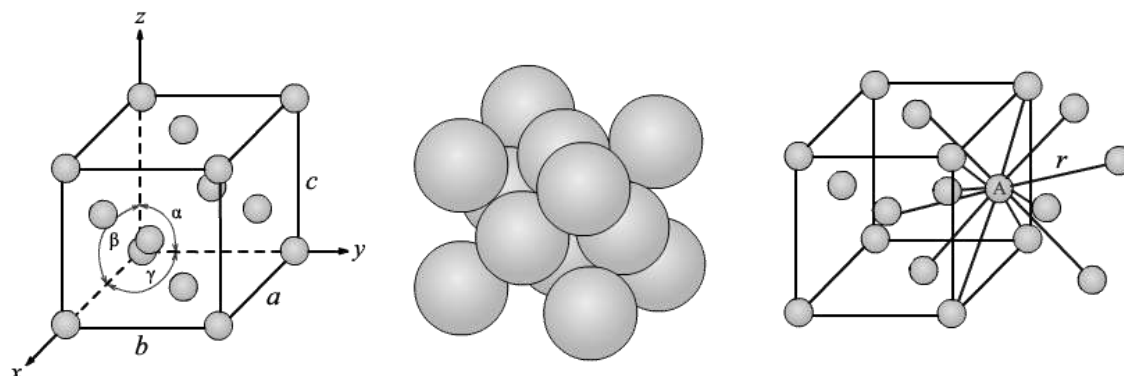
- **кубічна об'ємноцентрована** (форма центрованого куба (α і β -залізо, α -титан, хром, молібден, вольфрам, ванадій). Комірка кубічної об'ємноцентрованої решітки (рис. 1.9) обмежується дев'ятьма атомами, вісім з яких розташовані по вершинах куба, а дев'ятий – у його центрі. Повторенням цієї комірки шляхом переносів утворюється вся структура кристала;



Параметр	Значення
Кути між осями	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Період ґратки	$a = b = c$
Кількість атомів на чарунку	$n = 2$
Координатне число	$Z = 8$
Коефіцієнт компактності	$K = 0,68$

Рис. 1.9. Ґратка об'ємноцентрована кубічна (Mo, W, V, Fe_a):
 r – найменша відстань до сусідніх атомів

- **кубічна гранецентрована** (куб із центрованими гранями (γ -залізо, алюміній, мідь, нікель, свинець, β -кобальт)). Елементарна комірка кубічної гранецентрованої решітки (рис. 1.10) обмежується 14 атомами: 8 з них розташовані по вершинах куба і 6 – по гранях;



Параметр	Значення
Кути між осями	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Період ґратки	$a = b = c$
Кількість атомів на чарунку	$n = 4$
Координатне число	$Z = 12$
Коефіцієнт компактності	$K = 0,74$

Рис. 1.10. Ґратка гранецентрована кубічна (Al, Cu, Au, Ag, Fe $_{\gamma}$):
 r – найменша відстань до сусідніх атомів

- **тетрагональна або гексоганальна гранецентрована** (гексагональна комірка, як у шестигранної призми (магній, цинк, α -кобальт)). Елементарна комірка гексагональної решітки (рис. 1.11) обмежена 17 атомами, з них 12 атомів розташовані по вершинах шестигранної призми, 2 атоми – у центрі основ і 3 – у середині призми.



Рис. 1.11. Ґратка гексагональна щільного пакування

Форма кристалічної решітки залежить від багатьох факторів – температури, тиску, фізичної будови атомів, методів термічної обробки тощо.

Розміри кристалічної решітки характеризуються параметрами (періодами) (сторона куба або шестигранника) – відстанями між центрами атомів a , b , c , що розміщені у вузлах елементарної комірки. Параметр решіток у міді становить 0,36 нм, в алюмінію – 0,405 нм, у цинку – 0,267 нм і т. д.

Щільність і ступінь пакування атомів кристалічної решітки характеризується відношенням об'єму, зайнятого атомами, до об'єму кристалічної решітки.

Залежно від форми кристалічної чарунки і ступеня її пакування кожний атом має різне число взаємних контактів з іншими атомами. Ця величина характеризується координаційним числом – числом атомів, що розташовані на найбільш близькій рівній відстані від цього атома:

- кубічна об'ємноцентрована решітка – К8;
- кубічна гранецентрована решітка – К12;
- тетрагональна або гексоганальна гранецентрована – Т08.

Кожний із металів має свою характерну кристалічну комірку, яка багатократно повторюється й утворює решітку його структури. Міцність решітки забезпечується силами міжатомної взаємодії.

1.4.2. Види зв'язку в металах і металевих сплавах

Кожний атом складається з позитивно зарядженого ядра і кількох шарів (оболонок) негативно заряджених електронів, які рухаються навколо ядра. Електрони зовнішніх оболонок атомів металів називають валентними. Вони легко відщеплюються, швидко рухаються між ядрами і називаються вільними. Унаслідок наявності вільних електронів атоми металів є позитивно зарядженими іонами.

Отже, у вузлах решіток містяться позитивно заряджені іони. Проте іони не перебувають у спокої, а безперервно коливаються біля положення рівноваги. З підвищенням температури амплітуда коливань збільшується, що веде до розширення кристалів, а за температури плавлення коливання частинок збільшується настільки, що кристалічна решітка руйнується.

На основі квантово-механічної трактовки міжатомних сил зв'язки в металічній решітці поділяються на 4 типи: металевий зв'язок; зв'язок Ван-дер-Вальса; іонний зв'язок і ковалентний зв'язок.

У металах діють всі види зв'язку. У перехідних металах, до яких належить і сталь, переважає металевий зв'язок, структура якого дуже складна.

Металевий зв'язок виникає завдяки силам притягання між решіткою з позитивно заряджених іонів і оточуючим їх газом вільних електронів. Вільні електрони не зв'язані з яким-небудь певним атомом, і їх рухливість в решітці обумовлена її напруженістю, тепло- і електропровідністю.

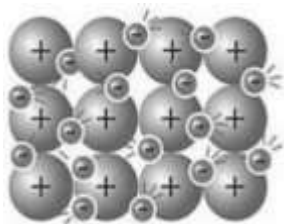


Рис. 1.12. Схематичне зображення металевого зв'язку

Зв'язок Ван-дер-Вальса, джерелом якого є поляризаційний ефект, що викликається впливом поля електронів, які рухаються навкруг ядра цього атома, на рух електронів навкруг ядра сусіднього атома.

Іонний зв'язок – результат електростатичного притягання різнойменно заряджених іонів. За досить тісного зближення електронні оболонки іонів стикаються.

Ковалентний зв'язок виникає за взаємодії групи електронів, які обертаються навкруг двох атомів металу й одночасно не зв'язані із жодним з них.

1.4.3. Будова сплавів на субмікро-, мікро- і макроскопічному рівнях

Будова реального сплаву відрізняється значною мірою від ідеальної кристалічної будови металів на всіх рівнях: субмікро-, мікро- і макроскопічному. Цьому сприяють багаточисленні фактори кристалізації сплавів, технологічної обробки металів (наприклад, зміцнення арматури), напруженого стану виробу (попередньо-напружена арматура в ЗБК) тощо.

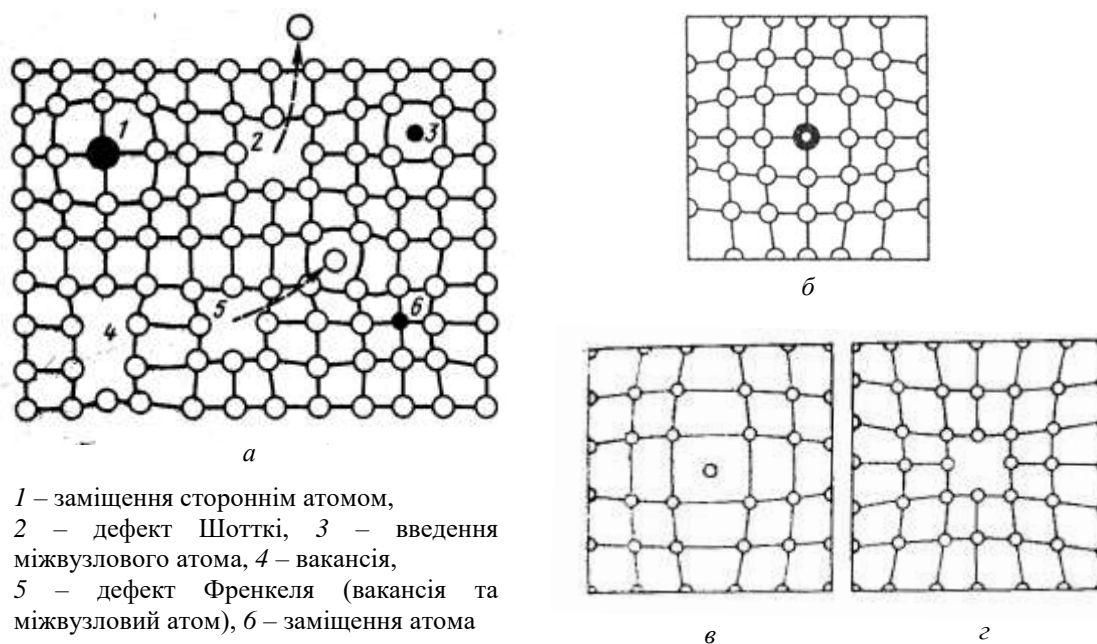
Субмікрокристалічна будова. На субмікрокристалічному рівні розглядають закономірності кристалічної будови сплаву в межах декількох параметрів решітки.

Внутрішнє напруження, міжатомні зв'язки, хімічні домішки, температура та тиск визначають енергетичний стан сплаву, а отже, і його будову. Усі ці фактори залежно від агрегатного стану сплаву можуть викривляти (спотворювати) елементарні комірки металу, призводячи їх до небездоганності. Причому небездоганність (тобто дефекти) реальної кристалічної решітки може бути значною.

Дефекти у структурі металу можуть бути *точковими, лінійними й об'ємними*.

Точкові дефекти викликають спотворення атомної ґратки металу до її періодів з появою атомів заміщення і вбудовування, вакантних місць у решітці й атомів у міжвузлях, кількість цих дефектів зростає з підвищенням температури.

Тобто точковими дефектами є (рис. 1.13): пусті вузли, або вакансії; міжвузлові атоми; сторонні атоми (кількість яких дуже велика навіть у технічно чистих металах; особливо багато таких атомів у сплавах).



1 – заміщення стороннім атомом,
2 – дефект Шотткі, 3 – введення міжвузлового атома, 4 – вакансія,
5 – дефект Френкеля (вакансія та міжвузловий атом), 6 – заміщення атома

Рис. 1.13. Точкові дефекти в кристалах:
а – схема точкових дефектів у кристалі; б – атоми вбудовування і заміщення;
в – атоми в міжвузлях; з – вакантні місця

Атоми заміщення і вбудовування виникають через різну щільності заповнення локальних об'ємів елементарної чарунки атомами різних елементів з неоднаковими атомними радіусами. Таке явище спостерігається за наявності різних домішок у металі (хром, кремній, марганець, вуглець у залізі; олово, алюміній, цинк у міді тощо): постійних, прихованих, випадкових і легуючих елементів.

Атоми в міжвузлях формуються в період вбудовування атомів домішок у решітку заліза або в період дифузії атомів заліза з решітки.

Вакантні місця в решітці утворюються в тому випадку, коли атом, долаючи енергію потенційного бар'єра, залишає своє місце у вузлі кристалічної решітки і переміщується в міжвузля.

Завдяки взаємодії один з одним атоми безперервно обмінюються кінетичною енергією: то віддають її сусідам, то отримують від них. Атоми, набуваючи підвищеної кінетичної енергії (через підвищення внутрішніх напружень, температури), отримують можливість долати міжатомні зв'язки й вириватися з вузлів решітки, залишаючи вільні (вакантні) місця, що призводить до появи дефектів структури.

Лінійні дефекти. Найважливішими лінійними дефектами є дислокації. **Дислокації** – лінійні дефекти, що викликають порушення ідеальної будови кристалічної решітки й характеризуються великою протяжністю в одному напрямі (на десятки і навіть тисячі її періодів) і малою в іншому. Дислокаційні види дефектів поділяють на *лінійні, гвинтові та часткові*.

Взаємодія дислокацій з іншими видами дефектів значною мірою визначає реологічні властивості матеріалу.

Лінійна дислокація (рис. 1.14) утворюється шляхом появи додаткової атомної площини (екстраплощини) у кристалі. Екстраплощина CC_1 викликає пружне викривлення площин NN_1 і BB_1 кристалічної решітки розміром 2–5 періодів під дією сили зрізу Q, Q_1 .

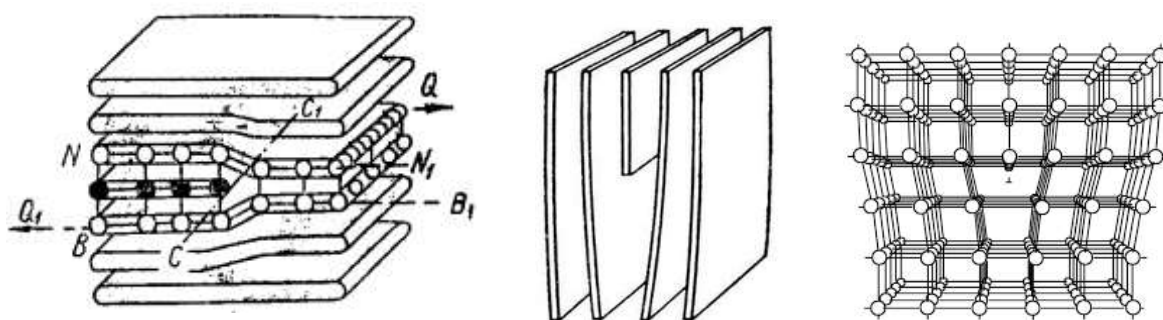


Рис. 1.14. Схема лінійної дислокації

Гвинтова дислокація (рис. 1.15) – це пряма лінія DD_1 , навкруг якої атомні площини L вигнуті по гвинтовій поверхні. Гвинтова дислокація може бути правою в разі обертання атомної поверхні за годинниковою стрілкою або лівою – з обертанням проти годинникової стрілки.

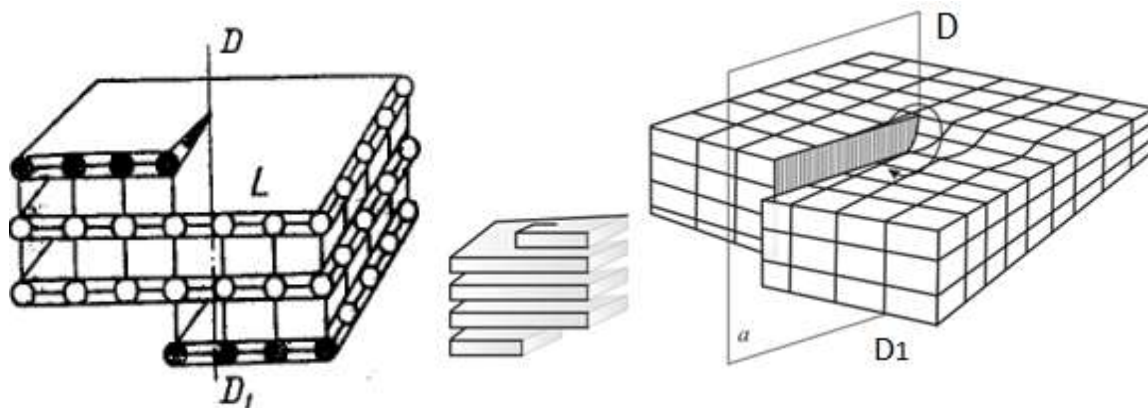


Рис. 1.15. Схема гвинтової дислокації

Крайова (часткова) дислокація утворюється в деяких ділянках кристалів у місцях щільно упакованої решітки, коли атоми одної площини не мають характерного протистояння до інших площин, а їх центри зміщені на півперіоду, тобто відбувається ніби зсув частини кристалічної решітки (по лінії AB).

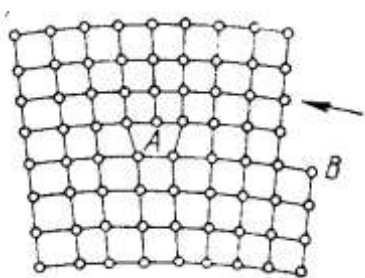


Рис. 1.16. Схема крайової дислокації

У металах є велика кількість дислокацій різних видів. Зокрема, щільність дислокацій у відпаленому металі становить 10^7 – 10^8 на 1 см^2 , а в деформованому – 10^{12} – 10^{13} . Унаслідок такого скопичення дислокацій і точкових дефектів у металі утворюється система дислокаційних гілок, що викликають значне викривлення (спотворення) кристалічної решітки металу на субмікроскопічному рівні.

Об'ємні дефекти викликають викривлення кристалічної решітки на десятки параметрів по довжині та ширині. Характерним об'ємним дефектом є локальне скопичення вакансій у колонії, які повністю порушують взаємозв'язок атомів, а отже, і решітки. Зазвичай із підвищенням

енергетичного стану системи (навантаження, температура) колонії вакансій є джерелом зародження мікротріщин.

Мікроскопічна будова. Під мікроскопічною будовою розглядають будову металу на рівні його зерен. Метали мають полікристалічну будову. **Зернами** називають кристали, що мають неправильну форму, різні розміри й різну орієнтацію у просторі. Структура самих зерен належить до субмікроскопічного рівня будови металу, а їх форма і взаємне розташування – до мікроскопічного рівня.

Розміри зерен можуть бути різними – від 10^{-4} до 1 см, а розорієнтування зерен стосовно один одного становлять десятки градусів (рис. 1.17, *а*). Зі свого боку, усередині зерен можуть бути ділянки, розорієнтовані на декілька градусів, що мають назву **фрагментів** (рис. 1.17, *б*). Розмір фрагментів зазвичай розміром 10^{-5} –1 см, розорієнтовані на кути в декілька хвилин (рис. 1.17, *в, г, д*). Такі ділянки називають блоками мозаїчної структури. За цих умов полігональна структура сталі має чисельні межі й розділи мозаїчних блоків, фрагментів і зерен, які мають великий вплив на розвиток непружних процесів у металі через наявність пустот, неметалевих включень, мікротріщин на межі розділів (рис. 1.17, *в*).

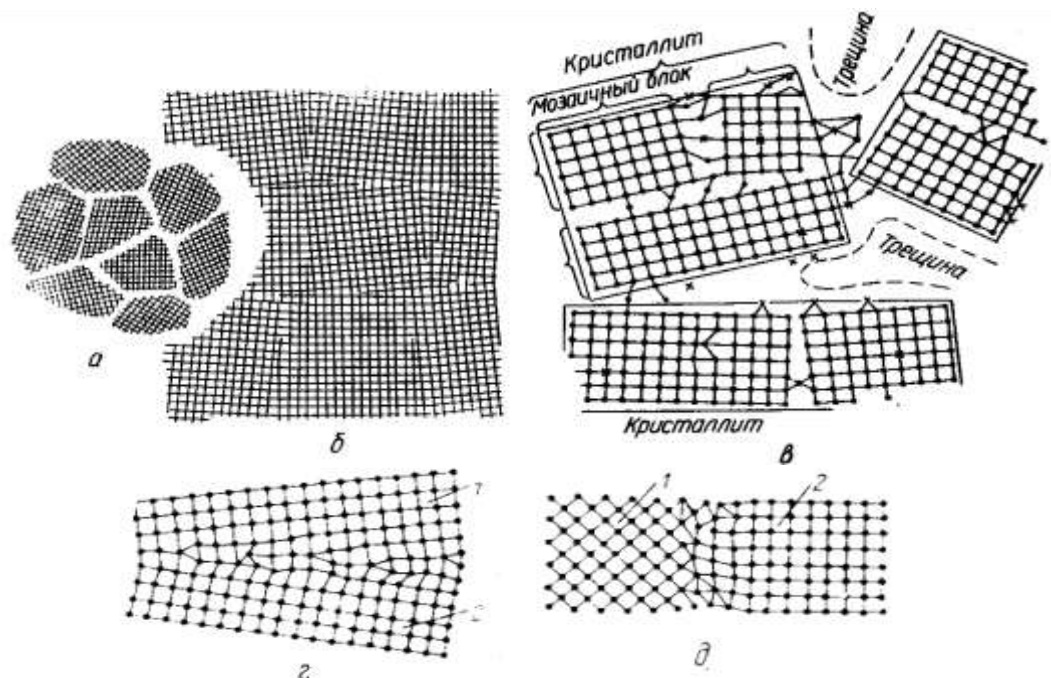


Рис. 1.17. Схеми будови металів:

а – полікристалічні зерна; *б* – фрагментація і блочність зерен; *в* – розділи зерен; *г* – ділянка межі субзерен або блоків; *д* – приклад різної орієнтації кристалевих ґраток зерен

Поверхневі дефекти спричинюються наявністю субзерен або блоків 1, 2 всередині кристала (рис. 1.17, *з*), а також різною орієнтацією кристалічних решіток зерен 1, 2 (рис. 1.17, *д*).

По межах зерен решітка одного кристала переходить у решітку іншого — тут порушено симетрію розташування атомів.

Макроскопічна будова. Під макроскопічною будовою розуміють *стан поверхні металевих виробів* (поверхня періодичного профілю арматури, швелерів, штаби, відливок тощо). На поверхнях арматури періодичного профілю, листової сталі прокату (кутиків, двотаврів та ін.) у процесі прокатування зароджуються і в деяких випадках розвиваються мікротріщини. Їх скопичення особливо спостерігається в місцях перетину ребер. Макроструктура прокату змінюється залежно від напрямку руху валків відносно оброблюваного металу і його деформацій (у разі поздовжнього, поперечного й поперечно-гвинтового прокатування). Усі види пластичної обробки металу (прокат, штампування) супроводжуються нерівномірною деформацією виробів по всім трьом вимірам, що призводить до локалізації макроструктури на незначних площах поверхні.

1.4.4. Анізотропність і спайність кристалів. Алотропія металів

Анізотропність кристалів. В окремих кристалах властивості різні в різних напрямках. Якщо взяти великий кристал (є лабораторні й виробничі методи вирощування крупних кристалів), вирізати з нього кілька однакових за розміром, але по-різному орієнтованих зразків і випробувати їх властивості, то іноді спостерігається дуже значна різниця у властивостях окремих зразків. Наприклад, під час випробування зразків, вирізаних із кристала міді, відносне видовження змінювалося в межах від 10 до 55 %, а межа міцності – від 14 до 35 кгс/мм² для різних зразків. Цю властивість кристалів називають **анізотропністю**. Анізотропність кристалів пояснюється особливостями розташування атомів у просторі.

Спайність кристалів. Наслідком анізотропності кристалів є спайність, яка виявляється під час руйнування. У місцях злому кристалів можна спостерігати правильні площини (рис. 1.18, *а*), які свідчать про зміщення частинок під впливом зовнішніх сил не безладно, а правильними рядами, у певному напрямку, відповідно до розташування частинок у кристалі. Ці площини називаються площинами спайності.

Аморфні тіла **ізотропні**, тобто всі ці властивості однакові у всіх напрямках. Злом аморфного тіла завжди має неправильну, викривлену, так звану раковисту поверхню (рис. 1.18, б).

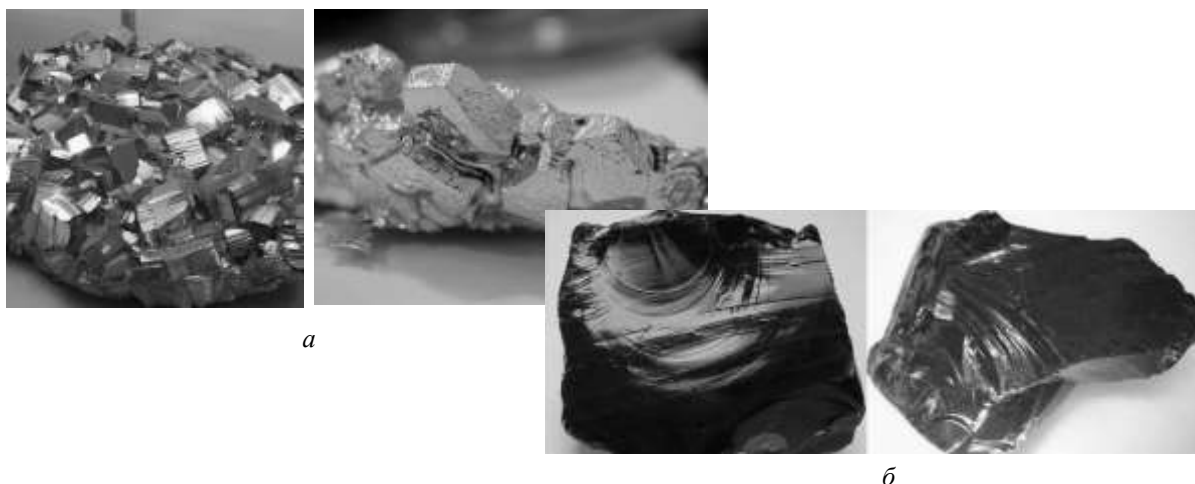


Рис. 1.18. Злам кристалічних (а) і аморфних тіл (б)

Метали, які затверділи у звичайних умовах, складаються не з одного кристалу, а з безлічі окремих кристалів, по-різному орієнтованих один до одного, тому властивості литого металу приблизно однакові в усіх напрямках; це явище називається **квазіізотропністю (уявною ізотропністю)**.

Алотропія металів (або поліморфізм) – це властивість перебудовувати решітку за певних температур у процесі нагрівання або охолодження. *Алотропія властива всім елементам, які змінюють валентність зі зміною температури*, наприклад залізу, марганцю, нікелю, олову та ін. Кожне алотропічне перетворення відбувається за певної температури. Наприклад, одне з перетворень заліза відбувається за температури 911 °С, нижче за яку атоми складають решітку центрованого куба (рис. 1.9), а вище – решітку гранецентрованого куба (рис. 1.10).

Структура, що має ту або іншу решітку, називається алотропічною формою, або модифікацією. Різні модифікації позначають грецькими буквами α , β , γ і т. д., причому буквою α позначають модифікацію, яка існує за температур нижчих за перше алотропічне перетворення. Алотропічні перетворення супроводжуються віддачею (зменшенням) або поглинанням (збільшенням) енергії.

1.4.5. Кристалізація металів. Кристалізація заліза

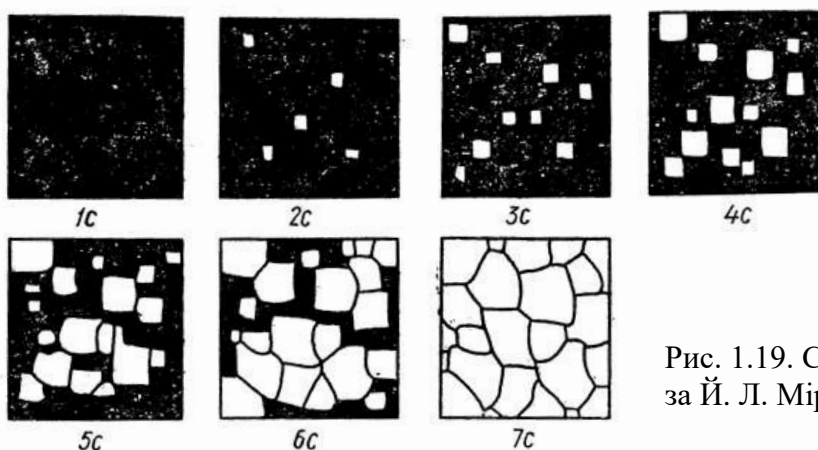
Кристалізація металів. Кристалізацією називається утворення кристалів у металах (і сплавах) під час переходу з рідкого стану в твердий (первинна кристалізація).

До вторинної кристалізації належить перетворення в затверділому металі під час його охолодження. А саме це перекристалізація з однієї модифікації в іншу (поліморфні перетворення), розпад твердих розчинів, розпад (а також утворення) хімічних сполук.

У разі охолодження розплаву металу, тобто під час переходу з рідкого стану в твердий, утворюється кристалічна ґратка (решітка), тобто відбувається кристалізація. Щоб розпочалася кристалізація, рідкий метал потрібно переохолодити до критичної точки (критичної температури), яка дещо нижча за температуру плавлення. Критичною точкою називається температура, яка відповідає будь-якому перетворенню в металі.

У деяких металів ступінь переохолодження (критична точка) може бути дуже значним (наприклад, у сурми до 40 °С), і за температури переохолодження відразу бурхливо розпочинається кристалізація.

Процес кристалізації відбувається таким чином (рис. 1.19): у розплаві (1с) виникають перші центри кристалізації (2с–4с), кількість яких збільшується під час охолодження металу або сплаву; у міру відводу тепла відбувається ріст кристалів правильної форми, але різної орієнтації, доти, доки вони не розпочнуть зростатися (5с, 6с); у цей період форма зерен видозмінюється, метал повністю кристалізується (7с).



Отже, процес кристалізації складається з двох етапів: утворення центрів кристалізації і кристалів.

Центрами кристалізації здебільшого є частинки нерозчинних домішок (наприклад, окисли алюмінію, нітриди, сульфіді). Чим більше таких центрів, тим дрібнішими є зерна закристалізованого металу, тим швидше протікає процес кристалізації. Тому в рідкий метал додають речовини, що називають **модифікаторами**, які сприяють росту зерна (тугоплавкі дрібні частинки) або уповільнюють його ріст (поверхнево-активні речовини, які осаджуються на поверхні кристалів, що ростуть).

У кожного з кристалів, які виникають, кристалографічні площини орієнтовані випадково. Крім того, за первинної кристалізації кристали можуть повертатися, тому що вони оточені рідиною. Суміжні кристали ростуть назустріч один одному, і точки їх зіткнення визначають межі кристалів (зерен).

Вважається, що найкращий ріст зерен відбувається по межах лінійних дефектів (дислокацій). Наприклад, за наявності гвинтової дислокації, що виходить на поверхню кристалів, ріст зерен відбувається по гвинтовій поверхні, що має виступаючі частинки (сходинки).

Первинні кристали в рідкому металі мають форму дерева, тому їх називають **дендритами** (рис. 1.20 і 1.21). Така форма кристалів пояснюється умовами, які не обмежують їх ріст; притім атоми приєднуються до грані кристала в напрямку максимальної сили зв'язку. Спочатку утворюється кристал по головній осі (вісь k), до якого під певними кутами починають прирощуватися кристали по осях другого порядку (вісь m), третього порядку (вісь n) і т. д.

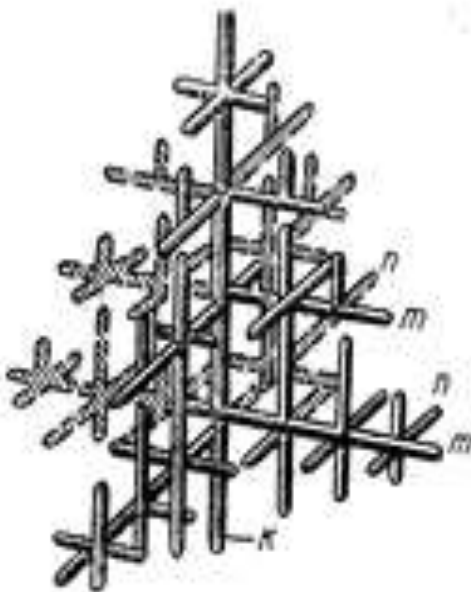


Рис. 1.20. Дендрит за Д. К. Черновим

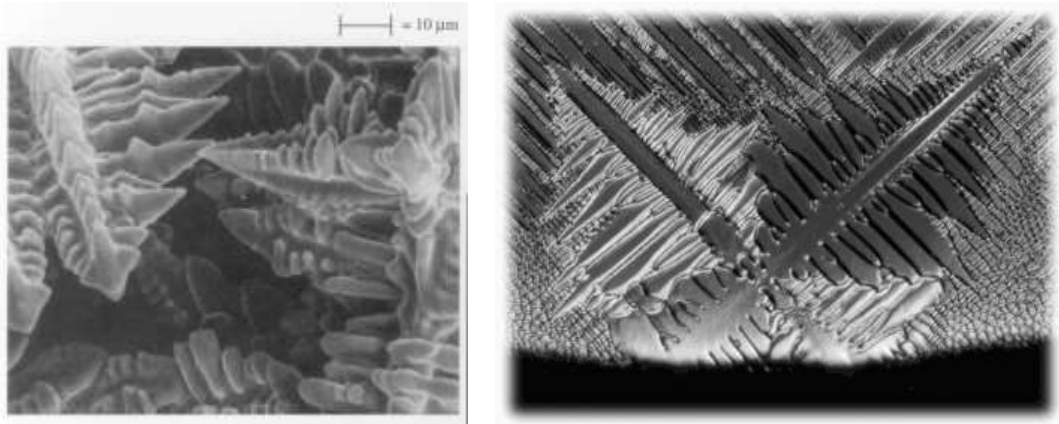


Рис. 1.21. Фотографії дендритів, отриманих на модельних сплавах

Кристалізація заліза. Криві охолодження й нагріву чистого заліза наведено на рис. 1.22.

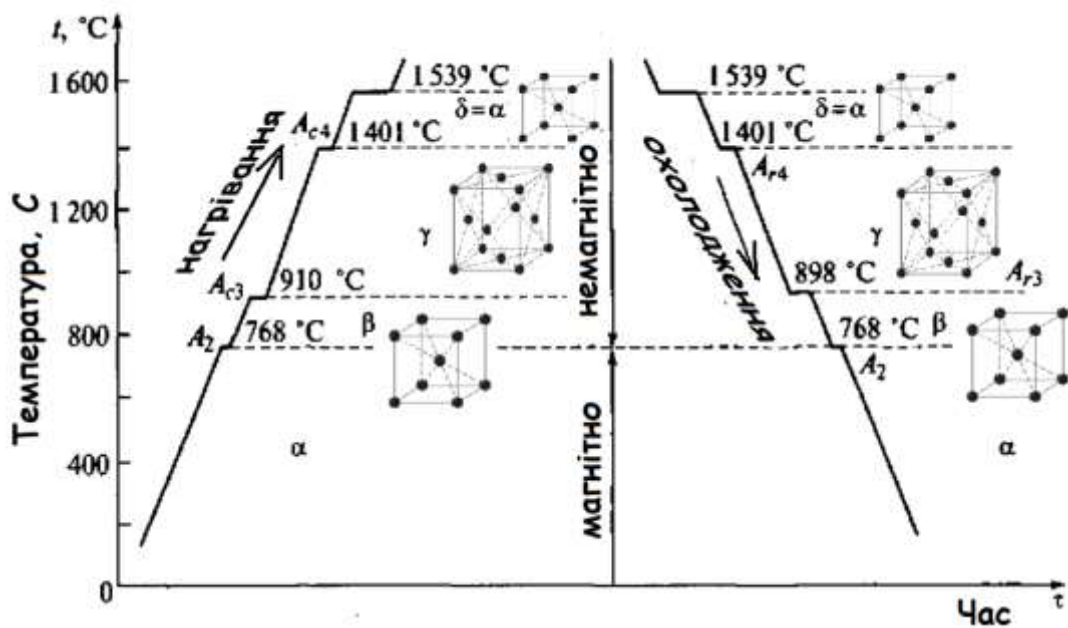


Рис. 1.22. Криві охолодження й нагріву чистого заліза

Рівноважна температура плавлення й затвердіння чистого заліза становить 1539 °C. Наявність критичних точок за менших температур свідчить про алотропічні перетворення у твердому залізі.

Критичні точки перетворень заліза позначають літерою А, індекси 2, 3 і 4 призначені для того, щоб відрізнити алотропічні перетворення одне від одного (індекс 1 означає перетворення на діаграмі стану Fe – Fe₃C). У разі нагрівання приписують букву *c*, охолодження – букву *r*, тому що внаслідок

гістерезису температури перетворень під час нагрівання вищі, а під час охолодження нижчі за рівноважні.

За температури менш як 768 °С залізо феромагнітне.

У разі нагрівання в точці A_{c2} , яка називається точкою Кюрі, залізо стає парамагнітним; *за сучасними уявленнями магнітне перетворення пов'язане зі змінами на зовнішніх електронних оболонках атомів.*

На кривій в точці A_2 є перегин, але решітка не змінюється (магнітне перетворення не має гістерезису: $A_{c2} = A_{r2}$) і залізо до точки A_{c3} має кристалічну ґратку центрованого куба; цю модифікацію називають α -залізо.

Парамагнітну частину цієї модифікації (між точками A_2 і A_{c3}) називають β -залізо.

У точці A_{c3} α -залізо переходить в γ -залізо з кристалічною ґраткою гранецентрованого куба.

У точці A_{c4} γ -залізо переходить в δ -залізо, притім кристалічна решітка знову перебудовується з гранецентрованого куба в центрований куб, тому δ -залізо називають також високотемпературною модифікацією α -заліза. A_{c4} , A_{r4} – перехід аустеніту у δ -ферит під час нагрівання й охолодження відповідно.

У разі охолодження алотропічні перетворення відбуваються в зворотній послідовності.

З перелічених перетворень найбільше практичне значення мають перетворення в точці L_3 як під час нагрівання (A_{c3}), так і під час охолодження (A_{r3}). A_{c3} , A_{r3} – поліморфне перетворення фериту в аустеніт у разі нагрівання й охолодження відповідно.

Перетворення в точці A_3 супроводжується зміною об'єму. Оскільки щільність кристалічної решітки γ -заліза більша за щільність решітки α -заліза, у точці A_{c3} об'єм зменшується, у точці A_{r3} – збільшується.

γ -залізо здатне розчинити до 2,14 % вуглецю за температури 1147 °С, α -залізо – до 0,02 % за 723 °С і тільки 0,006 % за 0 °С. Властивість заліза розчиняти значну кількість вуглецю використовують для термічної і хіміко-термічної обробки.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. Дати визначення поняття «метали».
2. Дати визначення поняття «металевий сплав».
3. Які типи кристалічних ґраток вам відомі?

4. Що показує мікроскопічна та макроскопічна будова металів і сплавів?
5. Розкрийте поняття «субмікрокристалічна будова сплавів».
6. Назвіть відомі вам види дефектів у структурі сплавів.
7. Що таке дислокації? Які дислокації ви знаєте?
8. Розкрийте поняття «кристалізація металів».
9. Розкрийте поняття «алотропія металів».
10. Дати визначення поняття «анізотропність».
11. Назвіть особливості кристалізації заліза.

ЛЕКЦІЯ 2

Залізовуглецеві сплави: класифікація, характеристика, структура

- 2.1. Залізо.
- 2.2. Чавун і феросплави.
- 2.3. Сталь.

2.1. Залізо

Дуже чисте й надчисте залізо в промисловості знаходить застосування, особливо в електротехніці, де використовуються його магнітні властивості, та у виробництві особливо якісних сплавів.

Найбільш широкого вжитку набули сплави заліза. Навіть *технічне залізо* – це є сплав зі вмістом вуглецю до 0,02 % .

Розчинність вуглецю в залізі змінна, зі зниженням температури розчинність вуглецю в залізі знижується. За температури 727 °С у залізі розчиняється 0,02 % вуглецю, а за кімнатної температури – 0,006 %. У зв'язку з цим сплави заліза зі вмістом вуглецю до 0,006 % мають структуру лише фериту, тобто твердого розчину вуглецю в залізі (рис. 2.1).

У сплавах зі вмістом вуглецю від 0,006 до 0,02 % у зв'язку зі зниженням розчинності вуглецю в залізі зі зниженням температури з фериту виділяється цементит, званий третинним. За кімнатної температури

структура таких сплавів складається з фериту та третинного цементиту, який розташовується по межах зерен фериту.

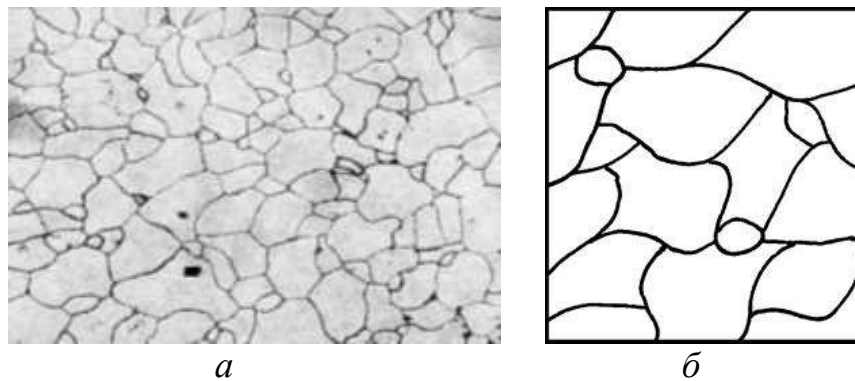


Рис. 2.1. Мікροструктура технічного заліза (вуглецю до 0,006 %):
a – мікροструктура; *б* – схема мікροструктури

Максимальна кількість третинного цементиту становить приблизно 0,3 %. Проте навіть така мала кількість цементиту третинного надає низьковуглецевій сталі низькі пластичні властивості, тобто призводить до збільшення крихкості (через розташування навколо зерен фериту крихких оболонок).

Для усунення цього явища здійснюється спеціальна термічна обробка, унаслідок якої третинний цементит виділяється у вигляді дисперсних частинок, рівномірно розподілених по всьому зерну.

Чавун і сталь є сплавами заліза з вуглецем, а також марганцем, кремнієм, фосфором і сіркою. Леговані чавун і сталь можуть містити, крім вищеназваних, ще й інші компоненти. Елементом, що найбільше впливає на властивості чорних металів, є вуглець, і залежно від його вмісту ці метали поділяють на сталь і чавун.

2.2. Чавун і феросплави

Чавуном називають залізовуглецевий сплав, який містить більш як 2,14 % вуглецю (2–4,5 %), до 4 % кремнію, до 2 % марганцю й інші елементи.

Чавун відрізняється від сталі за складом, тобто має більш високий уміст вуглецю й інші технологічні властивості.

Чавун завдяки високому вмісту вуглецю має кращі ливарні якості й характеризується малою здібністю до пластичної деформації (за звичайних умов не піддається куванню).

Залежно від стану вуглецю в чавуні розрізняють:

- білий чавун;
- сірий чавун;
- високоміцний чавун;
- ковкий чавун.

У *білому чавуні* весь вуглець перебуває у зв'язаному стані із залізом у формі цементиту або карбиду заліза Fe_3C , що й визначає білий колір злому.

Білий чавун залежно від умісту вуглецю поділяється на доевтектичний (від 2,14 до 4,3 % C), евтектичний (4,3 % C) і заевтектичний (від 4,3 до 6,67 % C).

У всіх білих чавунах є ледебурит – це евтектична суміш аустеніту й цементиту, що утворюється під час кристалізації рідкого сплаву з концентрацією вуглецю в рідині 4,3 %.

Мікроструктура евтектичного білого чавуну складається лише з одного ледебуриту (рис. 2.2). За температури $727^\circ C$ аустеніт перетворюється на перліт. Отже, після повного охолодження ледебурит складається з цементиту та перліту. Властивості цього чавуну переважно визначаються властивостями цементиту, який пронизує евтектичну колонію. У зв'язку з цим ледебурит відрізняється, подібно до цементиту, більшою твердістю і крихкістю, не кується і не прокочується ні в холодному, ні в гарячому стані.

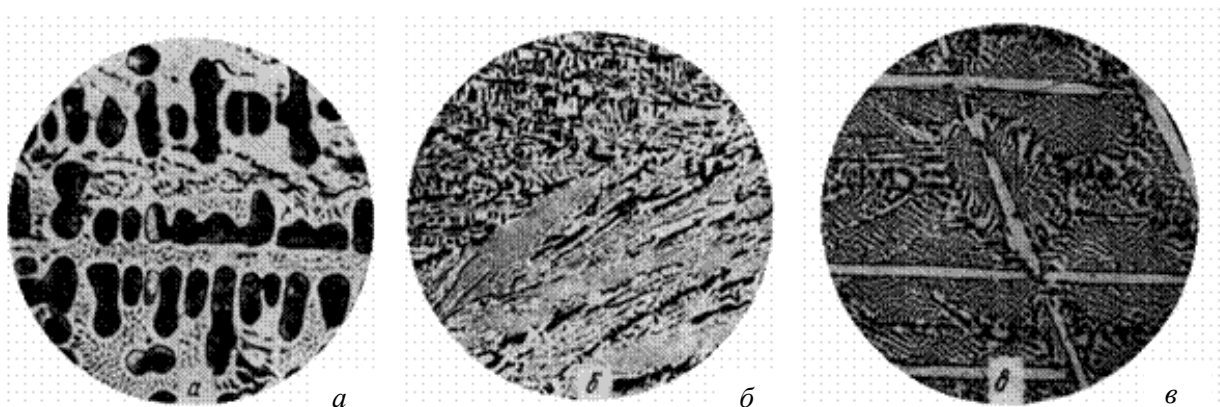


Рис. 2.2. Мікроструктура білого чавуну (x 100):
а – доевтектичного, б – евтектичного, в – заевтектичного

Мікроструктура доевтектичного білого чавуну після повної кристалізації ($T = 1147^\circ C$) має структуру: ледебурит – аустеніт – цементит

вторинний. Вторинний цементит виділяється з аустеніту, що містить за $T = 1147\text{ }^{\circ}\text{C}$ 2,14 % С, а за $T = 727\text{ }^{\circ}\text{C}$ 0,8 % С. Після повного охолодження сплаву структура складається з надлишкового перліту (колишнього аустеніту), ледебуриту перетвореного (перліт + цементит) і цементиту вторинного.

Для мікроструктури білого заевтектичного чавуну характерні надлишкові кристали цементиту (білі пластини) і перетворений ледебурит, що складається з темних ділянок перліту та світлої основи цементиту.

Зварювання білого чавуну утруднене в зв'язку з утворенням тріщин під час нагрівання й охолодження. Основну масу його використовують для переробки на сталь.

Обмежено застосовують відливки з відбіленим поверхневим шаром, наприклад прокатні валки, колеса залізничних вагонів, шари млинів та інші деталі, що працюють у важких умовах зносу (Fe_3C дуже твердий і зносостійкий).

У мікроструктурі сірого, високоміцного й ковкого чавунів розрізняють металеву основу та графітові включення.

За будовою металевої основи чавуни поділяють на перлітні, феритно-перлітні та феритні чавуни (рис. 2.3)

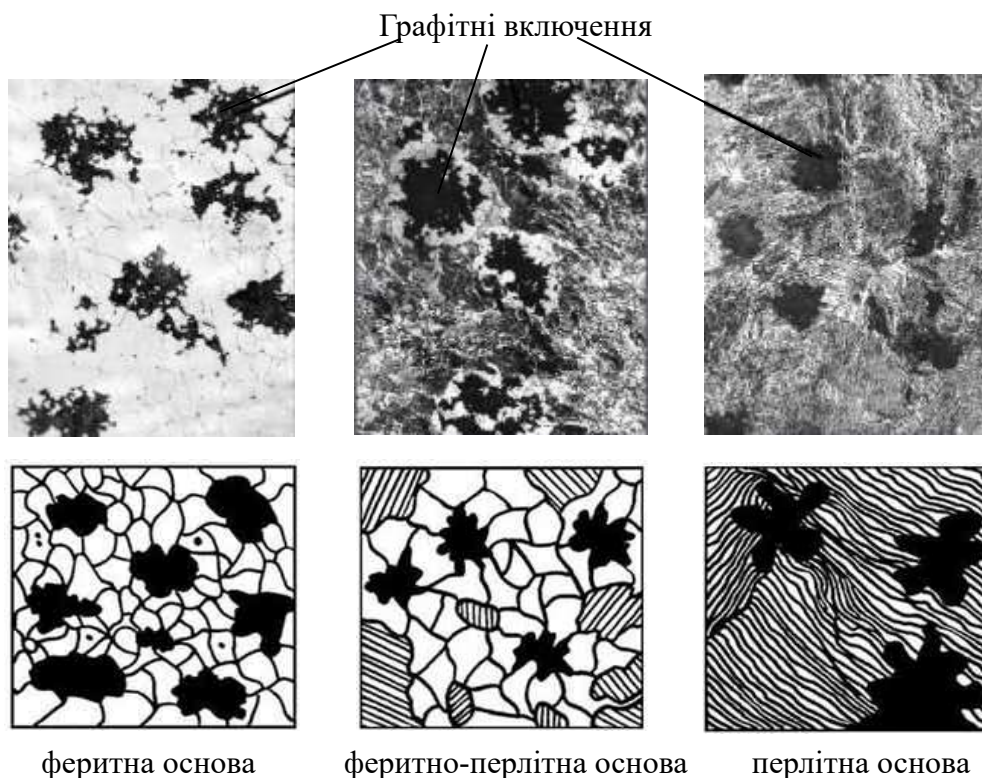


Рис. 2.3. Загальний вигляд і схематичне зображення матриць у сірих, ковких і високоміцних чавунах

Чавуни (за винятком білого) відрізняються від сталі наявністю у структурі графітових включень, а між собою чавуни різняться формою цих графітових включень. Тобто весь вуглець чи його більша частина перебуває у вільному стані у вигляді графіту.

Графіт – це поліморфна модифікація вуглецю. Процес утворення графіту у сплавах заліза з вуглецем називається графітизацією. На процеси графітизації чавунів великий вплив вчиняє хімічний склад чавуну й насамперед сумарний уміст вуглецю та кремнію. Зі збільшенням останніх складність до графітизації збільшується. Алюміній, кальцій також є графітизаторами. Швидкість охолодження також істотно впливає на ступінь графітизації: збільшення швидкості охолодження гальмує графітизацію, тобто призводить до вибілювання чавуну.

Графітна фаза в чавунах може мати різну структурну форму, розрізняють такі форми:

- у вигляді тонких пластинок або пелюсток (рис. 2.4, *a*);
- у вигляді компактних утворень неправильної форми або пластівців (рис. 2.4, *б*);
- сфероїдальної форми або шароподібної (рис. 2.4, *в*).

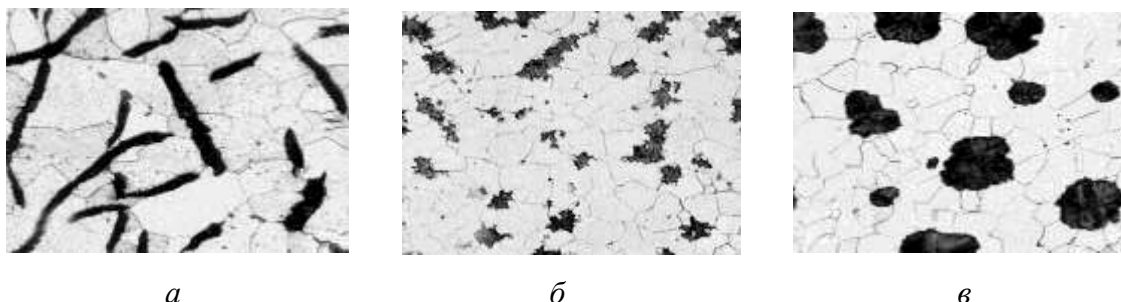


Рис. 2.4. Форми графітних включень (наведені у феритній матриці)

Графітні включення можна розглядати як порожнини відповідної форми у структурі чавуну. Навколо таких дефектів під навантаженням концентруються напруження, значення яких тим більші, чим гостріший дефект.

Тобто графітні включення пластинчастої форми максимальною мірою розміцнюють метал.

Більш сприятлива пластівцеподібна форма, а оптимальною є шароподібна форма графітових включень.

Округлі включення шароподібного графіту не створюють різкої концентрації напружень, такі включення не є «тріщинками». Чавун із шароподібним графітом має значно вищу міцність на розтяг і вигин.

Пластичність також залежить від форми графітних включень. Наявність графіту дуже різко знижує опір у разі жорстких способів навантаження: удар; розрив. Опір стиску знижується мало.

Сірий чавун. Чавун із графітними включеннями у вигляді тонких пластинок або пелюсток називається сірим.

У сірому чавуні злом має сірий або темно-сірий колір.

Сірий чавун використовують виключно як ливарний, характерним для нього є підвищений уміст кремнію і знижений уміст сірки. Цей чавун під час розливання добре заповнює форми; заготовки добре оброблюються різальними інструментами.

Структуру сірих чавунів і схеми їх зображення наведено на рис. 2.5.

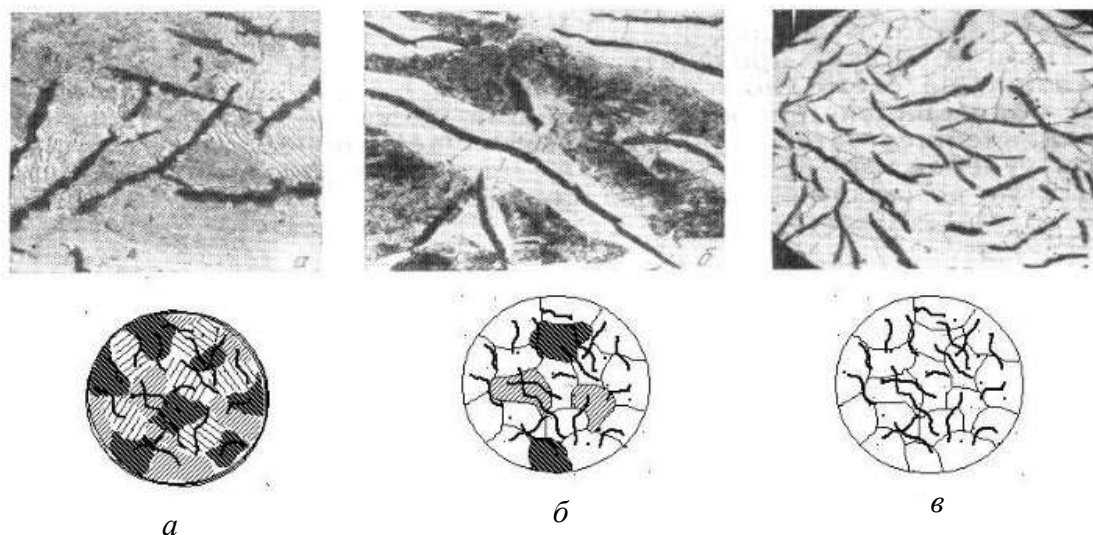


Рис. 2.5. Структура і схематичне зображення сірих чавунів:

a – перлітний чавун (x200); *б* – феритно-перлітний чавун (x100); *в* – феритний чавун (x100)

Ковкий чавун. Чавун із графітними включеннями у вигляді компактних утворень неправильної форми або пластівців називають ковким.

Ковкий чавун отримують із білого чавуну.

Суть технологічного процесу полягає в тому, що відливки зі структурою білого чавуну піддають тривалому (30–40 годин) відпалу – томленню за температури 950–1050 °С. За цієї температури цементит, що є

у структурі, розпадається за реакцією $Fe_3C = Fe + C$ (графіт). У силу особливостей процесу утворення графіту з твердої фази він набуває форми компактних новоутворень неправильної форми, що є характерною ознакою ковкого чавуну. Якщо дивитися під мікроскопом мікрошліф (рис. 2.6) ковкого чавуну, добре видно включення пластівцевого графіту (вуглецю відпалу).

Металева основа ковкого чавуну також подібна до мікроструктури сталі. За будовою металевої основи ковкі чавуни поділяють на такі: ковкий перлітний, ковкий феритно-перлітний і ковкий феритний чавун.

Ковкий чавун із пластівцеподібним графітом займає проміжне положення за міцністю між звичайним сірим і високоміцним чавунами.

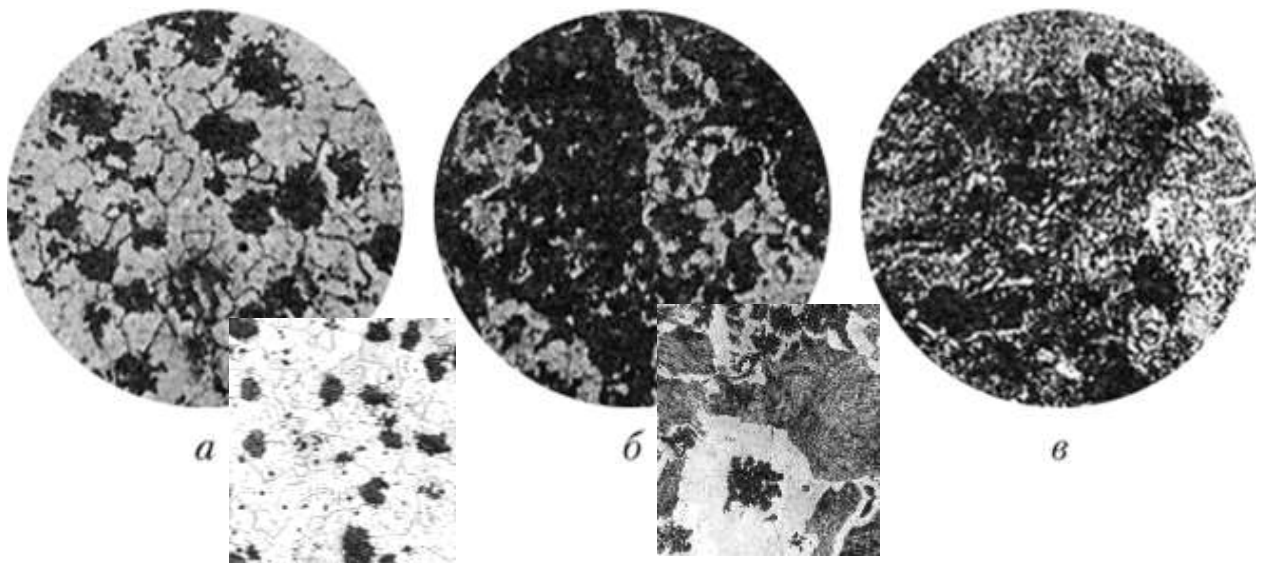


Рис. 2.6. Мікроструктури ковких чавунів (X200):

a – феритний ковкий чавун; *б* – феритно-перлітний ковкий чавун; *в* – перлітний ковкий чавун

Високоміцний чавун. Чавун із графітними включеннями сфероїдальної форми або кулеподібної називається високоміцним.

Високоміцний чавун отримують під час плавлення шляхом модифікації сплаву магнієм або церієм у кількості 0,1–0,2 % від ваги рідкого чавуну. Магній або церій впливає на процес графітизації, на кристалізацію графіту. Адсорбуючись на поверхні включень графіту, ці елементи сприяють утворенню включень графіту за формами, наближеними до форми кулі (рис. 2.7).

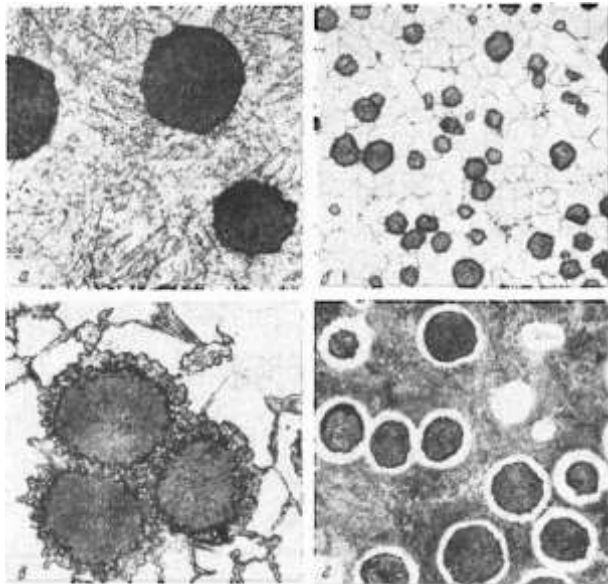


Рис. 2.7. Структура високоміцних чавунів

Округлі включення кулястого графіту не створюють різкої концентрації напруги, такі включення не є «тріщинками» (як пластинчастий графіт у сірому чавуні). Чавун із кулястим графітом має значно більшу міцність на розтяг і згин, ніж сірий чавун (звідси і назва чавуну з кулястим графітом – високоміцний чавун).

За металевою основою високоміцні чавуни можуть бути феритними, феритно-перлітними, перлітними, тобто в цьому сенсі різниці у структурі сірого, ковкого й високоміцного чавунів немає.

Розрізняють також половинчастий чавун. У половинчастому чавуні частина вуглецю перебуває у формі графіту, а частина – у формі цементиту (рис. 2.8).

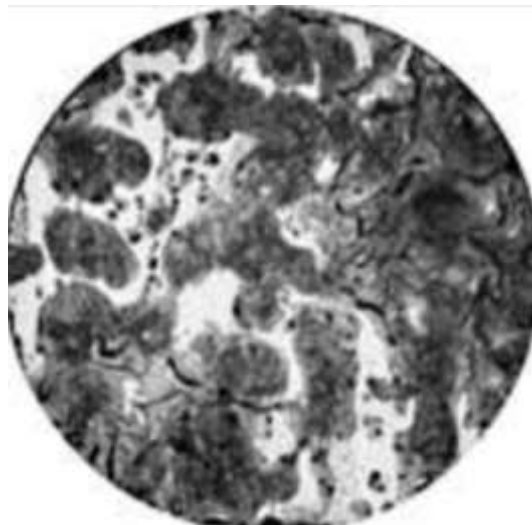


Рис. 2.8. Структура половинчастого чавуну

За механічними властивостями чавуни поділяють на:

- рядовий;
- підвищеної міцності;
- високоміцний.

Рядовий чавун (сірий) має межу міцності на розтяг 120–440 МПа, а межа міцності на вигин становить 280–640 МПа. Сірий чавун маркують літерами СЧ, далі слідує цифри межі міцності на розтяг і межі міцності на вигин. Наприклад: СЧ 12-28; СЧ 21-40, СЧ 44-64.

Чавун підвищеної міцності (ковкий чавун) має межу міцності на розтяг 370–630 МПа, відносне подовження – від 12 до 2 % і твердість – від 163 до 269 одиниць НВ (за Брунелем). Маркується літерами КЧ, далі йдуть цифри, що характеризують його міцність на розтяг і відносне подовження. Наприклад: КЧ 37-12, КЧ 30-6, КЧ50-4, КЧ63-2 і т. д.

Високоміцний чавун має межу міцності на розтяг 380–1200 МПа, межу міцності на вигин розтягу 240–900 МПа, відносне подовження – 17–4 %, твердість – від 140 до 370 НВ. Маркують високоміцний чавун літерами ВЧ, цифрами, які характеризують його міцність на розтяг і відносне подовження. Наприклад: ВЧ 38-17, ВЧ 45-5, ВЧ 120-4.

За призначенням чавуни поділяються на:

- переробні, що йдуть у переплавку на сталі;
- ливарні, які застосовують для виробництва фасонного литва.

Також виділяють групу феросплавів.

80 % виплавленого чавуну становить переробний чавун, 15–20 % – ливарний і 1–2 % – феросплави.

Чавуни переробні (за ДСТУ 3133-95 (ГОСТ 805-95, ІДТ) випускають трьох видів:

- переробний коксовий марок М1, М2, М3, Б1, Б2;
- переробний коксовий фосфористий марок МФ1, МФ2, МФ3;
- переробний коксовий високоякісний марок ПВК1, ПВК2, ПВК3 зі зниженим вмістом сірки та фосфору.

Марки меншого номера містять більше кремнію (наприклад, чавун марки М1 містить 0,91–1,30 % Si, чавун марки М3 – 0,50 % Si). За вмістом марганцю чавун поділяють на групи, фосфору – на класи, сірки – на категорії.

Чавуни ливарні коксові (за ДСТУ 3132-95 (ГОСТ 4832-95, ІДТ) випускають семи марок – ЛК1, ЛК2, ЛК3, ЛК4, ЛК5, ЛК6, ЛК7.

Марки меншого номера містять менше вуглецю і більше кремнію, (наприклад: ЛК1 містить 3,5–4,0 % С, 3,21–3,6 % Si); марки більшого номера, навпаки, містять більше вуглецю і менше кремнію (ЛК7 – 4,1–4,6 % С, 0,81–1,2 % Si).

Феросплави – ще один вид залізовуглецевих сплавів. Феросплав – це матеріал, потрібний для металургійної промисловості, що використовується з метою легування, розкислення, рафінування чорних і кольорових металів.

В основу феросплаву покладено сплав заліза (Fe, ферум) з домішками (марганець, калій, молібден, кремній та ін.), при цьому вміст домішок підвищений (більш як 10 %). Феросплави можуть містити один або кілька елементів. Розрізняють феросиліцій (до 2,5 % С, до 90 % Si), ферохром (до 8 % С, до 65 % Cr) феромарганець та інші (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Види феросплавів

Феросплав – добавка (домішка) в метал, що вводиться для зміни властивостей кінцевого продукту. Корегування якості сталі дає змогу покращити механічні показники, стійкість до перепадів температури або агресивного навколишнього середовища. Кінцеві властивості матеріалу залежатимуть від складу, який було введено в період виплавляння металу.

Виробництво феросплавів здійснюється в спеціальних агрегатах.

У чорній металургії феросплави використовують для легування, що дає змогу отримати понад 2,5 тисячі марок різних сталей. Покращені види сталі використовують у гірничій, металургійній, хімічній, будівельній, оборонній промисловості й інших галузях виробництва.

2.3. Сталь

Сталь – це сплав заліза з вуглецем, що містить менш як 2,14 % вуглецю і постійні домішки: до 0,8 % марганцю, до 0,5 % кремнію, до 0,07 % фосфору, до 0,06 % сірки.

Для покращення сталі до її складу вводять хром, нікель, мідь та інші елементи.

Розрізняють вуглецеві й леговані сталі.

Вуглецевими називають сталі, у яких, крім заліза і вуглецю, містяться постійні домішки, уміст яких переважно не перевищує одного відсотка:

- які є наслідками особливостей металургійного виробництва (магній, силіцій);
- які є наслідком неможливості їх повного видалення (сірка, фосфор, кисень, водень, азот);
- випадкові (хром, нікель, мідь і інші).

Залежно від умісту вуглецю (С) сталь поділяють на три групи:

- низьковуглецева – $C < 0,24 \%$;
- середньовуглецева – C від 0,25 до 0,6 %;
- високовуглецева – C від 0,6 до 2 %.

Легованими називають сталі, у яких, крім постійних домішок, містяться і спеціально введені леговані елементи: марганець, кремній, хром, цирконій, ванадій, нікель, вольфрам, ніобій, титан, кобальт, сполуки азоту й інші; іноді вводять до 5–6 різних матеріалів.

Введення легуючих домішок покращує деякі властивості сталі, забезпечуючи з високою міцністю поліпшення зварюваності, морозостійкості та пластичності.

Леговані сталі за сумарною кількістю легуючих добавок, що вміщуються в них, поділяють на 3 групи:

- низьколеговані (до 2,5 %);
- середньолеговані (від 2,5 до 10 %);
- високолеговані (понад 10 %).

Більшість легованих сталей набувають відповідних фізико-механічних властивостей тільки після термічної обробки.

Вплив добавок на властивості сталі. Крім вуглецю, у сталі завжди присутні кремній, марганець, сірка і фосфор, які по-різному впливають на властивості сталі.

Вуглець є основним компонентом, і залежно від його вмісту сильно змінюються механічні властивості сталі.

Зі збільшенням вуглецю:

– підвищується її твердість, межа міцності на розтяг і межа пружності,

– одночасно різко знижуються пластичність і в'язкість.

Ці зміни властивостей сталі пов'язані зі зміною кількості основних структурних складових – фериту та цементиту.

Кремній і марганець у зазначених межах (до 0,8 % марганцю, до 0,5 % кремнію) істотного впливу на властивості сталі не вчиняють.

Зі збільшенням їх вмісту (кремнію понад 0,8 %, марганцю – 1,0 %) підвищуються твердість і міцність сталі. Проте така сталь уже вважається легованою.

Марганець і кремній є добрими розкислювачами сталі; крім того, марганець знешкоджує вплив сірки, утворюючи з нею сполуку MnS, яка частково виділяється в шлак.

Сірка є шкідливою домішкою, вона не розчиняється в залізі, як інші домішки, а утворює з ним хімічну сполуку FeS (сірчисте залізо). Сірчисте залізо із залізом утворює легкоплавку суміш двох фаз FeS – Fe з температурою плавлення 985 °С. У разі затвердіння сталі ця суміш фаз розміщується у вигляді легкоплавких оболонок навколо зерен. Наявність таких оболонок є причиною червоноламкості (крихкості за червоного розжарювання) сталі з підвищеним вмістом сірки під час гарячої обробки (кування, прокатування тощо): оболонки розплавлюються, унаслідок чого між зернами втрачається зв'язок і утворюються тріщини.

Сірка знижує пластичність і міцність сталі, опір стиранню та корозійну стійкість.

Фосфор надає сталі холодоламкості (крихкості за звичайної і зниженої температури).

Його присутність збільшує інтервал температури між початком і кінцем затвердіння (переходом від рідкого до твердого стану (точками ліквідусу й солідусу) і сприяє зростанню зерна в металі.

Шкідливий вплив фосфору особливо проявляється в разі підвищеного вмісту вуглецю. Отже, чим твердіша сталь, тим шкідливіший для неї фосфор.

Проте в так званих автоматних сталях (зі вмістом вуглецю до 0,3 %) допускається підвищений вміст фосфору (до 0,15 %) і сірки (до 0,2 %), щоб

полегшити зняття стружки та виготовлення гладенької поверхні з обточуванням на верстатах, зокрема для нарізування різьби.

Вуглецеві сталі розрізняють за вмістом шкідливих домішок сірки (S) та фосфору (P), тобто поділяють *за якістю* на три групи:

- звичайної якості – $S \leq 0,05 \%$, $P \leq 0,04 \%$;
- якісні – $S \leq 0,04 \%$, $P \leq 0,035 \dots 0,04 \%$;
- високоякісні – $S \leq 0,02 \%$, $P \leq 0,03 \%$.

Відокремлюють групу особливо високоякісних сталей, що містять фосфору – до 0,025 %, сірки – до 0,015 %.

Виплавляння сталі на металургійних заводах здійснюється в печах трьох типів: мартенівських, конверторних і електросталеплавильних. І відповідно до способу виробництва сталі поділяють на:

- мартенівські;
- конверторні;
- електроплавильні.

Найбільш продуктивною технологією є виплавляння сталі в киснево-конверторних печах. Конверторна сталь характеризується низьким умістом фосфору, сірки й азоту. Її міцнісні характеристики не поступаються властивостям мартенівської сталі, а пластичні перевищують їх. Водночас ця технологія має ряд обмежень за сортаментом сталі, що випускається, і умовами виробництва. Тому на малих металургійних підприємствах, а також там, де потрібно забезпечити виготовлення широкої номенклатури сталей, використовують електросталеплавильні й мартенівські печі.

Після виплавляння сталь розливають у чавунні форми-ізложниці. Залежно від об'єму ізложниць маса злитка, що отримують, коливається від 250 кг до 7–8 т.

У разі стикання зі стінками і дном ізложниці рідка сталь починає тверднути в напрямку від поверхні злитка до його серцевини, причому зона рідкого металу поступово витісняється до середини і вгору (рис. 2.10). Разом із нею відтісняються до центру і вгору газові та неметалеві включення.

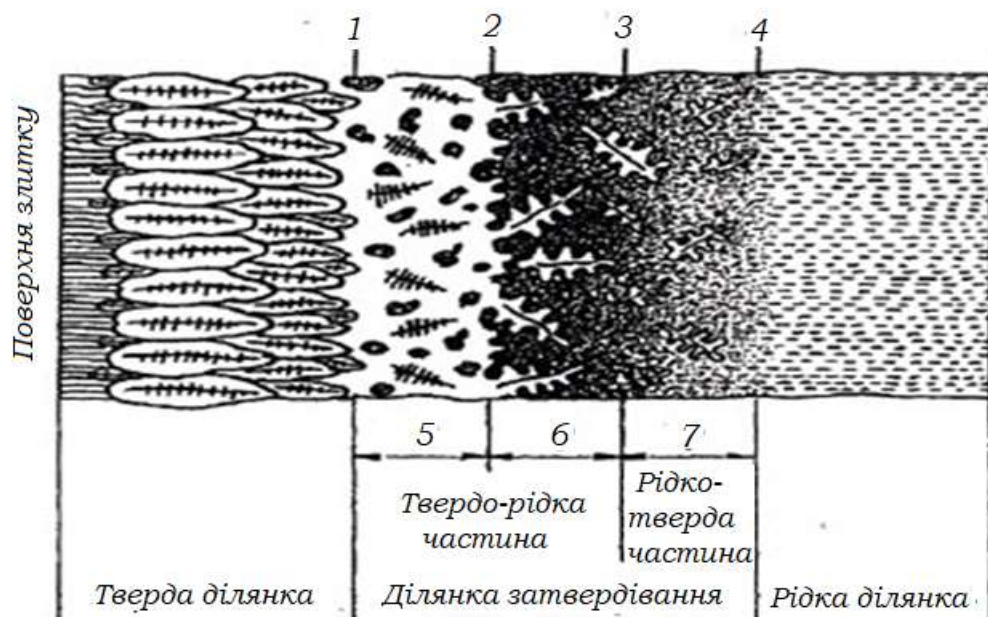


Рис. 2.10. Загальна схема областей і зон у злитка, що твердне (схема передбачає послідовну кристалізацію металу в умовах спрямованого тепловиділення)

Процес кристалізації злитка протікає за такою схемою (рис. 2.11):

- у зоні більшого переохолодження розплаву (зона його дотику з холодними стінками ізложниці) утворюються дрібні різновісні кристали 1;
- після зниження перепаду температур розплаву й ізложниці починають рости стовбчасті кристали 2 в напрямку відводу тепла від рідкого металу;
- уповільнена віддача тепла зовні знижує швидкість теплообміну, і тоді утворюється зона крупних неорієнтованих зерен 3;

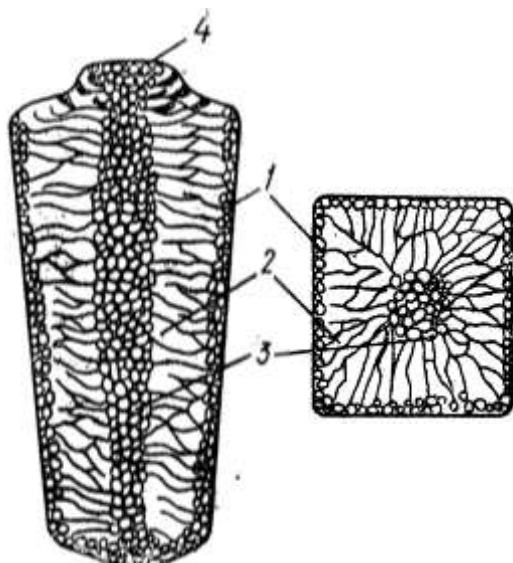


Рис. 2.11. Схема росту кристалів під час тверднення сталі

- кристалізація останньої ділянки рідкого металу 4 відбувається в зоні утеплювальної надставки ізложниці. Тут збираються гази, різні неметалеві включення, що утворюють велику неоднорідність будови злитка (раковини, газові пухирі), яка називається усадковою раковиною.

Структура виплавленого злитка сталі залежить від умов тверднення, які визначаються ступенем її розкислення.

Під час виплавлення сталі утворюються оксиди заліза, які, розчиняючись у сталі, підвищують уміст у ній кисню. Це сприяє виникненню тріщин у разі пластичного деформування сталі. Тому в процесі виробництва проводять розкислення сталі шляхом введення елементів (розкислювачів) із більшим спорідненням до кисню.

Оксиди, що утворюються, видаляються в шлак. Тобто виконують дезоксидації – відновлення FeO до чистого заліза.

Як розкислювачі використовують кремній (у вигляді феросиліцію), марганець (феромарганець), алюміній і лужноземельні метали.

Зовсім дезоксидовані сталі називають спокійними, а частково дезоксидовані – напівспокійними.

За ступенем розкислення розрізняють спокійну, киплячу і напівспокійну сталі. Сталі за ступенем розкислення розрізняють за вмістом кремнію.

Уміст кремнію у сталях різного ступеня розкислення наведено нижче:

Види сталі за ступенем розкислення	Позначення в марці	Уміст кремнію
кипляча	кп	не більше ніж 0,05 %
напівспокійна	пс	0,05–0,15 %
спокійна	сп	понад 0,15 %

Спокійна сталь повністю розкислена в печі або в ковші марганцем, кремнієм і алюмінієм і у виливниці твердіє спокійно. Утворюється щільний зливоч з усадковою раковиною (рис. 2.12, 2.13). Більша частина газоподібних і неметалевих включень накопичується в головній частині злитка.

Частину зливка, де розташована усадкова раковина і включення, під час подальшої обробки (прокаткою, ковкою) відрізають. Обріз становить 15–16 % ваги злитка.

Спокійна сталь має найбільш однорідні фізико-механічні властивості і менше схильна до крихкого руйнування.

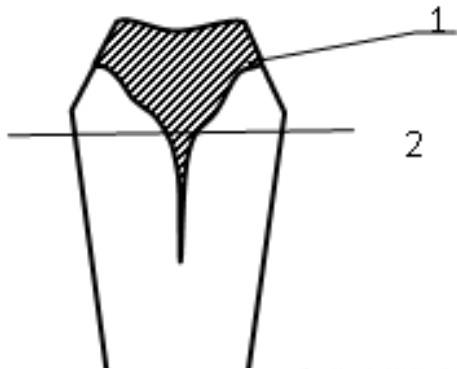


Рис. 2.12. Переріз зливка спокійної сталі:
1 – усадкова раковина; 2 – рівень верхнього
обрізування; 3 – рівень нижнього обрізування

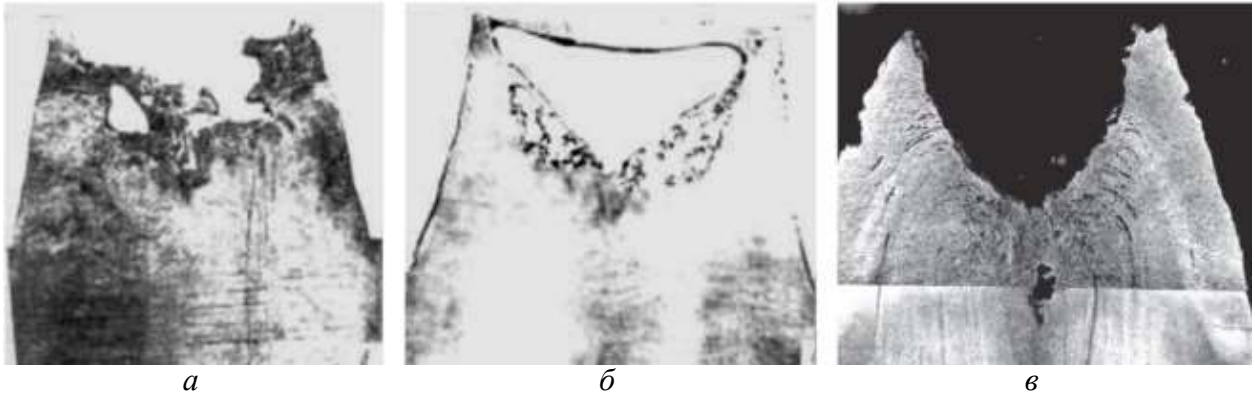


Рис. 2.13. Види усадкових раковин у зливках:
а – відкрита; б – закрита; в – вторинна

Кипляча сталь. Розкислюється не повністю, тільки марганцем, і під час розливання в форми бурлить від виділення оксиду вуглецю. Оксид вуглецю частково залишається всередині зливка у вигляді розсіяних газових раковин, які компенсують усадку, через що в зливку немає зосередженої усадкової раковини (рис. 2.14).

Газові раковини (пухирі) заварюються під час прокатування, і майже весь зливкок йде в діло. Головна дефектна його частина, що одрізається після тверднення, становить близько 5–7 %. Це дає змогу забезпечити максимальний вихід придатного прокату.

Така сталь дешевша, ніж спокійна, але зливки неоднорідні за складом (унаслідок ліквації внутрішні шари зливка містять більше, ніж зовні, вуглецю та домішок); що обмежує її застосування.

Уміст вуглецю в киплячій сталі не перевищує 0,3 %; більший уміст вуглецю спричиняє надмірне виділення газів і збільшення браку сталі.

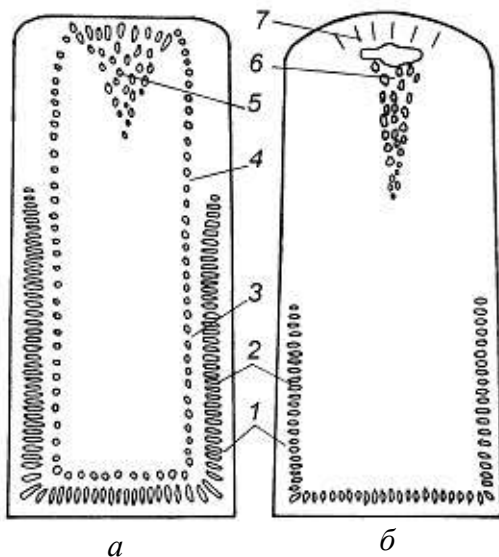


Рис. 2.14. Структурні зони злитків киплячої сталі:

а – звичайний злиток; *б* – хімічно закупорений злиток;

1 – зовнішня кірка; 2 – сотові пухирі; 3 – проміжна зона щільного металу; 4 – зона вторинних пухирів; 5 – скопичення пухирців у верхній частині злитка; 6 – пухирі й усадкові пустоти в верхній частині злитка; 7 – «міст» щільного металу

Кипляча сталь добре штампується, тому її застосовують для деталей глибокого витягування, а також для зварних труб і інших виробів.

Для запобігання надмірного розвитку процесу ліквації у злитках киплячої сталі використовують операцію закупорки злитків. Суть методики – припинення кипіння металу в ізложницях.

Останнім часом найбільш широко використовують хімічну закупорку злитків (рис. 2.14, *б*), для чого через 1,0–1,5 хвилини після наповнення ізложниці в метал вводять гранульований або рідкий алюміній. Витрату алюмінію підбирають таким чином, щоб подальше твердіння злитка супроводжувалось незначним газовиділенням, яке повинно компенсувати усадку сталі й запобігти утворенню усадкової раковини.

Напівспокійна сталь за реакціями у виливниці й однорідністю є проміжною між спокійною і киплячою.

Розкислення її в печі або ковші роблять підвищеною (проти киплячої сталі) кількістю марганцю або марганцем і кремнієм (іноді також алюмінієм).

Головний обріз злитка менше на 7–10 % порівняно зі спокійною сталлю. Відповідно знижується собівартість прокату.

Перевагами напівспокійної сталі порівняно зі спокійною є більший вихід придатного прокату, а порівняно з киплячою – більша однорідність завдяки меншій ліквації.

Механічні властивості в разі випробування на статичне розтягування і згинання напівспокійної і киплячої сталі практично не відрізняються від

властивостей спокійної сталі. Але напівспокійна і ще більшою мірою кипляча сталь схильні до крихкого руйнування за низьких температур і динамічних навантажень.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. Назвіть, які сплави називають сталлю.
2. Назвіть, які сплави називають чавунами.
3. Як поділяють вуглецеві сталі за якістю?
4. З якою метою легують сталі? Які сталі називають низьколегованими?
5. Назвіть структурну форму графітної фази в чавунах.
6. На які групи поділяють вуглецеві сталі залежно від вмісту вуглецю? Як впливає вуглець на властивості сталі?
7. Назвіть домішки, що негативно впливають на властивості сталі. На які групи поділяють сталі за присутністю цих домішок?

ЛЕКЦІЯ 3

Діаграми стану системи залізо – вуглець. Перетворення в системі Fe – Fe₃C

- 3.1. Загальні положення.
- 3.2. Діаграма «залізо – вуглець».
 - 3.2.1. Структурні складові (фази) залізовуглецевих сплавів у системі Fe – Fe₃C.
 - 3.2.2. Перетворення в системі Fe – C (Fe – Fe₃C).

3.1. Загальні положення

Усі фази сплавів можуть утворюватися й існувати за певного енергетичного стану (температури, тиску). Зі зміною енергетичного стану структура металу змінюється. У металевих сплавах фазовий стан сплаву змінюється залежно від його температури та хімічного складу. Тому для певних сплавів побудовані діаграми стану, що показують зміни системи залежно від складу сплаву й температури.

Діаграми стану характеризують процеси затвердіння та структурної зміни сплавів, компоненти яких повністю взаємно розчиняються в рідкому стані та дають наочне уявлення про фази в будь-якому сплаві цієї системи.

За діаграмою стану сплавів компонентів можна заздалегідь робити висновки про властивості всіх сплавів системи. Користуючись діаграмами стану, можна встановити режими термічної обробки сплаву, гарячої та холодної обробки металевих виробів тощо.

Діаграма стану дає змогу вибирати температуру нагрівання сплаву для термічної обробки, обробки тиском, температуру нагрівання для лиття.

Користуючись діаграмою стану, можна легко визначити:

- температуру початку й кінця плавлення для будь-якого сплаву цієї системи;
- кількість евтектики у сплаві,
- кількість рідкого розчину (рідкої фази) і його концентрацію в будь-який момент затвердіння сплаву.

Лінії діаграми являють собою сукупність критичних точок сплавів із різним складом, що характеризують перетворення в цих сплавах за відповідних температур.

Для побудови діаграм стану спочатку отримують криві охолодження сплавів за результатами термічного аналізу.

3.2. Діаграма «залізо – вуглець»

Основні властивості залізовуглецевих сплавів визначаються вмістом вуглецю.

Наявність невеликої кількості звичайних домішок у сталі не впливає істотно на положення критичних точок і характер ліній діаграми, тому сталі та чавуни можна з відомим наближенням розглядати як подвійний сплав залізо — вуглець (Fe – C).

Залізо за взаємодії з вуглецем утворює ряд хімічних сполук: Fe₃C, Fe₂C, FeC та інші. Найбільш стійкою хімічною сполукою є карбід заліза – Fe₃C (цементит), що містить до 6,67 % C.

Отже, вуглець може утворювати *цементит* або перебувати у вільному стані у вигляді *графіту*. Відповідно є дві діаграми сплавів залізо – вуглець: цементитна (рис. 3.1) і графітна (рис. 3.2).

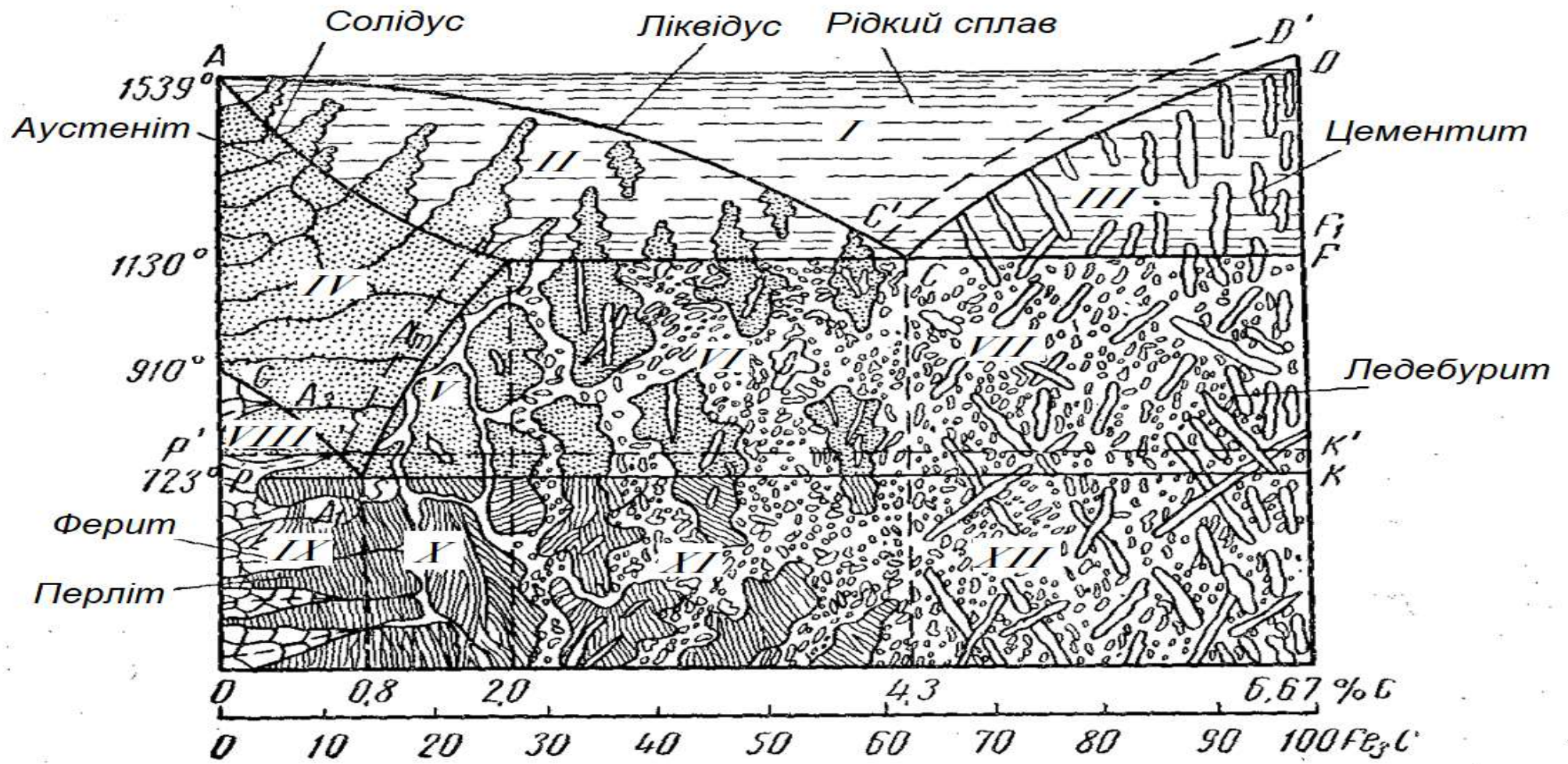


Рис. 3.1. Цементитна діаграма

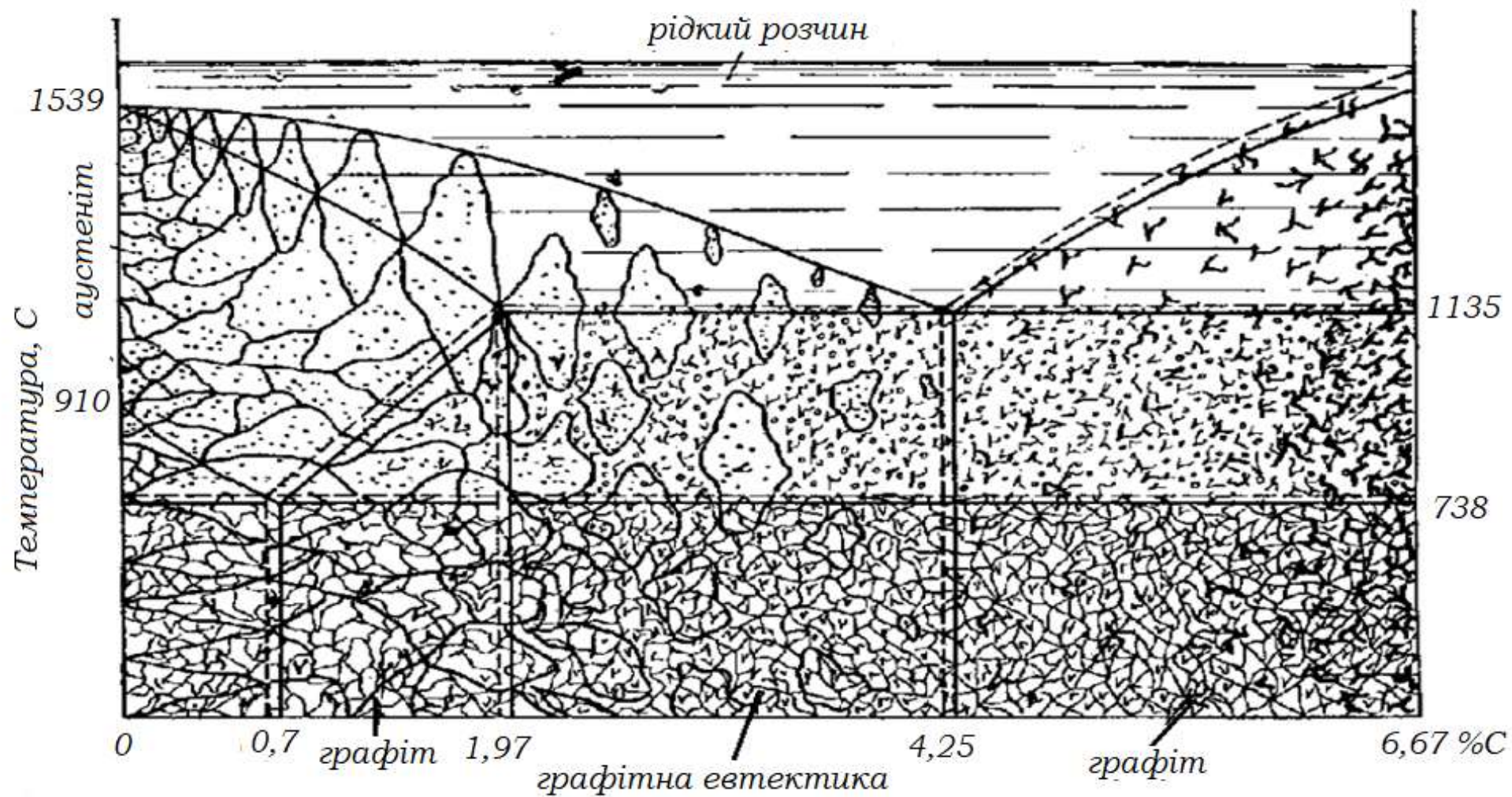


Рис. 3.2. Графітна діаграма

3.2.1. Структурні складові (фази) залізовуглецевих сплавів у системі Fe – Fe₃C

Однофазні складові

Цементит – карбід заліза Fe₃C – хімічна сполука заліза з вуглецем, якій міститься в кількості 6,67 % у стехіометричній пропорції у складній орторомбічній решітці (4 атоми С, 12 атомів Fe).

У залізовуглецевих сплавах цементит як фаза може виділятися за різних умов:

– *Цементит первинний* (рис. 3.3) – виділяється з рідини в процесі кристалізації у вигляді великих пластин; визначає високу твердість і крихкість білого чавуну. Під мікроскопом спостерігається у вигляді світлих полос на фоні ледебуриту.

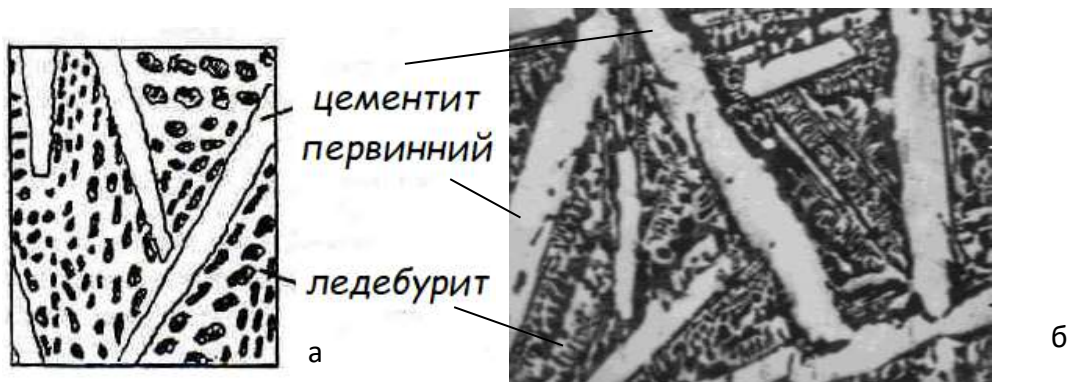


Рис. 3.3. Мікроструктура залізовуглецевого сплаву з первинним цементитом (б) і схема мікроструктури (а)

– *Цементит вторинний* – виділяється з аустеніту й розташовується у вигляді сітки навколо зерен аустеніту, що після евтектоїдного перетворення стануть зернами перліту (рис. 3.4).

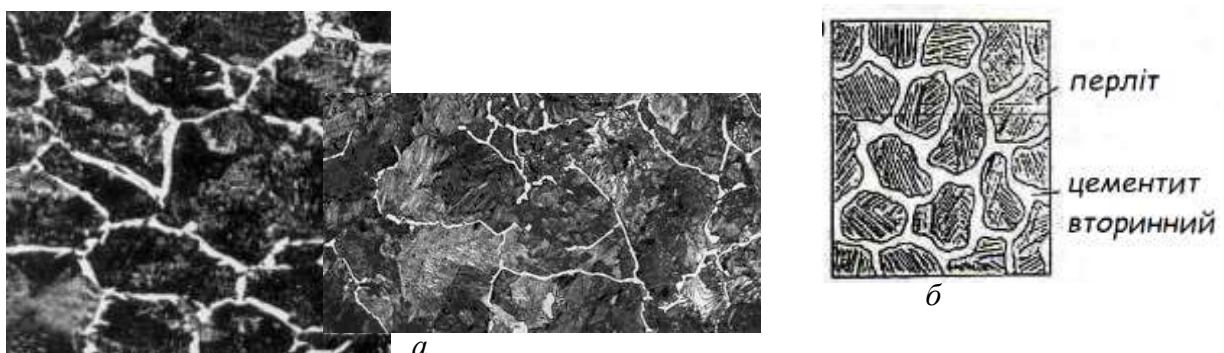


Рис. 3.4. Мікроструктура залізовуглецевих сплавів із цементитом вторинним (а) і схема мікроструктури (б)

– *Цементит третинний* – виділяється з фериту і у вигляді твердих включень розташовується біля границь феритних зерен (рис. 3.5).

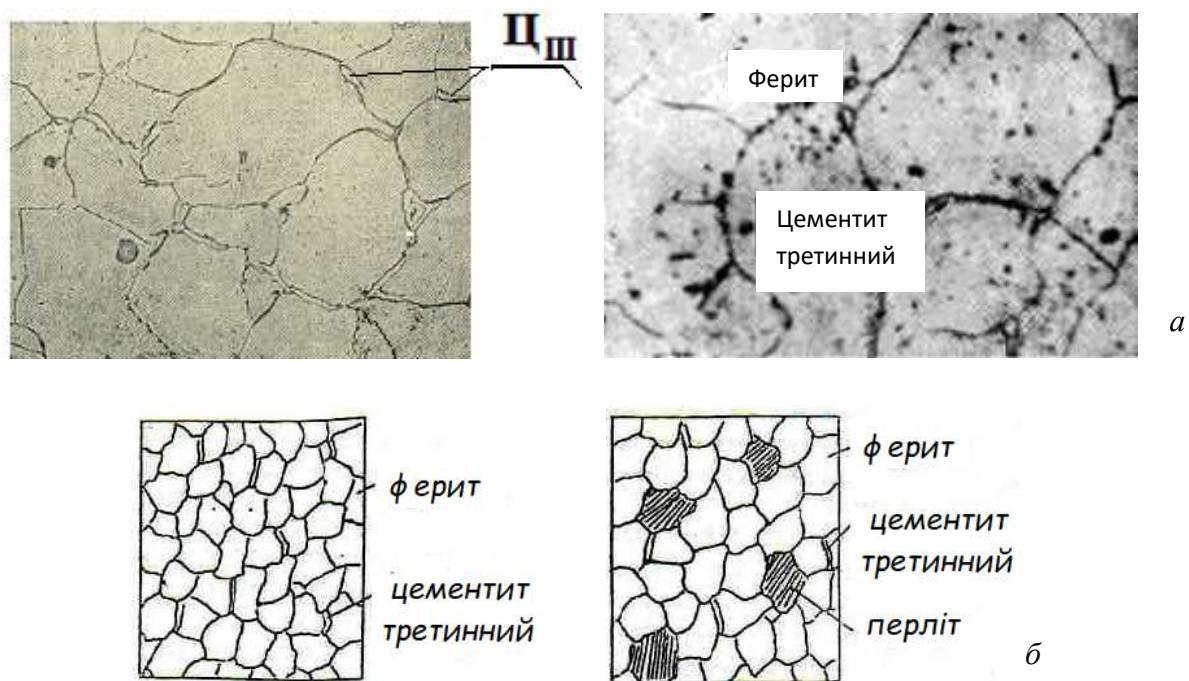


Рис. 3.5. Мікроструктура залізовуглецевих сплавів із цементитом третинним (а) і схеми мікроструктури (б)

– *Цементит евтектичний* – спостерігається лише в білих чавунах (рис. 3.6).

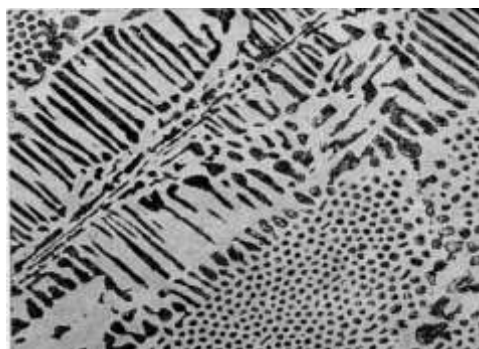


Рис. 3.6 Мікроструктура білого евтектичного чавуну

Аустеніт – твердий розчин вбудовування вуглецю й інших елементів в γ -Fe (гамма-залізо) із гранецентрованою кубічною коміркою.

У залізовуглецевих сплавах може існувати тільки за високих температур. У разі охолодження сплаву аустеніт розпадається на ферит і цементит.

Як і будь-який твердий розчин, аустеніт має мікроструктуру, що являє собою зерна твердого розчину (рис. 3.7).

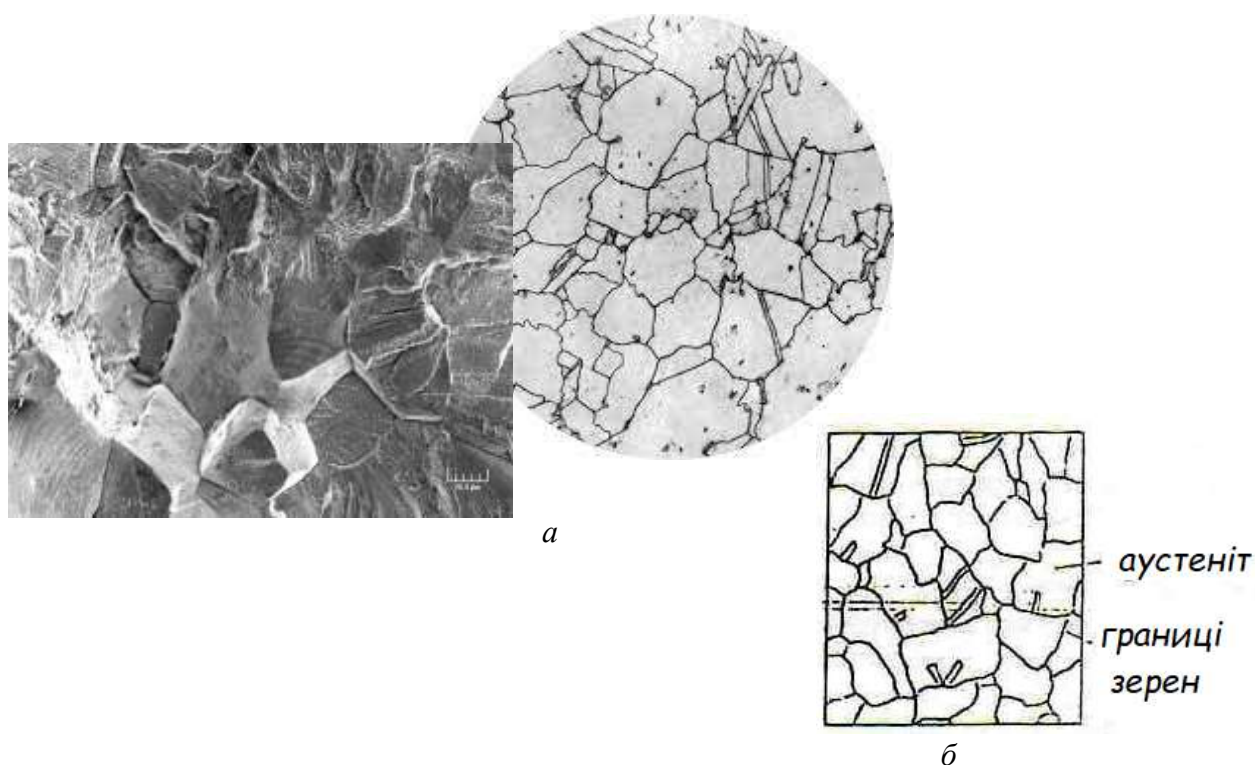


Рис. 3.7. Мікроструктура залізовуглецевих сплавів з аустенітом (а) і схема мікроструктури (б)

Елементи, що розчиняються в аустеніті, значно змінюють його властивості. Наприклад, за температури 1147 °С аустеніт містить 2,14 % С, а за 727 °С – усього 0,8 % С.

Ферит – твердий розчин вбудовування вуглецю в α -Fe (альфа-залізо) з об'ємно-центрованою кубічною коміркою. Ферит має обмежену розчинність вуглецю залежно від температури.

Під мікроскопом спостерігається у вигляді світлих зерен (рис. 3.8).

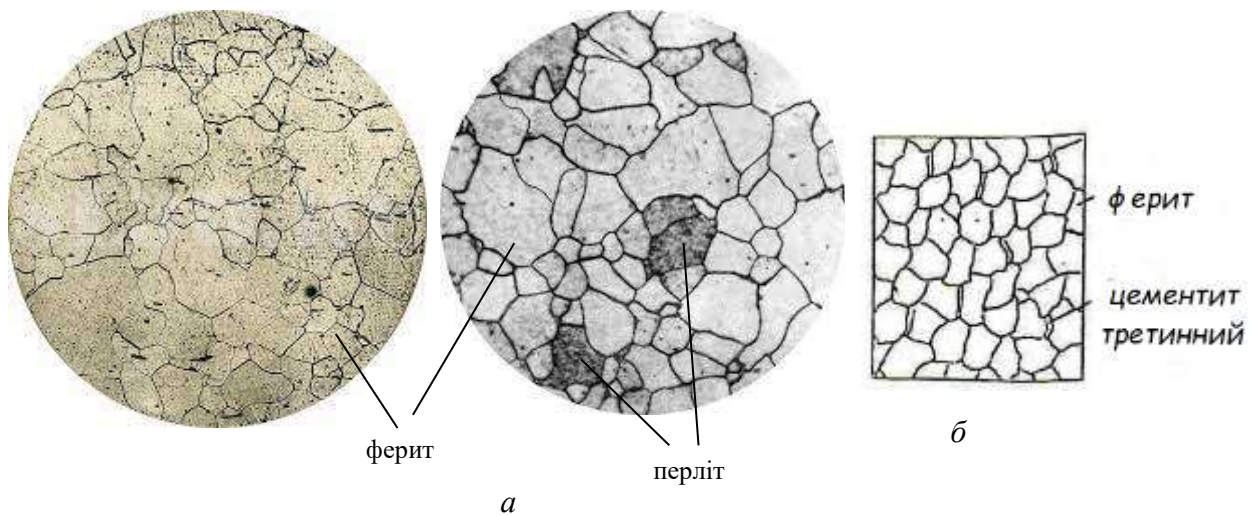


Рис. 3.8. Мікροструктура залізовуглецевих сплавів із цементитом вторинним (а) і схема мікροструктури (б)

Двофазні структурні складові

Перліт – механічна суміш фериту й цементиту (евтектоїдна суміш), які є продуктом розпаду аустеніту. Уміст вуглецю в перліті – 0,8 %.

Завдяки зміцнювальному впливу цементиту перліт має більш високу міцність і твердість ніж ферит, однак знижені характеристики в'язкості і пластичності.

За невеликих або дуже тонких пластинок фериту й цементиту перліт під мікроскопом спостерігається у вигляді темних ділянок. З більшим збільшенням (500–100 разів) або в разі крупних пластинок видно темну пластинчасту будову структури (рис. 3.9).

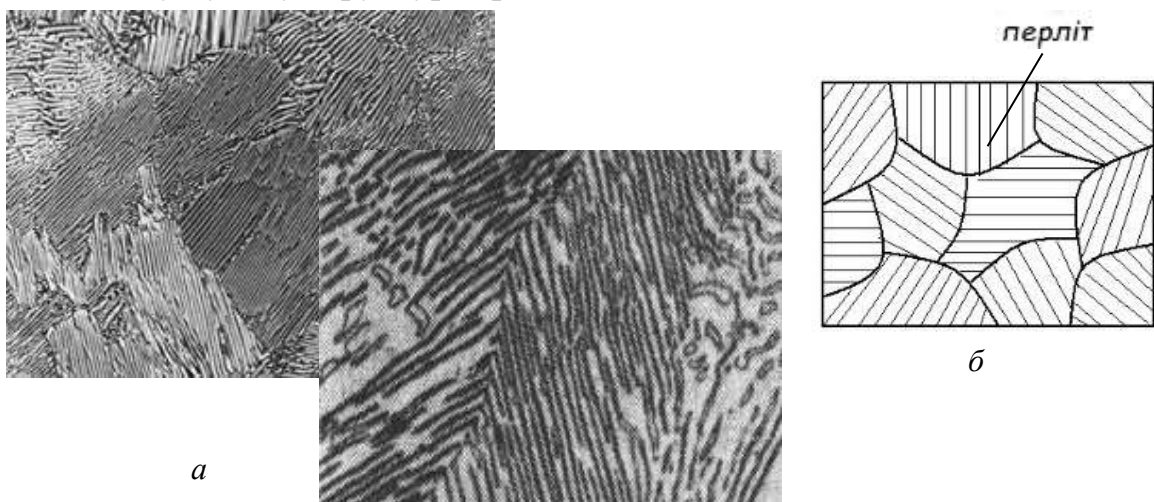


Рис. 3.9. Мікροструктура перлітної сталі (евтектоїдної) (а) і схема мікροструктури (б)

Ледебурит – механічна суміш (евтектика) цементиту й аустеніту (за температур понад $727\text{ }^{\circ}\text{C}$) або перліту та цементиту (за нижчих температур); містить 4,3 % вуглецю. Має високу твердість і крихкість.

Мікроструктура ледебуриту (рис. 3.10) – світле поле (цементит) з темними включеннями (перліт), схеми структур залізовуглецевих сплавів, що містять ледебурит, наведено на рис. 3.11.

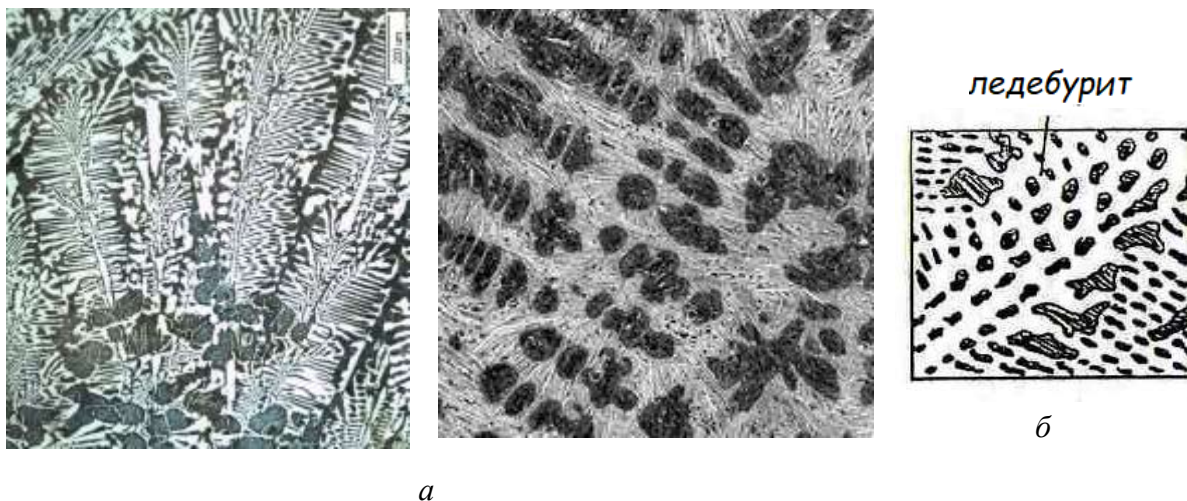


Рис. 3.10. Мікроструктура залізовуглецевих сплавів із ледебуритом

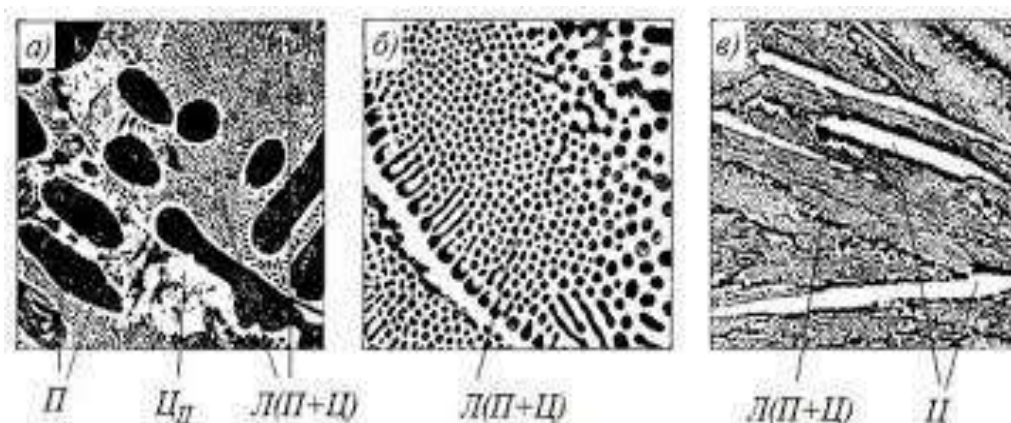
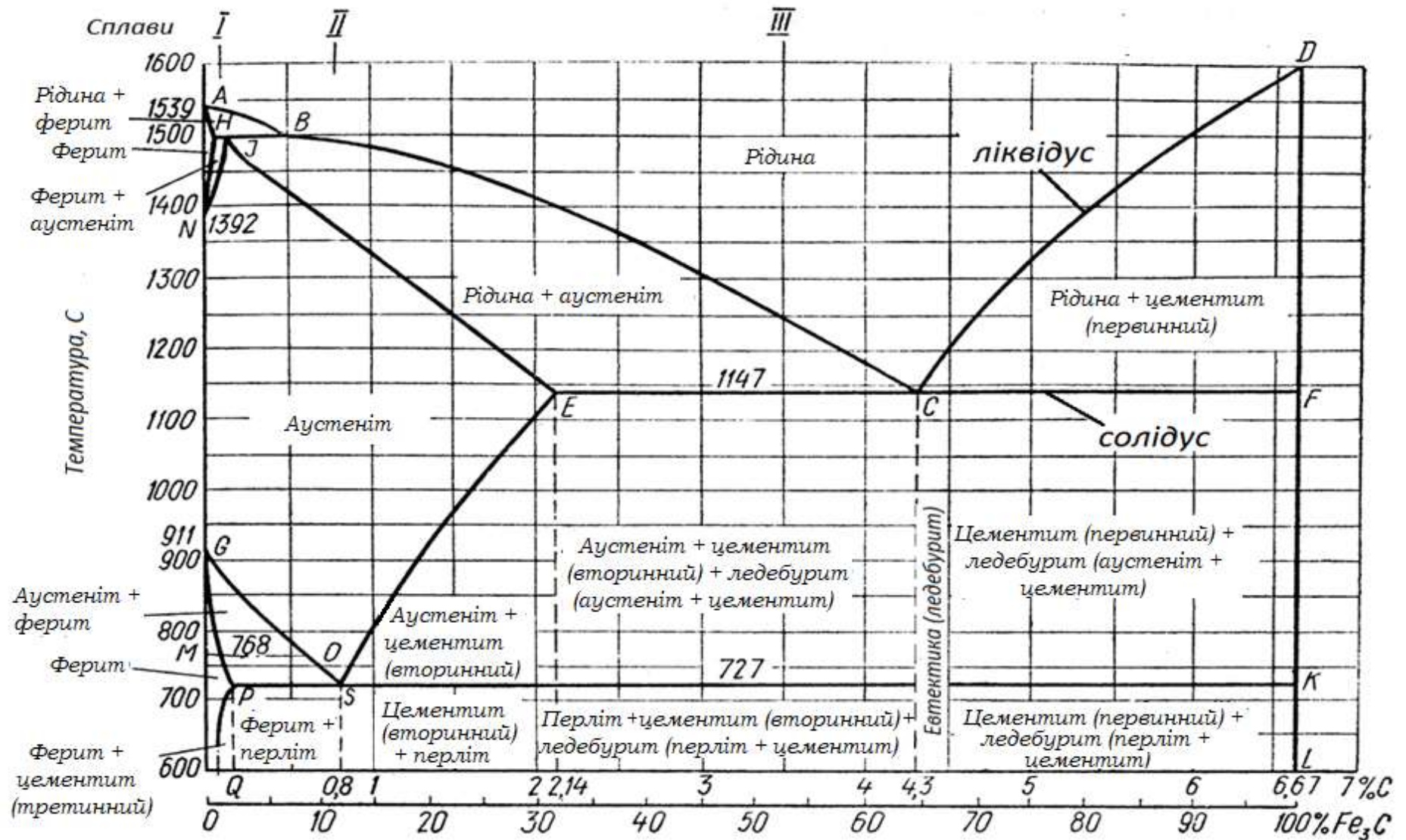


Рис. 3.11. Схеми структур залізовуглецевих сплавів, що містять ледебурит (білих чавунів):

a – доевтектичного; *б* – евтектичного; *в* – заевтектичного

3.2.2. Перетворення в системі Fe – C (Fe – Fe₃C)

Найбільша кількість вуглецю за діаграмою (рис. 3.12) 6,67 % відповідає вмісту вуглецю в хімічній сполуці – цементиті. Отже, компонентами є, з одного боку, чисте залізо Fe, з іншого – цементит Fe₃C.

Рис. 3.12. Діаграма стану Fe – C (Fe – Fe₃C)

Перетворення з рідкого стану в твердий (первинна кристалізація)

Лінія *ABCD* – ліквідус, лінія *АНІЕСF* – солідус.

Вище за лінію *ABCD* сплави системи перебувають у рідкому стані.

По лінії *AB* з рідкого розплаву починають випадати кристали фериту, по лінії *BC* з рідкого розчину починають випадати кристали аустеніту. По лінії *CD* з рідкого розчину починають випадати кристали цементиту.

У точці *C* зі вмістом 4,3 % С і за температури 1147 °С відбувається одночасно кристалізація аустеніту та цементиту й утворюється їх тонка механічна суміш *евтектика*, яка називається в цій системі ледебуритом. Ледебурит (евтектика) є у всіх сплавах, які містять від 2,14 до 6,67 % С. Ці сплави належать до групи чавуну.

Точка *E* відповідає граничному насиченню заліза вуглецем (2,14 %). Сплави, які розташовані ліворуч від цієї точки, після повного затвердіння становлять один аустеніт. Ці сплави належать до групи сталі.

Перетворення в твердому стані (вторинна кристалізація)

Перетворення в твердому стані відбуваються внаслідок переходу заліза з однієї модифікації в іншу, а також у зв'язку зі зміною розчинності вуглецю в залізі.

Лінії *GSE*, *PSK* і *GPQ* показують, що у сплавах системи в твердому стані відбуваються зміни структури.

У зоні діаграми *NGSEJ* міститься аустеніт. З охолодженням сплавів аустеніт розпадається з виділенням по лінії *GS* фериту); а по лінії *SE* – цементиту. Цей цементит називається вторинним.

У зоні діаграми *GSP* міститься суміш двох фаз – фериту й аустеніту, який розпадається, а в зоні *SE* – суміш вторинного цементиту й аустеніту, який розпадається.

У точці *S* зі вмістом 0,8 % С і за температури 727 °С весь аустеніт розпадається й одночасно кристалізується тонка механічна суміш фериту та цементиту – *евтектоїд* (тобто подібний до евтектики), який у цій системі називається *перлітом*.

Сталь, що містить 0,8 % С, називається евтектоїдною, менш як 0,8 % – доевтектоїдною, від 0,8 до 2,14 % С – заевтектоїдною.

По лінії *PSK* відбувається розпад аустеніту, що залишився в будь-якому сплаві системи, з утворенням перліту; тому лінія *PSK* називається лінією *перлітного (евтектоїдного) перетворення*.

Контрольні запитання для самоперевірки

1. Дати визначення поняття «діаграма стану».
2. Назвіть фази залізвуглецевих сплавів.
3. Охарактеризуйте зміни у структурі залізвуглецевих сплавів, що відбуваються по лінії *PSK*.
4. Що показують діаграми стану або діаграми фазової рівноваги?
5. Дати характеристику структурної складової – перліту.
6. Дати характеристику структурної складової – фериту.

ЛЕКЦІЯ 4

Основи термічної обробки сплавів

- 4.1. Загальні положення.
- 4.2. Види термічної обробки сплавів.

4.1. Загальні положення

Термічною обробкою називають процеси, пов'язані з нагріванням і охолодженням металу, що перебуває у твердому стані, з метою зміни структури і властивостей без зміни його хімічного складу.

Термічну обробку характеризують основні параметри: нагрівання до певної температури, витримування за цієї температури, швидкість нагрівання та швидкість охолодження (рис. 4.1).

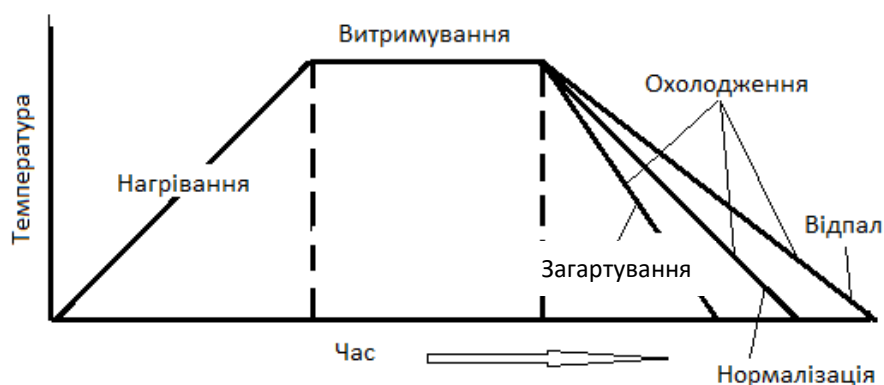


Рис. 4.1. Графік термічної обробки

Залежно від температури нагрівання й режимів охолодження розрізняють такі види термічної обробки сталей і сплавів:

- відпал;
- нормалізація;

- загартування;
- відпуск;
- хіміко-термічна обробка (ХТО);
- термомеханічна обробка (ТМО).

Слід розрізняти термообробку зміцнювальну, яка призводить до утворення структури загартування, і виконується під час нагрівання до температури понад 800 °С та термообробки, яка здійснюється для зняття внутрішніх напружень чи штучного старіння сталі здебільшого за температури 250–500 °С.

Можливість зміцнення сталей шляхом термічної обробки обумовлена наявністю алотропічних перетворень у твердому стані.

Процес термомеханічного зміцнення складається із чотирьох стадій охолодження й ілюструється на рис. 4.2.

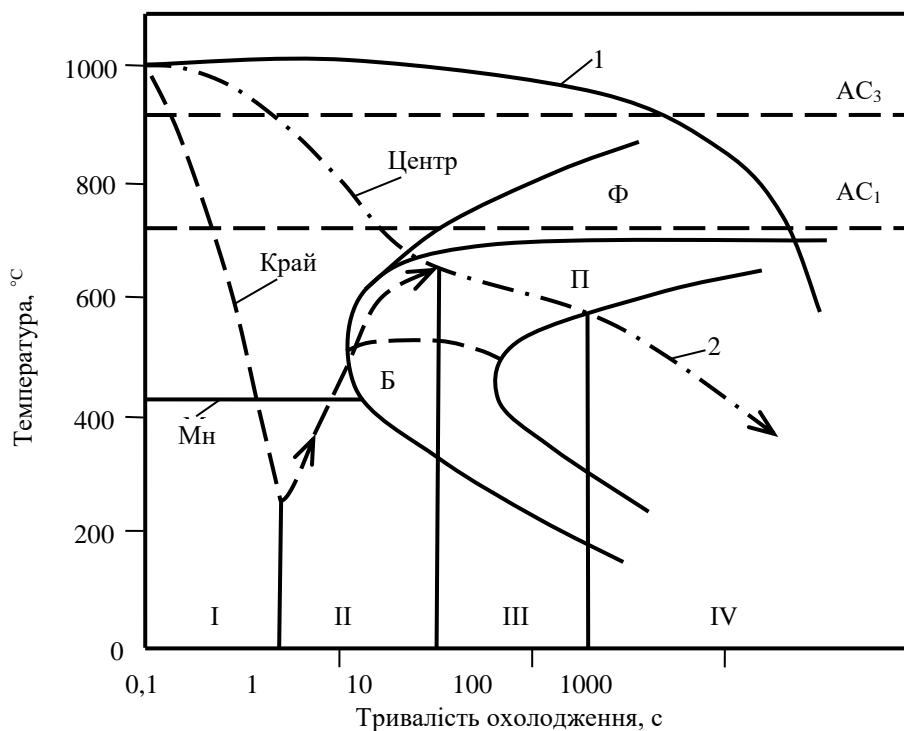


Рис. 4.2. Схематичне зображення процесу термомеханічного зміцнення на термокінетичній діаграмі:

1 – гарячекатаний стан; 2 – термозміцнений стан;

I – перша стадія (швидке охолодження водою; закалювання поверхневого шару);

II – друга стадія (охолодження на повітрі; відпуск поверхневого шару); III – третя

стадія (охолодження в холодильнику; квазіізотермічне перетворення центральних зон прутка); IV – четверта стадія (охолодження прутка на холодильнику до навколишньої температури після завершення структурних перетворювань);

АС – аустеніт, Ф – ферит, П – перліт, Б – бейніт, Мн – мартенсит

Охолоджуючи аустеніт з різними швидкостями і викликаючи тим різний ступінь переохолодження, можна отримати продукти розпаду аустеніту, що різко відрізняються за будовою і властивостями.

Мала швидкість охолодження v_1 призводить до утворення грубої суміші фериту й цементиту (*перліту* з твердістю HRS 10). Чим більша швидкість охолодження, тим більш дрібнодисперсна феритно-цементитна суміш.

Сорбіт (перша структура загартування), що отримують за швидкості охолодження v_2 , (швидкість охолодження $10\text{ }^\circ\text{C/s}$), являє собою суміш фериту й цементиту, вона відрізняється від перліту тоншою дисперсною будовою (рис. 4.3); твердість сорбіту – HRS 20. Сталі із сорбітною будовою зносостійкі, їх використовують для виготовлення навантажених виробів.

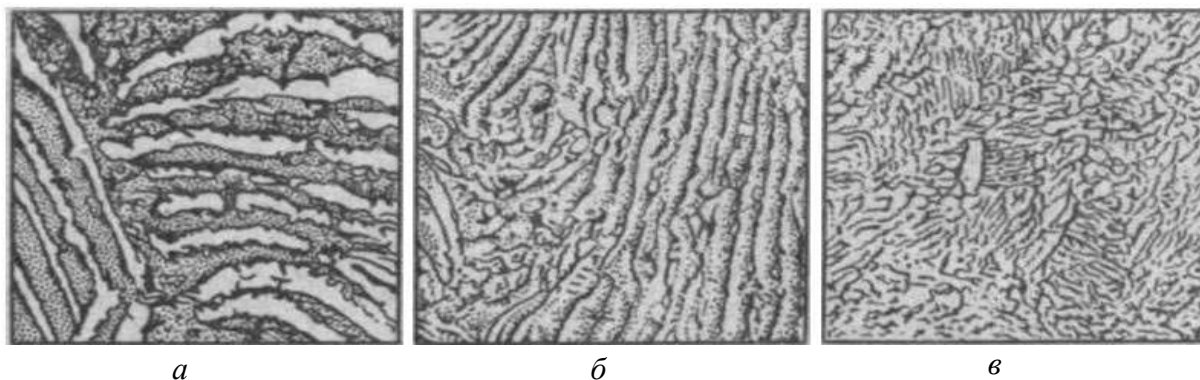


Рис. 4.3. Мікроструктура перліту (а), сорбіту (б) і троститу (в) зі збільшенням у 750 разів

Тростит (друга структура загартування) отримується за швидкості охолодження v_3 унаслідок розпаду переохолодженого аустеніту за температури $500 - 550\text{ }^\circ\text{C}$. Має значну пружність; це тонка дисперсна суміш фериту й цементиту. Твердість троститу – HRS 30. Сталь зі структурою троститу відрізняється високим значенням міцності та пружності. Її використовують переважно для виготовлення пружин і ресор.

Сорбіт і тростит, на відміну від перліту (евтектоїда), які називають квазіевтектоїдними, не є рівноважними структурами у сталях, що не відповідають евтектоїдному складу (вміст вуглецю більш або менш ніж $0,8\%$).

Твердість і міцність сталі з названими структурами прямо пропорційна збільшенню поверхні поділу між феритом і цементитом, тому зі збільшенням ступеня дисперсності феритно-цементитної структури, тобто з пониженням температури її розпаду, твердість, межі міцності,

плинності й витривалості збільшуються. Відносно подовження й відносно звужування найвище в сорбіті. З переходом до троститу (за нижчої температури перетворення) пластичність зменшується.

Бейніт (третя структура загартування) отримується за швидкості охолодження $70\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$; це також тонко дисперсна суміш фериту й цементиту з твердістю HRS 40.

Структура бейніту складається з α -твердого розчину, що утворюється внаслідок мартенситного перетворення і декілька перенасичений вуглецем, і частинок карбіду. Розрізняють структуру верхнього і нижнього бейніту. Верхній бейніт, що утворюється, здебільшого за температури $500\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$, має «перистий» вигляд (за типом різаної соломи). Частинки карбіду виділяються не у вигляді пластинок, як у перліті, а у вигляді ізольованих вузьких частинок (рис. 4.4). Нижній бейніт утворюється зазвичай за температур від $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ до точки Mn і має голчасту (пластинчасту) або мартенситоподібну будову. Карбідні частинки в нижньому бейніті розташовуються в пластинках α -фази.

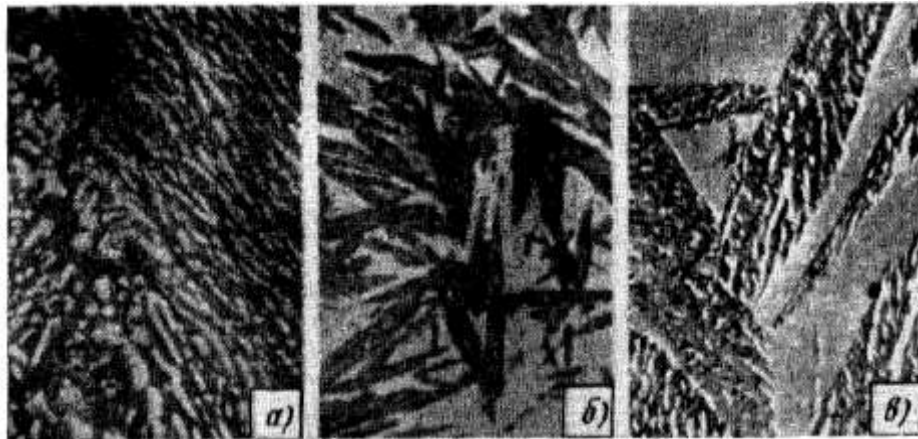


Рис. 4.4. Мікроструктура бейніту:

a – верхній бейніт (x500); *б* – нижній бейніт і залишковий аустеніт (x500);
в – нижній бейніт і остаточний (світлі ділянки) аустеніт (x10 000)

Мартенсит – перенасичений розчин вуглецю в α -Fe. Мартенсит утворюється не розпадом аустеніту, а дифузійною перебудовою решітки γ -Fe в α -F решітку.

Якщо в рівноважному стані розчинність вуглецю в α -залізі за температури $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ не перевищує $0,002\%$, то його вміст у мартенситі може бути таким самим, як у вихідному аустеніті, тобто може досягнути гранично $2,14\%$.

Мартенсит має тетрагональну решітку (рис. 4.5), у якій один період c більший за інший. Зі збільшенням умісту вуглецю висота тетрагональної

призми c збільшується, а розміри її основи зменшуються. Атоми вуглецю займають октаедричні пори вздовж осі в ґратці α -заліза (мартенситі) і сильно її спотворюють.

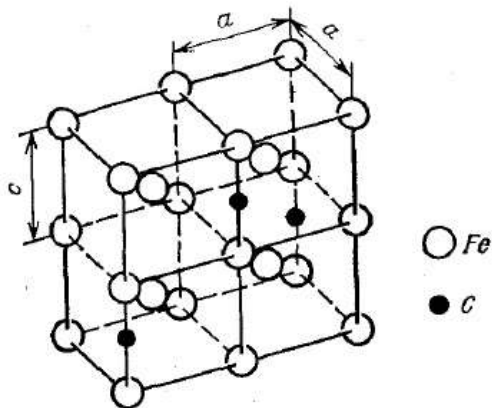


Рис. 4.5 Кристалічна ґратка мартенситу

Перетворення аустеніту в мартенсит відбувається в разі дуже швидкого охолодження ($v_5 > v_{кр}$) і має бездифузійний характер, тобто воно не супроводжується дифузійним перерозподілом атомів вуглецю й заліза в ґратці аустеніту. Мартенситне перетворення здійснюється шляхом зсуву й не супроводжується змінами складу твердого розчину.

Водночас фіксується типова для мартенситу голчаста структура (рис. 4.6). Мінімальна швидкість охолодження, за якої утворюється мартенсит, називається критичною швидкістю загартування ($v_{кр}$).

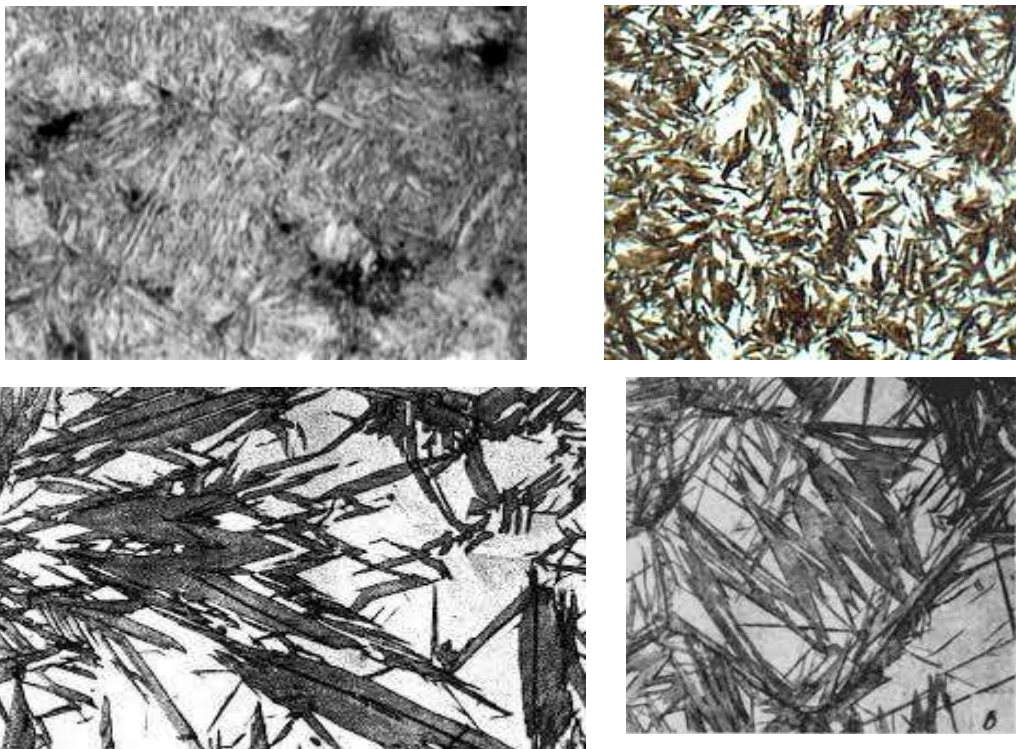


Рис. 4.6. Мікроструктура мартенситу

Кристали мартенситу залежно від складу сталі, а отже, і від температури свого утворення, можуть мати різну морфологію і субструктуру. Розрізняють два типи мартенситу – пластинчастий і рейковий (рис. 4.7).

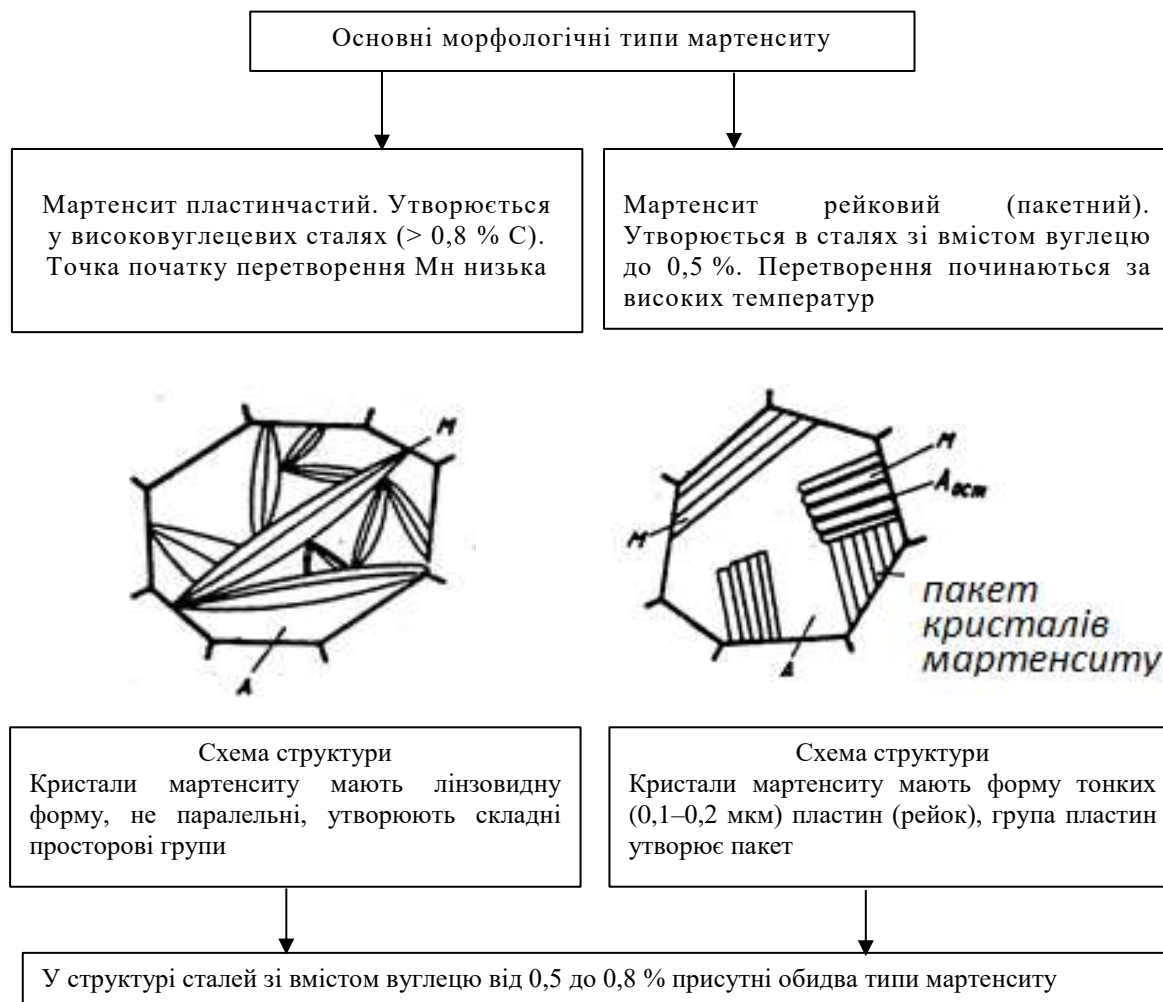


Рис. 4.7. Типи мартенситу

Розміри кристалів визначаються величиною вихідного зерна аустеніту. Чим більше зерно аустеніту, тим крупніший мартенсит. Перша пластинка мартенситу має протяжність, що відповідає поперечному розміру зерна аустеніту. Кристали, що утворюються за нижчих температур, стиснуті у своєму розвитку та мають менші розміри.

Мартенсит – тверда і крихка структура. Його твердість становить HRS 62–66. Твердість збільшується зі збільшенням в ньому вуглецю.

4.2. Види термічної обробки

Відпал – вид термічної обробки, що не супроводжується фазовими перетвореннями металів і сплавів, використовується для усунення внутрішніх напружень, утворення дрібної структури, надання сталі пластичності перед подальшою обробкою і приведення структури в рівноважний стан. Відпал складається з нагрівання сталі вище за критичні температури, витримування за цієї температури й повільного охолодження.

Розрізняють відпал I роду:

- дифузійний (гомогенізуючий) – для усунення хімічної неоднорідності металу через дифузію атомів;
- рекристалізаційний – для зняття наклепу й отримання рівноважного стану сплаву.

Відпал II роду (для металів і сплавів, що мають фазові перетворення у твердому стані):

- повний відпал – для повної перекристалізації і отримання дрібнозернистої структури сталі;
- неповний відпал – для отримання структури сталі із зернами вторинного цементиту, що полегшує механічну обробку металу.

Нормалізація – використовується для усунення внутрішніх напружень, утворення дрібної структури, збільшення твердості й міцності сталі, вирівнювання механічних властивостей; відбувається в разі нагрівання сталей вище за критичні температури на 30–50 °С, витримування й наступного охолодження на повітрі, унаслідок чого сталь набуває дрібнозернистої та однорідної структури (структури, як після відпалу, але перліт буде більш дисперсним).

Загартування – вид зміцнювальної термічної обробки вуглецевих сталей, що містять понад 0,3 % вуглецю, базується на перекристалізації. Складається з нагрівання сталі вище за критичні температури на 30–50 °С (не менше ніж 800 °С) з подальшим швидким охолодженням. Мета загартування – отримання високої міцності й заданих фізико-механічних властивостей.

Швидкість нагрівання та час витримування виробів і деталей залежать від їх розмірів, маси деталей, конфігурації, хімічного складу типу нагрівальних печей і середовищ.

Для охолодження в процесі загартування найчастіше використовують воду, іноді з додаванням солей і лугів; оливи, розплавлені солі й метали.

Способи загартування:

- загартування в одному охолоджувачі;
- загартування у двох середовищах;
- ступінчасте загартування;
- ізотермічне загартування;
- загартування з обробкою холодом.

Для підвищення твердості, межі витривалості та зносостійкості деталі й виробу піддають поверхневому зміцненню і використовують для цього поверхнєве загартування, за якого нагрівається тільки тонкий поверхневий шар деталі, а всередині метал майже не нагрівається. Після загартування деталі мають твердий поверхневий шар і в'язку серцевину.

Відпуск – нагрівання сталі до температури нижче за критичну, витримування за цієї температури й охолодження із заданою швидкістю (зазвичай охолодження на повітрі). Мета відпуску – зменшення напружень, що виникли під час загартування, зниження твердості й отримання відповідних механічних властивостей. Основне перетворення під час відпуску – розпад мартенситу, тобто виділення вуглецю з перенасиченого твердого розчину у вигляді найдрібніших кристаликів карбиду заліза.

Залежно від температури нагрівання розрізняють три *види відпуску*:

- низько-температурний відпуск (відпуск на відпущений мартенсит) – за температури 120–150 °С (твердість не зменшується, зменшуються залишкові напруження загартування);
- середньо-температурний відпуск (відпуск на тростит) – відбувається за температури нагрівання 350–450 °С (твердість знижується);
- високо-температурний відпуск (відпуск на сорбіт) – виконують за температури 500–650 °С (для забезпечення достатньої міцності, в'язкості і пластичності). Використовують для середньовуглецевих сталей.

Термомеханічна обробка (ТМО) – сукупність операцій пластичної деформації і термічної обробки, які поєднанні в одному технологічному процесі, що передбачає нагрівання, пластичне деформування й охолодження. Виконують для покращення структури та підвищення механічних властивостей.

Розрізняють два види обробки:

- високотемпературну термомеханічну обробку (ВТМО) – виконують за температур, що перевищують температуру рекристалізації (аустенітна структура), ступінь деформування – 20–30 %; для запобігання

рекристалізації після деформування відразу проводять загартування (1150 °С) з подальшим низько-температурним відпуском;

– низькотемпературну термомеханічну обробку (НТМО) – деформація виконують за температур нижче за температури рекристалізації (400–600 °С), потім відразу виконують загартування й низько-температурний відпуск. Використовують тільки для легованих сталей, що мають значну стійкість переохолодженого аустеніту. Ступінь деформування – 75–95 %.

Хіміко-термічна обробка (ХТО) – процес поверхневого насичення сталі різними елементами з метою надання їй відповідних властивостей. Крім структурних змін, відбувається зміна складу й будови через дифузію у сталь елементів в атомарному стані із зовнішнього середовища за високих температур. Мета – зміцнення поверхні деталей, підвищення твердості, зносостійкості, втомної міцності тощо та підвищення стійкості проти дії агресивних середовищ.

Види обробки:

- цементування;
- азотування;
- ціанування;
- нітроцементування;
- борування;
- дифузійна металізація (силіціювання, алітування, хромування, цинкування).

Контрольні запитання для самоперевірки

1. Дати визначення поняття «термічна обробка сплавів». Назвіть основні параметри термічної обробки.
2. Назвіть види термічної обробки сталей і сплавів.
3. Дати визначення поняття «відпал».
4. Розкрийте поняття «нормалізація».
5. Дати визначення поняття «загартування». Назвіть відомі вам способи загартування.
6. Розкрийте поняття «відпуск». Назвіть види відпуску.

Список літератури

1. Архипова Т. Ф. Прикладне матеріалознавство : навч. посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 60 с.
2. Афтанділянц Є. Г. Матеріалознавство : підручник / Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. – Київ : Вища освіта, 2012. – 548 с.
3. Бабак В. П. Конструкційні та функціональні матеріали / Бабак В. П., Байса Д. Ф. та інші. – Київ : Техніка, 2003. – 344 с.
4. Виробництво залізобетонних конструкцій і виробів : довідник / під загальною редакцією Гоц В. І. – Київ : Основа, 2019. – 464 с.
5. Кузін О. А., Яцюк Р. А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник. – Львів : Афіша, 2002. – 304 с.
6. Матеріалознавство : підручник / Дяченко С. С., Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков Е. І.; за ред. проф. С. С. Дяченко. – Харків : ХНАДУ, 2007. – 440 с.
7. Найденко В. І. Фізика та методи дослідження сировини та матеріалів : навчальний посібник. – Київ : КНТУ, 2004. – 509 с.
8. Пахолюк А. П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали : посібник / Пахолюк А. П., Пахолюк О. А. – Львів : Світ, 2005. – 172 с.
9. Петрикова Є. М. Арматура для залізобетонних конструкцій : навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ : Основа, 2010. – 256 с.
10. Поплавко Ю. М. Фізичне матеріалознавство : навчальний посібник / Поплавко Ю. М., Воронов С. О., Якименко Ю. І. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – Ч. 3. Провідники та магнетики. – 372 с.
11. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник / В. В. Попович, В. В. Попович. – Львів : Світ, 2006. – 624 с.

Навчальне видання

ПЕТРИКОВА Євгенія Миколаївна,
МАЙСТРЕНКО Алла Анатоліївна,
АМЕЛІНА Наталія Олексіївна та ін.

АРМАТУРА ДЛЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Конспект лекцій
у трьох частинах

Частина 1
Метали і сплави

Редагування та коректура *Т. В. Івченко*
Комп'ютерне верстання *Л. В. Лабунець*

Підписано до друку 08.02. 2024 Формат 60 x 84 ^{1/16}
Ум. друк. арк. 3,95 Обл.-вид. арк. 4,25
Електронний документ. Вид. № 33/І-23

Видавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002