

МІНІСТЕРСТВО АГРАРНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Клименко В.М.

ПРАКТИКУМ З МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

Навчальний посібник для студентів денної форми навчання спеціальності
6.090102 ” Технологія виробництва та переробки продуктів тваринництва”

Вінниця
ВНАУ - 2009

ЗМІСТ

Практичне заняття № 1 Атомно-кристалічна будова металів.....	4
Практичне заняття № 2 Кристалізація металів.....	8
Практичне заняття № 3 Сплави	12
Практичне заняття № 4 Типи діаграм стану	16
Практичне заняття № 5 Типи діаграм стану	20
Практичне заняття № 6 Залізовуглецеві сплави	24
Практичне заняття № 7 Термічна обробка сталі	28
Література.....	31

Практичне заняття № 1

Тема: Атомно-кристалічна будова металів

Ключові слова: кристалічна ґратка, далекий порядок, анізотропія властивостей, поліморфізм, текстура, дефекти кристалічної будови, дифузія

1.1 Загальна характеристика металів

Всі метали і металеві сплави – тіла кристалічні, атоми розташовані в них закономірно на відміну від аморфних тіл, де атоми розташовуються хаотично.

Метали, якщо їх отримують звичайним способом, є тілами полікристалічними, які складаються з великої кількості дрібних кристалів (10^{-1} - 10^{-5} см), по різному орієнтованих відносно один до одного. Внаслідок умов кристалізації вони мають неправильну форму і називаються *кристалітами* або *зернами* (рис.1.1).

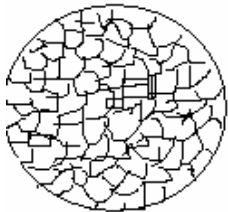


Рис.1.1 – Схема кристалічної будови металу

Метали в твердому стані мають низку характерних властивостей:

- високу тепло- та електропровідність;
- позитивний температурний коефіцієнт електричного опору; з підвищенням температури електричний опір чистих металів росте; у більшості металів при температурі, близькій до абсолютного нуля, електричний опір падає практично до нуля (явище надпровідності);
- термоелектронну емісію, тобто здатність випускати електрони при нагріванні;
- метали непрозорі і мають металевий блиск;
- метали мають підвищену здатність до пластичного деформування.

Наявність цих властивостей і характеризує так званий *металевий стан речовини*.

1.2 Атомно-кристалічна будова металів

Під атомно-кристалічною будовою металів розуміють взаємне розташування атомів у кристалі. Якщо через центри атомів умовно провести лінії, то отримаємо уявну просторову сітку, яку називають просторовою або *кристалічною ґраткою (решіткою)* – рис.1.2. В металах таке упорядковане розташування атомів в кристалічній ґратці зберігається на великих відстанях і це в металознавстві називають *далеким порядком*.

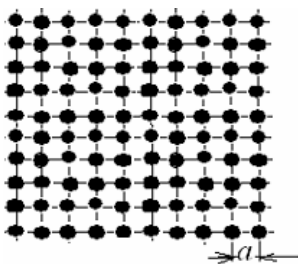


Рис.1.2- Кристалічна ґратка

Найменший об'єм кристалу, який дає уявлення про атомну структуру металу, має назву *елементарної кристалічної комірки (чатунки)*. Вся ґратка або кристал побудована шляхом послідовного переміщення у просторі такої елементарної комірки.

Переважає більшість металів утворюють одну з наступних видів кристалічної комірки: 1) кубічну об'ємно-центровану – ОЦК - ґратку (рис.1.3,

а); 2) кубічну гранецентровану – ГЦК - гратку (рис.1.3, б); 3) гексагональну щільноупаковану – ГЦУ – гратку (рис.1.3, в).

Розміри кристалічної гратки характеризуються величинами періодів, якими позначаються відстані між найближчими паралельними атомними площинами, що утворюють елементарну комірку (рис.1.3). Період гратки "а" вимірюється в **ангстремах** ($1\text{Å} = 10^{-10}\text{м}$) і знаходиться в межах $1...7\text{Å}$.

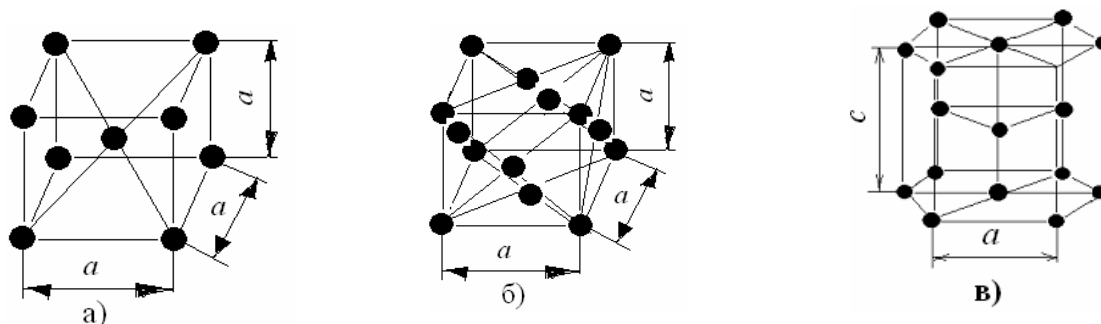


Рис.1.3 – Схеми кристалічних граток: а) – кубічна об’ємно-центрована (ОЦК); б) – кубічна гранецентрована (ГЦК); в) – гексагональна щільноупакована (ГЦУ)

Очевидно, що щільність розташування атомів по різних площинах кристалічної комірки неоднакова. Так, наприклад, площині, що проходить через грань комірки ОЦК-гратки, належить лише один атом, а площині, яка проходить через діагональ цієї ж гратки – 2 атоми. Внаслідок цього різні властивості (хімічні, фізичні, механічні) кожного кристалу в різних площинах і напрямках будуть різними. Це явище називається **анізотропією** властивостей. Технічні метали є полікристалічними, тобто складаються з великої кількості анізотропних кристалів. Оскільки ці кристали статистично невпорядковано орієнтовані відносно один одного, то властивості полікристалічного тіла практично однакові по всіх напрямкам, тобто полікристалічне тіло є ізотропним. Якщо ж внаслідок значної холодної деформації створити переважну орієнтованість кристалів у певних напрямках (створити **текстуру**, рис.1.4, б), то полікристалічний метал набуде анізотропії властивостей.

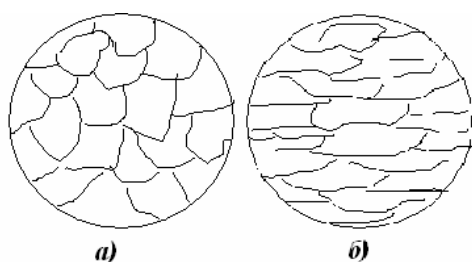


Рис.1.4 – Структура металу до пластичного деформування (а) і після холодного пластичного деформування(текстура) (б)

1.3 Поліморфні перетворення. Багато металів (залізо, кобальт, манган, олово, ванадій та ін.) в залежності від температури можуть мати різні типи кристалічних граток. Таке явище називається **поліморфізмом**, а перетворення одного типу гратки в інший – поліморфним перетворенням. Поліморфну модифікацію, стійку при більш низькій температурі, зазвичай позначають літерою α , при більш високій температурі – β , далі – γ і т.д. Так, залізо при температурі 911°C змінює ОЦК гратку на ГЦК. Записується таке перетворення так: $\text{Fe}_\alpha \rightleftharpoons \text{Fe}_\gamma$. Перехід чистого металу з однієї поліморфної модифікації в іншу в умовах рівноваги відбувається при постійній температурі (критична точка) і

супроводжується виділенням теплоти, якщо перетворення відбувається при охолодженні, або поглинанням теплоти при нагріванні.

Поліморфні перетворення відбуваються не тільки в чистих металах але і в сплавах. В цих випадках поліморфні перетворення відбуваються в інтервалі температур і при інших температурах ніж в чистих металах (більших або менших) в залежності від додаткового компонента в сплаві і його концентрації.

Поліморфне перетворення супроводжується утворенням нових кристалічних зерен інших розмірів і форми та зміною усіх властивостей металів і сплавів – фізичних, хімічних, механічних та ін.

1.4 Дефекти кристалічної будови металів В реальному кристалі завжди є дефекти будови. Вони поділяються на *точкові*, *лінійні* та *поверхневі*.

Точкові дефекти. До них відносяться *вакансії*, тобто вузли ґратки, в яких атоми відсутні внаслідок їх переходу на поверхню границь зерен, порожнин, тріщин, простір тощо (дефекти Шоткі) та в міжвузельний простір (дефекти Френкеля) (рис.1.5). З ростом температури концентрація вакансії зростає і може досягти 1% по відношенню до числа атомів у кристалі. Вакансії утворюються і внаслідок пластичного деформування. Точкові дефекти призводять до місцевого спотворення кристалічної ґратки.



Рис.1.5 – Точкові дефекти в кристалічній ґратці

Лінійні дефекти. Ці дефекти називаються *дислокаціями*. Вони утворюються внаслідок неповного зсуву однієї частини кристала відносно іншої, тобто коли частина кристалу не зазнала зсуву. На границі деформованої і недеформованої частин кристалу і утворюється дислокація.

Поверхневі дефекти – це, головним чином, поверхні розділу між окремими зернами полікристалічного металу. Ці поверхні мають ширину в 5 – 10 міжатомних відстаней і в цих границях атоми розташовані не так упорядковано, як в об'ємі самого зерна. Крім того, по границях зерен концентруються домішки, які є в навіть найчистіших металах, не кажучи вже про технічні метали, що ще більш порушує правильний порядок розташування атомів.

Наявність дефектів кристалічної структури в значній мірі позначається на механічних властивостях металів. Так, теоретичними і практичними дослідженнями встановлено, що міцність заліза, невеличкі зразки якого вдається отримати з бездефектною структурою, майже в 100 разів вища, ніж заліза, отриманого традиційними методами.

1.5 Дифузія

Значна кількість процесів, які протікають в металах і сплавах (процеси кристалізації, фазові перетворення, рекристалізація, процеси насичення поверхні іншими компонентами тощо) мають дифузійний характер. Під дифузією розуміють переміщення атомів в кристалічному тілі на відстані, які перевищують середні міжатомні відстані даної речовини. Дифузія протікає в напрямленні від об'ємів з більшою концентрацією дифундуючої речовини до об'ємів з меншою концентрацією і з тим більшою швидкістю, чим вище температура. Швидкість дифузії атомів з малим атомним радіусом (вуглець,

азот) в металах, наприклад в залізі, більша, ніж атомів елементів з більшим атомним радіусом.

Контрольні питання

1. Які основні властивості притаманні металам?
2. Які типи кристалічних ґраток Ви знаєте?
3. В чому полягає анізотропія властивостей кристалів?
4. Що таке текстура? Коли вона виникає?
5. Чи має текстурований метал анізотропні властивості?
6. Які властивості має метал, в якого з'явилася текстура?
7. Які дефекти структури кристалічного тіла Ви знаєте?
8. Що таке дислокації?
9. Що називається поліморфізмом?
10. Якими наслідками супроводжуються поліморфні перетворення в чистих металах?
11. Які особливості поліморфних перетворень в сплавах?
12. Що означає термін "далекий порядок"?
13. Що таке дифузія і від чого залежить її швидкість?

Практичне заняття № 2

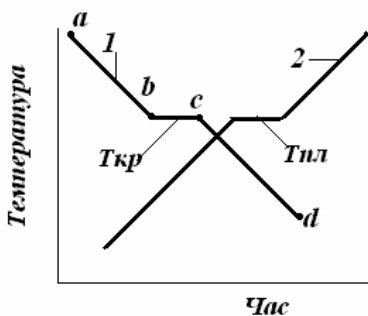
Кристалізація металів

Ключові слова: кристалізація, криві охолодження, ступінь переохолодження, близький порядок, центри кристалізації, модифікатори, макроструктура, мікроструктура, макро – та мікрошліфи, злам, ліквіація, термопара

2.1 Формування структури металу при кристалізації

Кристалізацією називається перехід металу з рідкого стану в твердий (кристалічний). Якщо неперервно вимірювати температуру металу з рідкого стану до кімнатної температури (20° С) і фіксувати її через проміжки часу з можливо меншим інтервалом (≈ 10 с) а потім нанести ці дані на графік, побудований в координатах Температура – Час, то отримаємо так звану криву охолодження (рис.2.1, крива 1). Горизонтальна площадка на цій кривій, яка свідчить про те, що з часом температура металу не змінюється, і буде температурою кристалізації. При нагрівнні металу з кімнатної температури до рідкого стану (рис.1.2, крива 2) отримаємо криву нагрівання, на якій також буде температурна зупинка. Ця температура буде температурою плавлення. Дільниця *a-b* на кривій охолодження 1- це падіння температури в рідкому металі, дільниця *b-c* – це температура кристалізації металу. Від початку до кінця кристалізації ця температура не змінюється внаслідок того, що виділяється так звана теплота кристалізації, яка і підтримує сталу температуру під час кристалізації. Дільниця *c-d* - це падіння температури твердого металу при його охолодженні до кімнатної температури.

Рис. 2.1 – Криві охолодження (1) та нагрівання (2) чистого металу



Температури кристалізації та плавлення будуть співпадати і будуть істинними тільки при дуже малих швидкостях охолодження або нагрівання. Якщо ж охолодження вести з більшими швидкостями, то процес кристалізації протікає при температурах, що лежать значно нижче рівноважної температури кристалізації. Різниця між цими температурами називається ступенем переохолодження (Δt). Термічні криві (криві охолодження), що характеризують процес кристалізації чистих металів при охолодженні з різними швидкостями (v), наведені на рис.2.2.

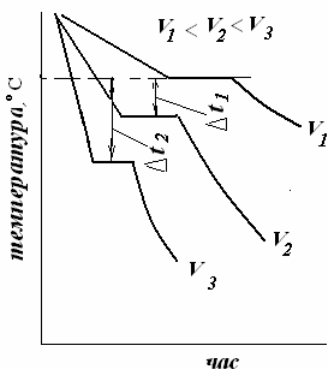


Рис. 2.2- Криві охолодження при кристалізації металу

Ступінь переохолодження залежить від природи та чистоти металів. Чим чистіший метал, тим він більш схильний до переохолодження. Для більшості металів ступінь переохолодження Δt становить 10...30° С. На кривих охолодження 1 (нагрівання 2) поліморфних металів крім температурних зупинок, які відповідають

температурам кристалізації або плавлення, будуть також температурні зупинки, які відповідають температурам поліморфних перетворень (рис.2.3).

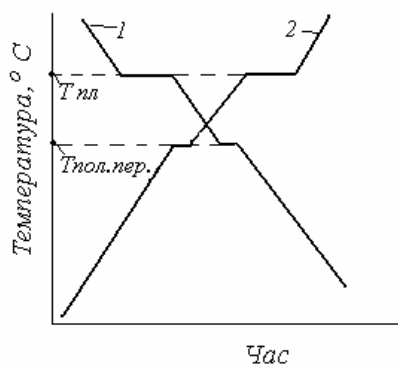


Рис. 2.3 – Крива охолодження (1) і нагрівання (2) поліморфного металу з одним поліморфним перетворенням

В рідкому металі упорядкована кристалічна гратка (див.рис.1.1) зберігається тільки в окремих мікрооб'ємах металу, кількість і величина яких зменшується з підвищенням температури рідкого металу. Для рідкого металу характерний так званий близький порядок, коли упорядковане розташування атомів розповсюджується на дуже невеликі відстані. Зі зниженням температури кількість і величина таких мікрооб'ємів збільшується і при температурі, близькій до температури кристалізації, з'являються окремі невеликі об'єми (так звані фазові флуктуації), найбільш крупні з яких перетворюються в зародки (центри) кристалізації, навкруги яких при подальшому зниженні температури ростуть кристали металу. Мінімальний розмір зародка, здатного до росту при певних температурних умовах, називається критичним. Розмір критичного зародка зменшується із збільшенням ступеня переохолодження. У зв'язку з цим із збільшенням ступеня переохолодження, тобто із збільшенням швидкості охолодження, здатними до росту стають зародки все меншого розміру, їх кількість значно зростає і, таким чином, структура металу стає більш дрібнозернистою, що позитивно відображається на його механічних властивостях.

Описаний механізм кристалізації шляхом утворення зародків кристалізації характерний тільки для дуже чистих металів. Автором цього механізму є відомий вчений-металознавець Д.К.Чернов. В технічних же сплавах завжди присутня велика кількість домішок, які при певних умовах можуть бути центрами кристалізації і, таким чином, також зменшувати розміри зерен в затверділому металі. Крім того, в практиці виплавки металів використовують штучне введення в рідкий метал спеціальних домішок для утворення дрібного зерна. Такі домішки називаються модифікаторами, а сам процес обробки рідкого металу – модифікуванням. Модифікатори, практично не змінюючи хімічного складу металу, викликають при кристалізації зменшення розмірів зерен а, отже, покращання механічних властивостей металу.

2.4. Методи дослідження металів.

Розрізняють макроструктуру (будову металу або сплаву, видимою неозброєним оком або при невеликому збільшенні в 30 - 40 раз) і мікроструктуру (будову металу або сплаву, яка спостерігається з допомогою мікроскопа при значних збільшеннях).

Макроструктуру можна досліджувати по зламу і на спеціальних макрошліфах.

Дослідження зламу (фрактографія) – найбільш простий метод виявлення кристалічної будови металу (рис.2.4, а)

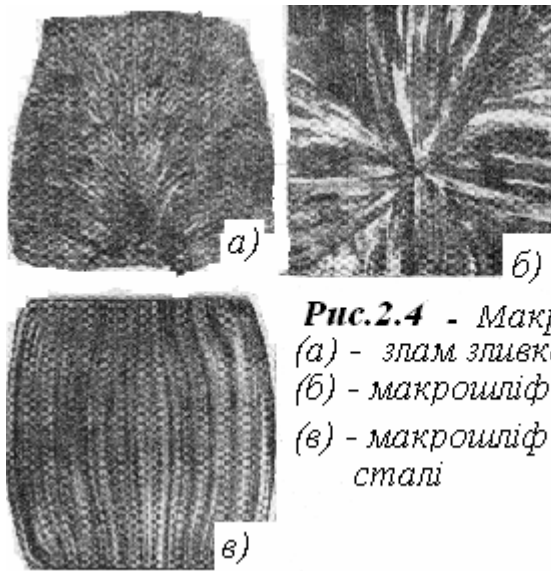


Рис.2.4 - Макроструктури:
 (а) - злам зливка цинку ;
 (б) - макрошліф зливка міді;
 (в) - макрошліф деформованої сталі

В багатьох випадках по зламу металу можна судити про форму і розміри зерен, про особливості виплавки металу, термічній обробці, тобто про механічні властивості металу.

При дослідженні макроструктури на спеціальних макрошліфах зразки вирізають з виробів, поверхню зразка

ретельно шліфують, обробляють спеціальними реактивами і досліджують неозброєним оком або при невеликих збільшеннях. При цьому можна визначити форму і розташування зерен в литому металі (рис.2.5, б), волокна після обробки тиском (рис.2.5, а), різноманітні дефекти (тріщини, раковини, неметалеві включення), хімічну неоднорідність металу (*ліквацію*) тощо.

Мікроструктура показує взаємне розташування фаз та структурних складових (рис.2.5).

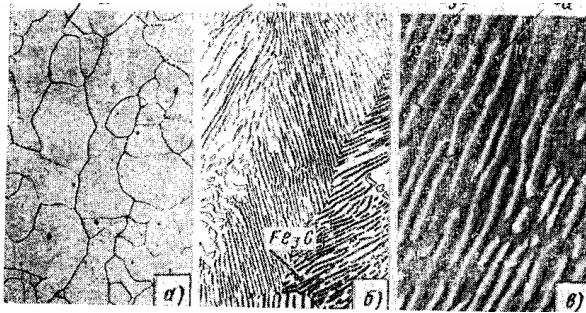


Рис.2.5 – Мікроструктура сталі різного хімічного складу

Для вивчення мікроструктури з досліджуваного металу вирізають зразок, одну з площин якого ретельно шліфують, полірують і обробляють спеціальним

реактивом (протравлюють). Мікроструктуру спостерігають в металографічних мікроскопах – оптичних або електронних. В оптичних мікроскопах мінімальний розмір об'єкту (деталі структури), який можна спостерігати, становить 0,2 мкм (2000 Å). Корисне збільшення в оптичному мікроскопі становить від 100 до 2000 раз.

Застосування електронних мікроскопів дає можливість розрізнати деталі структури розмірами 2-5 Å, що за своїми розмірами відповідають міжатомним відстаням.

Для дослідження перетворень в металі під час його охолодження з рідкого стану до кімнатної температури, наприклад, для побудови кривих охолодження використовують *термічний аналіз*, суть якого полягає в неперервному вимірюванні температури металу з рідкого стану до кімнатної температури (20° С). Фіксуючи температурні показники через проміжки часу з можливо меншим інтервалом (≈ 10 с) а потім наносячи ці дані на графік, побудований в координатах Температура – Час, отримуємо *криву охолодження* (див. рис.2.1, крива 1). Для вимірювання температури найчастіше використовують *термопару*. Термопарою називається датчик температури, який складається з двох спаяних між собою різнорідних струмопровідних дротів 1 і 2 (рис.2.7) – *термоелектродів*. Якщо місця контактів термоелектродів знаходяться при

різних температурах, то в ланцюзі термопари виникає електрорушійна сила, величина якої визначається температурами гарячого і холодного контактів і природою матеріалів, з яких виготовлені термоелектроди. Зазвичай, напруга цього струму 5...60 мВ і її можна зафіксувати на мілівольтметрі 3.

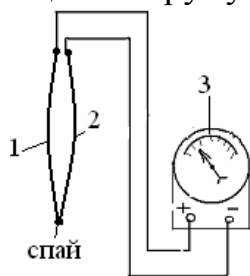


Рис.2.7 – Схема підключення термопари до реєструючого приладу

Термопари виготовляють з такими парами термоелектродів: сплав нікелю і алюмінію (*алюмель*) – один електрод, другий – сплав нікелю з хромом (*хромель*); пара платина-платинородій та ін. Спаяний кінець термоелектродів занурюють в розплавлений метал і через кожні 5...10с записують показники реєструючого приладу, шкала якого проградуєвана в градусах за Цельсієм. Потім будують криву охолодження. Всі зміни напрямку, які спостерігаються на кривій охолодження при певних температурах, називаються *критичними точками*. При цих температурах в металах відбуваються ті чи інші перетворення (кристалізація, поліморфні перетворення тощо).

Контрольні питання

1. Що називається кристалізацією металу?
2. Як будуються криві охолодження?
3. Що таке ступінь переохолодження?
4. Як впливає ступінь переохолодження на властивості металу?
5. Як виглядає крива охолодження чистого поліморфного металу з одним або кількома поліморфними перетвореннями?
6. Які методи дослідження металів Ви знаєте?
7. Як вимірюється температура при дослідженні перетворень в металах при їх охолодженні або нагріванні?

Практичне заняття № 3

Тема: Сплави.

Ключові слова: сплав, компонент, система, фаза, структура, структурні складові, тверді розчини, хімічні сполуки, діаграма стану, правило фаз, ліквідус, солідус

3.1 Сплави

Чисті метали в багатьох випадках не забезпечують необхідних властивостей, які повинен мати конструкційний матеріал, тому вони застосовуються дуже рідко. Головним чином використовуються **сплави**, які отримують сплавленням основного металу з іншими металами або неметалами. Хімічні елементи, що утворюють сплав, називаються **компонентами**. В металознавстві компоненти прийнято позначати великими літерами латинського алфавіту **A, B, C**.

В металознавстві широко використовують такі поняття як **фаза, структура, система, структурні складові**. Сукупність фаз, що знаходяться в стані рівноваги, називають **системою**. **Фазою** називають однорідні (гомогенні) складові частини системи, що мають однаковий склад, кристалічну будову та властивості, однаковий агрегатний стан і відокремлені від інших частин поверхнями розділу. Під **структурою** розуміють форму, розміри та характер взаємного розташування відповідних фаз в металах або сплавах.

Структурними складовими сплаву називають відокремлені частини сплаву, які мають однакову будову з притаманними їм характерними особливостями. До складу структурних складових входять кілька фаз.

3.2 Фази в сплавах

В залежності від фізико-хімічної взаємодії компонентів в сплавах можуть утворюватись такі фази: рідкі розчини, тверді розчини, хімічні сполуки та окремі компоненти, що входять до складу цих сплавів.

3.2.1 Тверді розчини

Твердими розчинами називають фази, в яких один з компонентів сплаву зберігає свою кристалічну ґратку, а атоми іншого компоненту розташовуються в ґратці першого компоненту (розчинника), змінюючи її розміри (періоди). Таким чином, твердий розчин, який складається з двох компонентів, має один тип ґратки і представляє із себе одну фазу. Тверді розчини зазвичай позначають малими літерами грецького алфавіту – α, β, γ і т.д.

Розрізняють тверді розчини заміщення, в яких атоми розчиненого компоненту **B** заміщають частину атомів розчинника **A** в його кристалічній ґратці (рис.3.1, *а*) і тверді розчини проникнення (рис.3.1, *б*), в яких атоми розчиненого компоненту **B** розташовуються в тих місцях розчинника, де для них знаходиться більше вільного простору.

Якщо, наприклад, система (сплав) складається з двох компонентів **A** та **B**, які в твердому стані можуть взаємно розчинятися один в одному, утворюючи тверді розчини α і β , то записують це так: тв.розчин α – **A(B)**, тв.розчин β – **B(A)** (поза дужками ставиться компонент-розчинник, в дужках – компонент, що розчиняється).

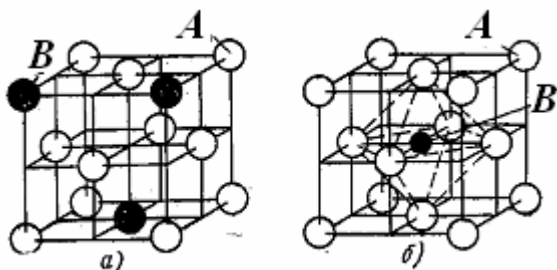


Рис.3.1 – Схеми твердих розчинів:
а) – заміщення; *б*) – проникнення.

Більшість металів у твердому стані в тій чи іншій мірі можуть розчинятися один в одному без зміни типу їх кристалічної ґратки. Це розчинення може бути або обмеженим або необмеженим. Так, обмежено розчиняється цинк в міді (до 39%), мідь а алюмінії (до 5,5%). Необмежені тверді розчини утворюють срібло з золотом, нікель з міддю, вольфрам з молібденом та ін. З утворенням твердих розчинів заміщення компоненти можуть розчинятися як обмежено, так і необмежено, а твердих розчинів проникнення – тільки обмежено.

Мікроструктура твердих розчинів представляє собою однорідні кристалічні зерна (рис.3.2, б) і практично не відрізняється від структури чистого металу (рис.3.2, а).

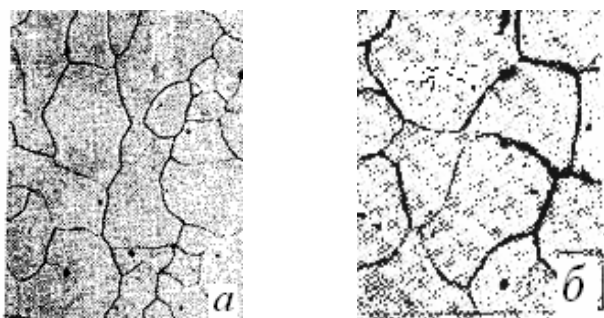


Рис.3.2 – Мікроструктури чистого заліза (а) і твердого розчину вуглецю в залізі (б)

3.2.2 Хімічні сполуки

Якщо компоненти в сплавах здатні вступати в хімічні реакції і утворювати між собою хімічні сполуки, то ці сполуки є фазами. Такі хімічні сполуки мають деякі характерні особливості:

- їх кристалічна ґратка відрізняється від ґраток компонентів, що утворюють сполуку;
- склад хімічних сполук можна виразити простою формулою A_mB_n , де A і B відповідні елементи (компоненти); m і n - прості числа;
- властивості хімічних сполук суттєво відрізняються від властивостей компонентів, що їх утворюють;
- температура плавлення хімічних сполук вища за температури плавлення компонентів.

3.2.3 Окремі елементи як фази

В тих випадках, коли компоненти в сплавах і не розчиняються один в одному в твердому стані і не утворюють хімічних сполук, то при кристалізації вони затвердівають незалежно один від одного і їх розглядають як окремі фази. Вони можуть утворювати між собою механічні суміші, які розглядаються як структурні складові.

3.3 Діаграми стану

Діаграми стану, або діаграми фазової рівноваги, в зручній геометричній формі показують зв'язок між хімічним складом, температурою та структурою сплаву. Вони будуються для умов, коли всі можливі перетворення в сплаві при його охолодженні з рідкого стану до кімнатної температури (+20 °С) відбулися і сплав набув стабільного стану, тобто всі існуючі в ньому фази і структурні складові знаходяться в рівновазі.

Закономірності співіснування стійких фаз, які відповідають умовам рівноваги, можна виразити в математичній формі так званим **правилом фаз**. Це правило встановлює взаємний зв'язок між числом *степеней вільності* системи і кількістю компонентів і фаз. Число степеней вільності системи - це число незалежних факторів (температура, тиск і концентрація), які можна змінювати,

не змінюючи кількість фаз в системі. Коли мова йде про конкретний сплав, то незалежними факторами будуть температура і тиск. Але оскільки для металевих сплавів тиск практично не впливає на фазову рівновагу сплавів ні в рідкому ні в твердому станах, то, застосовуючи правило фаз до металів, можна вважати тільки один незалежний фактор, від якого залежить фазова рівновага – це температура. Рівняння правила фаз в цьому випадку набуде такого вигляду: $C = K + I - \Phi$, де C число степеней вільності; Φ – число фаз, що знаходяться в рівновазі; K – число компонентів, що утворюють систему; I – число незалежних зовнішніх факторів (температура). Якщо, наприклад, для сплаву з двох компонентів в певний момент його існування $\Phi = 3$, то $C = 0$ (система *нонваріантна*), тобто температура буде постійною до тих пір, поки не зміниться число фаз. Якщо число степеней вільності дорівнює одиниці (система *моноваріантна*), то можлива зміна температури в певних межах і це не викличе зміни кількості фаз.

Якщо це правило застосувати для чистого металу ($K=1$), то в момент кристалізації металу буде дві фази: рідка і тверда ($\Phi=2$) і число степеней вільності буде дорівнювати 0 ($C = 1 + 1 - 2 = 0$). Це означає, що дві фази знаходяться в рівновазі при строго визначеній температурі (температурі кристалізації або плавлення) і вона не може бути змінена до тих пір, поки одна з фаз не зникне. Цим пояснюється температурна зупинка (горизонтальна ділянка) на кривій охолодження (нагрівання) чистих металів (див. рис.2.1, рис.3.3, а).

Діаграми стану будують в координатах Температура – концентрація в % за масою. Для побудови діаграм стану використовують термічний аналіз: експериментально отримують криві охолодження чистих компонентів A і B а також окремих сплавів з різною концентрацією компонентів (сплави I, II, III, IV на рис.3.3), відмічають на цих кривих точки, в яких криві охолодження змінюють свій напрям (*критичні точки*). На кривих охолодження критичні точки 1 – це точки, при температурі яких починається кристалізація сплавів, а в точках 2 – закінчується кристалізація. Кристалізація сплавів $I - IV$ відбувається в інтервалі температур, оскільки за правилом фаз $C = 2 + 1 - 2 = 1$.

Температури цих точок переносять на діаграму, де координатами будуть температура і концентрація. З'єднавши на діаграмі отримані точки суцільними лініями, мають діаграму стану (рис.3.3, б).

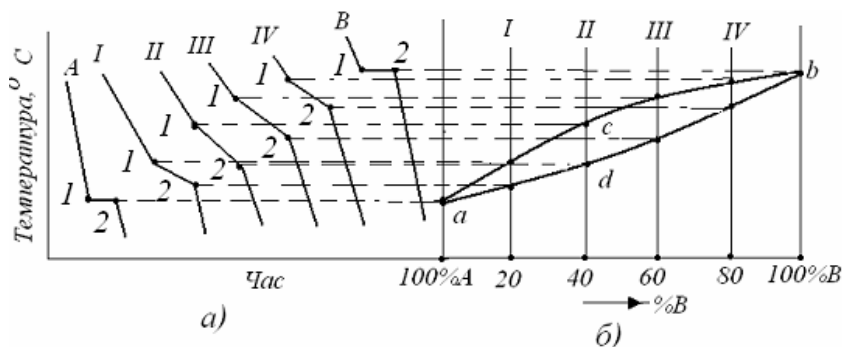


Рис.3.3 – Побудова діаграми стану: а) – криві охолодження; б) – діаграма стану.

На діаграмі стану геометричне місце точок 1 (верхня крива acb) називається лінією *ліквідус*, а геометричне місце точок 2 (нижня крива adb) – лінією *солідус* (ліквідус в перекладі з латини значить рідкий, а солідус – твердий). Очевидно, вище лінії ліквідус сплави знаходяться в рідкому стані, а нижче лінії солідус - в

твердому. Між лініями ліквідус і солідус сплави матимуть рідку фазу і кристали твердої фази, тобто будуть двохфазними.

Контрольні питання

1. Що таке фаза, система, структура, структурна складова?
2. Які фази існують в сплавах?
3. Які є типи твердих розчинів?
4. Які характерні особливості хімічних сполук в сплавах?
5. Що таке діаграми стану?
6. Як будуються діаграми стану?
7. Що таке критичні точки на кривих охолодження?
8. Які лінії на діаграмах стану називаються лініями ліквідус?
9. Які лінії на діаграмах стану називаються лініями солідус?
10. Що показують літери *a* і *b* на діаграмі стану (рис.3.3, б)

Практичне заняття № 4

Тема: Типи діаграм стану

Ключові слова: правило відрізків, евтектика, сплави доевтектичні і заевтектичні

4.1 Типи діаграм стану

Типи діаграм стану визначаються характером взаємодії, які виникають між компонентами в рідкому та твердому станах. В будь-якому випадку вважається, що в рідкому стані існує необмежена розчинність, тобто однорідна рідка фаза (в подальшому вона буде позначатися літерою *P*) існує при будь-яких співвідношеннях компонентів.

4.1.1 Діаграми стану для сплавів з утворенням механічних сумішей з чистих компонентів

Обидва компоненти в рідкому стані необмежено розчинні, а в твердому стані нерозчинні один в одному і не утворюють хімічних сполук.

Компоненти: речовини *A* і *B*.

Фази: рідина *P*, кристали компонента *A* і кристали компонента *B* (три фази).

Загальний вигляд діаграми стану показаний на рис.4.1. Лінія CED є лінією ліквідус (початок кристалізації), а лінія FEG – лінією солідус (кінець кристалізації).

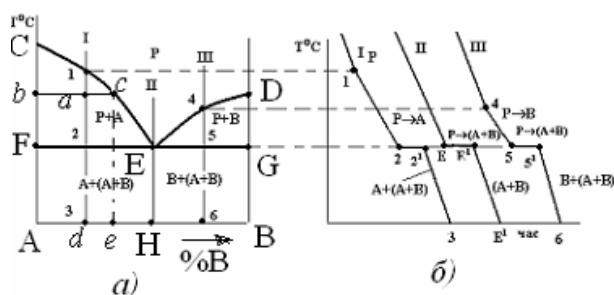


Рис.4.1–Діаграма стану (а) і криві охолодження (б) системи з відсутністю взаємної розчинності компонентів у твердому стані

На лінії CE при охолодженні починають виділятися кристали компонента *A*, а на лінії ED – кристали компонента *B*.

В діаграмах стану такого типу додавання як компонента *B* до компонента *A*, так і навпаки компонента *A* до компонента *B*, спричинює зниження температур кристалізації сплавів. З цієї причини лінія ліквідусу такої системи (рис. 4.1, а) опускається донизу з точок *C* і *D*. Обидві гілки лінії ліквідусу (*CE* і *DE*) перетинаються в точці *E*. Кожна з цих гілок є як лінією початку кристалізації того або іншого компонента (*CE* – компонента *A*, *DE* – компонента *B*), так і лінією граничного насичення рідкого розчину відповідними компонентом: на лінії *CE* рідина гранично насичена компонентом *A* і при подальшому зниженні температури відбувається його кристалізація; на лінії *ED* – компонентом *B*, який теж буде кристалізуватися при подальшому охолодженні. Точка *E* є спільною для обох кривих, отже, рідина такого складу гранично насичена обома компонентами, вони й будуть кристалізуватися одночасно і разом. Суміш двох твердих фаз, які кристалізуються одночасно і разом з рідини певного складу, називається **евтектикою** (евтектика в перекладі з грецької – така, що легко плавиться). Кристалізацію евтектики зазвичай називають реакцією евтектичного перетворення, яку можна виразити такою формулою: $P_E \rightarrow (A+B)$

(читається: рідина складу точки Е перетворюється в суміш двох фаз, тобто компонентів А і В). Ця суміш і є евтектикою. Евтектика є структурною складовою.

У кристалізації евтектики беруть участь три фази і згідно з правилом фаз система є нонваріантною, тобто кристалізація евтектики йде при постійній температурі, що й видно на кривих охолодження.

При кристалізації будь-якого сплаву цієї системи склад рідини буде змінюватися вздовж лінії ліквідусу до евтектичної точки Е, тобто кристалізація усіх сплавів закінчується утворенням евтектики. Оскільки це відбувається при постійній і однаковій для всіх сплавів температурі, то лінія солідусу даної системи є горизонтальною прямою FEG, яка називається **лінією евтектичного перетворення**.

Евтектична точка Е ділить усі сплави на **доевтектичні** (ліворуч від точки Е) та **заевтектичні** (праворуч від точки Е). В окрему групу виділяється **евтектичний** сплав (на рис.4.1, а) сплав II).

Розглянемо процеси кристалізації типових сплавів цієї системи. Доевтектичний сплав I кристалізується у два етапи. На першому в інтервалі температур 1-2 з рідини кристалізуються первинні кристали компонента (фази) А; потім в точці 2 рідина, що залишилася, закристалізується у вигляді евтектики. Отже, нижче точки 2 до точки 3, тобто до повного охолодження, сплав I буде мати структуру з двох складових: первинних кристалів компонента А та евтектики (суміші двох компонентів А і В) (рис. 4.2, а).

Евтектичний сплав II має всього один етап кристалізації – утворення евтектики, і, таким чином, одну структурну складову – евтектику (рис.4.2,б).

Заевтектичний сплав III кристалізується подібно до доевтектичного, але на першому етапі кристалізації з рідини виділяються кристали компонента В. Таким чином, кінцева структура заевтектичного сплаву складається з цих первинних кристалів і ділянок евтектики (рис. 4.2, в)

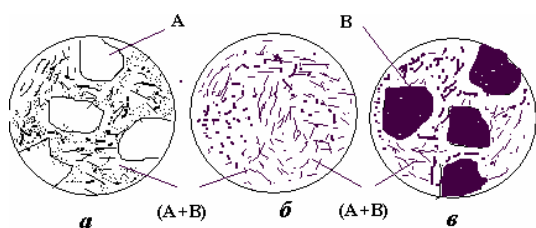


Рис. 4.2–Схеми мікроструктур доевтектичного (а), евтектичного (б) та заевтектичного (в) сплавів

4.1.1.1 Правило відрізків

В процесі кристалізації змінюються і концентрація фаз і кількість кожної фази. В будь-якій точці діаграми стану, коли в сплаві одночасно існують дві фази, можна визначити кількість кожної фази і їх концентрацію. Для цього використовують так зване **правило відрізків** або **правило важеля**.

Перше положення цього правила формулюється так: Для визначення концентрації компонентів у фазах при температурі певної точки, що характеризує стан сплаву, проводять горизонтальну лінію (коноду) до перетину з лініями, які обмежують дану область існування двох фаз; проєкції точок перетину на горизонтальну вісь концентрації показують склади фаз.

Так, для сплаву I при температурі точки "а" (рис.4.1, а) склади обох фаз визначаються проєкціями точок "b" і "c". Проєкція точки "b" – це 100% компонента (фази) А, а проєкція точки "c" (точка 'e') – це склад рідкої фази.

Якщо точка "a" визначає стан сплаву, точка "b" – склад твердої фази, а точка "c" – склад рідкої фази, то відрізок bc визначає всю кількість сплаву, відрізок ba - кількість рідини, а відрізок ac – кількість кристалів.

Друге положення правила відрізків: для визначення кількісного співвідношення фаз через задану точку проводять горизонтальну лінію – коноду. Відрізки цієї лінії між заданою точкою і точками, що визначають склад фаз, обернено пропорційні кількостям цих фаз.

Так, наприклад, в точці "a" (рис.4.1, a) кількість рідини буде:

$$\%P = \frac{ba}{bc}100\%, \text{ а кількість твердої фази (компонента А) - } \%A = \frac{ac}{bc}100\% .$$

За цим же правилом відрізків в сплаві I після повного його охолодження кількість фази А буде: $\%A = \frac{dH}{AH}100\%$, а кількість евтектики – $\frac{Ad}{AH}100\%$.

4.1.2 Діаграми стану систем, компоненти яких утворюють неперервний ряд рідких і твердих розчинів

Така діаграма є однією з найпростіших. Вона містить всього дві лінії (рис.4.3). Верхня з них CaD є лінією початку кристалізації будь-якого сплаву цієї системи і називається лінією ліквідус, а нижня CbD є лінією кінця кристалізації усіх сплавів і є лінією солідус.

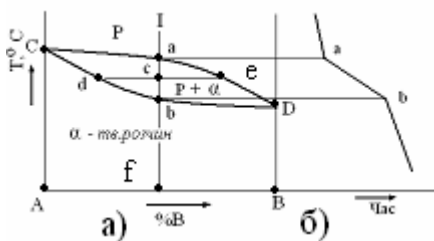


Рис.4.3 – Діаграма стану системи, компоненти якої утворюють неперервний ряд твердих розчинів (a) та крива охолодження типового сплаву I (б)

На діаграмі стану точки C і D є температурами кристалізації відповідно компонентів А і В. Сплав же будь-якої концентрації, наприклад, сплав I, кристалізуватиметься в інтервалі температур між точками a і b і після повного охолодження (точка f) буде мати остаточну структуру з зерен α – твердого розчину, який зображується так, як показано на рис.4.4

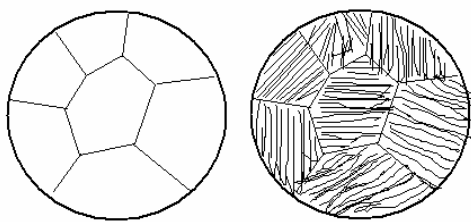


Рис.4.4 – Зображення мікроструктури α – твердого розчину

Для того, щоб визначити процентний вміст кожної фази (рідкої і α – твердого розчину), у двофазній області діаграми, яка знаходиться між лініями ліквідус і солідус, скористаємось правилом важеля. Так, при температурі точки 'c' кількість рідкої фази буде:, $\%P = \frac{dc}{de}100\%$, а кількість α – твердого розчину -

$$\%\alpha = \frac{ce}{de}100\% .$$

Контрольні питання

1. Як виглядає діаграма стану системи з абсолютно нерозчинними компонентами в твердому стані?
2. Який вигляд має діаграма стану системи з компонентами, які в твердому стані необмежено розчиняються один в одному?
3. Які лінії на діаграмах стану називаються лініями ліквідус?, солідус?
4. Як можна визначати кількісний фазовий склад в будь-якій двофазній області діаграм стану?

Практичне заняття № 5

Тема: Типи діаграм стану

Ключові слова: лінії граничного насичення, первинні та вторинні фази, евтектоїд, евтектоїдне перетворення.

5.1 Діаграми стану систем, компоненти яких в твердому стані обмежено розчинні один в одному

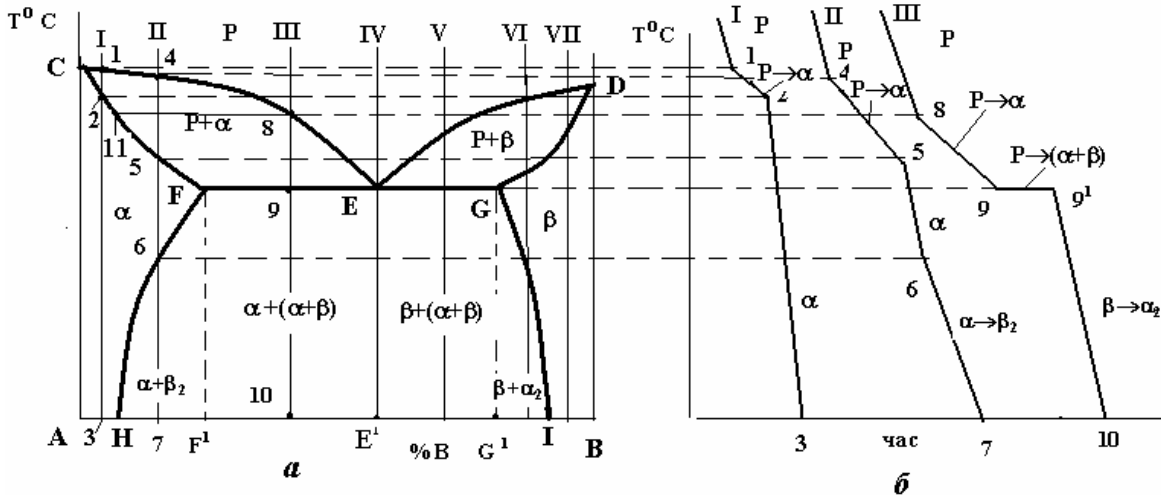


Рис.5.1 - Діаграма стану (а) і криві охолодження (б) системи з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані і евтектичним перетворенням

Лінією ліквідусу на цій діаграмі є лінія CED, а лінією солідусу – лінія CFEGD. На горизонтальній частині цієї лінії FEG відбувається евтектичне перетворення: $P_E \rightarrow (\alpha_F + \beta_G)$ (читається: рідина складу точки E перетворюється в суміш двох фаз - α -твердого розчину складу точки F і β -твердого розчину складу точки G), де α і β - обмежені тверді розчини компонента В у компоненті А (α) і компонента А в компоненті В (β).

Крім цих ліній на діаграмі є і дві нові – лінії так званого **сольвусу**, тобто обмеженої розчинності у твердому стані – FN і GI. Перша з них показує границю розчинності компонента В у компоненті А, тобто граничний вміст компонента В в α -твердому розчині. Відповідно, лінія GI є граничним вмістом компонента А в β -твердому розчині. З положення цих ліній видно, що взаємна розчинність компонентів із зниженням температури зменшується. Так, розчинність компонента В в α -твердому розчині зменшується з концентрації точки F до концентрації точки Н при кімнатній температурі, а компонента А в β -твердому розчині – від точки G до точки I. В будь-яких сплавах, концентрація яких знаходиться між точками Н-F або точками G-I, при охолодженні цих сплавів до температур ліній FN і GI тверді розчини α або β будуть ненасиченими, на цих лініях стають насиченими, а нижче ліній FN і GI – перенасиченими. І при подальшому охолодженні таких сплавів до кімнатної температури з них виділяються речовини, що їх перенасичують: з α -твердого розчину, наприклад від точки 6 до точки 7, виділяються кристали β -твердого розчину. Ці кристали називають вторинними, на відміну від первинних

кристалів β -твердого розчину, які виділяються безпосередньо з рідини нижче лінії ED, а процес виділення вторинних кристалів називають вторинною кристалізацією. Аналогічно відбувається вторинна кристалізація в сплавах, концентрація яких знаходиться між точками G-I, тільки в цих сплавах з β -твердого розчину виділяються вторинні кристали α -твердого розчину. Виділення вторинних кристалів найчастіше відбувається на межах зерен відповідного твердого розчину у вигляді окремих дисперсних часток або суцільних прошарків (рис. 5.2).

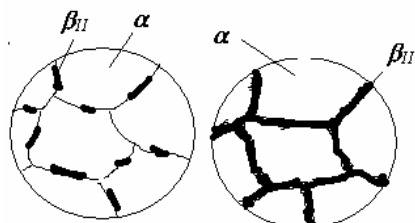


Рис.5.2 - Схеми мікроструктури сплаву II (рис.5.1)

Вказані лінії діаграми ділять її площу на 3 однофазні та 3 двофазні області. До однофазних належать область рідкого розчину (вище лінії ліквідусу CED), область CFHA α -фази і область DGIB β -фази. Двофазними є області CEF і DEG, в яких відбувається кристалізація первинних кристалів відповідно α - і β -твердих розчинів, а також область існування двох твердих розчинів α і β - HFGI. Схеми типових мікроструктур евтектичного, до- і заевтектичних сплавів показані на рис. 5.3

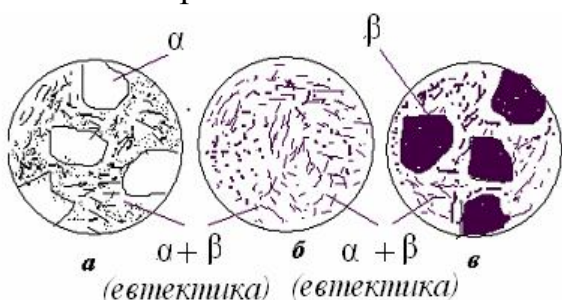


Рис. 5.3 - Схеми мікроструктур доевтектичного (а), евтектичного (б) та заевтектичного (в) сплавів

5.2 Діаграми стану систем з хімічними сполуками

В системах з двома компонентами можуть утворюватись хімічні сполуки між компонентами загальною формулою $A_m B_n$. Зазвичай ці хімічні сполуки утворюються безпосередньо з рідини: $P \rightarrow A_m B_n$. При цьому хімічна полука розглядається як окремий компонент. На рис.5.4 показані два можливих варіанти: **а** – з відсутністю розчинності компонентів у твердому стані і **б** – з утворенням обмежених твердих розчинів на основі як чистих компонентів, так і хімічної сполуки — α -, β - і γ -фаз.

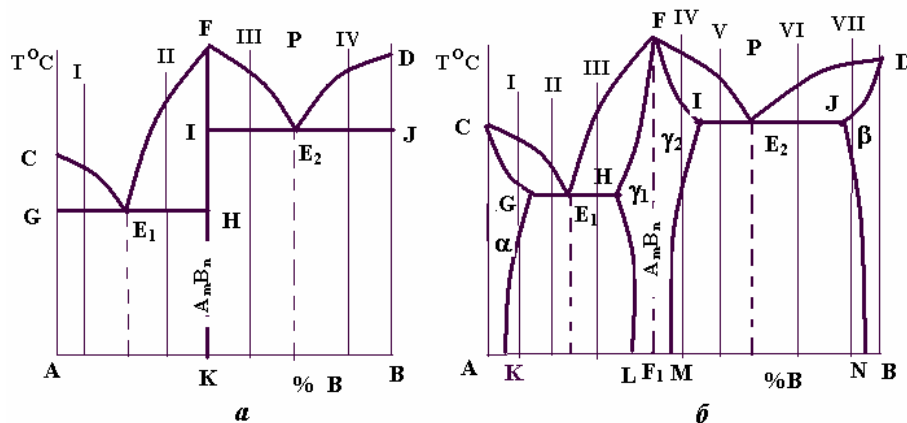


Рис.5.4. Діаграми стану систем з хімічними сполуками

Систему, діаграма стану якої зображена на рис. 5.4, *a*, можна розглядати як сукупність двох систем з компонентами А і A_mB_n та В і A_mB_n . Ці дві системи розділені вертикаллю FK. У кожній з підсистем утворюється власна евтектика – E_1 як суміш двох фаз – $(A + A_mB_n)$ і $E_2 (B + A_mB_n)$. Кристалізація і формування структур, наприклад, сплавів I, II, III, IV відбувається аналогічно тим, що були розглянуті нами в практичному занятті № 4 на рис 4.1.

Для систем, діаграма стану яких показана на рис.5.4,*б*, характерним є утворення обмежених твердих розчинів: твердого розчину хімічної сполуки A_mB_n в компоненті А – α -фази; твердого розчину хімічної сполуки в компоненті В – β -фази та твердих розчинів компонентів А і В в хімічній сполуці – відповідно γ_1 -фази і γ_2 -фази. Зазвичай ці тверді розчини γ_1 і γ_2 розглядаються як один твердий розчин — γ -фаза. Тому на діаграмі (рис.5.4, *б*) область FIMLHF розглядається як однофазна з твердим розчином γ . Пунктирна лінія FF₁ ділить цю область на дві частини: ліворуч від неї γ -фазу можна вважати твердим розчином компонента А в хімічній сполуці A_mB_n , праворуч – твердим розчином компонента В в цій же сполуці.

Евтектики в цій системі складаються з суміші кристалів твердих розчинів: $E_1(\alpha+\gamma)$, $E_2(\gamma+\beta)$.

Кристалізація сплавів і формування остаточних структур в цій системі відбувається аналогічно розглянутих в п.5.1 і на рис.5.1 цього практичного заняття.

5.3 Діаграми стану систем з поліморфними компонентами.

Поліморфні перетворення одного або обох компонентів сплаву суттєво змінюють його структуру і властивості. Такі перетворення є в багатьох промислових сплавах, наприклад, сплавах заліза, титану та ін. Конкретний вигляд діаграми стану визначається не тільки взаємодією компонентів, а і їх поліморфних модифікацій. Крім того важливу роль відіграє наявність або відсутність взаємної розчинності компонентів та їх поліморфних модифікацій у твердому стані. Тому діаграми стану з поліморфними компонентами надзвичайно численні.

Поліморфні перетворення компонентів в сплавах відбуваються в інтервалі температур на відміну від перетворень чистих компонентів і температури початку цих перетворень можуть або зростати або падати порівняно з чистими компонентами. На рис.5.5 наведена діаграма стану системи, компонент А в якій має дві поліморфні модифікації: A_α до температури точки С і A_β від точки С до температури плавлення (точкаD). В системі утворюються такі фази: β -твердий розчин – це розчин компонента В в A_β і α -твердий розчин – це розчин компонента В в A_α . Температура початку поліморфного перетворення компонента А з додаванням до нього компонента В падає від точки С до точки G, а закінчення цього поліморфного перетворення відбувається при температурах лінії SIG. В точці G відбувається так зване евтектоїдне перетворення за реакцією $\beta_G \rightleftharpoons \alpha_I + B$ (читається: β -твердий розчин складу точки G перетворюється на суміш двох фаз: α -твердого розчину складу точки I і компонента B).

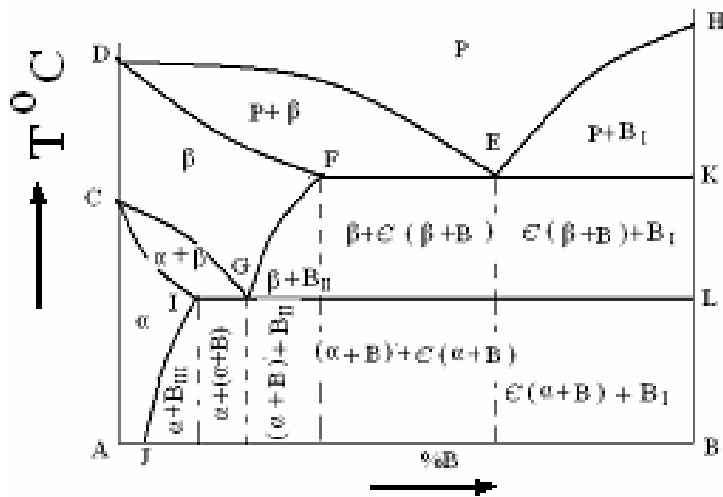


Рис.5.5 – Діаграма стану системи з поліморфним компонентом А

Ця суміш двох фаз є структурною складовою і називається евтектоїдом.

На відміну від евтектичного перетворення евтектоїдне перетворення відбувається в твердому стані. Ведучою фазою при охолодженні є не рідина як

при евтектичному перетворенні, а твердий розчин. Усі сплави ліворуч від точки G до точки I називаються доевтектоїдними, а сплави від точки G до точки F - заевтектоїдними.

Сплав точки E називається евтектичним, сплави від точки F до точки E - доевтектичними, а сплави від точки E до точки K - заевтектичними.

Контрольні питання

1. Які лінії на діаграмі стану називаються лініями сольвусу?
2. Яке перетворення називається евтектоїдним?
3. Яка структурна складова називається евтектоїдом?
4. Чим евтектичне перетворення відрізняється від евтектоїдного?

Практичне заняття №6

Тема: Залізовуглецеві сплави

Ключові слова: залізо, вуглець, ферит, аустеніт, цементит, графіт, діаграма стану залізо - вуглець

6.1 Компоненти

Компонентами залізовуглецевих сплавів є *залізо (Fe)* та *вуглець (C)*. Залізо плавиться при температурі 1539°C (точка А на діаграмі стану). Йому властивий поліморфізм, тобто в залежності від температури воно має різну кристалічну будову: до температури 911°C його кристалічна будова описується об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) граткою і воно позначається як Fe_{α} . При температурі 911°C (точка G на діаграмі стану) відбувається поліморфне перетворення, внаслідок якого Fe_{α} переходить у Fe_{γ} з ГЦК граткою. Ця поліморфна модифікація існує до температури 1392°C (точка N) і при цій температурі Fe_{γ} переходить в Fe_{δ} з ОЦК граткою, яка зберігається аж до температури плавлення 1539°C.

Вуглець має дві кристалічні модифікації - *графіт* та *алмаз*. В залізовуглецевих сплавах реалізується тільки одна з них, а саме - *графіт*. Його температура плавлення 3850°C.

Залізо з вуглецем можуть утворювати хімічну сполуку Fe_3C – *цементит*. Вміст вуглецю в цементиті становить 6,67%. Цією величиною і обмежується хімічний склад залізовуглецевих сплавів, тобто практичне значення мають тільки сплави з вмістом вуглецю до 6,67% (в більшості випадків – до 4,5...5,0%).

6.2 Фази в залізовуглецевих сплавах

В залізовуглецевих сплавах можливі такі фази: рідка – розчин заліза й вуглецю, та чотири твердих: 1) *ферит* – твердий розчин вуглецю в Fe_{α} та в Fe_{δ} . Його умовно називають відповідно низькотемпературним та високотемпературним феритом. Максимальна розчинність вуглецю в низькотемпературному фериті складає 0,02% при температурі 727°C. При кімнатній температурі розчинність вуглецю в фериті 0,002%. У високотемпературному фериті вуглець може розчинятися до 0,1% при температурі 1500°C. 2) Твердий розчин вуглецю в Fe_{γ} – *аустеніт*. Максимальна розчинність вуглецю в аустеніті 2,14% при температурі 1147°C. 3) *Цементит* – хімічна сполука Fe_3C . 4) *Графіт*.

6.3 Діаграма стану залізо-вуглець

Основою для вивчення процесів формування структур залізовуглецевих сплавів у всьому діапазоні їх хімічного складу є діаграма стану системи $Fe-C$ (рис.6.1).

Вуглець в залізовуглецевих сплавах може знаходитись у хімічно зв'язаному стані у вигляді *цементиту* – Fe_3C (Ц) або у вільному стані – у вигляді *графіту* (Г). В залежності від цього структуроутворення залізовуглецевих сплавів при їх охолодженні з рідкого стану можна розглядати за діаграмою метастабільної (нестабільної) рівноваги $Fe - Fe_3C$ (рис.6.1, суцільні лінії) або за діаграмою стабільної рівноваги $Fe - C$ (рис. 6.1, пунктирні лінії C^1D^1 , $E^1C^1F^1$, E^1S^1 , S^1K^1). В першому випадку весь вуглець в сплавах перебуває у вигляді цементиту, в другому – або повністю у вигляді графіту, або переважна його більшість.*

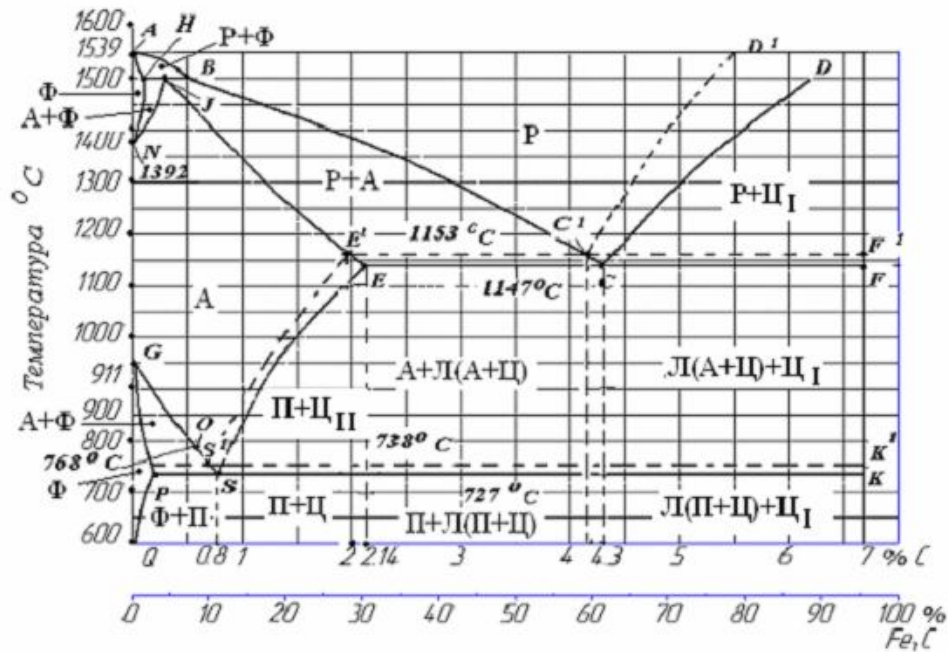


Рис. 6.1 – Діаграма стану Fe - Fe₃C: А – аустеніт; Р – рідина; Ц – цементит (Ц_I – первинний, Ц_{II} – вторинний, Ц_{III} – третинний); Φ – ферит; П – перліт; Л – ледебурит

Формування структур за діаграмою стабільної рівноваги реалізується тільки при дуже повільному охолодженні сплавів з рідкого стану. В практичних же умовах охолодження залізовуглецевих сплавів з рідкого стану до кімнатної температури формування структур здійснюється по діаграмі стану метастабільної рівноваги.

6.3 Характерні точки та лінії діаграми стану

6.3.1 Точки

Точка	Температура, °C	% вуглецю	Точка	Температура, °C	% вуглецю
A	1539	0	H	1500	0,1
B	1500	0,51	J	1500	0,16
C	1147	4,3	K	727	6,67
D	1500(?)	6,67	N	1392	0
E	1147	2,14	P	727	0,02
F	1147	6,67	Q	< 600	0,002
G	911	0	S	727	0,8

* Термін **метастабільна рівновага** означає, що цементит може розкладатися на залізо та графіт і при температурі вище 950°C це відбувається за декілька годин. При низьких же температурах цементит може існувати нескінченно довго.

6.3.2 Лінії

ABCD – лінія ліквідус, вище неї сплави знаходяться у рідкому стані; на дільниці ліквідусу АВ з рідини починають виділятися кристали високотемпературного фериту; на дільниці ВС – кристали аустеніту; на дільниці CD – кристали цементиту (первинного – C_I).

АНЕССF – лінія солідус, нижче цієї лінії стан усіх сплавів твердий; ЕСF – лінія евтектичного перетворення. На цій лінії відбувається перетворення за реакцією: $\text{P}_C \rightleftharpoons \text{A}_E + \text{Ц}$ (читається: рідина складу точки С перетворюється на суміш двох фаз – аустеніт складу точки Е і цементит). Ця суміш є евтектикою і називається ледебурит.

PSK – лінія евтектоїдного перетворення. На цій лінії відбувається перетворення за реакцією: $\text{A}_S \rightleftharpoons \text{F}_P + \text{Ц}$ (читається: аустеніт складу точки S перетворюється на суміш двох фаз – ферит складу точки P і цементит). Ця суміш є евтектоїдом і називається перліт.

ES – це лінія граничної розчинності вуглецю в аустеніті. При зниженні температури з 1147°C до 727°C розчинність вуглецю в аустеніті понижується з 2,14% до 0,8%. При охолодженні сплавів на цій лінії з аустеніту починають виділятися кристали цементиту. Цей цементит прийнято називати вторинним (C_{II}).

GS – це лінія на якій при охолодженні сплавів з аустеніту починають виділятися кристали низькотемпературного фериту. Закінчується це виділення на лінії GPS.

6.4 Залізовуглецеві сплави.

За положенням на діаграмі стану залізовуглецеві сплави поділяються на : 1) *технічне залізо* – сплави, що мають вміст вуглецю менше 0,02% (ліворуч від точки P); 2) *сталі* – сплави з вмістом вуглецю від 0,02 до 2,14% (на діаграмі стану заходяться в інтервалі концентрацій між точками P та E); 3) *чавуни* – сплави з вмістом вуглецю від 2,14 до 6,67% (на діаграмі стану знаходяться праворуч від точки C).

Технічне залізо має структуру практично чистого фериту (рис.6.2) з незначними включеннями цементиту. Воно м'яке, дуже пластичне, неміцне і як конструкційний матеріал в машинобудуванні не використовується.

Сталі – це один із основних конструкційних матеріалів. В сталях міститься від 0,02 до 2,14% вуглецю. На діаграмі стану вони розташовані між точками P і E.

За положенням на діаграмі стану сталі поділяються на:

1) евтектоїдну, хімічний склад якої відповідає точці S (0,8%С). Структура такої сталі – перліт (рис.6.3);

2) доевтектоїдні сталі, що знаходяться між точками P і S і містять від 0,02 до 0,8% вуглецю. Їх структура ферит і перліт (рис.6.4);

3) заевтектоїдні сталі. Це сталі з вмістом вуглецю від 0,8 до 2,14%. На діаграмі стану вони розташовані між точками S та E. Їх структура – перліт і вторинний цементит (рис.6.5).

Чавуни. Вміст вуглецю в чавунах від 2,14 до 6,67%. Вони поділяються на:

1) евтектичний із структурою ледебурит (точка C, 4,3% вуглецю) (рис.6.6, б);

2) доэвтектичні (2,14...4,3% вуглецю). Вони розташовані на діаграмі стану між точками E та C. Їх структура перліт і ледебурит (рис.6.6, а);

3) заэвтектичні (> 4,3% вуглецю, праворуч від точки C). Їх структура – ледебурит і первинний цементит (рис.6.6, в).

Структури залізовуглецевих сплавів

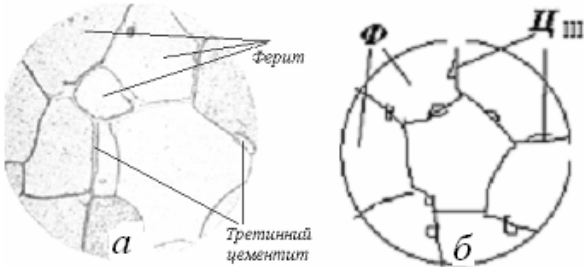


Рис. 6.2

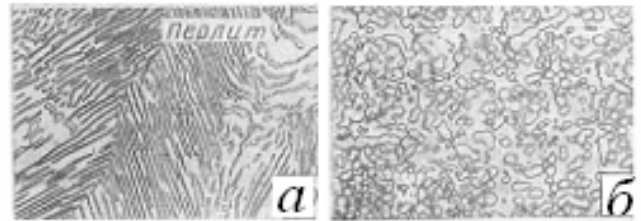


Рис.6.3

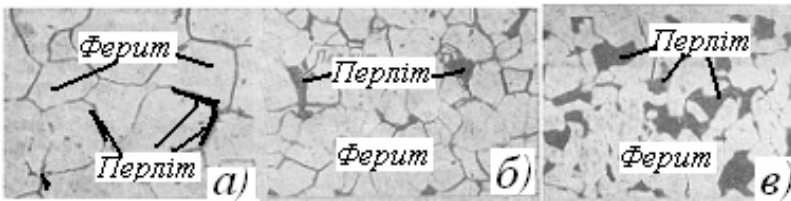


Рис.6.4

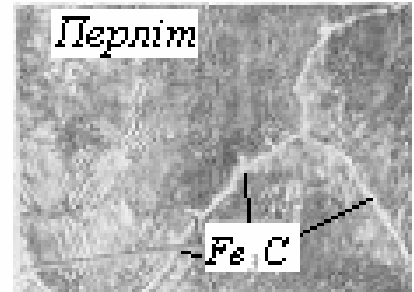


Рис.6.5

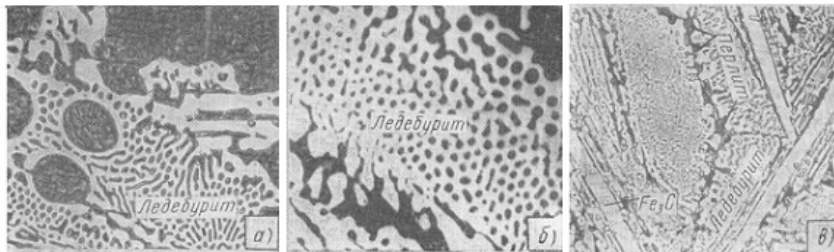


Рис. 6.6 – Мікроструктури чавунів: а – доэвтектичного; б – эвтектичного; в - заэвтектичного

Контрольні питання

- 1) Які фази існують у залізовуглецевих сплавах?
- 2) Що означають критичні точки G та N на діаграмі стану?
- 3) Які лінії на діаграмі стану є лініями ліквідусу та солідусу?
- 4) Що таке ферит? аустеніт? цементит?
- 5) Що таке ледебурит?
- 6) Що таке перліт?
- 7) Як поділяються залізовуглецеві сплави за положенням на діаграмі стану?
- 8) Де на діаграмі стану розташовані сталі? чавуни?
- 9) Який цементит називають первинним, а який – вторинним?

Практичне заняття № 7

Тема: термічна обробка сталі

Ключові слова: термічна обробка, відпал, наклеп, нормалізація, гартування, відпуск

Мета термічної обробки (в подальшому ТО) полягає в тому, щоб нагріванням металу до визначеної температури і наступним охолодженням викликати бажану зміну структури металу, і, таким чином, отримати потрібні його властивості.

Режим ТО характеризують такі основні параметри: температура нагрівання; швидкість нагрівання; час витримки при температурі, до якої метал нагрівають; швидкість охолодження.

До основних видів ТО, які різним чином змінюють структуру і властивості металу і які призначаються в залежності від вимог до заготовок і готових деталей, є *відпал, нормалізація, гартування та відпуск*.

Основою для вивчення термічної обробки сталей є діаграма стану залізо – вуглець. Оскільки ми розглядаємо ТО сталі, то нам цікаві тільки сплави з вмістом вуглецю до 2,14% і відповідно дільниця на діаграмі, де розташовані сталі (рис.6.1).

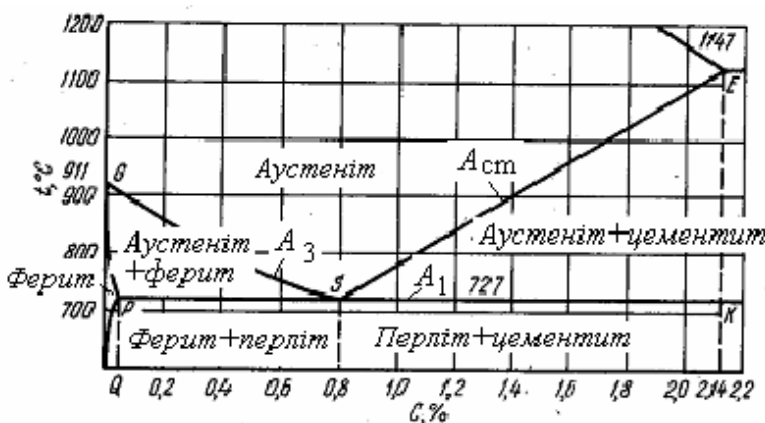


Рис.7.1 – "Стальна" дільниця діаграми Fe-C

В матеріалознавстві загальноприйняте позначення критичних точок (тобто точок, в яких відбуваються фазові перетворення) літерами А. Нижня критична точка, що позначається А₁, знаходиться

на лінії PSK і відповідає перетворенню *аустеніт* \rightleftharpoons *перліт* ($A \rightleftharpoons П$). Наступна критична точка А₃ знаходиться на лінії GS і відповідає перетворенню *ферит* \rightleftharpoons *аустеніт* ($Ф \rightleftharpoons А$). Критична точка, яка позначається як А_{cm}, знаходиться на лінії SE і відповідає перетворенню *аустеніт* \rightleftharpoons *цементит* (вторинний) ($A \rightleftharpoons Ц_{II}$).

Щоб відрізнити критичні точки при нагріванні від критичних точок при охолодженні поряд з літерою А ставлять літеру с, коли розглядають перетворення при нагріванні, і літеру r – при охолодженні.

Таким чином, критична точка перетворення аустеніту в перліт (при охолодженні сплавів) позначається Ar₁ (A→П), а перліту в аустеніт (при нагріванні) Ac₁ (П→A); початок виділення фериту з аустеніту (при охолодженні сплавів) позначається Ar₃; кінець розчинення фериту в аустеніті (при нагріванні) Ac₃; початок виділення вторинного цементиту з аустеніту (при охолодженні сплавів) позначається Ar_{cm}, а кінець розчинення вторинного цементиту в аустеніті (при нагріванні) – Ac_{cm}.

7.1 Відпал

Попередня обробка може привести метал в нестійкий стан. Так, холодне пластичне деформування створює таке явище як **наклеп** – підвищення твердості, міцності, зниження пластичності; при кристалізації внаслідок недостатньої швидкості дифузійних процесів хімічний склад металу, навіть в межах одного зерна, виявляється неоднорідним (тобто виникає внутрішньокристалічна **ліквація**); швидке або нерівномірне охолодження виливків або поковок після гарячого деформування викликає в них утворення термічних напружень. Такий нестійкий стан в подальшому може привести до незадовільних властивостей виробів, до втрати якості виробів під час їх експлуатації (деформації, втрати точності тощо). Для усунення такого нестійкого стану і приведення металу в більш стійкий стан застосовується такий вид термічної обробки як **відпал**. Поділяється відпал на **гомогенізаційний** (або **дифузійний**), **повний**, **неповний**, **рекристалізаційний**, **для зняття залишкових напружень** (**низький відпал**).

Дифузійний відпал застосовують для зливків легованої сталі з метою усунення внутрішньокристалічної ліквації, яка підвищує схильність сталі до крихкого руйнування, до анізотропії властивостей, до зниження пластичності і в'язкості. Нагрівання при дифузійному відпалі повинно бути високим ($A_{c3} + 100 \dots 200$ °C) і тривалість витримки при такій температурі досягає 8...20 год. Охолодження після такого відпалу повільне, разом з піччю, в якій відбувався відпал.

При **повному** відпалі сталі нагріваються вище точки A_{c3} на 30...50°C з наступним повільним охолодженням, що забезпечує низьку твердість і добру наступну оброблюваність різанням. Повному відпалу піддають доевтектоїдні сталі (з вмістом вуглецю до 0,8%). Це зазвичай сортовий прокат, поковки і фасонні виливки. Його мета – усунення дефектів структури, передусім – крупнозернистості.

Неповний відпал полягає в нагріванні сталі до температури $A_{c1} + 10 \dots 30$ °C, витримці і наступному повільному охолодженні (разом з виключеною піччю). Сталі, як доевтектоїдні так і заевтектоїдні, піддають неповному відпалу з метою їх пом'якшення і покращання оброблюваності різанням. Для заевтектоїдних сталей застосовують тільки неповний відпал. Пом'якшення і покращання оброблюваності різанням для цих сталей настає внаслідок отримання зернистого перліту після неповного відпалу замість пластинчастого перліту, який був у структурі сталі до відпалу (рис.6.1).

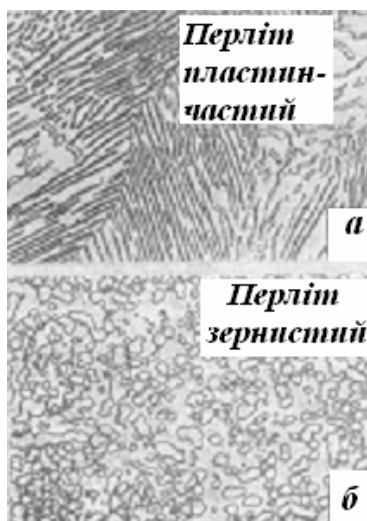


Рис. 7.1 – Структура перліту до (а) і після (б) неповного відпалу

Неповний відпал заевтектоїдних сталей називається **сфероїдізацією**. Якщо в заевтектоїдних сталях надлишковий цементит знаходиться у вигляді сітки навкруги зерен перліту (див.рис.6.2), що є дефектом,

який значно ускладнює оброблюваність сталі різанням, то перед неповним відпалом такої сталі проводять її нормалізацію (див.п.6.2).

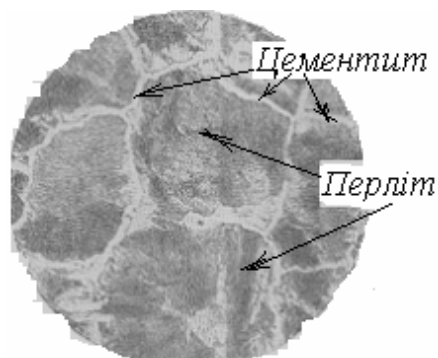


Рис.7.2 – Цементитна сітка в заевтектоїдній сталі

Рекристалізаційний відпал (рекристалізація) застосовують для усунення різноманітних відхилень у структурі сплавів, що виникли в результаті холодного пластичного деформування (наклеп, текстура). Температура рекристалізації становить 0,3...0,4 від температури плавлення металу. Ця температура нижча за температуру A_{c1} . Витримка 1...2 год, охолодження повільне.

Низький відпал застосовують для усунення залишкових внутрішніх напружень, що виникають при зварюванні виробів, у виливках внаслідок нерівномірного охолодження їх окремих частин, при механічній обробці тощо. Він включає нагрівання металу до температур 150...700⁰С, витримку і наступне повільне охолодження.

7.2 Нормалізація

Нормалізація полягає в нагріванні доевтектоїдних сталей до температур $A_{c3} + 30...50^{\circ}\text{C}$, заевтектоїдних сталей до температур $A_{cm} + 30...50^{\circ}\text{C}$, нетривалої витримки з наступним охолодженням на повітрі.

Нормалізація доевтектоїдних сталей замість повного відпалу забезпечує їх більш високу міцність і твердість без погіршення оброблюваності різанням і є процесом більш продуктивним, ніж повний відпал. Нормалізація заевтектоїдних сталей усуває сітку вторинного цементиту і є попередньою операцією перед наступним неповним відпалом, після якого в структурі буде зернистий перліт і оброблюваність такої сталі буде набагато кращою, тобто можливе застосування високих швидкостей різання і досягнення більш низької шорсткості поверхні після обробки різанням.

7.3 Гартування

Гартування – термічна обробка, яка полягає в нагріванні доевтектоїдної сталі до температури $A_{c3} + 30...50^{\circ}\text{C}$, заевтектоїдної сталі до температури $A_{cm} + 15...20^{\circ}\text{C}$, витримці і наступному охолодженні з такою швидкістю, щоб дифузійні процеси, внаслідок яких аустеніт перетворюється на перліт, не змогли відбуватися. При певній температурі (350...200⁰С в залежності від вмісту вуглецю) відбувається поліморфне перетворення $\text{Fe}_{\gamma} \rightarrow \text{Fe}_{\alpha}$, тобто перетворення аустеніту на ферит. При цьому у фериті залишається стільки вуглецю, скільки його було в аустеніті. Оскільки у фериті може розчинитися не більше 0,02% вуглецю, а в сталі, а, отже і в аустеніті, його було набагато більше, то ферит стає перенасиченим вуглецем, що в значній мірі спотворює його кристалічну ґратку, внаслідок чого він стає надзвичайно твердим і крихким. Такий перенасичений вуглецем ферит називається **мартенситом**. Охолоджується нагріта до вказаних температур сталь зазвичай у холодній або

підігрій воді, водних розчинах солей та лугів, мінеральному маслі. Отримана внаслідок гартування структура *мартенсит* є нестабільною (перенасичений розчин) і для приведення її в стабільний стан після гартування обов'язковий наступний вид ТО – відпуск.

7.4 Відпуск

В залежності від призначення загартованих деталей вони підлягають таким видам відпуску: 1) **Високий відпуск** - нагрівня загартованих деталей до температури 500...650⁰С, витримка з наступним повільним охолодженням. ТО, яка полягає в гартуванні і високому відпуску, називається покращанням. Покращанню піддають середньовуглецеві (0,3...0,5%С) конструкційні сталі з метою підвищення їх механічних властивостей. 2) **Середній відпуск** виконують при температурі 350...450⁰С і застосовують його головним чином для пружин і ресор а також для штампів. Охолодження після такого відпуску проводять у воді. Такий режим відпуску забезпечує високі пружність і витривалість роботи пружин, ресор і штампів. 3) **Низький відпуск** проводять з нагріванням до 150...200⁰С з метою зняття внутрішніх напружень, підвищення міцності без помітного зниження твердості. Низькотемпературному відпуску піддають різальний інструмент з вуглецевих і легованих сталей.

Контрольні питання

1. Мета та суть термічної обробки металів
2. Види термічної обробки
3. Що таке критичні точки та як вони позначаються в металознавстві?
4. Суть, призначення та види відпалу. Температурний режим відпалу
5. Суть, призначення та температурний режим нормалізації
6. Суть, призначення та температурний режим гартування сталей
7. Суть, призначення та температурний режим відпуску сталей. Види відпуску.
8. Яка термічна обробка називається "покращання"?

ЛІТЕРАТУРА

1. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів. Підручник. – Львів: Афіша, 2002. – 304 с.
2. Клименко В.М., Турич В.В.: Практикум з матеріалознавства, навчальний посібник - Вінниця, ВДАУ, 2006. - 65 стор.
3. Металознавство: Підручник / О.М.Бялік, В.С.Черненко та ін. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: ІВЦ "Видавництво <<Політехніка>>", 2002. – 384 с.
4. Практикум по технологии конструкционных материалов и материаловедению /Под общей ред. С.С.Некрасова. – М.: Агропромиздат, 1991.
5. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1980. – 493 с.