

Опорний конспект лекцій з дисципліни «Матеріалознавчі аспекти покриттів та модифікованих поверхонь» для здобувачів 2 рівня вищої освіти, за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство», – . /Автор Валерій САВУЛЯК, Олена ШИЛІНА - Вінниця: ВНТУ, 2022. - с./

# ЛЕКЦІЯ №1. МАТЕРІАЛИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ТА ПОКРИТТІВ НА НИХ

## Основна інформація

Конструкційними називають матеріали, з яких виготовляють деталі машин, приладів, елементи різних конструкцій, інструменти, тобто матеріали здатні витримувати значні механічні навантаження.

*Основні види обробки конструкційних матеріалів при виготовленні деталей:*

- лиття;
- обробка тиском;
- зварювання;
- обробка різанням.

*Основні способи обробки матеріалів для надання їм потрібних властивостей:*

- термічна обробка (температурна);
- механічна;
- термомеханічна;
- нанесення покриттів;
- модифікування поверхонь.

Рівень технічного розвитку суспільства залежить від того, якими матеріалами воно володіє. Навіть основні етапи розвитку людства визначаються матеріалами (кам'яний вік, бронзовий, вік заліза), що підкреслює важливе місце курсу матеріалознавства серед інших технічних наук.

Курси матеріалознавства і технології взаємопов'язані, оскільки технологія обробки залежить від властивостей оброблюваних матеріалів, а властивості – значною мірою - від методів виробництва матеріалів та їх обробки. В прискоренні науково-технічного поступу важлива роль відводиться машинобудуванню. Сучасне машинобудування характеризується безперервним зростанням енергонапруженості, екстремальними параметрами (граничні механічні навантаження, високі температури, агресивні середовища, високий рівень радіації тощо), тому в багатьох випадках тільки надання специфічних властивостей матеріалам, що застосовуються, можна забезпечити надійність і довговічність машин. Нові технології, що пов'язані з використанням надвисоких температур і тиску, лазера, плазми, електропорошкової металургії, енергії вибуху, електро- і магнітоімпульсної обробки тощо, дають змогу одержувати та синтезувати такі матеріали, які раніше людство не лише не мало, але й не знало, або які взагалі в природному стані не зустрічаються (надтверді, надміцні, жаростійкі тощо)

Отже, завдання матеріалознавства взагалі – це розробка нових і вдосконалення існуючих матеріалів. Знання основ матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів є конче необхідними для успішного

вивчення ряду спеціальних дисциплін, які формують технічну обізнаність, кваліфікацію спеціаліста.

Конструкційні матеріали, що використовуються в машинобудуванні, поділяються на *металеві* та *неметалеві*.

*Металеві*: сталі, чавуни та кольорові метали. Залізо і його сплави (сталі, чавуни) – чорні, всі інші – кольорові метали.

*Неметалеві* – полімери, пластмаси, гуми, композити, деревина, силікатні матеріали – кераміка, скло та ін.

Властивості матеріалів в основному поділяються на фізичні, хімічні, технологічні й механічні.

- **Фізичні**: щільність (питома вага), тепло- й електропровідність, магнетизм та деякі інші.
- **Хімічні**: здатність взаємодіяти з довколишнім середовищем. Вступати в хімічні сполуки, розчиняти, кородувати, більшою чи меншою мірою чинити опір дії агресивних середовищ.
- **Технологічні**: здатність піддаватися різним методам обробки – різанню (точіння, фрезеруванню, шліфування та інші), обробці тиском (прокатування, штампування, пресування, волочіння, кування), зварюванню, литтю (рідко- текучість, усадка).
- **Механічні**: твердість, міцність, жорсткість, пружність, пластичність, крихкість, зносостійкість, в'язкість, втомна міцність, жаростійкість, жароміцність, зносостійкість, дисипація енергії, повзучість та деякі інші.

Метали – найбільш розповсюдженні у природі елементи. Це хімічно прості речовини, які мають особливий (металевий) блиск, високу пластичність, електро- та теплопровідність. У техніці поняття “метал” означає речовину, що має вказані характерні властивості. Цей термін також використовують при визначенні металевих сплавів. Метал як хімічний елемент може бути компонентом, тобто речовиною, яка утворює систему і входить до складу сплавів з двох або кількох елементів.

Властивості металів зумовлює їх атомна будова і кристалічна структура. Залежно від будови і властивостей метали об'єднують у різні групи. За загальною і найбільш поширеною класифікацією метали поділяють на дві групи: чорні і кольорові. До чорних металів відносять залізо та його сплави (сталь, чавун), а до кольорових – решту металів.

Чорні метали загалом мають темно-сірий колір, більш високі температури плавлення, значну твердість і щільність, здатні до поліморфних перетворень (крім Ni). Серед них розрізняють метали групи заліза – Fe, Co, Ni, Mn; тугоплавкі – температура плавлення яких вища за температуру плавлення заліза (понад 1539°C) – W, Mo, Re, Nb, Ti, V, Cr; уранові – актиноїди; рідкоземельні (PMЗ) - La, Ce, Nd, Pr та інші. У техніці використовується понад 90% чорних металів.

До кольорових відносять решту металів. Характерним для них є забарвлення (червоне, жовте, біле), висока пластичність, низька твердість, відносно низька температура плавлення, відсутність поліморфізму. Типовим представником групи кольорових металів є мідь та сплави на її основі (бронза, латунь). Але фактично існує лише два кольорових метали – рожева мідь і жовте золото, по відношенню до решти металів можна говорити не про їхній колір, а про їхні різні відтінки, частіше сріблясто-сірого або червонуватого кольору. Серед кольорових металів розрізняють легкі – Be, Mg, Al; благородні - Ag, Au, Pt та метали платинової групи - Pd, Ir, Os, Ru, Rh; “напівблагородні” – Cu; легкоплавкі - Zn, Cd, Hg, Sn, Pb, Bi, Tl, Sb, а також елементи з послабленими металевими властивостями - Ga, Ge.

Кольорові метали додають до складу легованих сталей і сплавів для поліпшення їхньої структури та властивостей, а також використовують для виготовлення різноманітних виробів.

### **Атомно-кристалічна структура металів**

Під атомно-кристалічною структурою розуміють взаємне розташування атомів (іонів) у реальному кристалі. Залежно від будови (розташування атомів) тверді тіла поділяють на аморфні і кристалічні.

*Аморфні* характеризуються хаотичним розташуванням атомів. Тому зберігаючи постійну форму, вони не мають певних (критичних) температур плавлення та кристалізації. Залежно від зовнішніх умов їхні властивості змінюються поступово. Аморфний стан металів реалізується за умов дуже швидкого ( $>10^6$  К/с) охолодження під час кристалізації.

За звичайних умов тверднення метали у твердому стані мають кристалічну будову. Для кристалічного стану характерно, перш за все, певне закономірне розташування атомів у просторі. Кожен атом (іон) у кристалі оточений певною кількістю найближчих атомів (сусідів), розташованих на певній відстані від нього.

Взаємне розташування у просторі атомів реальних металів і відстань між ними визначають за допомогою рентгеноструктурного аналізу. Розташування атомів у кристалі зручно зображувати у вигляді просторових схем – *елементарних кристалічних комірок*.

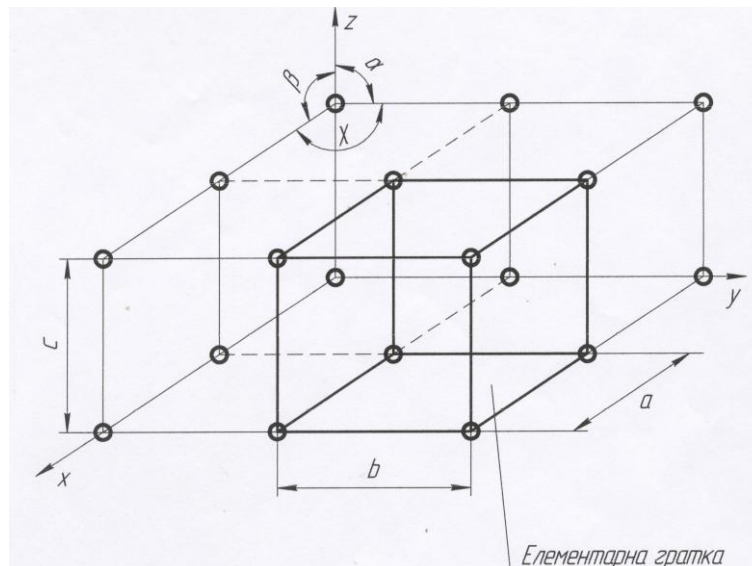


Рисунок 1.1 - Схема кристалічної ґратки

Під цим розуміють найменший комплекс атомів, що дозволяє при багатократному повторенні побудувати просторову кристалічну ґратку (рис. 1.1).

Основні параметри кристалічних ґраток такі.

*Відрізки* дорівнюють відстаням до найближчих атомів (іонів) по координатних осях у тривимірному просторі, позначають їх літерами  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

*Кути* між цими відрізками позначають  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

*Період* або *параметр ґратки* дорівнює довжині ребра комірки у напрямі головних осей кристалічної ґратки. Параметри ґратки вимірюють у нанометрах (нм), ангстремах (Å).

Просторове розташування атомів у кристалічному тілі залежить від природи металу, характеру міжатомних зв'язків, температури, тиску. Прагнення атомів до найбільш щільного розміщення призводить до значної кількості комбінацій їхнього взаємного розташування. Серед промислових металів найпоширенішим є утворення трьох основних типів кристалічних ґраток: об'ємноцентрованої кубічної (ОЦК), гранецентрованої (ГЦК) і гексагональної щільного пакування (ГЦП).

У *об'ємноцентрованій кубічній ґратці* (рис. 1.2, а) атоми розташовані у восьми вершинах куба, які одночасно належать восьми сусіднім елементарним коміркам і один атом у центрі куба. Значить, на кожну елементарну ОЦК-ґратку припадає  $1 + (1/8) \cdot 8 = 2$  атоми. Це число атомів для ОЦК-ґратки називають базисним. Таку кристалічну ґратку мають Р, К, Na, Li,  $Ti_{\beta}$ ,  $Zr_{\beta}$ , Та, W, V,  $Fe_{\alpha}$ , Cr, Nb, Ва та інші метали.

У *гранецентрованій кубічній ґратці* атоми розташовані у вершинах куба і в центрі кожної грані (рис. 1.2. б). ґратка ГЦК має базисне число  $(1/8) \cdot 8 + (1/2) \cdot 6 = 4$ . Кристалічну ґратку такого типу мають:  $Ca_{\alpha}$ , Се,  $Sr_{\alpha}$ , Th, Pb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Ir,  $Fe_{\gamma}$ , Cu та інші метали.

Гексагональну ґратку щільного пакування мають Mg,  $Ti_{\alpha\alpha}$ , Cd, Re, Os, Ru, Zn,  $Co_{\beta}$ , Be,  $Ca_{\beta}$ , та інші метали. Атоми у ГЦП-ґратці розташовані у

вершинах і центрі шестигранних основ призми та три атоми – всередині площини призми, базисне число ГЩУ – 6, 9рис. 1.2, с).

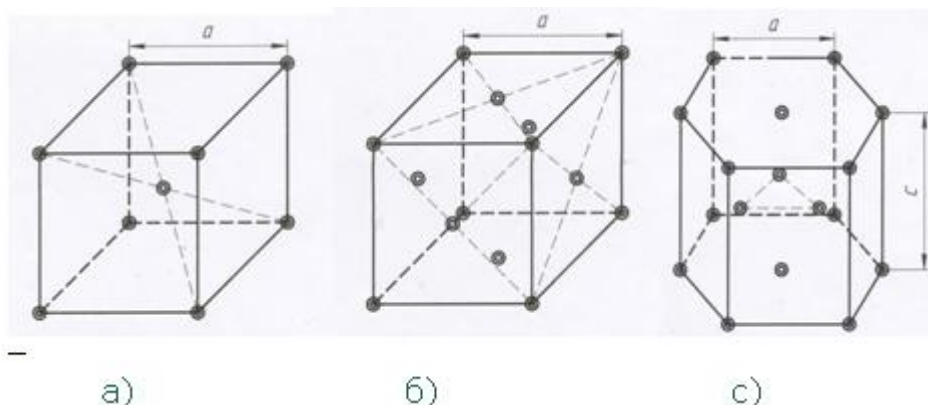


Рисунок 1.2 - Основні типи кристалічних ґраток: а – об’ємноцентрована кубічна (ОЦК); б– гранецентрована кубічна (ГЦК); с – гексагональна щільного пакування (ГЩП)

*Координаційне число (K)* характеризує щільність пакування ґратки, визначає кількість найближчих і рівновіддалених атомів у певній кристалічній ґратці і характеризує розподіл сил взаємного зв’язку між атомами. Координаційне число простої кубічної ґратки позначають К6 (літера вказує на тип ґратки, цифра – на кількість атомів), об’ємноцентрованої кубічної – К8; гранецентрованої кубічної – К12; гексагональної - Г6; гексагональної щільного пакування – Г12.

Залежно від температури і тиску деякі метали можуть змінювати будову (тип) кристалічної ґратки, тобто існувати у різних кристалічних формах – *поліморфних модифікаціях*. Поліморфну модифікацію, стійку при найнижчій температурі, позначають літерою  $\alpha$ , при більш високій –  $\beta$ , далі –  $\gamma$  тощо. Кожна з модифікацій має свій температурний інтервал існування. За умов рівноваги поліморфне перетворення відбувається при постійній температурі і супроводжується виділенням тепла, якщо перетворення йде при охолодженні, або поглинанням тепла - в разі нагрівання. Для реалізації поліморфного перетворення, як і при кристалізації з рідкої фази, потрібне деяке переохолодження (або перегрів) відносно рівноважної температури. Механізм поліморфного перетворення подібний до кристалізації, що здійснюється шляхом утворення зародків нової фази та їхнього наступного зростання.

Відомі поліморфні перетворення для таких металів:  $Fe_{\alpha} - Fe_{\gamma} - Fe_{\delta}$ ;  $Ti_{\alpha} - Ti_{\beta}$ ;  $Mn_{\alpha} - Mn_{\beta} - Mn_{\gamma}$ ;  $Sn_{\alpha} - Sn_{\beta}$ ; Ca, Li, Ne, Na, Cs, Sr, Zn, РЗМ-металів тощо.

Внаслідок поліморфного перетворення утворюються нові кристалічні зерна іншої форми та розміру. Тому таке перетворення називають *перекристалізацією*. При цьому властивості металів і сплавів змінюються стрибкоподібно.

*Поняття про ізотропію та анізотропію*

Властивості тіла залежать від природи атомів, із яких воно складається, та від сили взаємодії між атомами. Сили взаємодії між атомами у значній степені

визначаються відстанню між ними. В аморфних тілах з хаотичним розташуванням атомів у просторі відстані між атомами в різних напрямках однакові, таким чином, властивості будуть однакові, тобто аморфні тіла ізотропні.

В кристалічних тілах атоми правильно розташовуються у просторі, при цьому по різних напрямках відстані між атомами неоднакові, що визначає суттєву різницю у силах взаємодії між ними і, в кінцевому результаті, різні властивості. Залежність властивостей від напрямку називається анізотропією.

Аби зрозуміти явище анізотропії необхідно виділити кристалографічні площини та кристалографічні напрямки у кристалі.

Площина, що проходить через вузли кристалічної ґратки, називається кристалографічною площиною.

Пряма, що проходить через вузли кристалічної ґратки, називається кристалографічним напрямком.

Для позначення кристалографічних площин та напрямків користуються індексами Міллера. Аби встановити індекси Міллера, елементарну комірку вписують у просторову систему координат (осі X, Y, Z – кристалографічні осі). За одиницю вимірювання приймається період ґратки.

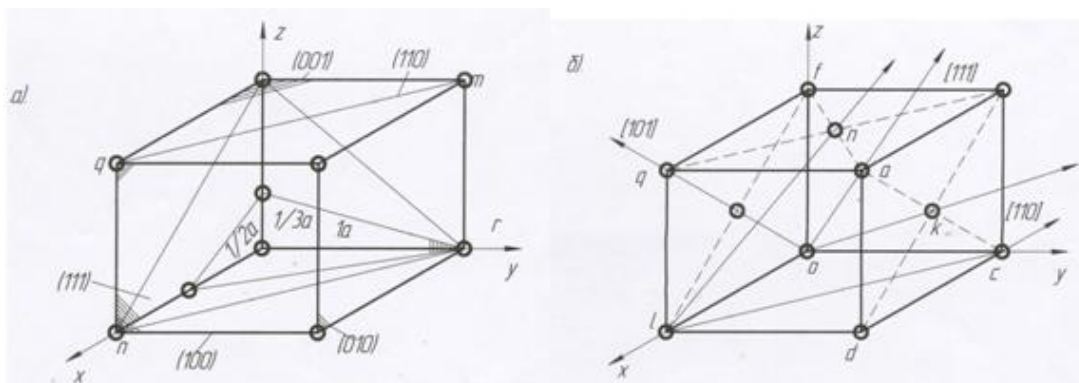


Рисунок 1.3 - Приклади позначення кристалографічних площин (а) та кристалографічних напрямків (б)

Для визначення індексів кристалографічної площини необхідно: встановити координати точок перетину площини із осями координат в одиницях періоду ґратки та взяти зворотні значення цих величин; привести їх до найменшого цілого кратного для кожного із отриманих чисел. Отриманні значення простих цілих чисел, які не мають загального множника і є індекси Міллера, для площини, вказуються у круглих дужках. Приклади позначення кристалографічних площин на рис. 1.3 а.

Іншими словами, індекс по осі показує на скільки частин площина поділяє осьову одиницю по даній осі. Площини, які паралельні осі, мають по ній індекс (0)

Орієнтація прямої визначається координатами двох точок. Для визначення індексів кристалографічного напрямку необхідно:

- одну точку напрямку сумістити з початком координат;

- встановити координати іншої будь якої точки, яка лежить на прямій в одиницях періоду ґратки
- привести відношення цих координат до відношення трьох найменших цілих чисел.

Індекси кристалографічних напрямків вказуються у квадратних дужках [111]

В кубічній ґратці індекси напрямку, перпендикулярно площині (hkl) мають ті ж індекси [hkl].

## **ЛЕКЦІЯ №2. ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІВ РЕАЛЬНИХ МЕТАЛІВ ТА ПОКРИТТІВ**

### **Зміст**

1. Точкові дефекти
2. Лінійні дефекти:
3. Найпростіші види дислокацій – краєві та гвинтові.

### **Конспект лекції**

Із рідкого розплаву можна вирощувати монокристал. Їх зазвичай використовують у лабораторіях для вивчення властивостей тієї або іншої речовини.

Метали та сплави, які отримують у звичайних умовах, складаються із великої кількості кристалів, тобто, мають полікристалічну будову. Ці кристали називаються зернами. Вони мають неправильну форму та по різному орієновані у просторі. Кожне зерно має свою орієнтацію кристалічної ґратки, відмінну від орієнтації сусідніх зерен, внаслідок чого властивості реальних металів усереднюються, і явища анізотропії не спостерігається.

У кристалічній ґратці реальних металів є різні дефекти (недосконалості), які порушують зв'язки між атомами та впливають на властивості металів. Розрізняють наступні структурні недосконалості:

- точкові – дуже малі в усіх трьох вимірах;
- лінійні – малі у двох вимірах та велику довжину в третьому;
- поверхневі – малі в одному вимірі і значно більші в двох інших.

#### *Точкові дефекти*

Однією із розповсюджених недосконалостей кристалічної будови є наявність точкових дефектів: вакансій, дислокованих атомів та примісні атоми. (рис. 2.1.)



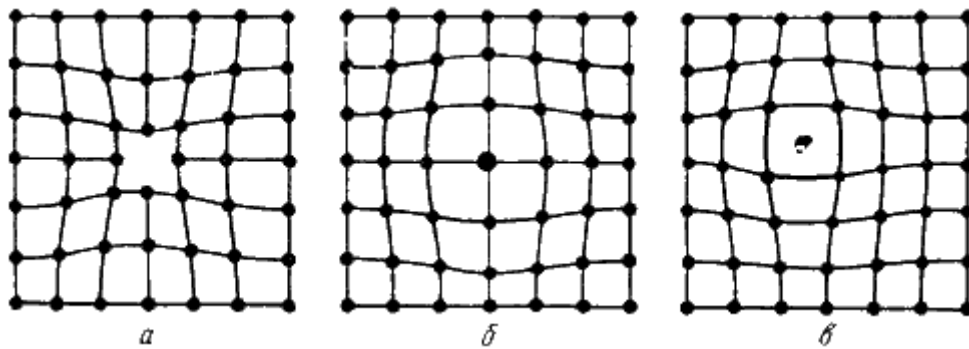


Рисунок 2.1. Точкові дефекти

*Вакансія* – відсутність атомів у вузлах кристалічної ґратки, «дирки», які утворилися в результаті різних причин. Утворюються при переході атомів із поверхні у навколишнє середовище або із вузлів ґратки на поверхню (границі зерен, порожнини, тріщини і т. і. ), в результаті пластичної деформації, при бомбардуванні тіла атомами або частинками високих енергій (опромінення в циклотроні або нейтроні, опромінення у ядерному реакторі). Концентрація вакансій у значній степені визначається температурою тіла. Поодинокі вакансії, які переміщуються по кристалу, можуть зустрічатися та об'єднуватися у девакансії. Скупчення багатьох вакансій може призвести до утворення пор та порожнеч.

*Дислокований атом* – це атом, який вийшов із вузла ґратки та зайняв місце у міжвузлі. Концентрація дислокованих атомів значно менше, ніж вакансій, так як для їх утворення потребують суттєвих витрат енергії. При цьому на місці атома, що переміщується, утворюється вакансія.

*Примісні атоми* завжди присутні у металі, так як практично неможливо виплавити хімічно чистий метал. Вони можуть мати розміри більші або менші за розміри основних атомів та розташовуються у вузлах ґратки або міжвузлах.

Точкові дефекти визивають незначне викривлення ґратки, що може призвести до зміни властивостей тіла (електропровідність, магнітні властивості), їх наявність сприяє процесам дифузії та протіканню фазових перетворень у твердому стані. При переміщенні по матеріалу дефекти можуть взаємодіяти.

#### *Лінійні дефекти:*

Основними лінійними дефектами є дислокації. Априорне уявлення про дислокації вперше використано у 1934 році Орованом та Тейлером при дослідженні пластичної деформації кристалічних матеріалів, для пояснення великої різниці між практичною та теоретичною міцністю металу.

Дислокація – це дефект кристалічної будови, яка являє собою повздовжні лінії, поблизу яких порушено характерне для кристалу правильне розташування атомних площин.

*Найпростіші види дислокацій – крайові та гвинтові.*

*Крайова дислокація* – це лінія, вздовж якої обривається всередині кристалу край “зайвої” півплощини (рис. 2.2). Або це лінія на краю зайвої атомної півплощини у кристалі.

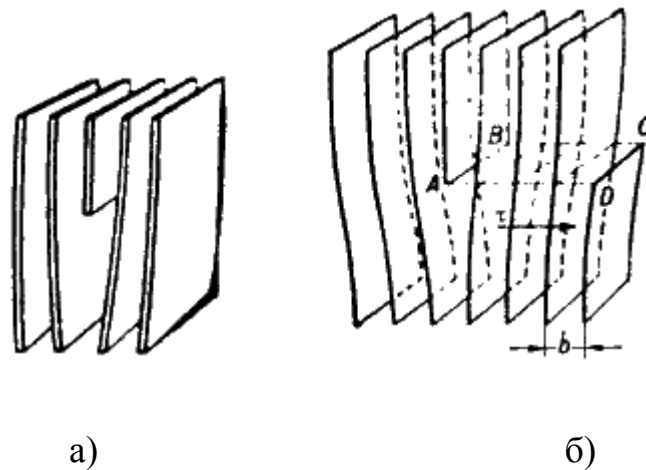


Рисунок 2.2. Крайова дислокація (а) та механізм її утворення (б)

Неповна площина називається екстраплощиною.

Більшість дислокацій утворюється шляхом механізму зсуву. Його утворення можна описати за допомогою наступної операції. Надрізати кристал по площині ABCD, зсунути нижню частину відносно верхньої на один період ґратки у напрямку, перпендикулярному АВ, а потім знову наблизити атоми по краях розрізу знизу.

Найбільше викривлення у розташуванні атомів у кристалі мають місце поблизу нижнього краю екстраплощини. Направо та наліво від краю екстраплощини ці викривлення малі (декілька періодів ґратки), а вздовж краю екстраплощини викривлення простягаються через весь кристал і можуть бути дуже великими (тисячі періодів ґратки) (рис. 2.3).

Якщо екстраплощина знаходиться у верхній частині кристалу, то крайова дислокація – позитивна ( $\uparrow$ ), якщо у нижній, то – від’ємна ( $\downarrow$ ). Дислокації одного знаку відштовхуються, а протилежні притягуються.

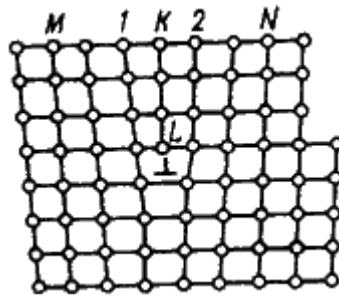


Рисунок 2.3. Викривлення у кристалічній ґратці при наявності крайової дислокації

Інший тип дислокацій був описаний Бюргерсом, та отримав назву гвинтова дислокація

*Гвинтова дислокація* утворена за допомогою часткового зсуву по площині Q навколо лінії EF (рис. 2.4) На поверхні кристалу утворюється сходинка, яка проходить від точки E до краю кристалу. Такий частковий зсув порушує паралельність атомних шарів, кристал перетворюється в одну атомну площину, закручену за гвинтом у вигляді порожнистого гелікоїда навколо лінії EF, яка є границею, що відокремлює частину площини ковзання, де зсув вже відбувся, від частини, де зсув не починався. Вздовж лінії EF спостерігається макроскопічний характер області недосконалості, в інших напрямленнях її розміри складають декілька періодів.

Якщо перехід від верхніх горизонтів до нижніх відбувається обертом за годинниковою стрілкою, то дислокація права, а якщо обертом проти годинникової стрілки – ліва.

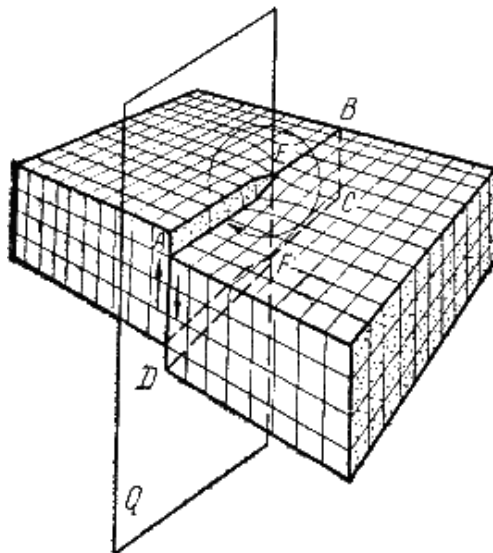


Рисунок 2.4. Механізм утворення гвинтової дислокації

Гвинтова дислокація не пов'язана із будь якою площиною ковзання, вона може переміщуватися по будь якій площині, що проходить через лінію дислокації. Вакансії та дислоковані атоми до гвинтової дислокації не спливають.

У процесі кристалізації атоми речовини, які виділяються із пару або розчину, легко приєднуються до щабля, що призводить до спірального механізму росту кристала.

Лінії дислокацій не можуть вкорочуватися в середині кристала, вони повинні або бути замкненими, створюючи петлю, або розгалужуватися на декілька дислокацій, або виходити на поверхню кристала.

Дислокаційна структура матеріалу характеризується щільністю дислокацій.

Щільність дислокацій у кристалі визначається як середнє число ліній дислокацій, які перетинаються всередині тіла ділянкою площиною  $1 \text{ м}^2$ , або як сумарна довжина ліній дислокацій в об'ємі  $1 \text{ м}^3$  ( $\text{см}^{-2}$ ;  $\text{м}^{-2}$ )

Щільність дислокацій вимірюється у широких межах і залежить від стану матеріалу. Після ретельного відпалу щільність дислокацій складає  $10^5 \dots 10^7 \text{ м}^{-2}$ , в кристалах із сильно деформованою кристалічною ґраткою щільність дислокацій сягає  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$ .

Щільність дислокацій в значній мірі визначає пластичність та міцність матеріалу (рис. 2.5)

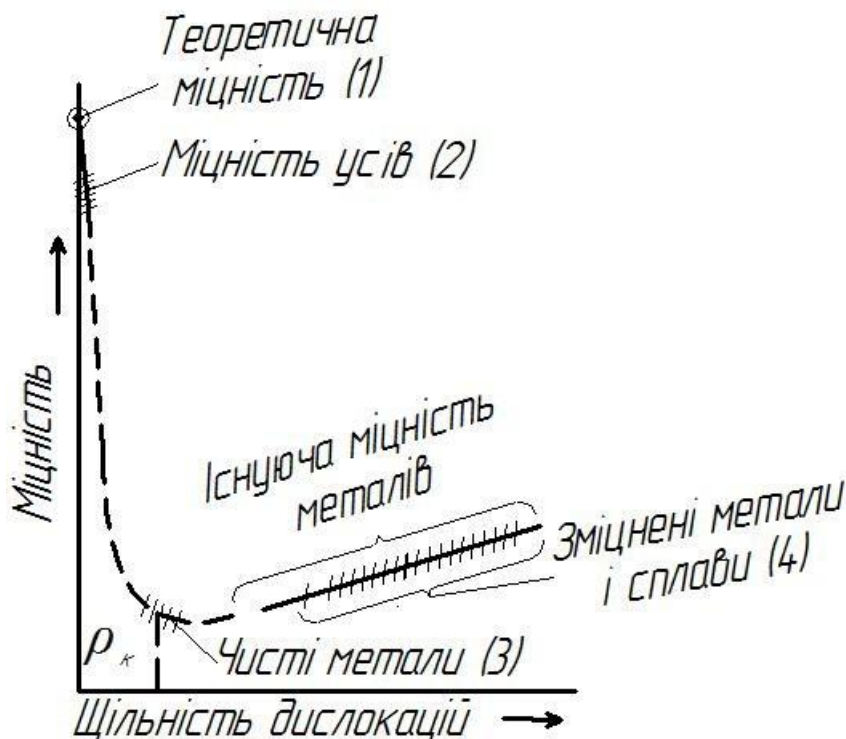


Рисунок 2.5 - Вплив щільності дислокацій на міцність

Мінімальна міцність визначається критичною щільністю дислокацій

Якщо щільність менше значення  $a$ , то опір деформуванню різко зростає, а міцність наближається до теоретичної. Підвищення міцності досягається створенням металу із бездефектною структурою, а також підвищенням щільності дислокацій, які ускладнюють їх рух. В теперішній час створені кристали без дефектів – нитковидні кристали довжиною до 2 мм, товщиною 0,5...20 мкм - “уси” із міцністю, наближеною до теоретичної: для заліза  $G = 13000$  МПа, для міді  $G = 30000$  МПа. При зміцненні металів збільшення щільності дислокацій не повинно перебільшувати значень  $10^{15} \dots 10^{16} \text{ м}^{-2}$ , інакше утворюються тріщини.

Дислокації впливають не лише на міцність та пластичність, але і на інші властивості кристалів. Із збільшенням щільності дислокацій зростає внутрішня енергія, змінюються оптичні властивості, підвищується електроопір металу. Дислокації збільшують середню швидкість дифузії у кристалі, прискорюють старіння та інші процеси, зменшують хімічну стійкість, тому в результаті обробки поверхні кристалу спеціальними речовинами у місцях виходу дислокацій утворюються ямки.

Дислокації утворюються при створенні кристалів із розплаву або газоподібної фази, при зростанні блоків із невеликими кутами разорієнтування. При переміщенні вакансій всередині кристалу, вони концентруються, створюючи порожнечі у вигляді дисків. Якщо такі диски великі, то енергетично вигідно “закривання” їх із утворенням по краю диску крайової дислокації. Утворюються дислокації при деформуванні, в процесі кристалізації, при термічній обробці.

Поверхневі дефекти – границі зерен, фрагментів та блоків (рис. 2.6).

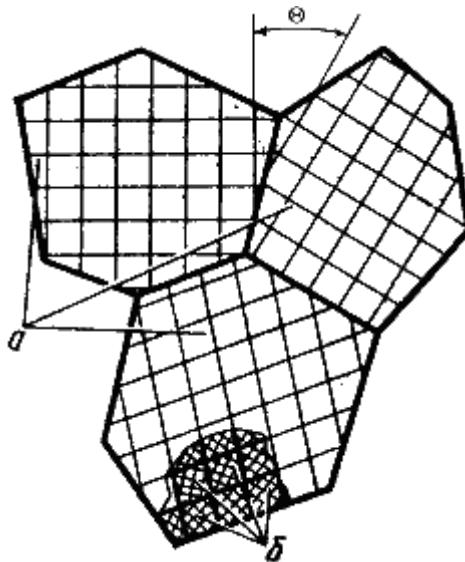


Рис. 2.6. Разорієнтування зерен та блоків у металі

Розміри зерен складають до 1000 мкм. Кути розорієтування складають до декількох десятків градусів.

Границі між зернами являє собою тонку у 5 – 10 атомних діаметрів поверхневу зону з максимальним порушенням порядку у розташуванні атомів.

Будова перехідного шару сприяє накопиченню у ньому дислокацій. На границях зерен підвищена концентрація домішків, які знижують поверхневу енергію. Але і всередині зерна ніколи не спостерігається ідеальної будови кристалічної ґратки. Є ділянки, які розорієтовані один відносно іншого на декілька градусів. Ці ділянки називаються фрагментами. Процес поділення зерен на фрагменти називається фрагментацією або полігонізацією.

В свою чергу кожний фрагмент складається із блоків, розмірами менш 10 мкм, розорієтованих на кут менше одного градусу. Таку структуру називають блочною або мозаїчною.

### **ЛЕКЦІЯ №3. КРИСТАЛІЗАЦІЯ МЕТАЛІВ. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТАЛІВ**

#### **Зміст**

1. Механізм та закономірності кристалізації металів.
2. Умови отримання дрібнозернистої структури
3. Будова металевого зливка
4. Визначення хімічного складу.
5. Вивчення структури.
6. Фізичні методи досліджень

#### **Конспект лекції**

Будь яка речовина може знаходитися у трьох агрегатних станах: твердому, рідкому, газоподібному. Можливий перехід із одного стану у інший, якщо новий стан у нових умовах є стійкішим, володіє меншим запасом енергії.

Із зміною зовнішніх умов вільна енергія змінюється за складним законом відмінним для рідкого та кристалічного станів. Характер зміни вільної енергії рідкого та твердого стану при зміні температури показано на рис. 3.1.

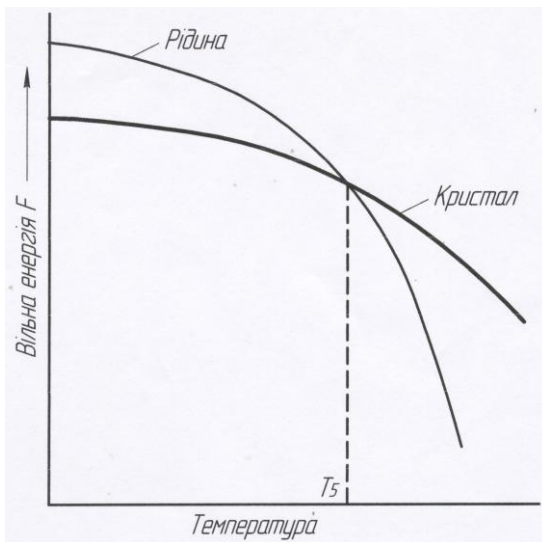


Рисунок 3.1. Зміна вільної енергії в залежності від температури

У відповідності до цієї схеми вище температури  $T_s$  речовина повинна знаходитися у рідкому стані, а нижче  $T_s$  – у твердому.

При температурі, яка дорівнюється  $T_s$  рідка та тверда фаза володіють однаковою енергією, метал в обох станах знаходиться у рівновазі, тому дві фази можуть існувати одночасно безкінечно довго. Температура  $T_s$  – рівноважна або теоретична температура кристалізації.

Для початку процесу кристалізації необхідно, аби процес був термодинамічно вигідним системі та супроводжувався зменшенням вільної енергії системи. Це можливо при охолодженні рідини нижче температури  $T_s$ . Температура, при якій практично починається кристалізація називається фактичною температурою кристалізації.

Охолодження рідини нижче рівноважної температури кристалізації називається переохолодженням, яке характеризується ступеню переохолодження ( $\Delta T$ ):

Ступінь переохолодження залежить від природи металу, від ступені його забруднення (чим чистіший метал, тим більша ступінь переохолодження), від швидкості охолодження (чим вища швидкість охолодження, тем більша ступінь переохолодження).

*Розглянемо перехід металу із рідкого стану у твердий.*

При нагріванні усіх кристалічних тіл спостерігається чітка границя переходу з твердого стану у рідкий. Така ж границя існує при переході із рідкого стану у твердий.

Кристалізація – це процес утворення ділянок кристалічної ґратки певного типу у рідкій фазі та ріст кристалів із центрів, що створилися.

Кристалізація протікає в умовах, коли система переходить до термодинамічно більш стійкого стану з мінімумом вільної енергії. Процес переходу металу з рідкого стану у кристалічний можна показати кривими у

координатах “час – температура”. Крива охолодження чистого металу представлена на рис. 3.2.

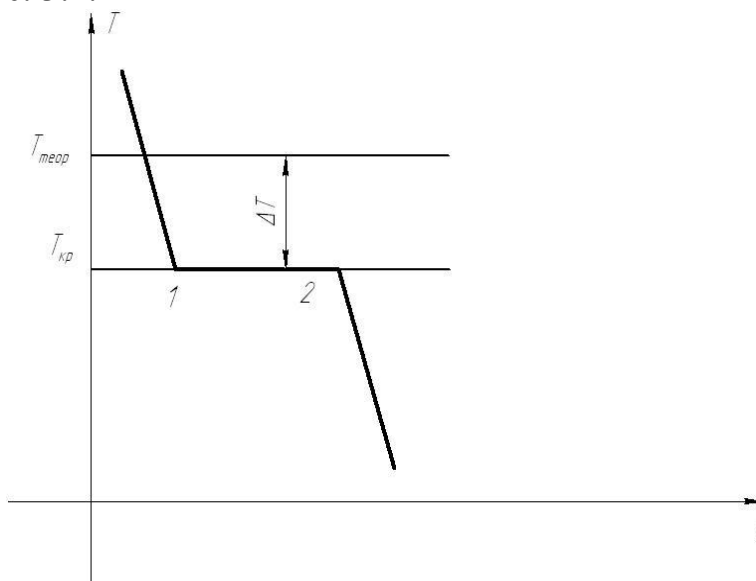


Рисунок 3.2. Крива охолодження чистого металу

$T_{теор}$  – теоретична температура кристалізації;

$T_{кр}$  – фактична температура кристалізації.

*Процес кристалізації чистого металу:*

До точки 1 охолоджується метал у рідкому стані, процес супроводжується плавним пониженням температури. На ділянці 1 – 2 йде процес кристалізації, який супроводжується виділенням тепла, яке називається прихованою теплотою кристалізації. Яке компенсує розсіювання теплоти у просторі, і тому температура залишається постійною. Після закінчення кристалізації у точці 2 температура знову починає знижуватися, метал охолоджується у твердому стані.

*Механізм та закономірності кристалізації металів.*

При відповідному пониженні температури у рідкому металі починають утворюватися кристали – центри кристалізації або зародки. Для початку їх росту необхідно зменшення вільної енергії металу, у протилежному випадку зародок розчиняється.

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

Перехід із рідкого стану у кристалічний потребує витрат енергії на утворення поверхні розділу рідна – кристал. Процес кристалізації буде відбуватися, коли заощадження від переходу у твердий стан буде більшим втрати енергії на утворення поверхні розділу. Залежність енергії системи від розміру зародка твердої фази представлено на рис. 3.3.

Зародки із розмірами, що дорівнюють або є більшими за критичний ростуть із зменшенням енергії і тому здатні до існування.



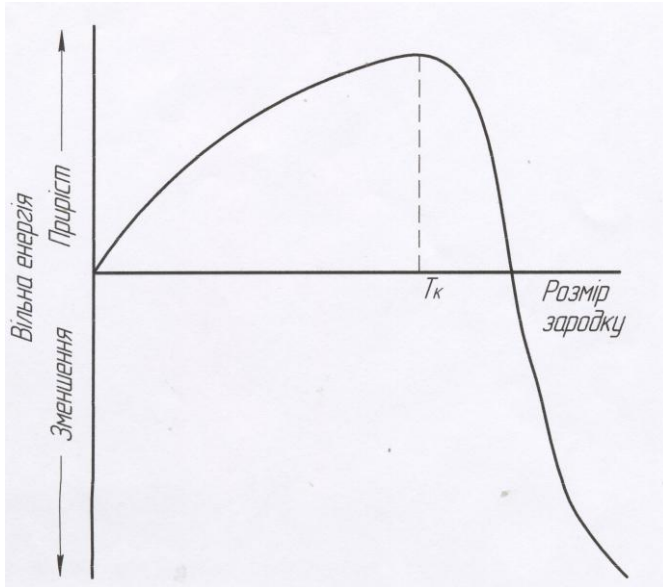


Рисунок 3.3. Залежність енергії системи від розміру зародка твердої фази

Механізм кристалізації представлено на рис.3.4.

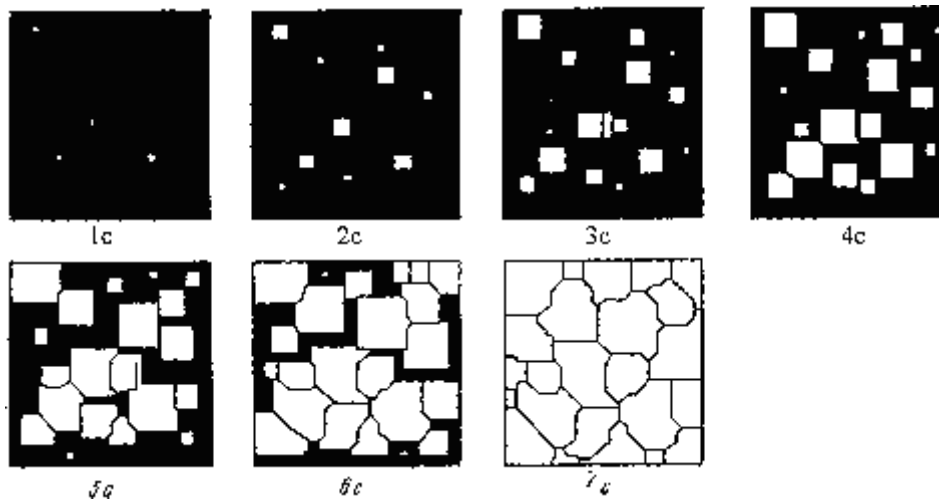


Рисунок 3.4. Модель процесу кристалізації

Центри кристалізації утворюються у початковій фазі незалежно один від іншого у випадкових місцях. Спочатку кристали мають правильну форму, але по мірі зіткнення та зростання з іншими кристалами форма порушується. Ріст продовжується у напрямках, де є вільний доступ до середовища. Після закінчення кристалізації утворюється полікристалічне тіло.

Якісна схема процесу кристалізації може бути представлена кінетичною кривою (рис.3.5).

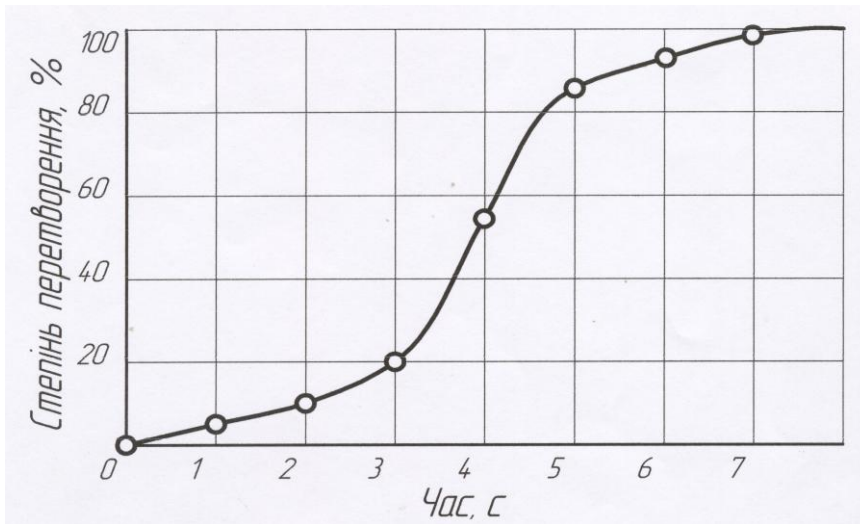


Рисунок 3.5. Кінетична крива процесу кристалізації

Процес спочатку прискорюється, поки зіткнення кристалів не починає унеможлиблювати їх ріст. Об'єм рідкої фази, в якій утворюються кристали зменшується. Після кристалізації 50 % об'єму металу, швидкість кристалізації буде загальмовуватися.

Таким чином, процес кристалізації побудовано із утворених центрів кристалізації та росту кристалів із цих центрів.

У свою чергу, число центрів кристалізації (ч.ц.) і швидкість росту кристалів (с.р.) залежать від ступені переохолодження (рис. 3.6).

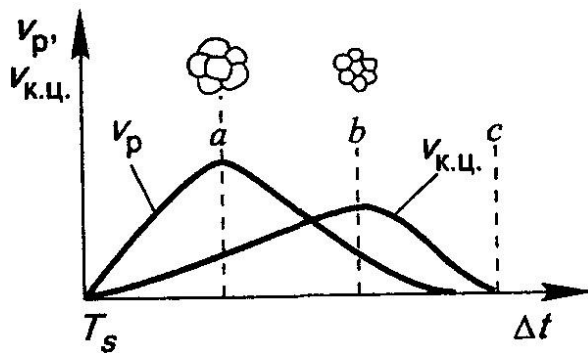


Рисунок 3.6. Залежність числа центрів кристалізації (а) та швидкості росту кристалів (б) від ступені переохолодження

Розміри утворених кристалів залежать від співвідношення числа центрів кристалізації, що утворилися та швидкості росту кристалів при температурі кристалізації.

При рівноважній температурі кристалізації  $T_s$  число утворених центрів кристалізації та швидкість їх росту дорівнюють нулю, тому процесу кристалізації не відбувається.

Якщо рідину переохолодити до температури, яка відповідає  $T_a$ , то утворюються великі зерна (число утворених центрів мале, а швидкість росту – велика).

При переохолодженні до температури, яка відповідає  $T_v$  – дрібне зерно (утворюється велике число центрів кристалізації, а швидкість їх росту мала).

Якщо метал дуже сильно переохолодити, то число центрів та швидкість росту кристалів дорівнюється нулю, рідина не кристалізується, утворюється аморфне тіло. Для металів, які володіють малою схильністю до переохолодження, експериментально визначаються тільки догірні гілки кривих.

### *Умови утворення дрібнозернистої структури*

Бажаною є дрібнозерниста структура. Оптимальними умовами для цього є: максимальне число центрів кристалізації та мала швидкість росту кристалів.

Розмір зерен при кристалізації залежить і від числа частинок нерозчинних домішок, які грають роль готових центрів кристалізації – оксиди, нітриди, сульфіди.

Чим більше частинок, тим дрібніші зерна закристалізованого металу.

Стінки виливниць мають нерівності, шорсткості, які збільшують швидкість кристалізації.

Дрібнозернисту структуру можна отримати у результаті модифікування, коли у рідкі метали додаються сторонні речовини – модифікатори,

За механізмом дії розрізняють:

Речовини не розчинні у рідкому металі – виступають у якості додаткових центрів кристалізації.

Поверхнево – активні речовини, які розчиняються в металі, та, осаджуються на поверхні кристалів, і запобігають їх росту.

Ріст кристалів у другій зоні має направлений характер. Вони ростуть перпендикулярно стінкам виливниці, утворюються деревовидні кристали – дендрити (рис. 3.8). Ростуть дендрити із напрямленням, наближеним до напрямлення тепловідводу.

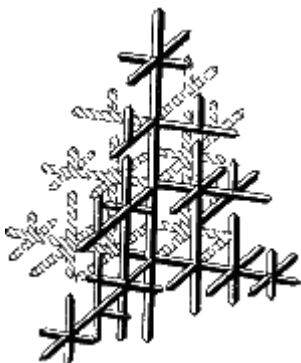


Рисунок 3.8. Схема дендриту за Черновим Д.К.

Зони стовбчастих кристалів у процесі кристалізації стикаються, це явище називається транскристалізацією.

Для малопластичних металів і для сталей це явище небажане, так як при наступному прокатуванні, куванні можуть створюватися тріщини у зоні стику.

У верхній частині зливка утворюється усадкова раковина, яка видаляється та переплавляється, так як метал більш крихкий (біля 15...20 % від довжини зливка)

#### *Методи досліджень металів: структурні та фізичні*

Метали та сплави володіють різнобічними властивостями. Використовуючи один метод дослідження металів, неможливо отримати інформацію про всі властивості. Використовують декілька методів аналізу.

#### *Визначення хімічного складу.*

Використовуються методи кількісного аналізу.

1. Якщо нема потреби у великій точності, то використовують спектральний аналіз.

Спектральний аналіз засновано на розкладенні та дослідженні спектра електричної дуги або іскри, яка штучно збуджується між мідним електродом та металом що досліджується.

Запалюється дуга, промінь світла крізь призми попадає до окуляра для аналізу спектра. Колір та концентрації ліній спектру дозволяють визначити вміст хімічних елементів.

Використовуються стаціонарні та переносні стилоскопи.

2. Більш точні відомості про склад дає рентгеноспектральний аналіз.

Проводиться на мікроаналізаторах. Дозволяє визначити склад фаз сплаву, характеристики дифузійної рухомості атомів.

#### *Вивчення структури.*

Розрізняють макроструктуру, мікроструктуру та тонку структуру.

1. Макроструктурний аналіз – вивчення будови металів та сплавів неозброєним оком або при невеликому збільшенні, за допомогою лупи.

Відбувається після попередньої підготовки поверхні, що досліджується (шліфування та травлення спеціальними реактивами).

Дозволяє виявити та визначити дефекти, які виникають на різних етапах виробництва, кованих, штампованих та катаних заготовок, а також чинники руйнування деталей.

Встановлюють: вид злому (в'язкий, крихкий); величину, форму та розташування зерен та дендритів литого металу; дефекти, які порушують суцільність металу (усадкову пористість, газові пухирці, раковини, тріщини); хімічну неоднорідність металу, які визвані процесами кристалізації або створену термічною та хіміко-термічною обробкою; волокна у деформованому металі.

2. Мікроструктурний аналіз – вивчення поверхні за допомогою світлових мікроскопів. Збільшення – 50...2000 разів. дозволяє виявити елементи структури розміром до 0,2 мкм.

Зразки – мікрошліфи із близькою полірованою поверхнею, так як структура розглядається у відбитому світлі. Спостерігаються мікротріщини та неметалеві включення.

Для виявлення мікроструктури поверхню трують реактивами, які залежать від складу сплаву. Різні фази протруються неоднаково і фарбуються по різному. Можна виявити форму, розміри та орієнтування зерен, окремі фази та структурні складові.

Крім світлових мікроскопів використовують електронні мікроскопи із великою здатністю.

Зображення формується за допомогою потоку швидко рухомих електронів. Електронні промені з довжиною хвилі  $(0,04 \dots 0,12) \cdot 10^{-8}$  см дають можливість розрізнити деталі об'єкту, які за своїми розмірами відповідають міжатомним відстаням.

*Просвітчасті мікроскопи.* Потік електронів проходить крізь об'єкт, що вивчається. Зображення є результатом неоднакового розсіювання електронів на об'єкті. Розрізняють побічні та прямі методи досліджень. При побічному методі вивчають не сам об'єкт, а його відбиток – кварцевий або вуглецевий відбиток (репліку), який відтворює рельєф мікрошліфа, для попередження вторинного випромінювання, що спотворює картину.

При прямому методі вивчають тонкі металічні фольги, товщиною до 300 нм, на просвічування. Фольги отримують безпосередньо із металу, що вивчається.

*Растрові мікроскопи.* Зображення створюється за рахунок вторинної емісії електронів, що випромінюються поверхнею, на яку безперервно падає потік первинних електронів які рухаються по цій поверхні. Вивчається безпосередньо поверхня металу. Здатність дещо нижча, ніж у просвітчастих мікроскопах.

3. Для вивчення атомно-кристалічної будови твердих тіл (тонка будова) використовуються рентгенографічні методи, які дозволяють встановлювати зв'язок між хімічним складом, структурою та властивостями тіла, тип твердих розчинів, мікронапруження, концентрацію дефектів, щільність дислокацій.

#### Фізичні методи досліджень

1. Термічний аналіз засновано на явищі теплового ефекту. Фазові перетворення у сплавах супроводжуються тепловим ефектом, у результаті на кривих охолодження сплавів при температурах фазових перетворень спостерігаються точки перегину або температурні зупинки. Даний метод дозволяє визначити критичні точки.

#### 2. Ділатометричний метод.

При нагріві металів та сплавів відбувається зміна об'єму та лінійних розмірів – теплове розширення. Якщо зміни обумовлені лише збільшенням

енергії коливань атомів, то при охолодженні розміри відновлюються. При фазових перетвореннях зміни розмірів – незворотні.

Метод дозволяє визначити критичні точки сплавів, температурні інтервали існування фаз, а також вивчати процеси розпаду твердих розчинів.

### 3 .Магнітний аналіз.

Використовується для дослідження процесів, пов'язаних із переходом із парамагнітного стану у феромагнітне (або навпаки), причому можлива кількісна оцінка цих процесів.

## **ЛЕКЦІЯ №4. ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ СПЛАВІВ. БУДОВА, КРИСТАЛІЗАЦІЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ. ДІАГРАМА СТАНУ.**

1. Поняття про сплави та методи їх отримання.
2. Основні поняття теорії сплавів.
3. Особливості будови, кристалізації і властивостей сплавів: механічних сумішей, твердих розчинів, хімічних сполук.
4. Класифікація сплавів твердих розчинів.
5. Кристалізація сплавів.
6. Діаграма стану.

### **Мета і задачі:**

*Поняття про сплави та методи їх отримання.*

Під сплавом розуміють речовину, яку отримують сплавленням двох або більш елементів. Можливі інші способи виготовлення сплавів: спікання, електроліз, випаровування, возгонка. В цьому випадку речовини називаються псевдосплавами.

Сплав, виготовлений переважно із металевих елементів, який має металеві властивості, називається металевим сплавом. Сплави володіють більш різноманітним комплексом властивостей, які змінюються в залежності від складу та методу обробки. Порівняно із чистими металами сплави мають більш цінний комплекс механічних, фізичних і технологічних властивостей.

*Основні поняття теорії сплавів.*

**Система** – група тіл ( сукупність металів, або металевих сплавів), які виділяються для спостереження та вивчення.

В металознавстві системами являються метали та металеві сплави. Чистий метал є простою однокомпонентною системою, сплав – складною системою, яка створюється із двох або більше компонентів.

Систему називають рівноважною, якщо перетворення в ній при нагріванні та охолодженні відбуваються зворотно, а рівноважні умови досягаються за незначних ступенів перегріву чи переохолодження.

**Компоненти ( $K$ )** – хімічні компоненти, які утворюють систему (сплав). В якості компонентів виступають чисті речовини і хімічні сполуки, як що вони не дисоціюють на складові частини у дослідному інтервалі температур.

**Фаза ( $\Phi$ )** – однорідна частина системи, яка відокремлена від інших частин системи поверхнею розподілу, при переході крізь яку структура та властивості різко змінюються. При рівновазі зберігається й кількість співіснуючих фаз.

**Варіантність ( $C$ )** (число ступенів вільності) – це число внутрішніх та зовнішніх факторів (температура, тиск, концентрація), які, не порушуючи рівноваги системи, можна змінювати без зміни кількості фаз у системі. Рівноважним називають такий стан сплаву, що не змінюється у часі.

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

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

$V$  – кількість зовнішніх змінних параметрів ( температура та тиск).

Як що прийняти, що всі перетворення відбувається при постійному тиску, то число змінних зменшиться

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

де:  $C$  – число ступенів вільності,  $K$  – число компонентів,  $\Phi$  – число фаз,  $I$  – враховує можливість зміни температури.

Як що варіантність  $C = 1$  (моноваріантна система), то можна змінювати один з факторів в де яких межах, без зміни числа фаз. ( Наприклад чистий метал , коли є лише одна фаза ( розплав або твердий метал.  $K=1$ , і  $\Phi=1$ . Тоді  $C=1+1-1=1$ . Тобто система має один ступінь вільності. Це означає, що метал можна охолоджувати або нагрівати, зберігаючи його однофазним – рідким або твердим, лише за певного інтервалу температур.

Як що варіантність  $C = 0$  (нонваріантна система), то зовнішні фактори змінювати неможна без зміни числа фаз у системі. Наприклад: у момент плавлення або кристалізації в однокомпонентній системі існують уже дві фази – рідкий і твердий метал, тоді  $K=1$ ,  $\Phi=2$ , тобто  $C=1+1-2=0$ . У цьому випадку система не має жодного ступеня вільності і рівновага можлива тільки при постійній температурі. Дійсно, твердіння чистих металів відбувається за постійної температури і на кривій охолодження (нагрівання) їй відповідає горизонтальна ділянка.

У двокомпонентних системах сплав кристалізується за інших умов, оскільки  $K=2$ ,  $\Phi=2$ , то  $C=2+1-2=1$ .

*Особливості будови, кристалізації та властивостей сплавів: механічних сумішей, твердих розчинів, хімічних сполук*

Будова металічного сплаву залежить від того, у яку взаємодію вступають компоненти, що утворюють сплав. Майже усі метали у рідкому стані розчинюються один у одному в будь яких співвідношеннях. При утворенні сплавів в процесі їх кристалізації можлива різна взаємодія компонентів.

Під час кристалізації залежно від фізико-хімічних властивостей компонентів їх атоми взаємодіють. Внаслідок такої взаємодії формуються структури у вигляді:

- механічної суміші компонентів;
- хімічної сполуки;
- твердого розчину.

**Сплави механічні суміші** утворюються, коли компоненти не здатні до взаємного розчинення у твердому стані і не вступають у хімічну реакцію зі створенням з'єднання.

Створюються між елементами, які значно відрізняються за будовою та властивостями, коли сила взаємодії між однорідними атомами більша ніж між різнорідними. Сплав складається із кристалів компонентів, які в нього входять (рис. 4.1). В сплавах зберігаються кристалічні ґратки компонентів.

Механічну суміш, яку утворюють два компоненти, що нездатні взаєморозчинюватися або утворювати хімічну сполуку при кристалізації із рідкого стану, називають *евтектикою*. Слід очікувати, що властивості цих сплавів будуть усередненими, виходячи з рівня властивостей компонентів та їхнього кількісного вмісту у сплаві.

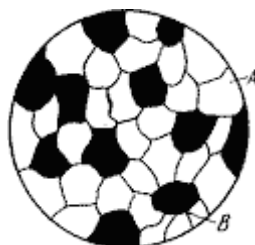


Рисунок 4.1. Схема мікроструктури механічної суміші

**Утворення хімічної сполуки** при кристалізації зумовлено здатністю різнорідних атомів ( які значною мірою відрізняються за будовою та властивостями) об'єднуватись у певні пропорції, утворюючи новий тип кристалічної ґратки, що відрізняється від ґраток компонентів сплаву.

Особливості цих сплавів:

- постійність складу, тобто сплав утворюється при певному співвідношенні компонентів, хімічне з'єднання позначається  $A_n B_m$ ;
- утворюється специфічна кристалічна ґратка з правильним впорядкованим розташуванням атомів, яка відрізняється від ґраток елементів, що створюють хімічне з'єднання (рис. 4.2).
- яскраво визначені індивідуальні властивості.
- постійність температури кристалізації, як у чистих компонентів



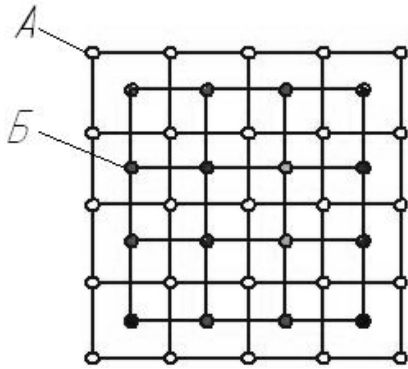


Рисунок 4.2. Кристалічна гратка хімічного з'єднання

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

Характерною особливістю твердих розчинів є: наявність в їх кристалічній гратки різнорідних атомів, при збереженні типу гратки розчинника.

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

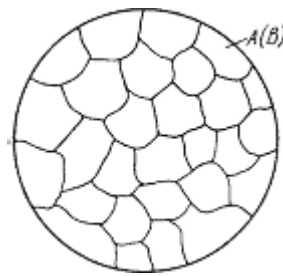


Рисунок 4.3. Схема мікроструктури твердого розчину

#### *Класифікація сплавів твердих розчинів.*

За ступенем розчинності компонентів розрізняють тверді розчини:

- з необмеженою розчинністю компонентів;
- обмеженою розчинністю компонентів.

При необмеженій розчинності компонентів кристалічна гратка компонента розчинника по мірі збільшення концентрації розчиненого компонента повільно переходить у кристалічну гратку розчиненого компонента.

Для утворення розчинів з необмеженою розчинністю необхідні:

- ізоморфність (однотипність) кристалічних ґраток компонентів;
- різниця розмірів атомних радіусів компонентів, не повинна відрізнятися більш ніж на 8...15 %.
- близькість фізико-хімічних властивостей подібних за будовою валентних оболонок атомів.

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

За характером розподілення атомів розчиненої речовини у кристалічній гратці розчинника розрізняють тверді розчини:

- заміщення;
- проникнення;
- вираховування.

У розчинах заміщення у кристалічній гратці розчинника частина його атомів заміщується атомами розчиненого елемента (рис. 4.4 а). Заміщення відбувається у будь яких місцях, тому такі розчини називають неупорядкованими твердими розчинами.

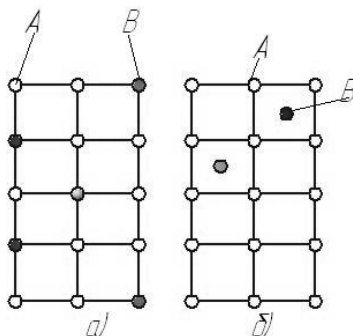


Рисунок 4.4. Кристалічна гратка твердих розчинів заміщення (а), проникнення (б)

При утворенні розчинів заміщення періоди гратки змінюються в залежності від різниці атомних діаметрів розчиненого елемента розчинника. Якщо атом розчиненого елемента більший за атом розчинника, то елементарні комірки збільшуються, як що менші – скорочуються. У першому наближенні ця зміна пропорційна концентрації розчиненого компонента. Зміна параметрів гратки при утворенні твердих розчинів – важливий момент, який визначає зміну властивостей. Зменшення параметру призводить до більшого зміцнення, ніж його збільшення.

Тверді розчини проникнення утворюються втіленням атомів розчиненого компоненту у пори кристалічної гратки розчинника (рис. 4.4 б). Утворення таких розчинів, можливе, як що атоми розчиненого елемента мають невеликі розміри. Такими є елементи, що знаходяться на початку періодичної системи Менделєєва, вуглець, водень, азот, бор. Як що розміри атомів перебільшують розміри міжатомних проміжків у кристалічній гратці металу, це визиває спотворення гратки і в ній виникають напруження. Концентрація таких розчинів не перебільшує 2 - 2.5%.

Тверді розчини вираховування або розчини з дефектною граткою утворюються на базі хімічних з'єднань, при цьому можлива не лише заміна одних атомів у вузлах кристалічної гратки іншими, але і створення порожніх, не зайнятих атомами вузлів у гратці.

*Сплави хімічні з'єднання* створюються між елементами, які значно відрізняються за будовою та властивостями, якщо сила взаємодії між різнорідними атомами більша, ніж між однорідними.

До хімічного з'єднання додають, один із елементів, що входить до формули, його атоми займають нормальне положення у ґратці з'єднання, а місце атомів іншого елемента залишається незайнятим.

### *Кристалізація сплавів.*

Кристалізація сплавів підкоряється тим самим закономірностям, що і кристалізація чистих металів. Необхідною умовою є наближення системи до стану з мінімумом вільної енергії

Основною відміною є велика роль дифузійних процесів, меж рідиною та фазою, що кристалізується. Ці процеси необхідні для перерозподілу різнорідних атомів, рівномірно розподілених у рідкій фазі.

У сплавах у твердому стані, мають місце процеси перекристалізації, які обумовлені алотропічними перетвореннями компонентів сплаву, розпадом твердих розчинів, виділенням із твердих розчинів вторинних фаз, коли розчинність компонентів у твердому стані змінюється зі зміною температури.

Ці перетворення називаються фазовими перетвореннями у твердому стані.

При перекристалізації у твердому стані утворюються центри кристалізації та відбувається їх ріст.

Зазвичай центри кристалізації виникають по границям зерен старої фази, де ґратка має найбільш дефектну будову, і де є домішки, які можуть стати центрами нових кристалів. У старої та нової фази, на протязі деякого часу, є загальні площини. Такий зв'язок ґраток називається когерентним зв'язком. В випадку різниці будови старої та нової фаз перетворення протікає з утворенням проміжних фаз.

Порушення когерентності - обособлення кристалів наступає, коли вони досягнуть визначених розмірів.

Процеси кристалізації сплавів вивчаються за діаграмами стану.

### *Діаграма стану.*

Діаграма стану являє собою графічне зображення стану будь якого сплаву, систему якого вивчаємо залежно від концентрації та температури (рис. 4.5)

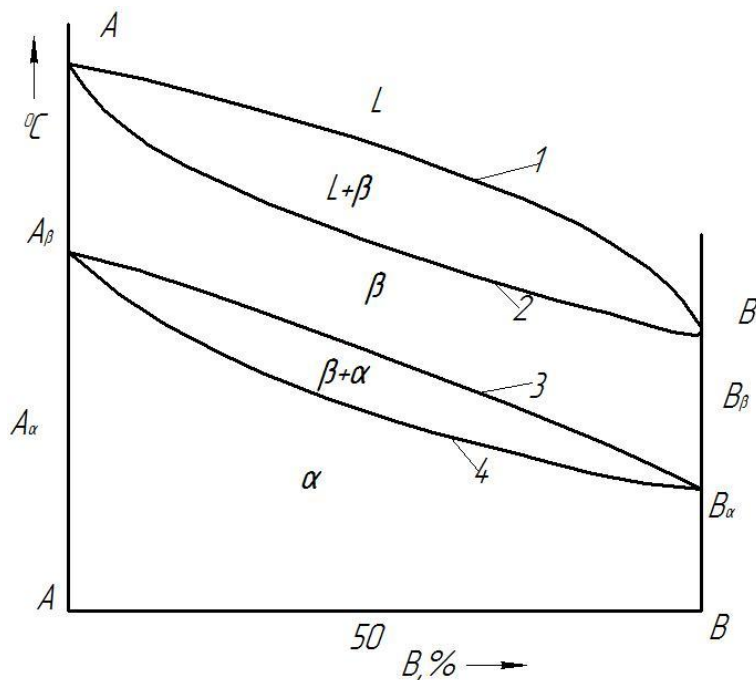


Рисунок 4.5. Діаграма стану

Діаграми стану показують стійкий стан, тобто стан, який при даних умовах має мінімум вільної енергії, і тому її також називають рівноважною діаграмою, так як вона показує, які при даних умовах існують рівноважні фази.

Побудова діаграм стану найчастіше відбувається за допомогою термічного аналізу.

В результаті отримують серію кривих охолодження, на яких при температурах фазових перетворень спостерігаються точки перегину та температурні зупинки.

Температури, які відповідають фазовим перетворенням, називають критичними точками. Деякі критичні точки мають назву, наприклад, точки які відповідають початку кристалізації називають точками ліквідус, а кінцю кристалізації – точками солідус.

За кривими охолодження будують діаграму стану в координатах: по осі абсцис – концентрація компонентів, по осі ординат – температура.

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

По діаграмі стану можна визначити температури фазових перетворень, зміну фазового складу, приблизно, властивості сплаву, види обробки, які можна застосувати до сплаву.

## ЛЕКЦІЯ №5. ДІАГРАМИ СТАНУ ДВОКОМПОНЕНТНИХ СПЛАВІВ

1. Діаграма стану сплавів з необмеженою взаємною розчинністю компонентів у твердому стані (сплави тверді розчини з необмеженою розчинністю)
2. Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів у твердому стані (механічні суміші)
3. Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані.
4. Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічні з'єднання.
5. Діаграма стану сплавів, які випробовують фазові перетворення у твердому стані (змінна розчинність)
6. Зв'язок між властивостями сплавів та типом діаграми стану.

### Мета і задачі:

*Діаграма стану сплавів з необмеженою взаємною розчинністю компонентів у твердому стані (сплави тверді розчини з необмеженою розчинністю)*

Діаграма стану та криві охолодження сплавів системи представлені на рис. 5.1.

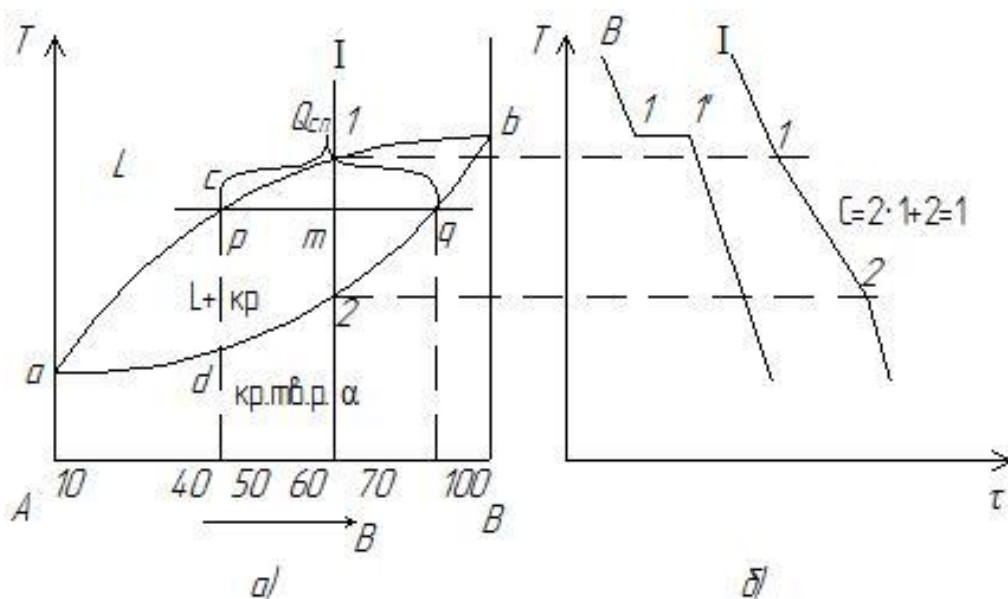


Рисунок 5.1 Діаграма стану сплавів з необмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (сплави тверді розчини з необмеженою розчинністю) (а); криві охолодження типових сплавів (б)

Спочатку отримують термічні криві. Отримані точки переносять на діаграму, з'єднавши точки початку кристалізації сплавів і точки кінця кристалізації, будують діаграму стану. Система Cu – Ni є прикладом діаграми стану сплавів, які утворюють необмежені тверді розчини. *Компоненти системи:* Купрум – Нікел. *Фази системи :* Рідкий розчин P та  $\alpha$ -твердий розчин.

Проведемо аналіз отриманої діаграми.

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

2. Число фаз:  $f = 2$  (рідка фаза Р,  $\alpha$ -кристали твердого розчину)

3. Основні лінії діаграми:

асb – лінія ліквідус, вище цієї лінії сплави знаходяться у рідкому стані;

adb – лінія солідус, нижче цієї лінії сплави знаходяться у твердому стані.

4. Характерні сплави системи:

Чисті компоненти А і В кристалізуються при постійній температурі, крива охолодження компонента В представлена на рис. 5.1,б.

Інші сплави кристалізуються аналогічно сплаву І, крива охолодження якого представлена на рис. 5.1, б.

*Процес кристалізації сплаву І:* сплав у рідкому стані охолоджується до точки 1. При температурі, яка відповідає точці 1, починають утворюватися центри кристалізації твердого розчину  $\alpha$ . На кривій охолодження відмічається перегин (критична точка), яка пов'язана із зменшенням швидкості охолодження внаслідок виділення прихованої теплоти кристалізації. На ділянці 1–2 відбувається процес кристалізації, який протікає при температурі, яка знижується, так як згідно правилу фаз у двокомпонентній системі при наявності двох фаз (рідкої та кристалів твердого розчину  $\alpha$ ) число ступенів вільності дорівнюється одиниці ( $C=2-2+1=1$ ).

При досягненні температури, яка відповідає точці 2, сплав твердіє і при подальшому зниженні температури сплав охолоджується до твердого стану, який складається з однорідних кристалів твердого розчину. Цілком ясно, що вище лінії ліквідус маємо фазу Р (рідина), нижче лінії солідус – фазу  $\alpha$ , а між цими лініями - (Р +  $\alpha$ ) (рідина + фаза  $\alpha$ ).

Схема мікроструктури сплаву представлена на рис. 5.2

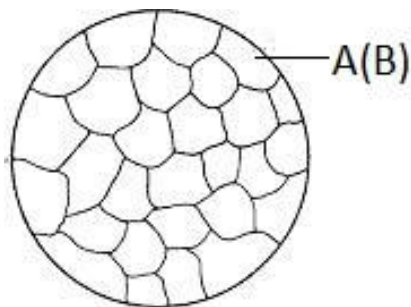


Рис. 5.2. Схема мікроструктури сплаву – однорідного твердого розчину

5. Кількісний структурно-фазовий аналіз сплаву.

Користуючись діаграмою стану, можна для будь якого сплаву ( у двофазній області) при будь-якій температурі визначити не тільки кількість фаз, але їх склад та кількісне співвідношення. Для цього використовується *правило відрізків (правило важеля)*.

Правило відрізків дає змогу визначити склад фаз та їх кількісне співвідношення. Для проведення кількісного структурно-фазового аналізу через задану точку  $m$  проводять горизонталь (коноду) - пряму паралельну до осі складу до перетину з найближчими лініями діаграми (ліквідус, солідус або осі компонентів). Проекція точки перетину коноди з лінією ліквідус на вісь складу покаже концентрацію компонентів у рідкому розчині, а проекція точки її перетину з лінією солідус – концентрацію компонентів у твердому розчині. (Перше положення правила відрізків)

. Друге положення – допомагає визначити масову частку кожної з двох фаз при заданій температурі. Масова частка одної фази у вибраній точці дорівнює відношенню довжини відрізка, що межує з областю іншої фази, до довжини цього відрізка – коноди.

а). *Визначення складу фаз у точці  $m$ :*

Для його визначення через точку  $m$  проводять горизонталь до перетину з найближчими лініями діаграми: ліквідус і солідус.

Склад рідкої фази визначається проекцією точки перетину горизонталі з лінією ліквідус  $p$  на ось концентрації.

Склад твердої фази визначається проекцією точки перетину горизонталі з лінією солідус  $q$  (або віссю компонента) на ось концентрації.

Склад рідкої фази змінюється по лінії ліквідус, а склад твердої фази – по лінії солідус. З пониженням температури склад фаз змінюється у бік зменшення вмісту компонента В.

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

Кількісна маса фаз зворотно пропорційна відрізкам проведеної коноди.

Розглянемо проведеною через точку  $m$  коноду та її відрізки.

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

Відрізок, прилеглий до лінії ліквідус  $pm$ , визначає кількість твердої фази.

$$Q_t = \frac{pm}{pq} 100\%$$

Відрізок, прилеглий до лінії солідус (або до осі компонента)  $mq$ , визначає кількість рідкої фази

$$Q_p = \frac{mq}{pq} 100\%$$

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

Діаграма стану та криві охолодження типових сплавів системи зображені на рис. 5.3. Прикладом такої діаграми стану є свинець – сурма.

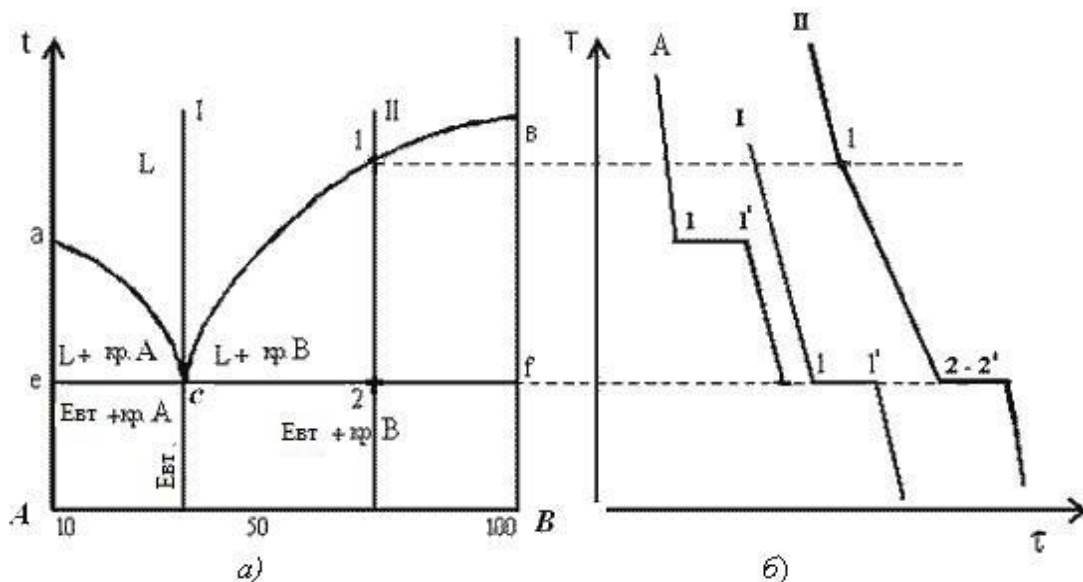


Рисунок 5.3. Діаграма стану сплавів з відсутністю розчинності компонентів у твердому стані (а) та криві охолодження сплавів (б)

Проведемо аналіз діаграми стану.

1. Кількість компонентів:  $K = 2$  (компоненти А и В);
2. Число фаз:  $\Phi = 3$  (кристали компоненту А, кристали компоненту В, рідка фаза).

3. Основні лінії діаграми:

- лінія ліквідус  $асb$ , складається з двох розгалужень, які сходяться в одній точці;
- лінія солідус  $есf$ , паралельна осі концентрацій спрямована до осей компонентів, але не досягає них;

4. Типові сплави системи.

а) Чисті компоненти, кристалізуються при постійній температурі, на рис 5.3 б показана крива охолодження компоненту А.

б). Евтектичний сплав – сплав, який відповідає концентрації компонентів у точці С (сплав І). Крива охолодження цього сплаву, аналогічна кривим охолодження чистих металів (рис. 5.3 б)

Евтектика – дрібнодисперсна механічна суміш різнорідних кристалів, які кристалізуються одночасно при сталій, найнижчій для даної системи, температурі. Евтектичними називають сплави, для яких характерно:

1. Початок і кінець кристалізації відбуваються при одній і тій же температурі ( точки ліквідус та солідус співпадають);
2. Найменша температура плавлення серед сплавів даної системи;
3. Структура таких сплавів є механічна суміш компонентів А і В.

При утворенні сплавів механічних сумішей евтектика складається із кристалів компонентів А и В:  $\rightarrow$  *Евт.* (кр. А + кр. В).

При кристалізації будь-якого сплаву цієї системи склад рідини буде змінюватися вздовж лінії ліквідус до евтектичної точки С, тобто кристалізація усіх сплавів закінчується утворенням евтектики. Оскільки це відбувається при постійній і однаковій для всіх сплавів температурі, то лінія солідус даної



системи є горизонтальною прямою  $esf$ , яка називається лінією евтектичного перетворення.

Евтектична точка  $C$  ділить усі сплави на доевтектичні (ліворуч від точки  $C$ ) та заевтектичні (справа від точки  $C$ ). В окрему групу виділяються евтектичний сплав (на рис.5.3 сплав 1).

Процес кристалізації евтектичного сплаву: до точки 1- охолоджується сплав з рідкого стану. При температурі, яка відповідає точці 1, починається одночасна кристалізація двох різнорідних компонентів. На кривій охолодження фіксується температурна зупинка, то б то процес проходить при постійній температурі, так як згідно правилу фаз у двокомпонентній системі при наявності трьох фаз (рідкої та кристалів компонентів  $A$  і  $B$ ) число ступені вільності (варіантність) дорівнюється нулю  $\rightarrow C = 2 - 3 + 1 = 0$ . При цьому виділяється велика кількість теплоти і температура залишається постійною. У точці 1 - процес кристалізації завершується. Нижче точки 1 охолоджується сплав, який формується з дисперсних різнорідних кристалів компонентів  $A$  і  $B$ :  $\rightarrow C = 2 - 2 + 1 = 1$ .

в) Інші сплави системи аналогічні сплаву II, криву охолодження сплаву дивись на рис 5.3.б.

Процес кристалізації сплаву II: до точки 1 сплав охолоджується у рідкому стані. При температурі, яка відповідає точці 1, починають утворюватися центри кристалізації надлишкового компоненту  $B$ . На кривій охолодження відзначається перегин (критична точка), пов'язаний із зменшенням швидкості охолодження внаслідок виділення прихованої теплоти кристалізації. На ділянці 1-2 відбувається процес кристалізації, який протікає при температурі яка знижується, так як згідно правилу фаз у двокомпонентній системі при наявності двох фаз (рідкої та кристалів компоненту  $B$ ) число ступені вільності буде дорівнюватися одиниці ( $C = 2 - 2 + 1 = 1$ ). При охолодженні склад рідкої фази змінюється за лінією ліквідус до евтектичного. На ділянці 2-2' кристалізується евтектика (дивись кристалізацію евтектичного сплаву). Нижче точки 2' охолоджується сплав, який формується з кристалів, які первинно кристалізувалися з надлишкового компоненту  $B$  та евтектики.

Схема мікроструктури сплаву представлена на рис. 5.4.

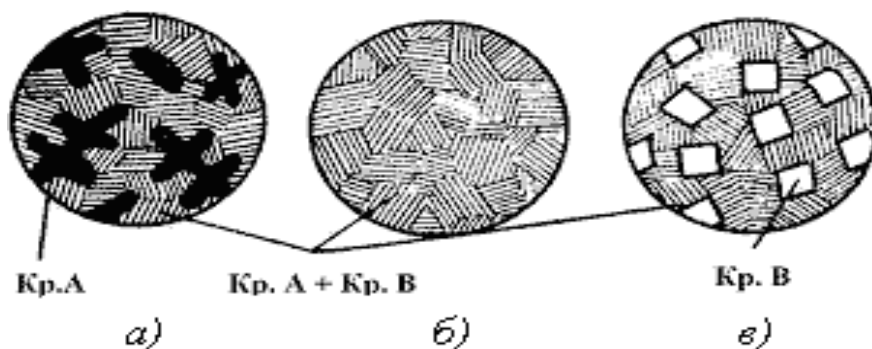


Рисунок 5.4. Схема мікроструктур сплавів: а – доевтектичного, б – евтектичного, в – заевтектичного

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

*Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані*

Діаграма стану та криві охолодження типових сплавів системи показана на рис.5.5.

1. Кількість компонентів:  $K = 2$  (компоненти А и В);
2. Число фаз:  $\Phi = 3$  {рідка фаза і кристали твердих розчинів  $\alpha$  (розчин компоненту В у компоненті А) та  $\beta$  (розчин компоненту А у компоненті В)};
3. Основні лінії діаграми:
  - лінія ліквідус  $acb$ , складається з двох гілок, які збігаються у одній точці;
  - лінія солідус  $adcfb$ , складається з трьох ділянок;
  - $dm$  – лінія граничної концентрації компоненту В у компоненті А;
  - $fn$  – лінія граничної концентрації компоненту А у компоненті В.
4. Типові сплави системи.

При концентрації компонентів, які не перебільшують граничних значень (на ділянках  $Am$  и  $nB$ ), сплави кристалізуються аналогічно сплавам твердих розчинів з необмеженою розчинністю, дивись криву охолодження сплаву I на рис. 5.5 б. При концентрації компонентів, яка перебільшує порогові значення (на ділянці  $dcf$ ), сплави кристалізуються аналогічно сплавам механічні суміші, дивись криву охолодження сплаву II на рис. 5.5 б.

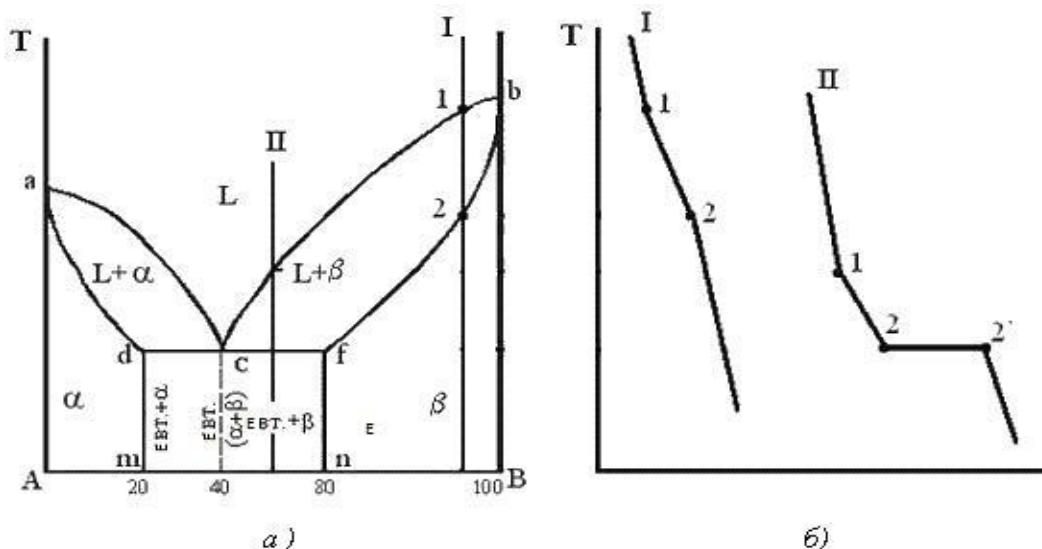


Рисунок 5.5 Діаграма стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані (а) та криві охолодження типових сплавів (б)

Сплав з концентрацією компонентів, яка відповідає точці С, є евтектичним сплавом. Сплав формований з дрібнодисперсних кристалів твердих розчинів  $\alpha$  та  $\beta$ , евт. (кр. тв. р-ну  $\alpha$  + кр. тв. р-ну  $\beta$ )

Кристали компонентів у чистому вигляді ні в жодному із сплавів не присутні.

*Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічні з'єднання.*

Діаграма стану сплавів представлена на рис. 5.6.

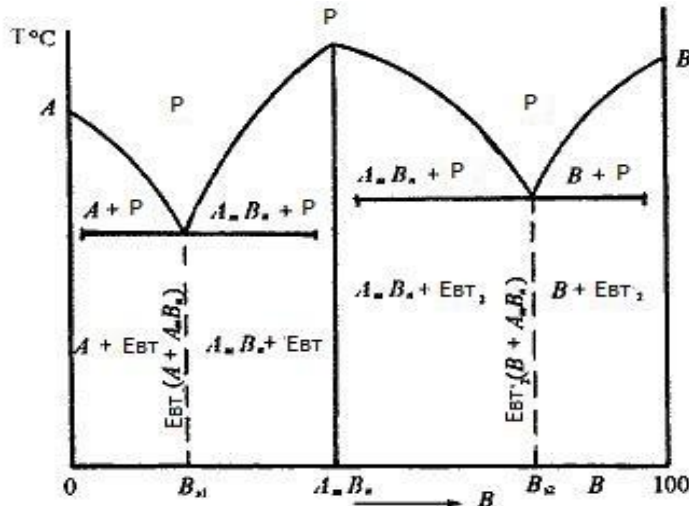


Рисунок 5.6. Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічні з'єднання

Діаграма стану складна, складається з декількох простих діаграм. Число компонентів та кількість діаграм залежить від того, скільки хімічних з'єднань утворюють основні компоненти системи.

Число фаз и вид простих діаграм визначаються характером взаємодії між компонентами.

*Эвт<sub>1</sub>* (кр. *A* + кр. *AmBn*);

*Эвт<sub>2</sub>* (кр. *B* + кр. *AmBn*).

*Діаграма стану сплавів, які випробовують фазові перетворення у твердому стані (змінна розчинність)*

Діаграма стану представлена на рис. 5.7.

За зовнішнім видом діаграма схожа на діаграму стану сплавів з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані. Відміна у тому, що лінії максимальної розчинності компонентів не перпендикулярні осі концентрації. З'являються області, в яких із однорідних твердих розчинів при пониженні температури виділяються вторинні фази.

На діаграмі:

*df* – лінія змінної граничної розчинності компонента *B* у компоненті *A*;

*ek* – лінія змінної граничної розчинності компонента *A* у компоненті *B*.

Крива охолодження сплаву *I* наведена на рис. 5.7 б.

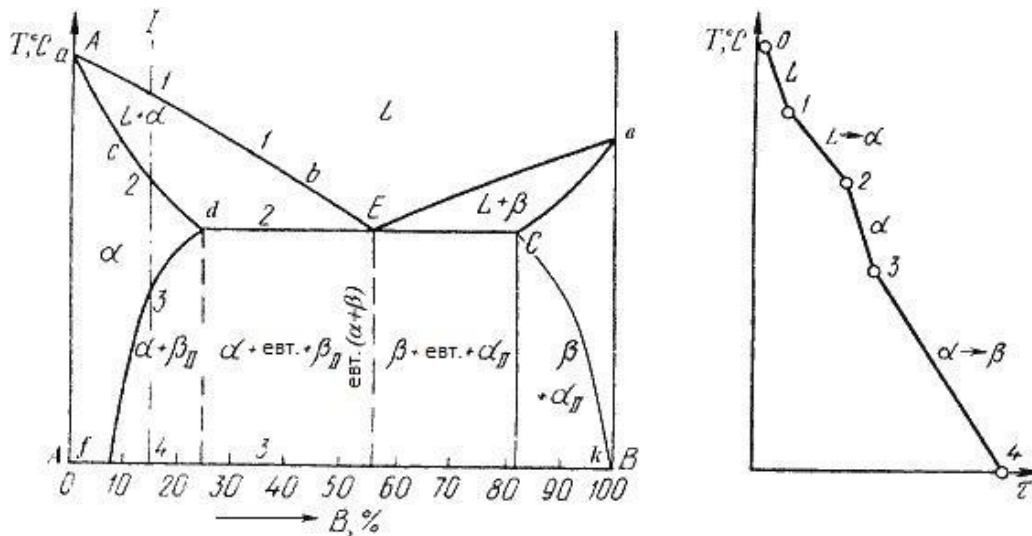


Рисунок 5.7. Діаграма стану сплавів, які випробовують фазові перетворення у твердому стані (а) та крива охолодження сплаву (б)

*Процес кристалізації сплаву I:* до точки 1 сплав охолоджується з рідкого стану. При температурі, яка відповідає точці 1, починають утворюватися центри кристалізації твердого розчину  $\alpha$ . На ділянці 1–2 проходить процес кристалізації, який протікає при зниженні температури. При досягненні температури, що відповідає точці 2, сплав твердіє, при подальшому зниженні температури охолоджується до твердого стану, який формується із однорідних кристалів твердого розчину  $\alpha$ . При досягненні температури, що відповідає точці 3, твердий розчин  $\alpha$  стає насиченим компонентом В, при більш низьких температурах розчинність другого компонента зменшується, тому із  $\alpha$ -розчину починає виділятися надлишковий компонент у вигляді кристалів  $\beta_{II}$ . За точкою 3 сплав складається з двох фаз: кристалів твердого розчину  $\alpha$  та вторинних кристалів твердого розчину  $\beta_{II}$ .

*Зв'язок між властивостями сплавів та типом діаграми стану.*

Так як вигляд діаграми, так і властивості сплаву, залежать від того, які з'єднання або які фази створили компоненти сплаву, то між ними повинен існувати визначений зв'язок. Ця залежність встановлена Курнаковим, (рис. 5.8.).

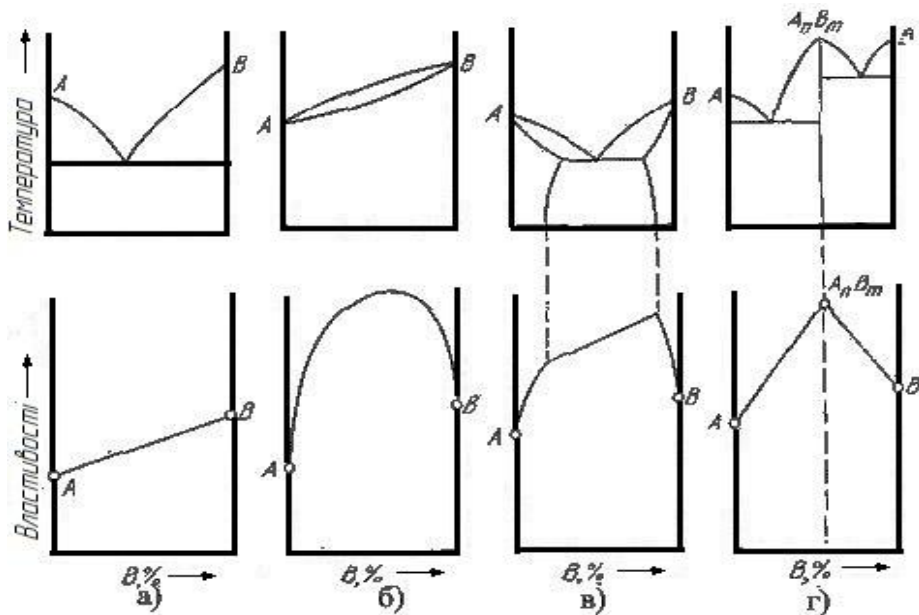


Рисунок 5.8. Зв'язок між властивостями сплавів та типом діаграми стану

При утворенні механічних сумішей (рис. 5.8, а) властивості змінюються за лінійним законом. Значення характеристик властивостей сплаву знаходяться в інтервалі між характеристиками чистих компонентів.

При утворенні твердих розчинів (рис. 5.8, б) з необмеженою розчинністю властивості сплавів змінюються за криволінійною залежністю, причому деякі властивості, наприклад, електроопір, може значно відрізнятись від властивостей компонентів.

При утворенні твердих розчинів з обмеженою розчинністю (рис. 5.8, в) властивості в інтервалі концентрацій, які відповідають однофазним твердим розчинам, змінюються за криволінійним законом, а у двофазній області – за лінійним законом. Причому крайні точки на прямій є властивостями чистих фаз, максимально насичених твердих розчинів, які утворюють дану суміш.

При утворенні хімічних з'єднань (рис. 5.8, г) концентрація хімічного з'єднання відповідає максимуму на кривій. Це точка перегину, яка відповідає хімічному з'єднанню, називається сингулярною точкою.

Подані залежності не можна вважати універсальними, оскільки вони описують властивості сплавів переважно у рівноважному стані й часто не враховують таких структурних особливостей, як дефекти кристалічної будови, розміри й форму зерен, дисперсність фаз тощо. Але істотно полегшують роботу над створенням нових сплавів.

## ЛЕКЦІЯ №6. ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ. ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗО - ВУГЛЕЦЬ

1. Структури залізовуглецевих сплавів.
2. Компоненти та фази залізовуглецевих сплавів
3. Процеси при структуроутворенні залізовуглецевих сплавів

## 4. Структури залізовуглецевих сплавів

### Конспект лекції

#### Структури залізовуглецевих сплавів

Залізовуглецеві сплави – сталі та чавуни – найважливіші металічні сплави сучасної техніки. Виробництво чавуну та сталі за обсягом перебільшує виробництво усіх інших металів разом більш ніж у десять разів.

Діаграма стану залізо – вуглець дає основне уявлення про будову залізовуглецевих сплавів – сталей та чавунів. Започаткував вивчення діаграми залізо – вуглець Чернов Д.К. У 1868 році. Чернов вперше звернув увагу на існування у сталі критичних точок та на залежність їх положення від вмісту вуглецю.

Діаграма залізо – вуглець поширюється від заліза до вуглецю. Залізо створює з вуглецем хімічне з'єднання: цементит –  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Кожне стійке хімічне з'єднання можна розглядати як компонент, а діаграму – по частинам. Так як на практиці використовують металеві сплави з вмістом вуглецю до 5% , то розглядаємо частину діаграми стану від заліза до хімічного з'єднання: цементит, який містить 6,67% вуглецю.

Діаграма стану залізо – цементит представлена на рис. 6.1.

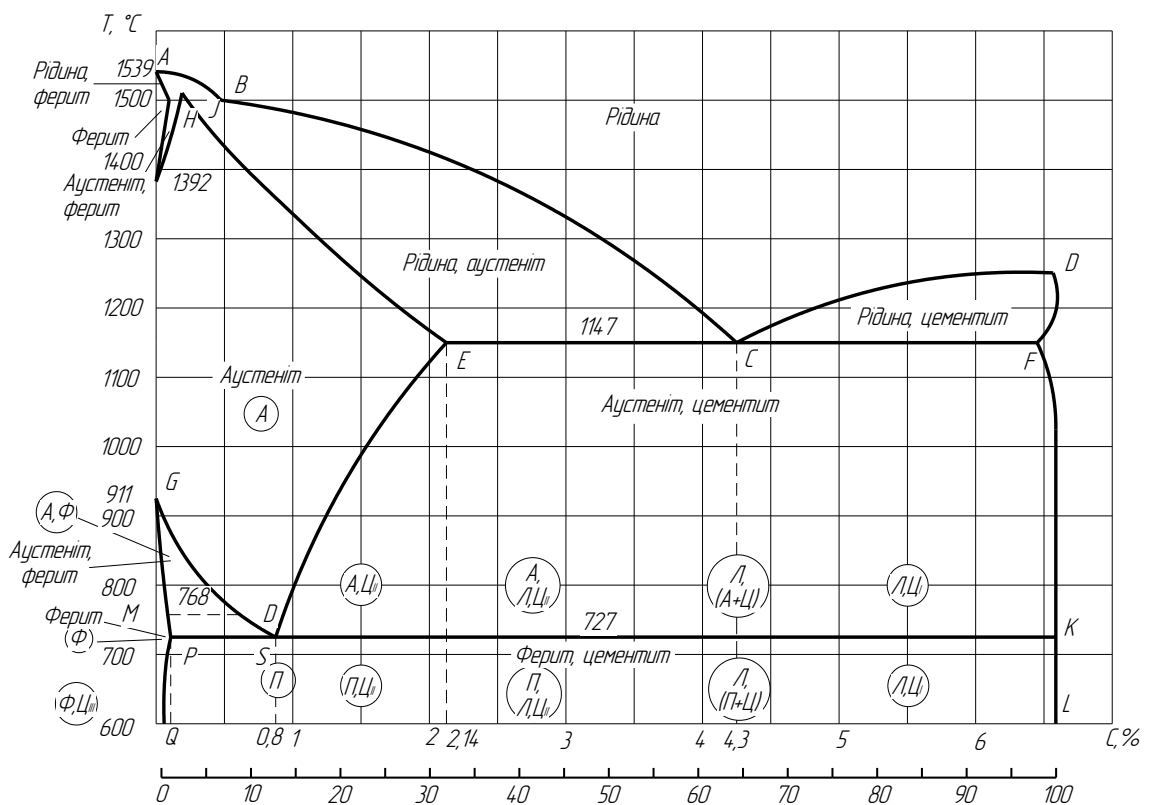


Рисунок 6.1 – Діаграма стану системи залізо – цементит

#### Компоненти і фази залізовуглецевих сплавів

Компонентами залізовуглецевих сплавів є залізо, вуглець та цементит.

1. **Залізо** – перехідний метал сріблясто-світлого кольору. Має високу температуру плавлення –  $1539^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$ , його густина при кімнатній температурі  $7,68 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Залізу властивий поліморфізм, тобто в залежності від температури воно має різну кристалічну будову.

При кристалізації ( $1539^{\circ}\text{C}$ ) утворюється  $\alpha\text{-Fe}$ , кристалічна будова якого має об'ємноцентровану кубічну (ОЦК) ґратку. У твердому стані залізо може перебувати у двох модифікаціях. Поліморфні перетворення відбуваються при температурах  $911^{\circ}\text{C}$  та  $1392^{\circ}\text{C}$ . При температурі нижче  $911^{\circ}\text{C}$  існує ( $768 \dots 911^{\circ}\text{C}$ )  $\alpha\text{-Fe}$  з об'ємно-центрованою кубічною ґраткою. У інтервалі температур  $911 \dots 1392^{\circ}\text{C}$  стійкою є  $\gamma\text{-Fe}$  з гранецентрованою кубічною ґраткою. Вище  $1392^{\circ}\text{C}$  залізо має  $\alpha\text{-Fe}$  об'ємноцентровану кубічну ґратку і називається високотемпературною  $\delta$ -фазою. Високотемпературна модифікація не є новою алотропічною формою. Критичну температуру  $911^{\circ}\text{C}$  перетворення  $\text{Fe}\alpha \leftrightarrow \text{Fe}\gamma$  позначають точкою  $A_3$ , а температуру  $1392^{\circ}\text{C}$  перетворення  $\text{Fe}\alpha \leftrightarrow \text{Fe}\delta$  - точкою  $A_4$ .

При температурі нижчою за  $768^{\circ}\text{C}$  залізо ферромагнітно, а вище – парамагнітно. Точка Кюрі заліза  $768^{\circ}\text{C}$  позначається  $A_2$  і є температурою переходу  $\alpha\text{-Fe}$  із парамагнітного стану в ферромагнітне при охолодженні заліза і навпаки - при його нагріванні.

Для заліза крива охолодження має наступний вигляд (рис.6.2).

В інтервалі  $911 - 1392^{\circ}\text{C}$   $\text{Fe}$  має ГЦК, а в інтервалі від  $0$  до  $911^{\circ}\text{C}$  і від  $1392^{\circ}\text{C}$  до  $1539^{\circ}\text{C}$  - ОЦК. Змінюються також магнітні властивості при температурі  $768^{\circ}\text{C}$ .

$\text{Fe}\delta$  - ОЦК  $a = 2,93\text{Å}$ ,

$\text{Fe}\gamma$  - ГЦК  $a = 3,64\text{Å}$  - немагнітні,

$\text{Fe}\beta$  - ОЦК  $a = 2,90\text{Å}$  - немагнітні.

$\text{Fe}\alpha$  - ОЦК не супроводжується змінами решітки, але змінюються магнітні властивості.

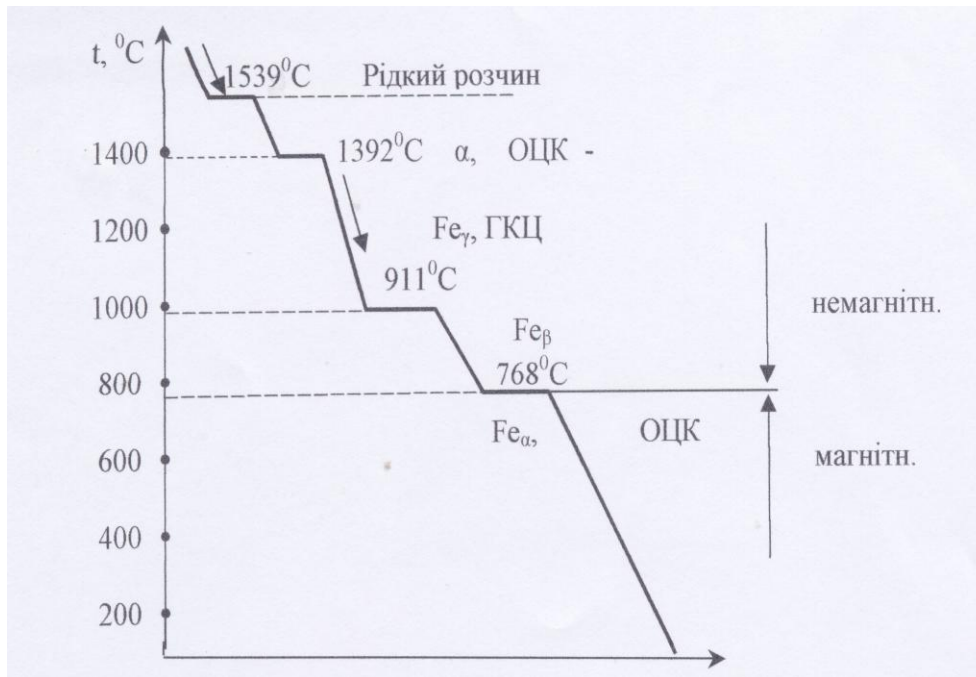


Рисунок 6.2 - Крива охолодження заліза

Залізо технічної чистоти має невисоку твердість (80 НВ) та міцність (межа міцності – міцність на розрив  $G_B=200\dots250$  МПа , межа текучості –  $G_T = 120$  МПа) та високими характеристиками пластичності (відносне видовження –  $\delta = 50\dots55\%$  , а відносне звуження –  $\psi = 80\%$ ). Властивості можуть змінюватися у деяких межах в залежності від величини зерна.

Залізо характеризується високим модулем пружності, наявність якого проявляється і у сплавах на його основі, забезпечує високу цупкість деталей із цих сплавів.

Залізо з багатьма елементами створює розчини: з металами – розчини заміщення, з вуглецем, азотом та воднем – розчини втілення.

2. **Вуглець** відноситься до неметалів. Має поліморфні перетворення, в залежності від умов створення, існує у формі графіту з гексагональною кристалічною ґраткою (температура плавлення –  $3850$  °С, густина –  $2,5$  г/см<sup>3</sup>) або у формі алмазу зі складною кубічною ґраткою та координаційним числом - чотири (температура плавлення –  $5000$  °С).

У сплавах заліза з вуглецем вуглець знаходиться у стані твердого розчину із залізом та у вигляді хімічного з'єднання – цементит ( $Fe_3C$ ), а також у вільному стані у вигляді графіту (у сірих чавунах).

3. **Цементит ( $Fe_3C$ )** – хімічне з'єднання заліза з вуглецем (карбід заліза), містить 6,67 % вуглецю.

Алотропічних перетворень не має. Кристалічна ґратка цементиту складається із ряду октаєдрів, вісі яких нахилені один до одного.

Температура плавлення цементиту точно не встановлена ( $1250, 1550$  °С). При низьких температурах цементит слабо феромагнітний, магнітні властивості втрачає при температурі близько  $217$  °С.



Цементит має високу твердість (більшу за 800 НВ, легко дряпає скло), але надзвичайно низьку, практично нульову, пластичність. Такі властивості є наслідком складної будови кристалічної ґратки.

Цементит здатний утворювати тверді розчини заміщення. Атоми вуглецю можуть заміщуватися атомами неметалів: азотом, киснем; атоми заліза – металами: марганцем, хромом, вольфрамом та ін. Такий твердий розчин на базі ґратки цементиту називається легованим цементитом.

Цементит – з'єднання нестійке і при визначених умовах розпадається з утворенням вільного вуглецю у вигляді графіту. Цей процес має важливе практичне значення процесу структуроутворення чавунів.

В системі залізо – вуглець існують наступні фази: рідка фаза, ферит, аустеніт, цементит.

1. *Рідка фаза (P)*. У рідкому стані залізо добре розчинює вуглець в будь-яких пропорціях з утворенням однорідної рідкої фази і існує як окрема фаза над лінією ліквідус.

2. *Ферит (Ф) Fe $\alpha$ (C)* – твердий розчин проникнення вуглецю у  $\alpha$ -залізі.

Ферит має змінну граничну розчинність вуглецю: мінімальна – 0,006 % при кімнатній температурі (точка Q), максимальна – 0,02 % у  $\alpha$ -фериті при температурі 727° С (точка P). Вуглець розташовується в дефектах ґратки (по лінії PQ).

При температурі вище 1392° С існує високотемпературний ферит ( $\delta$ -Fe $\delta$ (C)), з граничною розчинністю вуглецю 0,1 % при температурі 1499° С (точка J).

Властивості фериту наближені до властивостей заліза. Він м'який (твердість – 130 НВ, межа міцності –  $G_B = 300$  МПа) і пластичний (відносно видовження –  $\delta = 30$  %), магнітний до 768° С.

3. *Аустеніт (А) Fe $\gamma$ (C)* – твердий розчин проникнення вуглецю у  $\gamma$ -залізо.

Вуглець займає місце у центрі гранецентрованої кубічної комірки.

Аустеніт має змінну граничну розчинність вуглецю: мінімальну – 0,8 % при температурі 727° С (точка S), максимальну – 2,14 % при температурі 1147° С (точка E).

Аустеніт має твердість 200...250 НВ, пластичний (відносно видовження –  $\delta = 40 \dots 50\%$ ), парамагнітний (немагнітний).

При розчиненні в аустеніті інших елементів можуть змінюватися властивості та температурні границі існування.

4. *Цементит (Ц)* – характеристика наведена вище.

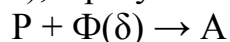
В залізовуглецевих сплавах присутні фази: цементит первинний (Ц<sub>I</sub>), цементит вторинний (Ц<sub>II</sub>), цементит третинний (Ц<sub>III</sub>). Хімічні та фізичні властивості цих фаз однакові. Вплив на механічні властивості сплавів надає різниця у розмірах, кількості та розташуванню цих виділень. Цементит первинний – який виділяється з рідкої фази у вигляді добірних пластинчатих кристалів. Цементит вторинний, який виділяється із аустеніту розташовується у вигляді сітки навколо зерен аустеніту (при охолодженні – навколо зерен

перліту). Цементит третинний, що виділяється із фериту і у вигляді дрібних включень і розташовується біля границь феритних зерен.

*Процеси при структуроутворенні залізовуглецевих сплавів*

Лінія ABCD – ліквідус системи. На ділянці АВ починається кристалізація фериту ( $\delta$ ), на ділянці ВС починається кристалізація аустеніту, на ділянці CD – кристалізація цементиту первинного.

Лінія ANJESCF – лінія солідус. На ділянці AN закінчується кристалізація фериту ( $\delta$ -Fe). На лінії HJB при постійній температурі 1499°C відбувається перетектичне перетворення, яке полягає в тому, що рідка фаза реагує із раніше утвореними кристалами фериту ( $\delta$ -Fe), в результаті чого утворюється аустеніт:



На ділянці JE закінчується кристалізація аустеніту. На ділянці ECF при постійній температурі 1147° С проходить евтектичне перетворення, яке полягає у тому, що рідина, яка містить 4,3 % вуглецю перетворюється в евтектичну суміш аустеніту і цементиту первинного:



Евтектика системи залізо – цементит називається ледебуритом (Л), на ім'я німецького вченого Ледебура, містить 4,3 % вуглецю.

При температурі нижче 727° С до складу ледебуриту входять цементит первинний і перліт, його називають ледебурит перетвореним (ЛП).

По лінії HN починається перетворення фериту ( $\delta$ -Fe) в аустеніт, яке обумовлено поліморфним перетворенням заліза. По лінії NJ перетворення фериту ( $\delta$ -Fe) в аустеніт закінчується.

По лінії GS відбувається перетворення аустеніту у ферит, яке обумовлене поліморфним перетворенням заліза. По лінії PG перетворення аустеніту у ферит закінчується.

По лінії ES починається виділення цементиту вторинного з аустеніту, яке обумовлене зниженням розчинності вуглецю в аустеніті при пониженні температури.

По лінії MO при постійній температурі 768°C мають місце магнітні перетворення.

По лінії PSK при постійній температурі 727°C проходить евтектоїдне перетворення, яке полягає у тому, що аустеніт, який містить 0,8 % вуглецю, перетворюється в евтектоїдну суміш фериту і цементиту вторинного:



За механізмом дане перетворення схоже на евтектичне, але протікає у твердому стані.

Евтектоїд системи залізо – цементит називається перлітом (П), містить 0,8% вуглецю.

Назву отримав за те, що на полірованому та протравленому шліфі спостерігається перлуватий блиск.

Перліт може існувати у зернистій та пластинчастій формі, в залежності від умов утворення.

По лінії PQ починається виділення цементиту третинного із фериту, яке обумовлено зниженням розчинності вуглецю у фериті при пониженні температури.

Температури, при яких проходять фазові та структурні перетворення у сплавах системи залізо – цементит, тоб то критичні точки, мають умовне позначення.

Позначаються літерою А (від французького *arret* – зупинка):

$A_1$  – лінія PSK ( $727^{\circ}\text{C}$ ) – перетворення  $\text{P} \rightarrow \text{A}$ ;

$A_2$  – лінія MO ( $768^{\circ}\text{C}$ , т. Кюри) – магнітне перетворення;

$A_3$  – лінія GOS (змінна температура, яка залежить від вмісту вуглецю у сплаві) – перетворення  $\Phi \rightarrow \text{A}$ ;

$A_4$  – лінія NJ (змінна температура, яка залежить від вмісту вуглецю у сплаві) – перетворення  $\text{A} \leftrightarrow \Phi(\delta)$ ;

$A_{cm}$  – лінія SE (змінна температура, яка залежить від вмісту вуглецю у сплаві) – початок виділення цементиту вторинного (іноді позначається  $A_3$ ).

Так як при нагріві та охолодженні перетворення відбуваються при різних температурах, аби відрізнити ці процеси вводять додаткові позначення. При нагріві додають літеру  $A_{c1}$ , при охолодженні – літеру  $A_{r1}$ .

*Структури залізовуглецевих сплавів*

Усі сплави системи залізо – цементит за структурними ознаками поділяють на дві великі групи: сталі та чавуни.

Особливу групу складають сплави з вмістом вуглецю менше 0,02% (точка Р), їх називають технічне залізо. Мікроструктури сплавів представлені на рис.6.3. Структура таких сплавів після закінчення кристалізації складається або із зерен фериту (рис.6.2 а), при вмісті вуглецю менш 0,006 %, або із зерен фериту та кристалів цементиту третинного, які розташовані по границям зерен фериту (рис.6.3.б), якщо вміст вуглецю від 0,006 до 0,02 %.

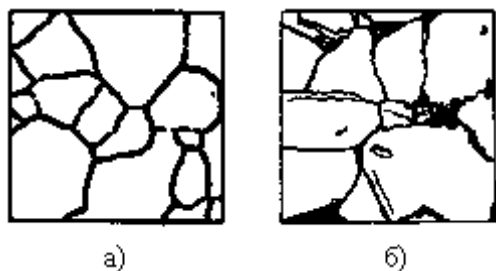


Рисунок 6.3. Мікроструктури технічного заліза: а – вміст вуглецю менш 0,006%; б – вміст вуглецю 0,006...0,02 %.

Вуглецевими сталями називають сплави заліза з вуглецем, які містять 0,02...2,14 % вуглецю, і закінчують кристалізацію створенням аустеніту.

Вони володіють високою пластичністю, особливо в аустенітному стані.

Структура сталей формується в результаті перекристалізації аустеніту. Мікроструктури сталей представлені на рис. 6.4.

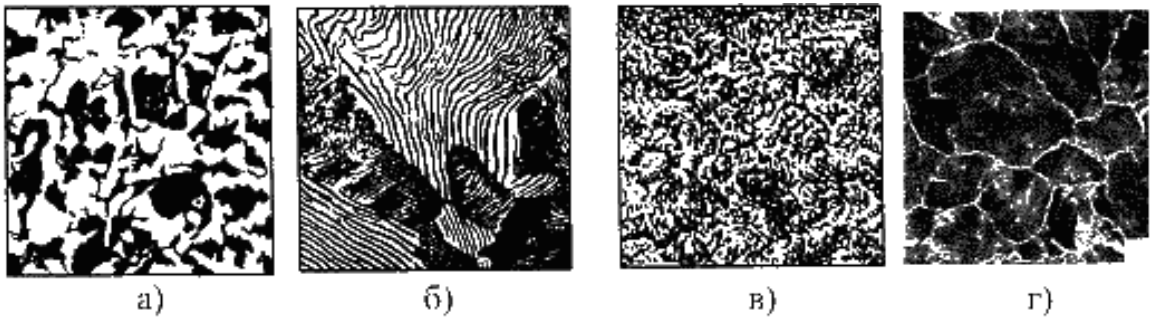


Рисунок 6.4. Мікроструктури сталей: а – доевтектоїдна сталь ; б – евтектоїдна сталь (пластинчатий перліт); в – евтектоїдна сталь (зернистий перліт); г – заевтектоїдна сталь .

За вмістом вуглецю та за структурою сталі поділяються на доевтектоїдні ( $0,02\% < C < 0,8\%$ ), *структура ферит + перліт* (Ф+П) (рис.6.4 а); евтектоїдні, *структура перліт* (П), перліт може бути пластинчастий або зернистий (рис. 6.4 б и 6.4 в); заевтектоїдні ( $0,8\% < C < 2,14\%$ ), *структура перліт + цементит вторинний* (П + Ц<sub>II</sub>), цементитна сітка розташовується навколо зерен перліту.

По мікроструктурі сплавів можна приблизно визначити кількість вуглецю у сплаві, враховуючи наступне: кількість вуглецю у перліті складає 0,8 %, у цементиті – 6,67 %. Внаслідок малої розчинності вуглецю у фериті, вважається, що у ньому вуглець відсутній.

Сплави заліза з вуглецем, які містять вуглецю більш ніж 2,14 % (до 6,67 %), які закінчують кристалізацію утворенням евтектики (ледебурит), називають чавунами.

Наявність легкоплавкого ледебуриту у структурі чавунів підвищує їх ливарні властивості.

Чавуни, які кристалізуються за діаграмою стану залізо – цементит, відрізняються високою крихкістю. Колір їх зламу – сріблясто-білий. Такі чавуни називаються білими чавунами.

Мікроструктури білих чавунів представлені на рис. 6.5.



Рисунок 6.5. Мікроструктури білих чавунів: а – доевтектичний білий чавун; б – евтектичний білий чавун (Л); в – заевтектичний білий чавун .

За кількістю вуглецю і за структурою білі чавуни поділяються на: доевтектичні ( $2,14\% < C < 4,3\%$ ), *структура перліт + ледебурит + цементит вторинний* (П +Л + Ц<sub>II</sub>); евтектичні ( $C=4,3\%$ ), *структура ледебурит* (Л) (рис.

6.5 б); заевтектичні (4,3% < C < 6,67%), *структура ледебурит + цементит первинний* (Л + Ц<sub>I</sub>) (рис. 6.5 в).

У структурі доевтектичних білих чавунів присутній цементит вторинний, який утворюється в результаті зміни складу аустеніту при охолодженні (по лінії ES). У структурі цементит вторинний перевивається з цементитом, якій входить до складу ледебуриту.

Фазовий склад сталей и чавунів за нормальних температур той самий, вони утворені із фериту та цементиту. Але властивості сталей та білих чавунів значно вирізняються. Таким чином, основним фактором, який визначає властивості сплавів системи залізо – цементит є структура.

## **ЛЕКЦІЯ №7. ЧАВУНИ. ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗО – ВУГЛЕЦЬ. БУДОВА, ВЛАСТИВОСТІ, КЛАСІФІКАЦІЯ ТА МАРКУВАННЯ ЧАВУНІВ**

1. Класифікація чавунів
2. Діаграма стану залізо – графіт.
3. Процес графітизації.
4. Будова, властивості, класифікація та маркування сірих чавунів
5. Влив складу чавуна на процес графітизації.
6. Влив графіту на механічні властивості виливків.
7. Позитивний бік наявності графіту.
8. Сірий чавун.
9. Високоміцний чавун з кулястим графітом.
10. Ковкий чавун
11. Вибілені та інші чавуни

### **Конспект лекції**

#### *Класифікація чавунів*

Чавуном називають сплав заліза з вуглецем при вмісті останнього більше 2,14%. До складу чавуну входять також постійні домішки – марганець (до 1,0%), кремній (до 3,5%), сірка і фосфор (до 0,1% кожного).

Слід розрізнити чавуни доменні (чавуни первинної плавки) та конструкційні (чавуни вторинної плавки). Доменні чавуни виплавляються в доменних цехах металургійних заводів і використовуються переважно для подальшої переробки в сталь (переробні чавуни) і частково (ливарні чавуни) – як один із компонентів **шихти** для виготовлення конструкційних чавунів у ливарних цехах машинобудівних заводів (**шихта** – це суміш матеріалів у визначеній пропорції, що підлягає переробці в металургійних печах для отримання кінцевих продуктів із заданими властивостями).

В залежності від того, в якому стані знаходиться вуглець, чавуни поділяють на *білі* та *графітизовані*. В білих чавунах весь вуглець, не розчинений у залізі, знаходиться у зв'язаному стані у вигляді хімічної сполуки Fe<sub>3</sub>C – карбїду заліза (**цементиту**). Назву білий чавун отримав за виглядом зламу, який має матово-білий колір. Білий чавун надто твердий, крихкий,

практично не піддається обробці різальним інструментом і знаходить обмежене застосування (для виготовлення деталей, від яких потребують високу зносостійкість – прокатні валки, робочі тіла кульових млинів тощо). Процес утворення в чавуні цементиту називається **вибілом**.

На процес вибілу впливають такі чинники як хімічний склад і швидкість охолодження чавунних виливків. Так, вибілу сприяють такі елементи як марганець, а графітизації – вуглець і кремній. Чим швидше охолоджуються виливки, тим більша вірогідність утворення в їх структурі цементиту.

*Діаграма стану залізо – графіт.*

В результаті перетворення вуглець може не тільки хімічно взаємодіяти із залізом, але і виділятися в елементарному стані у формі графіту. Рідка фаза, аустеніт и ферит можуть знаходитися у рівновазі і з графітом.

Діаграма стану залізо – графіт показана штриховими лініями на рис. 7.1. Лінії діаграми знаходяться вище ліній діаграми залізо – цементит. Температури евтектичного та евтектоїдного перетворень, відповідно, 1153°C и 738°C. Точки С, Е, S – зсунуті вліво, і знаходяться при концентрації вуглецю 4,24; 2,11 и 0,7 %, відповідно.

При високих температурах цементит розпадається з виділенням графіту, тому діаграма стану залізо – цементит є метастабільною, а діаграма залізо – графіт – стабільною. Процес утворення графіту у сплавах заліза з вуглецем називається графітизацією.

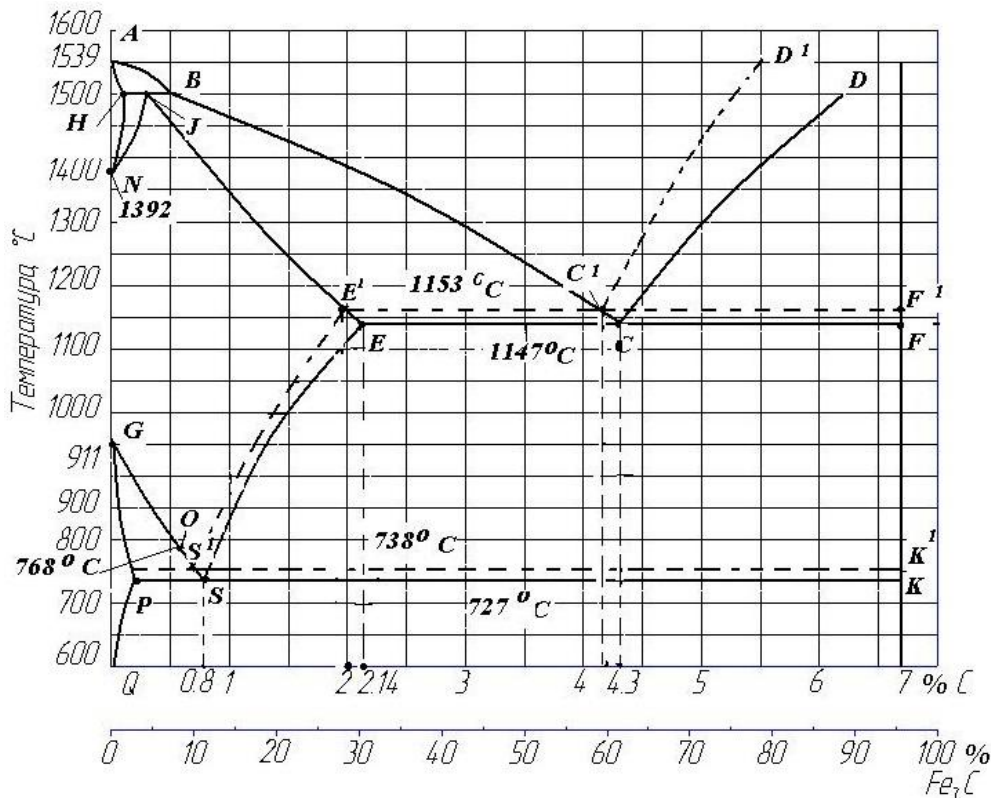


Рисунок 7.1. Діаграма стану залізо – графіт: суцільні лінії – цементитна система; пунктирна – графітні

*Процес графітизації.*

Графіт – це поліморфна модифікація вуглецю. Так як графіт містить 100% вуглецю, а цементит – 6,67 %, то рідка фаза і аустеніт за вмістом найбільш наближений до цементиту, ніж до графіту. Таким чином, утворення цементиту з рідкої фази та аустеніту повинно протікати легше, ніж графіту.

З іншого боку, при нагріві цементит розкладається на залізо та вуглець. То б то, графіт є більш стабільною фазою, ніж цементит.

Можливі два шляхи утворення графіту у чавуні. У найкращих умовах (наявність у рідкій фазі готових центрів кристалізації графіту та дуже повільному охолодженні) відбувається безпосереднє утворення графіту із рідкої фази.

При розпаді раніше створеного цементиту. При температурах вищих за 738°C цементит розпадається на суміш аустеніту і графіту за схемою:



При температурах нижчих за 738°C розпад цементиту відбувається за схемою:



При малих швидкостях охолодження ступень розпаду цементиту більша.

Графітизацію із рідкої фази, а також від розпаду цементиту первинного та цементиту, який входить до складу евтектики, називають первинною стадією графітизації.

Виділення вторинного графіту із аустеніту називають проміжною стадією графітизації.

Утворення евтектоїдного графіту, а також графіту, який створився в результаті цементиту, що входить до складу перліту, називають вторинною стадією графітизації. Структура чавунів залежить від ступеня графітизації, тобто від того, скільки вуглецю знаходиться у зв'язаному стані.

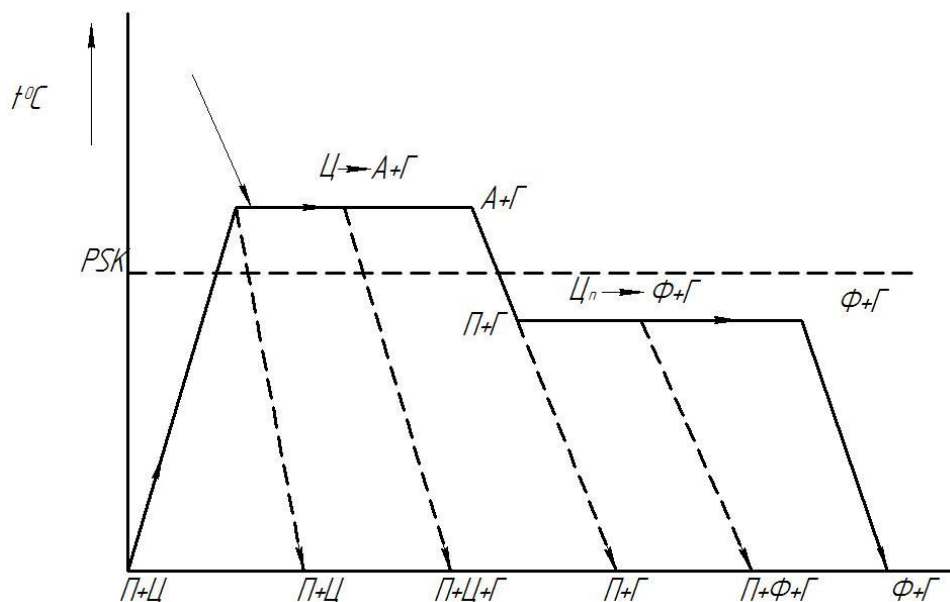


Рисунок 7.2. Схема утворення структур при графітизації

Витримка при температурі більшу за 738°C призводить до графітизації надлишкового нерозчиненого цементиту. Якщо процес завершити повністю, то при високій температурі структура буде складатися із аустеніту та графіту, а після охолодження – із перліту і графіту.

При незавершеності процесу первинної графітизації, вище температури 738°C структура складається із аустеніту, графіту та цементиту, а нижче цієї температури – із перліту, графіту та цементиту.

При переході через критичну точку перетворення аустеніту в перліт, та витримки при температурі нижче критичної призведе до розпаду цементиту, який входе до складу перліту (вторинна графітизація). Якщо процес завершено повністю, то структура складається із фериту і графіту, при незавершеності процесу – із перліту, фериту та графіту.

При розгляді структур чавунів можна зробити висновок, що їх металева основа схожа на структуру евтектоїдної або доевтектоїдної сталі або технічного заліза. Відрізняється від сталі лише наявністю графітових включень, які визначають спеціальні властивості чавунів.

Залежно від форми графітних включень у графітизованих чавунах, які поділяються на **сірий, ковкий, високоміцний** та чавун із **вермикулярним графітом**.

Структура чавуну складається з металевої основи та графіту. Графітні включення в металевій основі з огляду на те, що графіт має дуже низькі



механічні властивості порівняно з металевою основою, можна розглядати як порожнечі, тріщини. Природно, що чим більший об'єм займають ці порожнечі, тобто чим більше в чавуні вуглецю, тим нижчі механічні властивості чавуну. При однаковому об'ємі порожнечі властивості чавуну будуть залежати також від площі їхньої поверхні, тобто від форми. Включення пластинчатої форми мають найбільш розгалужену поверхню і тому найбільше знижують механічні властивості. З округленням графітних включень їхній негативний вплив зменшується й стає найменшим у випадку включень кулястої форми.

Схеми мікроструктур чавуна в залежності від металічної основи та форми графітових включень представлені на рис. 7.3

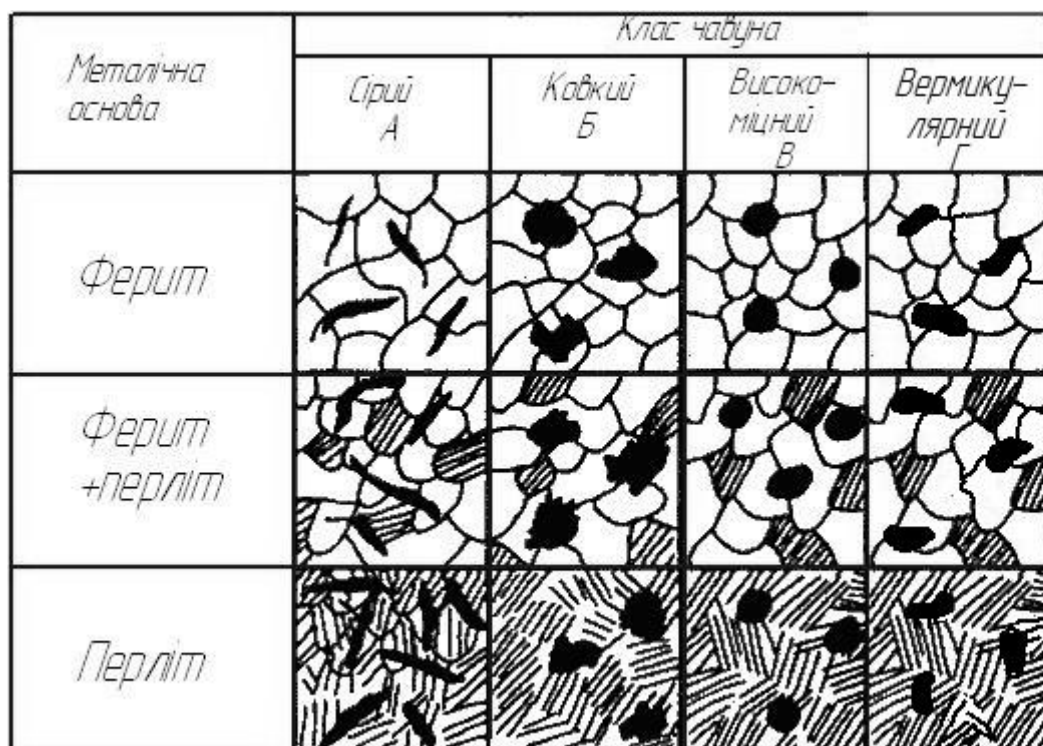


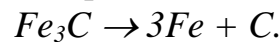
Рисунок 7.3. Схеми мікроструктур чавуну в залежності від металічної основи та форми графітних включень

Найбільше розповсюдження отримали чавуни із вмістом вуглецю 2,4...3,8%. Чим вищий вміст вуглецю, тем більше утворюється графіту і тим нижчі його механічні властивості, відповідно, кількість вуглецю не повинно перебільшувати 3,8 %. В той же час для забезпечення високих ливарних властивостей (доброї рідкотекучості) вуглецю повинно бути не менше 2,4 %.

У промисловості застосовуються чавуни, в яких весь вуглець (або його більша частина) знаходиться у вигляді графіту, що забезпечує зниження твердості, підвищення оброблюваності різанням, високі ливарні і антифрикційні властивості. Такий чавун називається графітованим. Чавун, в

якому частина вуглецю знаходиться у вигляді цементиту  $Fe_3C$ , а частина – у вигляді графіту, називається **половинчастим**.

Якщо чавун, в якому вуглець знаходиться у вигляді цементиту (білий або половинчастий) зазнає тривалого впливу високої температури, то в ньому відбудеться процес графітизації, тобто розпад цементиту на вуглець і залізо:



Така термічна обробка білого або половинчастого чавуну називається **відпалюванням**

*Вплив складу чавуну на процес графітизації.*

Вуглець і кремній сприяють графітизації, марганець ускладнює графітизацію та сприяє вибілу чавуну. Сірка сприяє вибілу чавуну та погіршує ливарні властивості, її вміст обмежено – 0,08...0,12 %. Фосфор на процес графітизації не впливає, але покращує рідкотекучість, Фосфор являється у чавунах корисним домішком, його вміст – 0,3...0,8 %.

*Вплив графіту на механічні властивості виливків.*

Графітові включення можна розглядати як відповідної форми порожнини в структурі чавуна. Біля таких дефектів при навантаженні концентруються напруження, значення яких тем більше, чим гостріший дефект. Звідси випливає, що графітові включення пластинчастої форми в максимальній мірі знеміцнюють метал. Більш сприятлива пластівчаста форма, а оптимальною є куляста форма графіту. Пластичність залежить від форми таким же чином. Відносне видовження ( $\delta$  %) для сірих чавунів складає 0,5 %, для ковких – до 10 %, для високоміцних – до 15%.

Наявність графіту найбільш різко знижує опір при жорстких способах навантаження: удар; розрив. Опір стисканню понижується мало.

Позитивний бік наявності графіту:

- графіт поліпшує оброблюваність різанням, так як утворюється ламка стружка;
- чавун має кращі антифрикційні властивості, у порівнянні зі сталлю, так як наявність графіту забезпечує додаткове змащення поверхонь тертя;
- із-за мікропорожнин, які заповнені графітом, чавун добре гасить вібрації та резонансні коливання, має підвищену циклічну в'язкість;
- чавун майже нечутливий до дефектів поверхні, надрізів тощо (виточки, отвори, переходи у перетинах);
- чавун значно дешевше сталі;
- чавун має добрі ливарні властивості, особливо рідкотекучість, тобто заповнюваність ливарної форми;
- виробництво виробів із чавуна литтям дешевше виготовлення виробів із сталевих заготовок оброблюваних різанням, а також литтям та обробкою тиском з наступною механічною обробкою.

В багатьох випадках, завдяки графіту, чавун має переваги перед сталлю.

*Будова, властивості, класифікація та маркування сірих чавунів*

**Сірий чавун** (ГОСТ1412-85). Сірим називається чавун, в якому графіт має форму дещо вигнутих пластин різної довжини та товщини в залежності від марки чавуну (рис.7.4).

Сірий чавун – складний сплав, хімічний склад якого коливається в таких межах: 3,2...3,8% C; 1,0...3,5% Si; 0,5...0,8% Mn; 0,2...0,4% P; до 0,12% S. Сірий чавун поділяється на марки : СЧ10; СЧ15; СЧ20; СЧ25; СЧ30; СЧ35; СЧ40; СЧ45 (С – сірий, Ч – чавун, цифри показують міцність чавуну в  $кг/мм^2$ ).



Рисунок 7.4 - Форма графіту у сірому чавуні

Структура не впливає на пластичність, вона залишається надзвичайно низькою. Але впливає на твердість. Механічна міцність в основному визначається кількістю, формою та розмірами включень графіту. Дрібні, завихреної форми чешуї графіту менш знижують міцність. Така форма досягається шляхом модифікування. В якості модифікаторів використовують алюміній, селікокальцій, феросиліцій.

Сірий чавун широко використовується в машинобудуванні, так як легко оброблюється та володіє гарними властивостями.

Залежно від міцності сірого чавуну існує 10 марок (ГОСТ 1412).

Сірі чавуни при малому опорі на розтяг мають достатньо високий опір на стискання.

Сірі чавуни містять вуглецю – 3,2...3,5 %; кремнію – 1,9...2,5 %; марганцю – 0,5...0,8 %; фосфору – 0,1...0,3 %; сірки – < 0,12 %.

Структура металічної основи залежить від кількості вуглецю та кремнію. Із збільшенням вмісту вуглецю та кремнію збільшується ступень графітизації та схильність до утворення феритної структури металічної основи. Це призводить до знеміцнення чавуну без підвищення пластичності. Кращими міцністю та зносостійкістю володіють перлітні сірі чавуни.

Твердість сірого чавуну коливається від НВ129 до НВ269 в залежності від марки. Пластичність сірого чавуну мізерно мала (відносне видовження  $\delta$  не перевищує 0,5%), тому він може застосовуватись для виготовлення деталей, які не зазнають навантажень на розтяг і удар.

У верстатобудуванні це базові корпусні деталі, станини верстатів, кронштейни, зубчасті колеса, напрямні; в автобудуванні - блоки циліндрів, поршневі кільця, розподільчі вали, диски зчеплення, корпуси редукторів, насосів, стійки, кришки, маховики, гільзи та поршні циліндрів, циліндри парових машин і компресорів, гальмівні барабани тощо.

Виливки із сірого чавуну також використовуються в електромашинобудуванні, для виготовлення товарів народного споживання.

*Високоміцний чавун із графітом кулястої форми.*

**Високоміцний чавун** (ДСТУ 3925-99). Високоміцним називається чавун, в якому графітні включення мають кулясту форму (рис. 7.5). Така форма графіту утворюється при обробці рідкого чавуну невеликими дозами таких елементів як магній, церій, кальцій, ітрій. Ці елементи називаються **модифікаторами**. Вони, практично, не змінюють хімічний склад сплавів, зате суттєво впливають на їхню структуру, змінюючи форму графітних включень, розмір зерен, їх розташування тощо. Як модифікатор для виготовлення чавуну з кулястим графітом найчастіше всього використовується магній – найбільш ефективний і дешевий елемент. Остаточний вміст магнію для отримання кулястого графіту становить 0,04...0,06%. За вмістом решти елементів високоміцний чавун не відрізняється від сірого, за винятком сірки, якої у високоміцному чавуні 0,01...0,03%. Таке зменшення вмісту сірки відбувається завдяки тому, що магній при обробці рідкого чавуну активно реагує із сіркою з утворенням нерозчинних у чавуні сульфідів магнію  $Mg_2S$ , переходять у шлак і видаляються разом з ним.

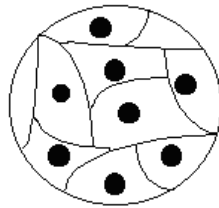


Рисунок 7.5 – Форма графіту у високоміцному чавуні

Високоміцний чавун поділяється на марки: ВЧ 350-22; ВЧ 400-15; ВЧ 420-12; ВЧ 450-10; ВЧ 450-5; ВЧ 500-7; ВЧ 600-7; ВЧ 700-2; ВЧ 800-2; ВЧ 900-2; ВЧ 1000-2 (В – високоміцний, Ч – чавун, перше число вказує межу міцності на розтяг в  $МПа$ , друге число через дефіс – значення межі відносного видовження у відсотках).

Високоміцні чавуни можуть мати феритну (ВЧ 350), ферито-перлітну (ВЧ450) та перлітну (ВЧ 800) металеву основу. Отримують ці чавуни із сірих, в результаті модифікування магнієм або церієм (додається 0,03...0,07% від маси вилівка). У порівнянні з сірими чавунами, механічні властивості підвищуються, це визвано відсутністю нерівномірності у розподіленні напружень внаслідок кулястої форми графіту.

Чавуни з перлітною металічною основою мають високі показники міцності при найменшому значенні пластичності. Співвідношення пластичності та міцності феритних чавунів - зворотне.

Високоміцні чавуни володіють високою межею текучості,  
 $\sigma_{ж} = 300...420 МПа$ ,

що значно вище межі текучості сталевих виливків. Також характерна достатньо висока ударна в'язкість та втомлена міцність,

$\sigma_{-1} = 230...250 \text{ МПа}$ , при перлітній основі.

Високоміцні чавуни містять: вуглецю – 3,2...3,8 %, кремнію – 1,9...2,6 %, марганцю – 0,6...0,8 %, фосфору – до 0,12 %, сірки – до 0,3 %.

Ці чавуни володіють високою рідкотекучістю, лінійна усадка – близько 1%. Ливарні напруження у виливках дещо вище, ніж для сірого чавуну. Внаслідок високого модулю пружності достатньо висока оброблюваність різанням. Володіють задовільним зварюванням.

Високоміцний чавун використовується для виготовлення середньо – та важко навантажених деталей відповідального призначення: прокатного, ковальсько-пресового обладнання, корпусів парових турбін, колінчастих валів для автомобілів, тракторів та комбайнів, поршнів, кронштейнів та інших деталей.

Із високоміцного чавуна виготовляють тонкостінні виливки (поршневі кільця), шаботи ковальських молотів, станіни та рами пресів и прокатних станів, різцетримачі, планшайби.

Виливки колінчастих валів масою до 2..3 т, замість кованих валів із сталі, володіють більш високою циклічною в'язкістю, малочутливі до зовнішніх концентраторів напружень, володіють кращими антифрикційними властивостями та значно дешевше.

**Чавун із вермикулярним графітом.** Високоміцний чавун із кулястим графітом поряд із його позитивними якостями (високі механічні та експлуатаційні характеристики) має і суттєві недоліки (підвищену об'ємну усадку, понижену теплопровідність, схильність до вибілювання). В чавуні з **вермикулярним графітом** ці недоліки відсутні. В ньому поєднуються високі механічні і ливарні властивості, висока теплопровідність, низька собівартість.



Рисунок 7. 6 – Вермикулярна форма графіту

Графіт в такому чавуні має вигляд коротких потовщених пластин з закругленими кінцями (рис.7.6), форма яких є перехідною між пластинчатим і кулястим графітом. Як конструкційний матеріал чавун із вермикулярним графітом є найбільш молодим типом чавуну. Перша технологія його виробництва була розроблена лише в 1966 році. Суть цієї технології полягає в тому, що рідкий чавун обробляється модифікаторами в кількості, недостатній для отримання цілковито кулястої форми графіту. У структурі чавуну

утворюється вермикулярний графіт і 20..30% кулястого. Наприклад, при обробці чавуну магнієвими модифікаторами остаточний вміст магнію для забезпечення вермикулярного графіту повинен бути біля 0,02%.

За ДСТУ 3326-99 "Чавун з вермикулярним графітом" цей чавун поділяється на марки: ЧВГ 300-4; ЧВГ 400-4; ЧВГ 500-1 (Ч – чавун, В – вермикулярний, Г – графіт, перше число вказує межу міцності на розтяг в МПа, друге число через дефіс – значення межі відносного видовження у відсотках).

Чавун з вермикулярним графітом є ефективним матеріалом для деталей машин, які зазнають досить високих статичних, ударних і циклічних навантажень, працюють в умовах тепломінів тощо. В автомобілебудуванні цей чавун застосовується для виготовлення головок блоків циліндрів, випускних колекторів, гальмівних дисків, колінчастих і розподільчих валів, блоків циліндрів, зубчастих коліс, корпусів турбокомпресорів тощо.

#### *Ковкий чавун*

**Ковкий чавун** (ГОСТ 1215-79). Ковким називається чавун, в якому графіт має пластівчасту (кляксоподібну) форму (рис. 7.7). Така форма графіту утворюється з білого чавуну внаслідок його тривалій витримці (відпалюванні) при температурі 950...1000°C. Назва "ковкий" не означає, що цей чавун можна кувати, або піддавати будь-якій іншій обробці тиском. Це суто ливарний матеріал а назва свідчить тільки про його більшу пластичність порівняно із сірим чавуном. Розрізняють 7 марок ковкого чавуну: три з феритною (КЧ 30 – 6) та чотири з перлітною (КЧ 65 – 3) основою (ГОСТ 1215).

Ковкий чавун поділяється на марки: КЧ30-6; КЧ33-8; КЧ35-10; КЧ37-12; КЧ45-6; КЧ50-4; КЧ56-4; КЧ60-3; КЧ63-2 (К – ковкий, Ч – чавун, перші дві цифри показують міцність у  $кг/мм^2$ , другі – відносне видовження в процентах).

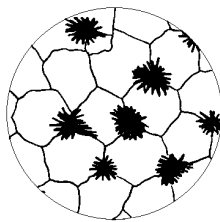


Рисунок 7. 7 - Форма графіту в ковкому чавуні

Отримують відпалом білого доевтектичного чавуну.

Добрі властивості у виливка забезпечуються, якщо у процесі кристалізації та охолодження виливка у формі не відбувається процесу графітизації. Аби попередити графітизацію, чавуни повинні мати понижений вміст вуглецю та кремнію.

Хімічний склад ковкого чавуну знаходиться в межах: 2,4...2,8%С; 0,8...1,4% Si; 0,3...1,0% Mn; 0,08...0,1% S; до 0,2% P. Понижені значення вмісту вуглецю та кремнію і підвищений марганцю потрібні для того, щоб у виливках

була структура білого чавуну. З цією ж метою товщина стінок виливків не повинна перевищувати 40...50 мм. При більших розмірах в стінках можливе утворення пластинчатого графіту і чавун стає непридатним для відпалювання.

Формування кінцевої структури та властивостей виливків відбувається у процесі відпалу, схема якого наведена на рис. 7.8.

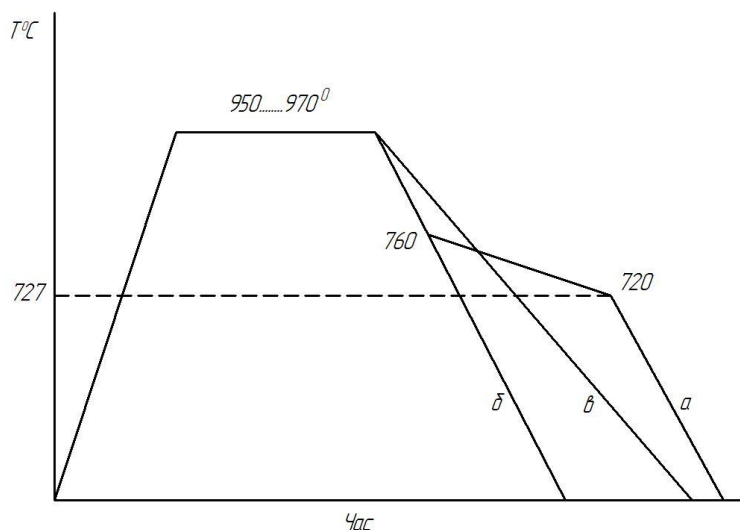
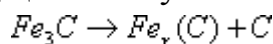


Рисунок 7.8. Відпал ковкого чавуну.

Виливки витримуються у печі при температурі 950...1000°C на протязі 15...20годин. Відбувається розпад цементиту: .



Структура після витримки складається з аустеніту та графіту (вуглець відпалу). При повільному охолодженні у інтервалі 760...720°C, відбувається розпад цементиту, який входить до складу перліту, і структура після відпалу складається з фериту та вуглецю відпалу (утворюється феритний ковкий чавун).

При відносно швидкому охолодженні (режим б, рис. 11.8) друга стадія повністю видаляється, і утворюється перлітний ковкий чавун.

Структура чавуна, відпаленого за режимом в, складається з перліту, фериту та графіту відпалу (утворюється ферито-перлітний ковкий чавун)

Відпал є довготривалим 70...80 годин та дорогавартісною операцією. Останнім часом, у результаті вдосконалень, час відпалу скоротився до 40 годин

За механічними та технологічними властивостями ковкий чавун займає проміжне положення між сірим чавуном і сталлю. Недоліком ковкого чавуну, у порівнянні з високоміцним, є обмеження товщини стінок для виливка та необхідність відпалу.

Ковкі чавуни знайшли широке застосування в сільськогосподарському, автомобільному, текстильному машинобудуванні. З нього виготовляють деталі високої міцності, що працюють у важких умовах зношування, здатні сприймати ударні та змінні за напрямом навантаження.

З феритних чавунів виготовляють картери редукторів, маточини, гаки, скоби, хомутики, муфти, фланці маточини коліс.

З перлітних чавунів, які характеризуються високою міцністю, достатньою пластичністю, виготовляють вилки карданних валів, ланцюги та ролики конвеєра, гальмівні колодки тощо.

Добрі ливарні властивості вихідного білого чавуну дають можливість виготовляти виливки складної форми. Виливки з ковкого чавуна використовують для деталей, які працюють при ударних та вібраційних навантаженнях.

#### *Вибілені та інші чавуни*

Вибілені – виливки, поверхні яких складаються з білого чавуна, а всередині сірих або високоміцний чавун.

Чавун містить 2,8...3,6 % вуглецю, і понижений вміст кремнію –0,5...0,8 %.

Має високу поверхневу твердість (950...1000 НВ) і дуже високу зносостійкість. Використовується для виготовлення прокатних валків, вагонних коліс з вибіленим ободом, кулі для шарових млинів.

Для виготовлення деталей, які працюють в умовах абразивного зносу, використовують білі чавуни, леговані хромом, хромом та марганцем, хромом і нікелем. Виливки з такого чавуну вирізняються високою твердістю та зносостійкістю.

#### *Чавуни зі спеціальними властивостями.*

Для деталей, які працюють в умовах зношування при високих температурах, використовують високохромісті і хромонікелеві чавуни. Жаростійкість досягається легуванням чавунів кремнієм (5...6 %) та алюмінієм (1...2 %). Корозійна стійкість збільшується легуванням хромом, нікелем, кремнієм.

Використовують їх у випадку, коли виливок, окрім міцності, має забезпечити певний рівень специфічних властивостей, наприклад, хімічну або корозійну стійкість, зносостійкість, жаростійкість тощо. Так аустенітний чавун має високі показники хімічної стійкості у кислотах та лугах, а також жароміцні. Приклади таких чавунів – нерезіт (містить додатково 14% Ni , 2 % Cr, 7 % Cu), нікросілал (містить 5 %Si, 18 % Ni/, 2 % Cr та інші). Жаростійкий чавун – чугаль містить 20 – 25 % алюмінію. З них виготовляють, наприклад, котли для розплавлення каустичної соди. Корозійна стійкість зростає при зменшенні розмірів графітних вкраплень. У марках цих чавунів записують літери СЦЩ (Щ – стійкість у середовищі лугів) і через дефіс номер сплаву, наприклад СЧЩ-1, СЧЩ-2.

Магнітний чавун (феритний з кулястим графітом) використовують для виготовлення корпусів електричних машин, щитів , рам тощо.

Немагнітні чавуни – нікільмарганцевий (містить 7...10 % Mn , 7...9 % Ni) або марганцевомідний (містить 9,8 % Mn і 1,2...2,0 % Cu ) – використовують для виготовлення кожухів і бандажів електричних машин.

ГОСТ 1585 – 85 регламентує склад і властивості антифрикційних сірих АСЧ, антифрикційних ковких АЧК та високоміцних АЧВ чавунів.



Жаростійкі чавуни позначають літерами «ЖЧ» , а також літери С. Х або Ю з числами через дефіс, які показують вміст кремнію, хрому і алюмінію у відсотках, наприклад ЖЧХ-0,8; ЖЧХ-30, а також літеру «Ш» в кінці марки для кулястої форми графіту.

Для чавунів можна застосовувати термічну обробку.

## Лекція 8

### КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ. ОСОБЛИВОСТІ ДЕФОРМАЦІЇ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ТІЛ. НАКЛЕП, ВІДНОВА ТА РЕКРИСТАЛІЗАЦІЯ

#### План лекції

1. Конструкційна міцність матеріалів.
2. Особливості деформації полікристалічних тіл.
3. Вплив пластичної деформації на структуру та властивості металу: наклеп.
4. Вплив нагріву на структуру та властивості деформованого металу: віднова та рекристалізація.

#### Конспект лекції

*Конструкційна міцність матеріалів.*

В результаті досліджень отримують характеристики:

- силові (межу пропорційності, межу пружності, межу текучості, межу міцності, межу витривалості);
- деформаційні (відносне видовження -  $\delta$ , відносне звуження -  $\psi$ );
- енергетичні (ударна в'язкість - КСУ).

Усі вони характеризують загальну міцність матеріалу незалежно від призначення, конструкції та умови експлуатації. Висока якість деталі може бути досягнута лише при врахуванні усіх особливостей, які мають місце в процесі роботи деталі, і які визначають її конструкційну міцність.

Конструкційна міцність – комплекс властивостей на міцність, які знаходяться у найбільшій кореляції із службовими властивостями даного

виробу, забезпечують довготривалу та надійну роботу матеріалу в умовах експлуатації.

На конструкційну міцність впливають наступні фактори:

- конструкційні особливості деталі (форма та розміри);
- механізми різних видів руйнування деталі;
- стан матеріалу у поверхневому шарі деталі;
- процеси, що відбуваються у поверхневому шарі деталі та призводять до відказу у роботі.

Необхідною умовою створення якісних конструкцій при економному використанні матеріалу є врахування додаткових критеріїв, які впливають на конструкційну міцність. Такими критеріями є надійність та довготривалість.

*Надійність* – властивість виробу, виконувати задані функції, зберігаючи експлуатаційні показники у заданих межах на протязі необхідного часу або опір матеріалу крихкому руйнуванню.

Розвиток крихкого руйнування відбувається при низьких температурах, при наявності тріщин, при підвищених залишкових напруженнях, а також при розвитку процесів втоми та корозії.

Критеріями, що визначають надійність, є температурні пороги холодноламкості, опір розповсюдженню тріщин, ударна в'язкість, характеристики пластичності, витривалість.

*Витривалість* – здатність металу протистояти втомному руйнуванню.

Витривалість визначається втомою металу, процесами зносу, корозії та іншими, які визивають повільне руйнування, але не допускають аварійних наслідків, то б то умовами роботи.

Критеріями, що визначають витривалість, є втомлена міцність, зносостійкість, опір корозії, контактна міцність.

Загальними принципами вибору критеріїв для оцінки конструкційної міцності являються:

- аналогія - вид напруженого стану на зразках, що випробовуються, та виробках;
- аналогія - умова випробувань зразків та умова експлуатації (температура, середовище, порядок навантаження);
- аналогія - характер руйнування та вид злому у зразка та виробу.

*Особливості деформації полікристалічних тіл.*

Розглянемо холодну пластичну деформацію полікристалу. Пластична деформація металів та сплавів як тіл полікристалічних, має деякі особливості у порівнянні з пластичною деформацією монокристалу.

Деформація полікристалічного тілу складається із деформації окремих зерен та деформації у приграничних об'ємах. Окремі зерна деформуються ковзанням та двійникуванням, але взаємний зв'язок зерен та їх багаточисельність у полікристалі вносять свої особливості у механізм деформації.

Площини ковзання зерен вільно орієнтовані у просторі, тому під впливом зовнішніх сил, напруження у площинах ковзання окремих зерен будуть

різними. Деформація починається в окремих зернах, у площинах ковзання, де виникають максимальні дотичні напруження. Сусідні зерна будуть розвертатися та мало-помалу залучатися у процес деформації. Деформація призводить до зміни форми зерен: зерна отримують витягнуту форму в напрямленні найбільш інтенсивного плину металу (повертаються осями найбільшої міцності вздовж напрямлення деформації). Зміна структури при деформації показана на рис. 8.1.

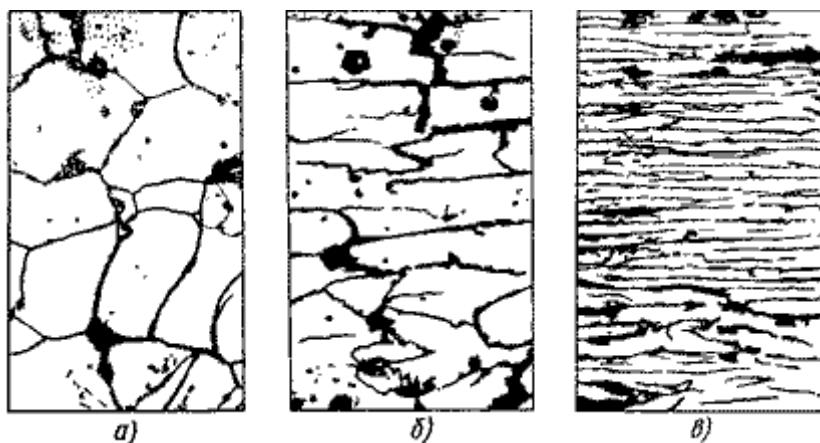


Рисунок 8.1. Зміна структури при деформації: а) до деформації; б) після обтискання на 35%; в) після обтискання на 90%.

Метал набуває волокнисту будову. Волокна з витягнутими вздовж них неметалевими включеннями є причиною неоднакових властивостей вздовж та поперек волокон. Одночасно зі зміною форми зерен у процесі пластичної деформації відбувається зміна орієнтації у просторі їх кристалічної ґратки.

Коли кристалічні ґратки більшості зерен однаково орієнтовані, виникає текстура деформації.

*Вплив пластичної деформації на структуру та властивості металу: наклеп*

Текстура деформації створює кристалічну анізотропію, при якій найбільша різниця властивостей проявляється для напрямлень, розташованих під кутом  $45^\circ$  один до одного. Із збільшенням ступеня деформації характеристики пластичності (відносне видовження  $\delta$ , відносне звуження  $\psi$ ) та в'язкості (ударна в'язкість КСУ) зменшуються, а міцності характеристики (межа пружності, межа текучості, межа міцності) та твердість збільшуються (рис. 8.2). Також підвищується електроопір, знижується опір корозії, теплопровідність, магнітна проникність.

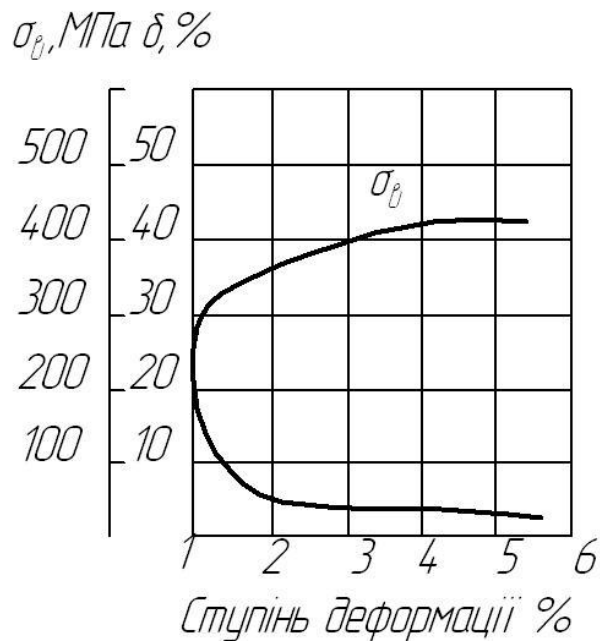


Рисунок 8.2. Вплив холодної пластичної деформації на механічні властивості металу

Сукупність явищ, пов'язаних зі зміною механічних, фізичних та інших властивостей металів у процесі пластичної деформації називають *деформаційним зміцненням або наклепом*.

Зміцнення при наклепі пояснюється зростанням на декілька порядків щільності дислокацій:

$$\rho = 10^6 \dots 10^8 \rightarrow 10^{11} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$$

Їх вільне переміщення ускладнюється взаємним впливом, також гальмуванням дислокацій у зв'язку із подрібненням блоків та зерен.

*Вплив нагріву на структуру та властивості деформованого металу: віднова та рекристалізація*

Деформований метал знаходиться у не рівноважному стані. Перехід до рівноважного стану пов'язаний зі зменшенням спотворення у кристалічній ґратці, зняттям напружень, що визначають можливість переміщення атомів.

При низьких температурах рухливість атомів невеличка, тому стан наклепу може зберігатися необмежено довго.

При підвищенні температури металу у процесі нагріву після пластичної деформації дифузія атомів збільшується і починають діяти процеси знеміцнення, які призводять метал до більш рівноважного стану – віднова та рекристалізація.

*Відновою* (відновленням) – називається всі зміни структури та властивостей деформованого металу, які не супроводжуються зміною форми та розмірів зерен. Невеликий нагрів визиває прискорення руху атомів, зниженню щільності дислокацій, знешкодженню внутрішніх напружень та відновленню кристалічної ґратки.

Процес часткового знеміцнення та відновлення властивостей називається *відпочинком* (перша стадія відновлення). Має місце при температурі:

$$T = (0,2) T_{\text{п}},$$

де  $T_{\text{п}}$  - термодинамічна температура плавлення металу

Відпочинок, при нагріванні деформованого металу спостерігається завжди. Він зменшує викривлення кристалічної ґратки, але не впливає на розміри та форму зерен і не перешкоджає утворенню текстури деформації.

Перегрупування дислокацій під час відпочинку не призводить до утворення нових мало кутових границь.

*Полігонізація* – процес поділення зерен на частини: фрагменти, полігони в результаті ковзання та переповзання дислокацій. Це є друга стадія віднови і полягає у нагріванні металу до температури  $(0,2...0,3) T_{\text{п}}$  з утворенням в межах окремого кристалу фрагментів і блоків (полігонів), розділених мало кутовими границями.

При температурах полігонізації можливе групування дислокацій однакових знаків біля стінки та поділ зерна малокутовими границями (рис. 8.3).

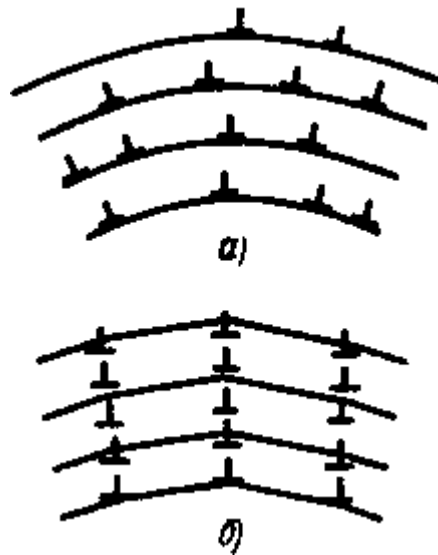


Рисунок 8.3. Схема полігонізації: а – хаотичне розташування крайових дислокацій у деформованому металі; б – дислокаційні стінки після полігонізації.

В полігонізованому стані кристал володіє меншою енергією, тому утворення полігонів — процес енергетично вигідний.

Процес протікає при невеликих ступенях пластичної деформації. В результаті понижується міцність на  $(10...15) \%$  та підвищується пластичність (рис.8.4). Границі полігонів мігрують у бік більшої об'ємної щільності дислокацій, приєднуються нові дислокації, завдяки чому кути разорієнтування зерен збільшуються (зерна аналогічні зернам, що утворюються при рекристалізації). Змін у мікроструктурі не спостерігається (рис.8.5 а). Температура початку полігонізації не є постійною. Швидкість процесу залежить від природи металу, вмісту домішок, ступеня передуючої деформації. Наприклад. Вона відсутня в міді та її сплавах, а в алюмінії, залізі, молібдені та

їх сплавах присутня завжди. Наслідком полігонізації є зменшення твердості, міцності. Після полігонізації рекристалізації не відбувається.

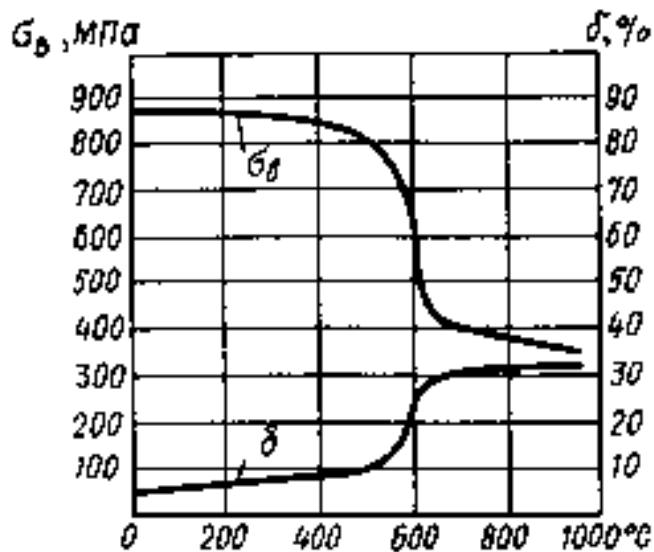


Рисунок 8.4. Вплив нагріву деформованого металу на механічні властивості

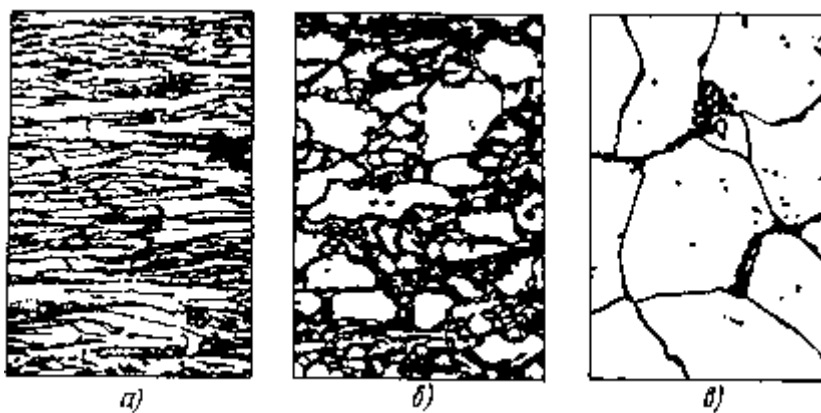


Рисунок 8.5. Зміна структури деформованого металу при нагріві

При нагріві до достатньо високих температур рухливість атомів зростає і відбувається рекристалізація.

*Рекристалізація* – процес зародження та росту нових недеформованих зерен при нагріві наклепаного металу до визначеної температури.

Нагрів металу до температур рекристалізації супроводжується різкою зміною мікроструктури та властивостей. Нагрів призводить до різкого зниження міцності при одночасному зростанні пластичності. Також понижується електроопір та підвищується теплопровідність.

*Перша стадія* – первинна рекристалізація (обробки) полягає в утворенні центрів кристалізації та зростанні нових рівноважних зерен із неспотвореною

кристалічною ґраткою. Нові зерна виникають біля границь старих зерен та блоків, де ґратка була найбільш спотворена. Кількість нових зерен повільно збільшується і у структурі не залишається старих деформованих зерен.

Рушійною силою первинної рекристалізації є енергія, яка акумулюється у наклепаному металі. Система намагається перейти у стійкий стан із спотвореної кристалічної ґратки. Перехід деформованих зерен у дрібні.

*Друга стадія* – збиральна рекристалізація яка полягає у рості створених нових зерен.

Рушійною силою є поверхнева енергія зерен. При дрібних зернах поверхня розділу велика, тому є великий запас поверхневої енергії. При збільшенні зерен загальна протяжність границь зменшується, і система переходить у більш рівноважний стан.

Температура початку рекристалізації пов'язана з температурою плавлення

$$T_{\text{рек}} = \alpha T_{\text{пл}},$$

- для металів  $\alpha = 0,4$ ;
- для твердих розчинів  $\alpha = 0,5 \dots 0,8$ ;
- для металів високої чистоти  $\alpha = 0,1 \dots 0,2$ .

На властивості металу найбільше впливає розмір зерен, які утворюються при рекристалізації. В результаті утворення значних зерен при нагріві до температури  $T_1$  починає понижуватися міцність і, особливо значно, пластичність металу.

Основними факторами, що визначають величину зерен металу при рекристалізації, являються температура, час витримки при нагріві та ступень попередньої деформації (рис. 8.6).

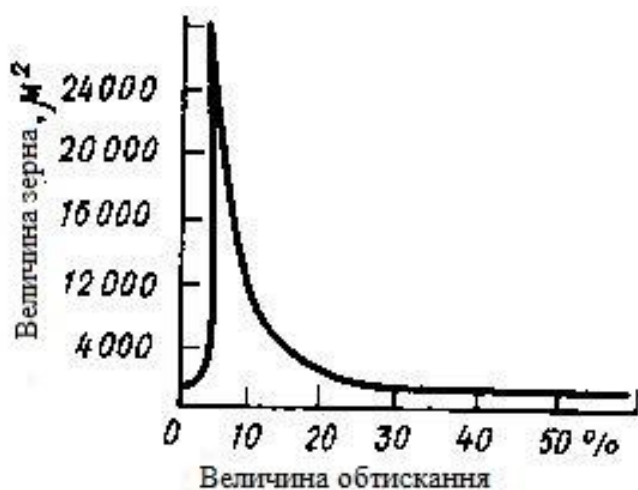


Рисунок 8.6. Вплив попереднього ступеня деформації металу на величину зерна після рекристалізації

З підвищенням температури відбувається збільшення зерен, із збільшенням часу витримки зерна також збільшуються. Рекристалізація

пластично деформованого металу можлива лише після певного ступеня деформації. Таку деформацію називають критичною. Найбільші зерна утворюються після незначної попередньої деформації 3...10 %, для алюмінію та його сплавів вона становить 2%, а для заліза та міді – 5%. І така деформація небажана перед проведенням рекристалізаційного відпалу.

Практично рекристалізаційний відпал проводять для маловуглецевих сталей при температурі 600...700°C, для латуні та бронз – 560...700°C, для алюмінієвих сплавів – 350...450°C, для титанових сплавів – 550...750°C.

Його застосовують для надання металові високої пластичності, перед холодною обробкою тиском, а також як кінцеву обробку після пластичної деформації.

## ЛЕКЦІЯ №9. СТАЛІ. КЛАСИФІКАЦІЯ ТА МАРКУВАННЯ СТАЛЕЙ

1. Вплив вуглецю та домішок на властивості сталей
2. Вплив вуглецю.
3. Вплив домішок.
4. Призначення легуючих елементів.
5. Розподіл легуючих елементів у сталі.

### Конспект лекції

#### *Класифікація сталей*

- Сталь вуглецева звичайної якості (ДСТУ 2651-94)
- Сталь вуглецева якісна конструкційна (ГОСТ 1050-88)
- Якісні та високоякісні леговані сталі
- Леговані конструкційні сталі
- Леговані інструментальні сталі
- Швидкоріжучі інструментальні сталі
- Шарикопідшипникові сталі

Найважливішими залізни сплавами, що застосовуються в сучасній техніці, є сплави заліза з вуглецем, вміст якого в сплаві визначає, практично, весь комплекс властивостей сплаву. Крім того, характерною особливістю залізвуглецевих сплавів є те, що різноманітною обробкою (термічною, механічною, термомеханічною тощо) можна змінювати їхню структуру, тобто розміри, форму і взаємне розташування кристалів різних фаз та їхнє



співвідношення. Варіюючи склад і структуру, отримують залізовуглецеві сплави з різноманітними властивостями, що робить їх універсальними матеріалами.

Технічні залізовуглецеві сплави, які застосовують у машинобудуванні, крім вуглецю вміщують ще і різні домішки. Одні з них (фосфор, сірка, марганець, кремній, кисень, азот, водень) є звичайними, що з'явилися в сплавах під час здійснення технологічних процесів при їхньому виготовленні, інші ж (хром, нікель, молібден, титан, ванадій, вольфрам, кобальт, мідь та ін.) називаються легуючими і вводяться в сплави спеціально для покращання властивостей.

Технічні залізовуглецеві сплави називаються **сталями й чавунами**.

**СТАЛЮ** називається сплав заліза з вуглецем, вміст якого в сплаві не перевищує 2.14%. За хімічним складом сталь поділяється на вуглецеву та леговану. Властивості вуглецевих сталей визначаються кількістю вуглецю та вмістом домішків, які взаємодіють із залізом та вуглецем.

**Вуглецева сталь** є найбільш розповсюдженою, її виплавка складає до 80% від загального об'єму виробництва. Сталь поділяється на три основні групи: 1) звичайної якості; 2) якісна загального призначення; 3) спеціалізована (інструментальна, котельна, мостова, суднобудівельна та ін.). Властивості вуглецевої сталі у значній мірі змінюються в залежності від вмісту вуглецю.

*Вплив вуглецю*

Вплив вуглецю на властивості сталей показано на рис. 10.1

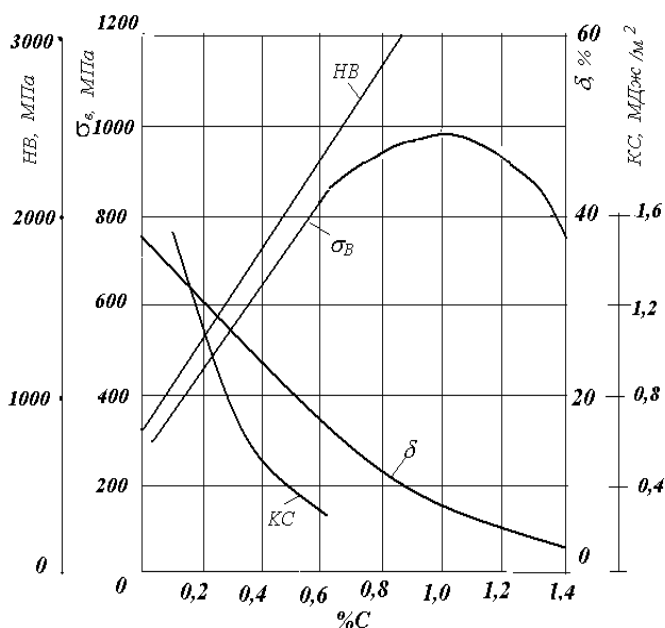


Рисунок - 10.1. Вплив вуглецю на властивості сталей

Вуглець у сталях перебуває в складі фериту й цементиту. Ферит має не високу міцність, малу твердість і добру пластичність, але зі збільшенням кількості вуглецю частка фериту у сталі поступово зменшується, а частка

високотвердого і малопластичного цементиту зростає. Зміна співвідношення між складовими призводить до зменшення пластичності, а також до підвищення міцності та твердості. Підвищення міцності спостерігається до вмісту вуглецю біля 1%, а після вона зменшується, так як утворюється груба сітка вторинного цементиту.

Вуглець впливає на в'язкість. Збільшення вмісту вуглецю підвищує поріг холодноламкості та зменшує ударну в'язкість КСУ і її пластичність  $\delta$ .

Підвищується електроопір та коерцитивна сила, понижується магнітна проникненість та щільність магнітної індукції.

Вуглець впливає і на технологічні властивості. Так, із збільшенням вмісту вуглецю підвищується твердість та міцність, покращуються ливарні властивості (підвищений вміст вуглецю погіршує ливарні властивості сталі - використовуються сталі з вмістом вуглецю до 0,4 %) та здатність до загартовування, знижуються пластичність, ударна в'язкість, погіршуються зварюваність, оброблюваність тиском та різанням. Слід враховувати, що сталі з низьким вмістом вуглецю також погано оброблюються різанням.

#### *Вплив домішок.*

У сталях завжди присутні домішки, які поділяються на чотири групи.

1. Постійні домішки: кремній, марганець, сірка, фосфор.

*Марганець та кремній* вводяться у процесі виплавки сталі для розкислення, вони являються технологічними домішками.

Вміст марганцю не перебільшує 0,5...0,8 %. Марганець підвищує міцність, не понижуючи пластичності, й різко знижує червоноламкість сталі, яка визивається впливом сірки. Він сприяє зменшенню вмісту сульфїду заліза FeS, так як утворює із сіркою з'єднання сульфїд марганцю MnS. Частинки сульфїду марганцю розташовуються у виді окремих включень, які деформуються та стають витягнутими вздовж направлення прокатування.

Вміст кремнію не перебільшує 0,35...0,4 %. Кремній, дегазує метал, підвищує щільність вилівка. Кремній розчинюється у фериті й підвищує міцність сталі, особливо підвищує межу текучості, . Але спостерігається де яке зниження пластичності, що знижує здатність сталі до витягання.

*Вміст фосфору* у сталі 0,025...0,045 %. Фосфор розчинюється у фериті, спотворює кристалічну ґратку та збільшує межу міцності і межу текучості , проте зменшує пластичність та в'язкість. Спад ударної в'язкості стає причиною холодноламкості, тобто схильність сталі до крихкого руйнування при низьких температурах.

Розташовуючись поблизу зерен, збільшує температуру переходу до крихкого стану, визиває холодноламкість, зменшує роботу з розповсюдження тріщин, Підвищення вмісту фосфору на кожную 0,01 % підвищує поріг холодноламкості на 20...25°C.

Фосфор схильний до ліквациї, тому у центрі зливка окремі ділянки мають різко понижену в'язкість.

Для деяких сталей можливе збільшення вмісту фосфору до 0,10...0,15 %, для поліпшення оброблюваності різанням.

*Вміст сірки* у сталях складає 0,025...0,06 %. Сірка – шкідливий домішок, який потрапляє у сталь із чавуна. При взаємодії із залізом утворює хімічне з'єднання – сульфід сірки FeS, яке, у свою чергу, утворює із залізом легкоплавку евтектику з температурою плавлення 988°C. При нагріві під прокатування або кування евтектика плавиться, порушуються зв'язки між зернами. При деформації у місцях розташування евтектики виникають надриви та тріщини, заготовка руйнується – явище червоноламкості.

Червоноламкість – підвищує крихкість при високих температурах.

Сірка знижує механічні властивості, особливо ударну в'язкість та пластичність ( KCU та  $\delta$  ), а також межу витривалості. Вона погіршує зварність і корозійну стійкість.

2. *Приховані домішки* - гази (азот, кисень, водень) – попадають у сталь при виплавленні.

Азот та кисень знаходяться у сталі у вигляді крихких неметалевих вкраплень: окислів (FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) нітридів (Fe<sub>2</sub>N), у вигляді твердого розчину  $\alpha$ -заліза або у газоподібному стані, розташовуються в мікропорожнечах. Домішки втілення (азот N, кисень O) підвищують поріг холодноламкості та знижують опір крихкому руйнуванню. Неметалічні включення (окисли, нітриди), є концентраторами напружень, можуть значно понизити межу витривалості та в'язкість.

Дуже шкідливим є розчинений у сталі водень, який сприяє тому що сталь стає крихкою. Він не утворює із залізом хімічних сполук і може протягом тривалого часу поступово виділятися зі сталі. Як наслідок - окремі властивості поліпшуються. Якщо водню багато, то він утворює в мікропорожнечах високий тиск, що призводить до виникнення внутрішніх тріщин – флокени і особливо в прокатаних заготовках та поковках.

Флокени – тонкі тріщини овальної або округлої форми, які мають на зломі вигляд п'ятен – пластівців сріблястого кольору.

Метал з флокенами не можна використовувати у промисловості, при зварюванні утворюються холодні тріщини у наплавленому та основному металі.

Якщо водень знаходиться у поверхневому шарі, то він видаляється в результаті нагріву до 150...180°C, краще у вакуумі мм рт. ст. Що більша міцність сталі, то флокени не безпечніші.

Для видалення прихованих домішок використовують вакуумування.

Шкідливий вплив газів можна зменшити, дегазуючи рідкий метал перед розливанням.

3. *Спеціальні домішки* – спеціально вводяться у сталь для отримання ладанних властивостей. Домішки називаються легуючими елементами, а сталі - леговані сталі.

*Призначення легуючих елементів.*

Основним легуючим елементом є *хром* (0,8...1,2)%. Він підвищує прогартованість, сприяє високій та рівномірній твердості сталі. Поріг холодноламкості хромистих сталей - (0...-100)°C.

Додаткові легуючі елементи.

*Бор* - 0.003%. Збільшує прогартованість, а також підвищує поріг холодноламкості (+20...-60 °С).

*Марганець* (манган) – збільшує прогартованість, але сприяє росту зерна, та підвищує поріг холодноламкості до (+40...-60)°С.

*Титан* (~0,1%) вводять для подрібнення зерна у хромомарганцевій сталі.

*Введення молібдену* (0,15...0,46%) у хромісті сталі збільшує прокалюваність, знижує поріг холодноламкості до –20...-120°С. Молібден збільшує статичну, динамічну та втомлену міцність сталі, ліквідує схильність до внутрішнього окислення. Крім того, молібден понижує схильність до відпускнуї крихкості сталей, які містять нікель.

*Ванадій* у об'ємі (0.1...0.3) % у хромістих сталях подрібнює зерно та підвищує міцність і в'язкість.

Введення у хромісті сталі нікелю, значно підвищує міцність та прокалюємість, понижує поріг холодноламкості, але при цьому підвищує схильність до відпускнуї крихкості (цій недолік компенсується введенням у сталь молібдену). Хромонікелеві сталі, володіють найкращим комплексом властивостей. В той же час нікель є дефіцитним, і використання таких сталей обмежено. Значна кількість нікелю можна замінити міддю, це не призводить до пониження в'язкості.

При легуванні хромомарганцевих сталей кремнієм отримують сталі – хромансіль (20ХГС, 30ХГСА). Сталі мають добре поєднання міцності та в'язкості, добре зварюються, штампуються і обробляються різанням. Кремній підвищує ударну в'язкість та температурний запас в'язкості.

Добавка свинцю, кальцію – поліпшує оброблюваність різанням. Використання зміцнювальної термічної обробки поліпшує комплекс механічних властивостей.

*Розподіл легуючих елементів у сталі.*

Легуючі елементи розчиняються у основних фазах залізовуглецевих сплавах (ферит, аустеніт, цементит), або створюють спеціальні карбіди.

Розчинення легуючих елементів в Fe- $\alpha$  відбувається в результаті заміщення атомів заліза атомами цих елементів. Ці атоми створюють у решітці напруження, які визивають зміну її періоду.

Зміна розмірів решітки визиває зміну властивостей фериту – міцність підвищується, пластичність зменшується. Хром, молібден та вольфрам зміцнюють менше, ніж нікель, кремній та марганець. Молібден та вольфрам, а також кремній и марганець у визначених кількостях, понижують в'язкість.

У сталях карбіди утворюються металами, які розташовані у таблиці Менделєєва лівіше заліза (хром, ванадій, титан), які мають менш добудовану d – електронну смугу.

У процесі карбідоутворення вуглець віддає свої валентні електрони на доповнення d – електронної смуги атома металу, тоді як у металі валентні електрони утворюють металевий зв'язок, який обумовлює металеві властивості карбідів.

При співвідношенні атомних радіусів вуглецю та металу більше 0,59 утворюються типові хімічні з'єднання:  $Fe_3C$ ,  $Mn_3C$ ,  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$ ,  $Fe_3W_3C$  – які мають складну кристалічну решітку и при нагріві розчиняються в аустеніті.

При співвідношенні атомних радіусів вуглецю та металу менше 0,59 утворюються фази втілення:  $Mo_2C$ ,  $WC$ ,  $VC$ ,  $TiC$ ,  $TaC$ ,  $W_2C$  – які мають просту кристалічну решітку та важко розчинюються в аустеніті.

Усі карбіди оволодіють високою твердістю и температурою плавлення.

4. Випадкові домішки.

### *Класифікація та маркування сталей*

#### Класифікація сталей

Сталі класифікуються за такими ознаками.

За хімічним складом: вуглецеві та леговані.

За вмістом вуглецю:

- низьковуглецеві, із вмістом вуглецю до 0,25 %;
- середньовуглецеві, із вмістом вуглецю 0,3...0,6 %;
- високовуглецеві, із вмістом вуглецю більше 0,7 %.

За рівновагою структури: доевтектоїдні, евтектоїдні, заевтектоїдні.

За якістю.

Кількісним показником якості є вміст шкідливих домішок: сірки та фосфору:

- $0,04 \leq S \leq 0,06\%$ ,  $0,04 \leq P \leq 0,08\%$  – вуглецеві сталі звичайної якості;
- $P, S \leq 0,03...0,04\%$  - якісні сталі;
- $P, S \leq 0,03\%$  - високоякісні сталі.

За способом виплавки:

- у мартенівських печах;
- у кисневих конверторах;
- у електричних печах: електродугових, індукційних та інш.

За призначенням:

- конструкційні – використовують для виготовлення деталей машин та механізмів;
- інструментальні – використовують для виготовлення різноманітних інструментів;
- спеціальні – сталі з особливими властивостями: електротехнічні, із особливими магнітними властивостями та інші.

**Сталь вуглецева звичайної якості (ДСТУ 2651-94)** - це широко вживана і недорога сталь, з якої випускається до 70% всього прокату, що використовується в машинобудуванні, будівництві, транспорті та інших галузях. Маркується така сталь літерами **Ст**, цифрою від 0 до 6 (порядковий

номер) та індексами сп, кп, або пс, що означає, відповідно, сталь *спокійна* (розкислена), сталь *кипляча* (не розкислена) та сталь *напівспокійна* (розкислена неповністю). *Розкислення* - це видалення зі сталі кисню. Сталі містять підвищену кількість сірки та фосфору.

Сталь звичайної якості в залежності від марки містить 0.06...0.49% С, 0.25...1.1% Mn, 0.05...0.35% Si, до 0.04% P та до 0.05% S.

Приклади марок сталі звичайної якості : **Ст1кп, Ст3сп, Ст5пс.**

Із збільшенням номера марки зростає міцність та знижується пластичність сталі. За гарантіями постачання існує три групи сталей: А, Б и В. Для сталей групи А постачання гарантує механічні властивості, при позначенні індекс групи А не вказується. Для сталей групи Б гарантується хімічний склад. Для сталей групи В постачання гарантує механічні властивості та хімічний склад.

Зі сталі звичайної якості виготовляють гарячекатаний сортовий, фасонний, листовий, штабовий прокат і холоднокатаний тонколистовий, а також труби, поковки, штаповки, стрічки, дріт, метизи та ін. Ці сталі широко використовуються у будівництві для зварних, клепаних та болтових конструкцій (корпуси суден, каркаси парових котлів, конструкції підйомних кранів та ін.).

**Сталь вуглецева якісна конструкційна** (ГОСТ 1050-88) за хімічним складом поділяється на марки від Сталь 05 до Сталь 85, де число показує вміст вуглецю в сотих долях процента (відповідно 0.05%, 0.85%). Числа в марках сталі кратні 5 (10, 15, 20...85). Поділяється на киплячу (кп), напівспокійну (пс) і спокійну (без індексу). В деяких марках якісної сталі в кінці стоїть літера Г, що означає вміст марганцю до 1% (наприклад, Сталь 65Г). Умовно якісна вуглецева конструкційна сталь поділяється на низьковуглецеву (Сталь 05...Сталь 20), середньовуглецеву (Сталь 25...Сталь 40) та високовуглецеву (Сталь 45 ... Сталь 85). Якісні сталі постачають з гарантованими механічними властивостями та хімічним вмістом (група В). Ступень розкислювання, в основному, спокійна.

Сталі якісні конструкційні відрізняються меншою масовою часткою сірки та фосфору ( $\leq 0.04\%$ ) обмеженим вмістом інших елементів, неметалевих включень.

*Низьковуглецеві* сталі використовуються для мало навантажених деталей – прокладки, шайби, кузови легкових автомобілів, елементів зварних конструкцій тощо (сталі 08, 08кп, 10), а також для деталей, що піддаються цементації (насиченню вуглецем) для підвищення твердості та зносостійкості (мало навантаженні шестерні, шпинделі, кулачкові валики, втулки та ін. (сталі 15, 20) та відповідальних зварних конструкцій.

*Середньовуглецеві* сталі 30, 35, 40 та високовуглецеві сталі 45, 50 після термічної обробки, поверхневого гартування використовують для різних деталей багатьох галузей машинобудування (розподільчі вали, фрикційні диски, шестерні, шатуни, шпинделі, вали).

Сталі 60...85, маючи високу міцність, твердість, пружність, використовуються для виготовлення деталей, які після відповідної термічної

обробки працюють в умовах тертя під дією високих вібраційних навантажень (пружини, ресори, прокатні валки тощо).

*Інструментальні якісні вуглецеві сталі* маркуються літерою У (вуглецева інструментальна сталь) та числом, яке вказує вміст вуглецю у десятих долях проценту. Сталь У8, сталь У13. Вміст вуглецю, відповідно, 0,8 % і 1,3 %

*Інструментальні високоякісні вуглецеві сталі.* Маркуються аналогічно якісним інструментальним вуглецевим сталям, лише в кінці марки ставлять літеру А, для позначення високої якості сталі. Сталь У10А.

*Якісні та високоякісні леговані сталі*

**Легованими** називаються сталі, до складу яких крім заліза, вуглецю та неминучих домішок, входять *легуючі елементи*, які надають сталям визначених фізико-хімічних, механічних, технологічних або експлуатаційних властивостей. В марках легованих сталей про присутність легуючих елементів свідчить наявність літер: Н - нікель (*Ni*), Х - хром (*Cr*), Г - марганець (*Mn*), С - кремній (*Si*), В - вольфрам (*W*), Ф - ванадій (*V*), М - молібден (*Mo*), Д - мідь (*Cu*), К - кобальт (*Co*), Б - ніобій (*Nb*), Т - титан (*Ti*), Ю - алюміній (*Al*), Р - бор (*B*), А - азот (*N*). Але, якщо літера А стоїть в кінці марки, то це свідчить про те, що сталь має більш низький вміст сірки й фосфору (до 0.03% кожного), тобто є високоякісною (сірка і фосфор є безумовно шкідливими елементами у залізобуглецевих сплавах). Сталі, в марках яких у кінці не стоїть літера А, можуть мати вміст сірки та фосфору до 0.05...0.06%. Цифри після літер вказують на приблизний вміст відповідного елемента в процентах, але якщо вміст елемента складає 1.0...1.5% і менше, то цифра не ставиться. Перші цифри в марці сталі показують вміст вуглецю в сотих частках процента (в інструментальній сталі - в десятих частках процента). В деяких випадках, наприклад, в інструментальних сталях, які містять вуглецю більше 1%, цифри, що визначають його вміст, відсутні. Так, наприклад, інструментальна сталь з 1.45...1.70% С, 11.0...12.5% Cr і 0.5...0.8% Mo позначається Х12М.

Леговані сталі зазвичай поділяються на конструкційні, інструментальні та сталі особливих властивостей (електротехнічні, нержавіючі, жароміцні, зносостійкі тощо).

Сталь 9ХС, сталь ХВГ – леговані інструментальні сталі. На початку марки вказують однозначну цифру, яка показує вміст вуглецю у десятих долях проценту. При вмісті вуглецю більш 1% цифра не вказується.

Приклад маркування легованих сталей: Сталь 08Х21Н6М2ТА містить (у середньому) 0.08% С, 21% Cr, 6% Ni, 2% Mo, 1% Ti, високоякісна.

В деяких випадках маркування сталей відступає від загальноприйнятого і літера вказує на призначення цих сталей. Так, літерою Р позначаються інструментальні швидкорізальні сталі (від англ. *rapid* - швидкий) - Р18 (18% W - вольфрам), вміст вуглецю більш 1%, Е - електротехнічні сталі - Е3А (3% Si), Ш - підшипникові сталі - ШХ15 (1.5% Cr), сталь ШХ6 (0,6% Cr). Вміст вуглецю більш 1%.

Легування здійснюється, як правило, шляхом сплавлення основного металу з легуючими елементами, які вводять у рідкий метал зазвичай у вигляді

*феросплавів*, тобто сплавів заліза з відповідними елементами (ферохрому, ферованадію тощо) або ж у вигляді чистих металів.

## **ЛЕКЦІЯ №10. ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ. ВИДИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛІВ**

### План лекції

1. Види термічної обробки металів.
2. Перетворення, що відбуваються в структурі сталі при нагріванні та охолодженні.
3. Механізм основних перетворень.
4. Перетворення перліту в аустеніт.
5. Перетворення аустеніту в перліт при повільному охолодженні.
6. Закономірності перетворення.
7. Проміжне перетворення.

### **Конспект лекції**

*Види термічної обробки металів.*

Властивості сплаву залежать від його структури. Основним способом, який дозволяє змінювати структуру, а, відповідно, і властивості є термічна обробка.

Основи термічної обробки розробив Чернов Д.К.. У подальшому вони розвивалися у працях Бочвара А.А., Курдюмова Г.В., Гуляєва А.П.

Термічна обробка являє собою сукупність операцій нагріву, витримки та охолодження, які виконуються у визначеній послідовності при визначених режимах, з метою зміни внутрішньої будови сплаву та отримання необхідних властивостей (представлена у вигляді графіка в осях температура – час, див. рис. 10.1 ).



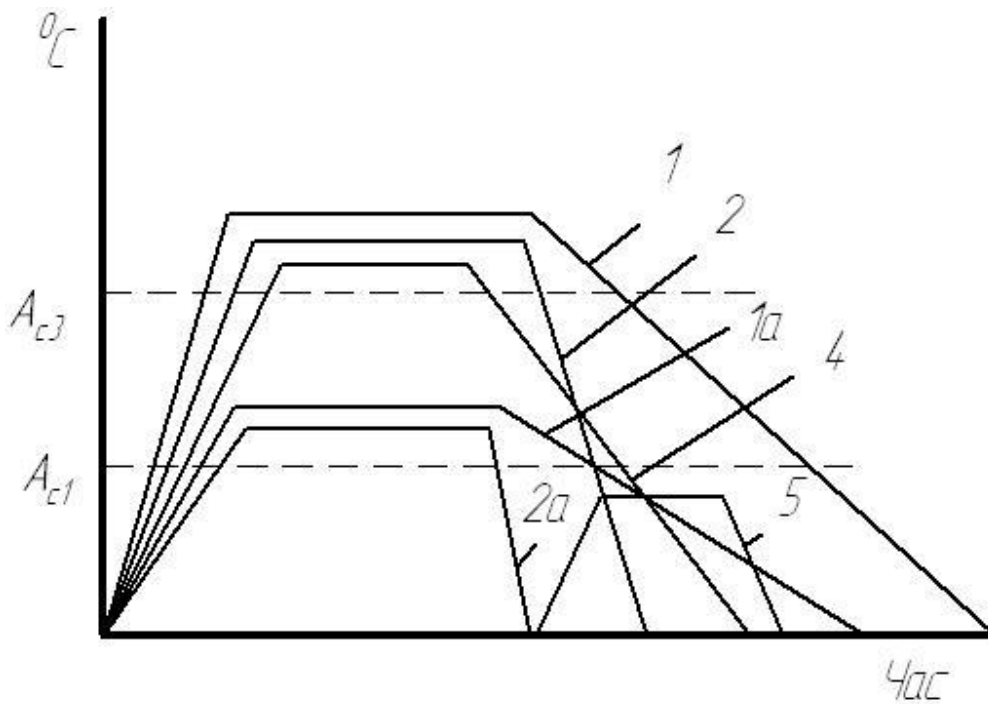


Рисунок 10.1. Графіки різних видів термообробки: відпалу(1, 1а), гартування(2, 2а), відпуску (3), нормалізації (4)

Будь яка термічна обробка – це нагрівання металу до певної температури ( $A_1$  або  $A_3$ ) з потрібною швидкістю нагрівання ( $V_H$ ), витримування за цієї температури протягом певного часу ( $\tau$ ) й його охолодження із заданою швидкістю ( $V_{ox}$ ) Розрізняють обробку з нагрівом до температур вище і нижче температури фазових перетворень.

Температура нагрівання та швидкість охолодження визначають вид термічної обробки. Так нагрівання вище температур фазових перетворень і подальше повільне охолодження призводять до фізико-хімічної та структурної рівноваги сталі. Такі операції називаються відпалюванням (1 та 1а на рис.10.1)

Швидке охолодження заважає утворенню рівноважної структури, й таку операцію називають гартуванням.

Нагрівання до температур нижче за температуру фазових перетворень ( $A_1$  або  $A_3$ ) сприяє наближенню до стану рівноваги. Вплив швидкості охолодження незначний і така операція називається відпуск

Розрізняють наступні види термічної обробки:

1. *Відпал 1 роду* – є сприятливим для будь яких металів та сплавів.

Його проведення не обумовлено фазовими перетвореннями у твердому стані. Нагрів, при відпалі першого роду, підвищуючи рухомість атомів, частково або повністю ліквідує хімічну неоднорідність, зменшує внутрішні напруження. Основне значення має температура нагріву та час витримки. Характерним є повільне охолодження.

Різновидами відпалу першого роду являються:

- дифузійний;
- рекристалізаційний;

- відпал для зняття напруження після кування, зварювання, виливання.

2. *Відпал II роду* – відпал металів та сплавів, які зазнають фазові перетворення у твердому стані при нагріві та охолодженні.

Проводиться для сплавів, у яких існують поліморфні або евтектоїдні перетворення, а також змінна розчинність компонентів у твердому стані.

Проводять відпал другого роду з метою отримання найбільш рівноважної структури та підготовки її до подальшої обробки. В результаті відпалу подрібнюється зерно, підвищуються пластичність та в'язкість, знижуються міцність та твердість, поліпшується оброблюваність різанням.

Характеризується нагрівом до температур вище критичних та дуже повільним охолодженням, як правило, разом із піччю (рис. 10.1 (1, 1a)).

3. *Гартування* – проводиться для сплавів, які мають фазові перетворення у твердому стані при нагріві та охолодженні, з метою підвищення твердості та міцності за рахунок утворення нерівноважних структур (сорбіт, троостит, мартенсит).

Характеризується нагрівом до температур вище критичних та високими швидкостями охолодження (рис. 10.1 (2, 2a)).

4. *Відпуск* – проводиться з метою зняття внутрішніх напружень, зниження твердості та збільшення пластичності та в'язкості загартованих сталей.

Характеризується нагрівом до температури нижче критичної  $A_{C1}$  (рис. 10.1 (3)). Швидкість охолодження не впливає. Відбуваються перетворення, які зменшують ступінь нерівноваги структури загартованої сталі.

Термічну обробку поділяють на попередню та кінцеву.

*Попередня* – використовується для підготовки структури та властивостей матеріалу для наступних технологічних операцій (для обробки тиском, поліпшенням, оброблюваність різанням).

*Кінцева* – формує властивості готового виробу.

*Перетворення, які відбуваються у структурі сталі при нагріві та охолодженні*

Будь який різновид термічної обробки складається з комбінації чотирьох основних перетворень, в основі яких лежить нестримність системи до мінімуму вільної енергії (рис 10.2).

Розрізняють такі основні структурні стани під час термічної обробки сталі :

- аустеніт (А) – твердий розчин вуглецю(С) в  $\gamma$ -залізі  $Fe_{\gamma}$  (однорідна суміш);

- мартенсит(М) – перенасичений твердий розчин вуглецю в  $\alpha$ -залізі  $Fe_{\alpha}(C)$ ;

- перліт(П) – евтектоїдна суміш фериту (Ф) і цементиту ( $Fe_{\alpha} + Fe_3C$ ) (неоднорідна гетерогенна суміш);

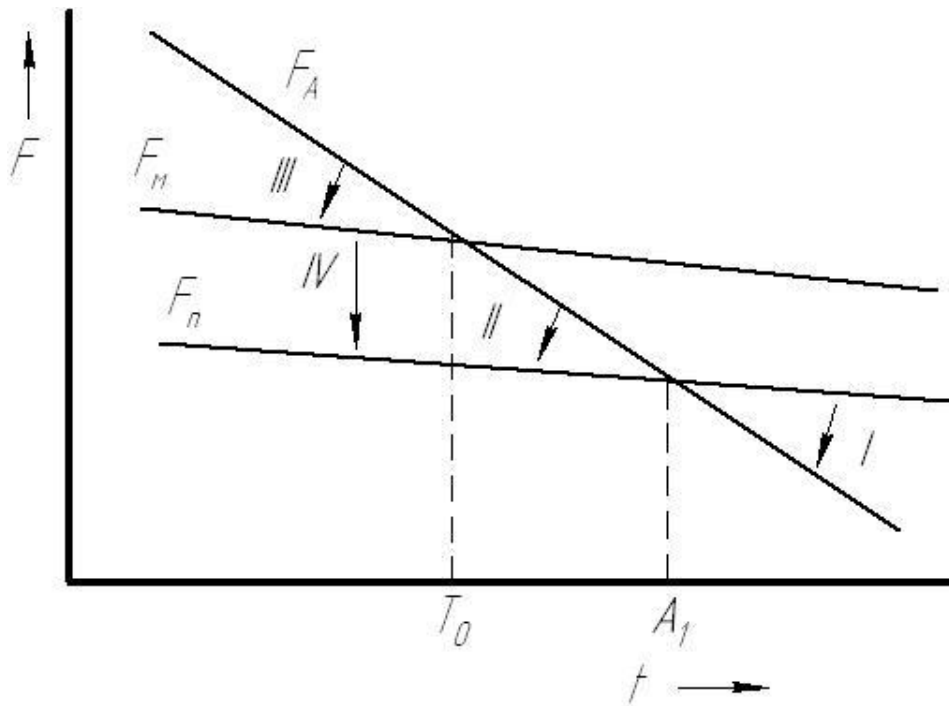
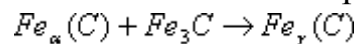
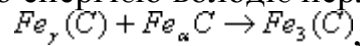


Рисунок 10.2. Залежність вільної енергії структурних складових сталей від температури: аустеніту ( $F_A$ ), мартенситу ( $F_M$ ), перліту ( $F_{\Pi}$ )

1. Перетворення перліту в аустеніт ( $\Pi \rightarrow A$ ), відбувається при нагріві вище критичної температури  $A_1$ , мінімальною вільною енергією володіє аустеніт.

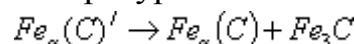


2. Перетворення аустеніту в перліт ( $A \rightarrow \Pi$ ), відбувається при охолодженні нижче  $A_1$ , мінімальною вільною енергією володіє перліт:

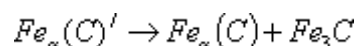


Відбуваються процеси дифузії атомів вуглецю для досягнення концентрації 0,8 %C, перетворення закінчується після розчинення усього цементиту.

3. Перетворення аустеніту в мартенсит ( $A \rightarrow M$ ), відбувається в процесі швидкого охолодження нижче температури нестабільної рівноваги



4. Перетворення мартенситу в перліт ( $M \rightarrow \Pi$ ); – відбувається при будь яких температурах, так як вільна енергія мартенситу більша, ніж вільна енергія перліту.



### **Механізм основних перетворень**

#### **1 Перетворення перліту в аустеніт**

Перетворення засновано на дифузії вуглецю, супроводжується поліморфним перетворенням  $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$ , а також розчиненням цементиту в аустеніті.

Для дослідження процесів будують діаграми ізотермічного утворення аустеніту (рис.10.3). Для цього зразки нагрівають до температури вище  $A_1$  і витримують, фіксуючи початок та кінець перетворення.

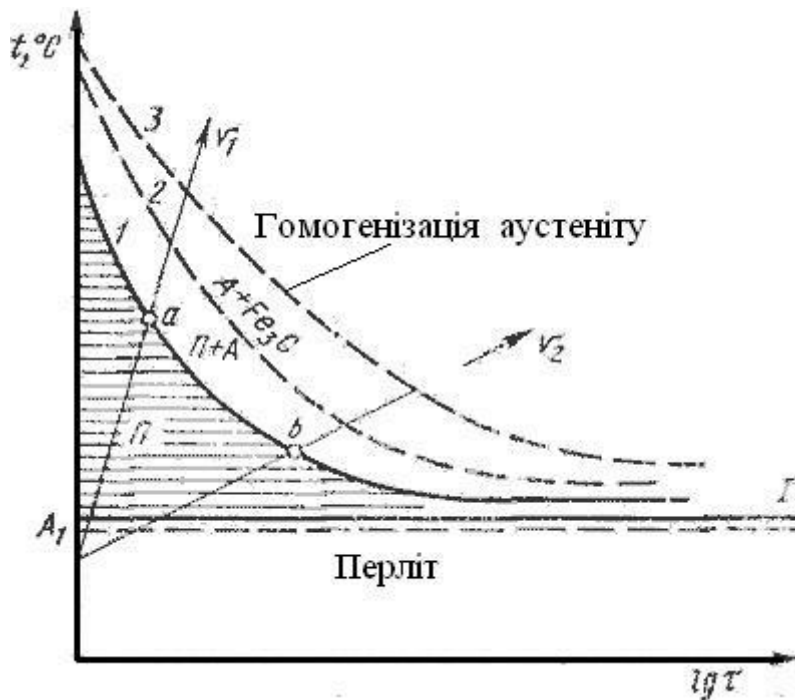


Рисунок 10.3. Діаграма ізотермічного утворення аустеніту: 1 – початок утворення аустеніту; 2 - кінець перебудови перліту в аустеніт; 3 - повне розчинення цементиту.

Із збільшенням перегріву та швидкості нагріву час перетворення скорочується.

Механізм перетворення представлено на рис.10.4.

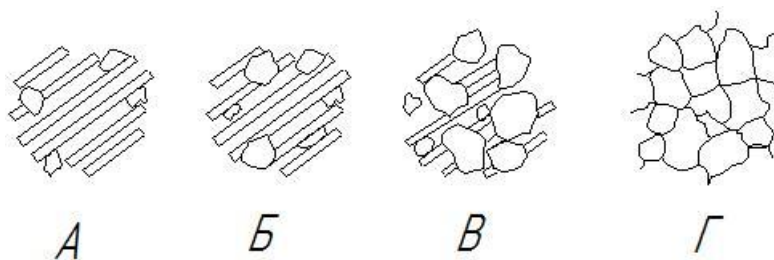


Рисунок 10.4. Механізм перетворення перліту в аустеніт.

Перетворення починаються із зародження центрів аустенітних зерен на поверхні розділу ферит – цементит, кристалічна ґратка  $\text{Fe}_\alpha$  (ферит) перебудовується у ґратку  $\text{Fe}_\gamma$  (аустеніт).

Час перетворення залежить від температури, так як із збільшенням ступеню перегріву зменшується розмір критичного зародка аустеніту, збільшується швидкість виникнення зародків та швидкість їх росту.

Зерна аустеніту, що утворюються, мають спочатку таку саму концентрацію вуглецю, як і ферит. Після того в аустеніті починає розчинюватися друга фаза перліту – цементит, відповідно, концентрація

вуглецю збільшується. Перетворення  $Fe_{\alpha}$  в  $Fe_{\gamma}$ . Проходить швидше. Після того, як увесь цементит розчинюється, аустеніт не є однорідний за хімічним складом: там, де знаходились пластинки цементиту концентрація вуглецю значно більша. Для завершення процесу перерозподілу вуглецю в аустеніті є необхідний додатковий нагрів або витримка.

Величина зерна аустеніту, що утворився, впливає на властивості сталі.

*Ріст зерна аустеніту.* Створені зерна аустеніту є дрібними (початкове зерно). При підвищенні температури або витримуванні відбувається ріст зерна аустеніту. Рушійною силою росту являється різниця вільних енергій дрібнозернистої (більша енергія) та грубозернистої (мала енергія) структури аустеніту.

Сталі розрізняють за схильністю до росту зерна аустеніту. Як що зерно аустеніту починає швидко рости навіть при незначному нагріві вище температури  $A_1$ , то сталь спадково грубозерниста. Як що зерно росте лише при великому перегріві, то сталь спадково дрібнозерниста.

Схильність до росту аустенітного зерна є характеристикою плавки. Сталі однієї марки, але різних плавок розрізняються, так як містять неоднакову кількість неметалічних включень, які ускладнюють ріст аустенітного зерна.

Ванадій, титан, молібден, вольфрам, алюміній – зменшують схильність до зростання зерна аустеніту, а марганець та фосфор – збільшують її.

Заевтектоїдні сталі менш схильні до росту зерна.

При наступному охолодженні зерна аустеніту не подрібнюються. Це необхідно враховувати при призначенні режимів термічної обробки, так як від розміру зерна залежать механічні властивості. Грубе зерно знижує опір відриву, ударну в'язкість, підвищує поріг холодноламкості.

Розрізняють величину зерна спадкову та дійсну.

Для визначення величини спадкового зерна, зразки нагрівають до  $930^{\circ}C$  і після визначають розмір зерна.

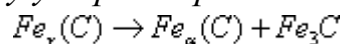
*Дійсна величина зерна* – розмір зерна при звичайних температурах, отриманий після тієї або іншої термічної обробки.

Неправильний режим нагріву може призвести або до перегріву, або до перепалу сталі.

*Перегрів.* Нагрів доевтектоїдної сталі значно вище температури  $A_3$  призводить до інтенсивного зростання зерна аустеніту. При охолодженні ферит виділяється у вигляді пластинчастих або голчатих кристалів. Така структура називається відманштеттова структура і характеризується пониженими механічними властивостями. Перегрів можна виправити повторним нагрівом до оптимальних температур з наступним повільним охолодженням.

*Перепал* має місце, коли температура нагріву наближається до температури плавлення. При цьому спостерігається окислення границь зерен, що різко знижує міцність сталі. Злам такої сталі каменеподібний. Перепал – зумовлює непоправне пошкодження сталі.

2. Перетворення аустеніту у перліт при повільному охолодженні.



Перетворення пов'язано з дифузією вуглецю, супроводжується поліморфним перетворенням  $Fe_\gamma \rightarrow Fe_\alpha$ , виділенням вуглецю із аустеніту у вигляді цементиту, розростанням цементиту, що утворився.

В залежності від ступеня переохолодження розрізняють три області перетворення. Спочатку, із збільшенням переохолодження швидкість перетворення зростає, а після йде на спад. При температурі  $727^\circ\text{C}$  і нижче  $200^\circ\text{C}$  швидкість дорівнюється нулю. При температурі  $200^\circ\text{C}$  дорівнюється нулю швидкість дифузії вуглецю.

*Закономірності перетворення.*

Зразки нагрівають до температури, при якій структура складається із однорідного аустеніту ( $770^\circ\text{C}$ ). Після чого переносять у термостати з заданої температурою (інтервал  $25 - 50^\circ\text{C}$ ). Перетворення аустеніту можна легко визначити за допомогою спостережень за зміною магнітних характеристик, так як аустеніт парамагнітний, а ферит та цементит володіють магнітними властивостями.

Будують серію кінетичних кривих (рис. 10.5 а), які показують кількість перліту, що утворився, в залежності від часу, який пройшов з початку перетворення.

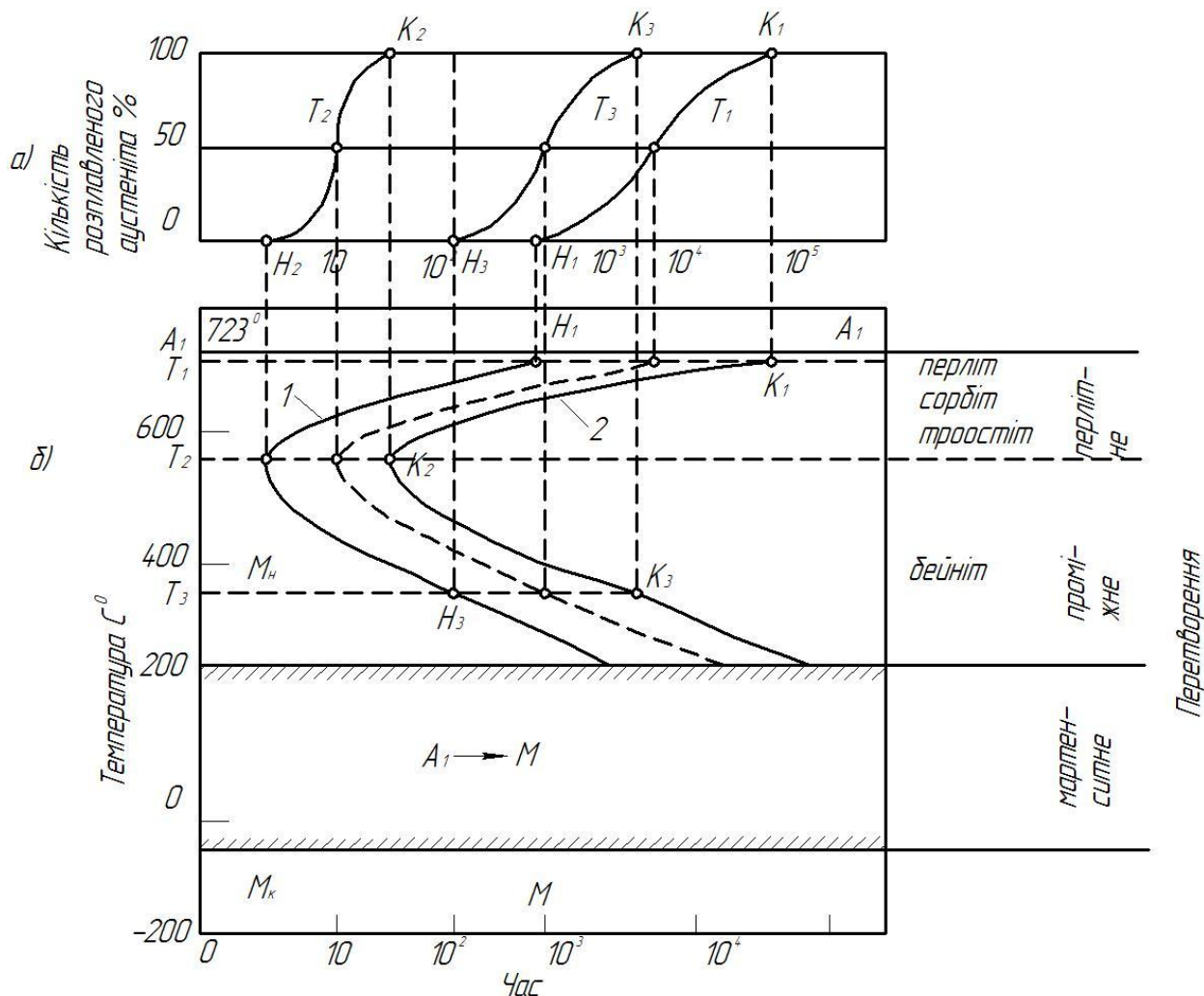


Рисунок 10.5. Кінетичні криві перетворення аустеніту при охолодженні (а);  
діаграма ізотермічного перетворення аустеніту (б)

Спочатку спостерігається інкубаційний підготовчий період, час, на протязі якого зберігається переохолоджений аустеніт. Перетворення проходить з різною швидкістю і досягає максимуму при утворенні 50 % продуктів розпаду.

Після цього швидкість починає зменшуватися і повільно затухає. Із збільшенням ступеня переохолодження стійкість аустеніту зменшується, а потім збільшується.

Горизонтальна лінія  $M_n$  показує температуру початку бездифузійного мартенситного перетворення. Такі діаграми називаються діаграмами ізотермічного перетворення аустеніту (рис. 10.5 б). Або так звані С – криві (англійською ТТТ – діаграми (time – temperature – transformation)).

При малих ступенях переохолодження, в області температур  $727...550^{\circ}\text{C}$ , в результаті перетворення аустеніту утворюється механічна суміш фериту та цементиту, склад якої відрізняється від складу вихідного аустеніту. Аустеніт містить 0,8 % вуглецю, а фази, що утворилися: ферит – 0,02 %, цементит – 6,67 % вуглецю.

Час стійкості аустеніту та швидкість його перетворення залежать від ступеня переохолодження.

Максимальна швидкість перетворення відповідає переохолодженню нижче температури  $A_1$  на  $150...200^{\circ}\text{C}$ , то б то відповідає мінімальній стійкості аустеніту.

Механізм перетворення представлено на рис. 10.6.

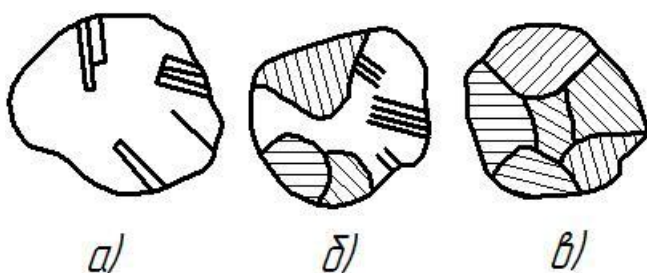


Рисунок 10.6. Механізм перетворення аустеніту в перліт

При утворенні перліту з аустеніту ведучою фазою є цементит. Зародження центрів кристалізації цементиту полегшується на границі аустенітних зерен. Пластинка цементиту, що утворилася, зростає, подовжується та збіднює сусідні ділянки вуглецем. Поряд з ним утворюється пластинка фериту. Ці пластинки ростуть як за товщиною, так і по довжині. Ріст утворених колоній перліту продовжується до зіткнення із кристалами перліту, які розгалужуються з інших центрів.

Властивості та будова продуктів перетворення аустеніту залежать від температури, при якій відбувається процес його розпаду.

Товщина сусідніх пластинок фериту та цементиту визначає дисперсність структури і позначається  $\Delta_0$ . Вона залежить від температури перетворення. В залежності від дисперсності продукти розпаду мають різну назву: перліт, сорбіт і тростит, які утворюються під час дифузійного розпаду переохолодженого аустеніту є ферито-цементитними структурами пластинчастої будови, що вирізняються ступенем дисперсності.

$$\Delta_0 \approx (0,5 \dots 0,7) 10^{-5} \text{ мм} - \text{перліт.}$$

Утворюється при переохолодженні до температури  $T = 650 \dots 700$  °С, або при швидкості охолодження  $V_{охл} = 30 \dots 60$  °С/с. Твердість складає 180...250 НВ.

$$\Delta_0 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ мм} - \text{сорбіт}$$

Утворюється при переохолодженні до температури  $T = 600 \dots 650$  °С, або при швидкості охолодження  $V_{охл} = 60$  °С/с. Твердість складає 250...350 НВ. Структура характеризується високою межою пружності, достатньою в'язкістю та міцністю.

$$\Delta_0 \approx 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ мм} - \text{троостит}$$

Утворюється при переохолодженні до температури  $T = 550 \dots 600$  °С, або при швидкості охолодження  $V_{охл} = 150$  °С/с. Твердість складає 350...450 НВ. Структура характеризується високою межою пружності, малою в'язкістю та пастичністю.

Твердість феритно-цементитної суміші прямо пропорційна площі поверхні розділу між феритом та цементитом.

Якщо температура нагріву незначно перевищила температуру  $A_1$  і аустеніт, що отримали неоднорідний за вмістом, то при малому ступені переохолодження утворюється зернистий перліт.

#### *Проміжне перетворення*

При температурі нижче 550°С самодифузії атомів заліза практично не відбувається, а атоми вуглецю достатньо рухомі.

Механізм перетворення полягає у тому, що всередині аустеніту відбувається перерозподіл атомів вуглецю і ділянки аустеніту, які збагачені вуглецем перетворюються в цементит.

Перетворення збідненого вуглецем аустеніту у ферит відбувається за механізмом зсуву, шляхом виникнення та росту зародків фериту. Кристали, що утворилися при цьому мають голчасту форму.

Така структура, що складається з цементиту та фериту, називається бейнітом. Особливістю є підвищений вміст вуглецю у фериті (0,1...0,2 %).

Дисперсність кристалів фериту та цементиту залежить від температури перетворення.

При температурі 550°С -  $\Delta_0 = 0,12 \cdot 10^{-3}$  мм – *верхній бейніт*. Структура характеризується недостатньою міцністю, при низьких відносному видовженню ( $\delta$ ) та ударною в'язкістю (КСУ).

При температурі 300°С -  $\Delta_0 = 0,08 \cdot 10^{-3}$  мм – *нижній бейніт*. Структура характеризується високою міцністю у поєднанні з пластичністю та в'язкістю.



## ЛЕКЦІЯ №11. ОСНОВИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ (ПРОДОВЖЕННЯ)

### Мета і задачі:

1. Технологічні особливості та можливості відпалу і нормалізації.
2. Перетворення аустеніту в мартенсит при високих швидкостях охолодження.
3. Перетворення мартенситу у перліт.
4. Технологічні можливості та особливості відпалу, нормалізації, гартування та відпуску.
5. Відпал та нормалізація. Призначення та режими.
6. Відпал першого роду.

### Конспект лекції

#### *1. Перетворення аустеніту в мартенсит при високих швидкостях охолодження*

Перетворення аустеніту в мартенсит ( $A \rightarrow M$ ) має зовсім відмінну природу, не таку як при формуванні ферито-цементитних сумішей. Характерною особливістю аустеніто-цементитного перетворення є його бездифузійність.

При охолодженні сталі зі швидкістю, більшою за критичну ( $V > V_k$ ), перетворення починається при температурі початку мартенситного перетворення ( $M_n$ ) і закінчується при температурі закінчення мартенситного перетворення ( $M_f$ ). В результаті такого перетворення аустеніту утворюється продукт гартування – мартенсит.

Мінімальна швидкість охолодження  $V_k$ , при якій увесь аустеніт переохолоджується до температури  $t_{M_n}$  та перетворюється, називається *критичною швидкістю гартування*.

Так як процесу дифузії не відбувається, то весь вуглець аустеніту залишається у гратках  $Fe_\alpha$  і розташовується або в центрах тетраедрів, або в середині довгих ребер (рис. 1.1).

*Мартенсит* – перенасичений твердий розчин втілення вуглецю в  $\alpha$  – залізі ( $Fe_\alpha$ ).

При утворенні мартенситу  $Fe_\alpha$  кубічна гратка сильно спотворюється, перетворюється в тетрагональну (рис. 11.1 а). Викривлення гратки характеризується ступеню тетрагональності:  $c/a > 1$ . Ступень тетрагональності пропорційна вмісту вуглецю у сталі (рис. 11.1 б).

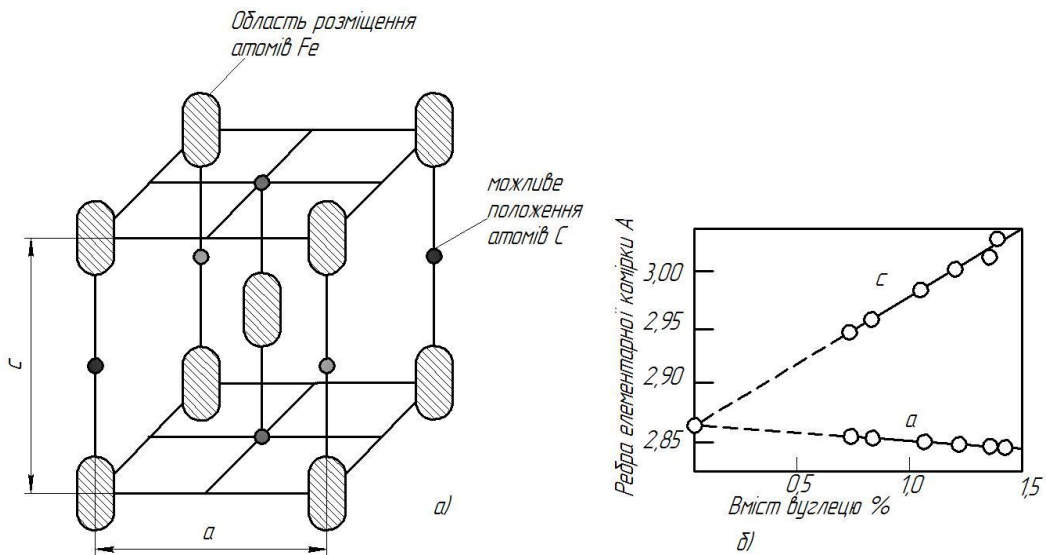


Рисунок 11.1. Кристалічна ґратка мартенситу (а); вплив вмісту вуглецю на параметри  $a$  і  $c$  ґратки мартенситу (б)

Механізм мартенситного перетворення має ряд особливостей.

1. Бездифузійний характер.

Перетворення відбувається за механізмом на зсув. Спочатку перетворення є безперервний перехід від ґратки аустеніту до ґратки мартенситу (когерентний зв'язок). В процесі перетворення гранецентрованої кубічної ґратки у об'ємно-центровану кубічну атоми зміщуються на відстань менше міжатомного, тобто немає необхідності у самодифузії атомів заліза.

2. Орієнтування кристалів мартенситу.

Кристали мають форму пластин, які звужуються вкінці, під мікроскопом така структура виглядає як голчаста. Утворюючись миттєво пластини ростуть або до границі зерна аустеніту, або до дефекту. Наступні пластини розташовані до перших під кутами  $60^\circ$  або  $120^\circ$ , їх розміри обмежені ділянками між першими пластинами (рис. 11.2).



Рисунок 11.2. Орієнтованість кристалів мартенситу

Орієнтований (когерентний) ріст кристалів мартенситу забезпечує мінімальну поверхневу енергію. При когерентному рості, із-за різниці об'ємів аустеніту та мартенситу, виникають великі напруження. При досягненні визначеної величини кристалів мартенситу, ці напруження стають рівними межі текучості аустеніту. У результаті цього порушується когерентність і відбувається відрив ґратки мартенситу від ґратки аустеніту. Ріст кристалів зупиняється.

3. Дуже висока швидкість росту кристалу, до 1000 м/с.

4. Мартенситне перетворення відбувається лише при безперервному охолодженні. Для кожної сталі починається і закінчується при визначеній температурі, незалежно від швидкості охолодження. Температуру початку мартенситного перетворення називають мартенситною точкою  $M_H$ , а температуру закінчення перетворення –  $M_K$ . Температури  $M_H$  і  $M_K$  залежать від вмісту вуглецю і не залежать від швидкості охолодження. Для сталей з вмістом вуглецю вище за 0,6 %  $M_K$  йде у область від'ємних температур (рис.11.3)

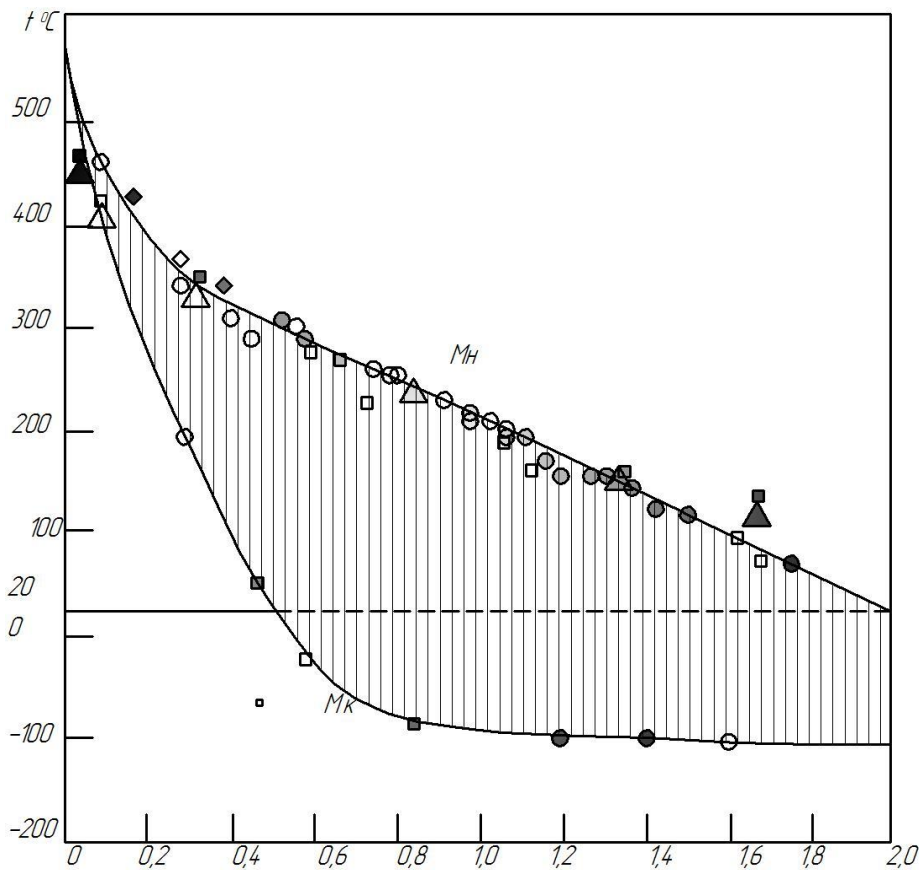


Рисунок 11.3. Залежність температур початку ( $M_H$ ) та кінця ( $M_K$ ) мартенситного перетворення від вмісту вуглецю у сталі

Мартенситне перетворення чутливе до напружень, і деформація аустеніту може визвати перетворення навіть при температурах вище  $M_H$ .

У сталях з  $M_K$  нижче  $20^\circ\text{C}$  присутній аустеніт залишковий, його кількість тим більша, чим нижче  $M_H$  і  $M_K$ . (при вмісті вуглецю  $0,6 \dots 1,0$  % кількість залишкового аустеніту –  $10$  %, при вмісті вуглецю  $1,5$  % - аустеніту до  $50$  %). В мікроструктурі спостерігається у вигляді ясного поля між голками мартенситу.

5. Перетворення незворотне. Отримати аустеніт з мартенситу неможливо.

Властивості мартенситу обумовлені особливостями його утворення. Він характеризується високою твердістю та низькою пластичністю, що обумовлює крихкість.

Твердість складає до  $65$  HRC. Висока твердість визвано впливом втілення атомів вуглецю у гратку  $\alpha$ -фази, що визиває її спотворення та виникнення напружень. З підвищенням вмісту вуглецю у сталі зростає схильність до крихкого руйнування.

## 2. Перетворення мартенситу у перліт.

Відбувається при нагріві загартованих сталей. Перетворення пов'язано із дифузією вуглецю.

Мартенсит гартування не рівноважна структура, яка зберігається при низьких температурах. Для отримання рівноважної структури виріб піддають відпуску.

При нагріванні гартованої сталі відбуваються наступні процеси.

При нагріві до 200°C відбувається перерозподіл вуглецю в мартенситі. Утворюються пластинки  $\epsilon$  – карбідів товщиною у декілька атомних діаметрів. На утворення карбідів вуглець витрачається лише із ділянки мартенситу, що оточує кристали створених карбідів. Концентрація вуглецю на цих ділянках різко падає, тоді як віддалені ділянки зберігають концентрацію вуглецю. У сталі присутні карбіди та два  $\alpha$ -твердих розчину мартенситу (з високою та низькою концентраціями вуглецю). Такий тип розпаду мартенситу *називається переривчастим*. Швидкість дифузії незначна, карбіди не збільшуються, розпад мартенситу супроводжується зародженням нових карбідних часток. Таким чином, маємо структуру з нерівноважним розподіленням вуглецю – це мартенсит відпуску. При цьому дещо знижується тетрагональність ґратки.

При нагріві до 300°C відбувається ріст утворених карбідів. Карбіди виділяються із мартенситу і він збіднюється вуглецем. Дифузія вуглецю збільшується і карбіди ростуть в результаті напливу вуглецю з областей твердого розчину з високою його концентрацією. Кристалічна ґратка карбідів когерентно пов'язана з ґраткою мартенситу.

У високовуглецевих сталях аустеніт залишковий перетворюється у мартенсит відпуску. Спостерігається зниження тетрагональності ґратки та внутрішніх напружень. Структура – мартенсит відпуску:

При нагріві до 400°C весь надлишковий вуглець виділяється із . Карбідні часточки повністю відособляються, перебудовуються у цементит, і починають рости. Форма карбідних частинок наближається до сферичної.

Високодисперсна суміш фериту та цементиту називається троостит відпуску;

При нагріванні вище 400°C зміни фазового складу не відбувається, змінюється тільки мікроструктура. Відбувається зростання та сфероїдизація цементиту. Спостерігається розчинення дрібних та ріст грубих карбідних частинок.

При температурі 550...600°C маємо сорбіт відпуску. Карбіди мають зернисту будову. Поліпшуються властивості сталі.

При температурі 650...700°C отримують більш грубу феритно-цементитну суміш – перліт відпуску (зернистий перліт).

*3 Технологічні можливості та особливості відпалу, нормалізації, гартування і відпуску*

В процесі розроблення технології необхідно встановити:

- режим нагріву деталей (температуру та час нагріву)
- характер середовища, де відбувається нагрівання та його вплив на матеріал сталі;

- умови охолодження.

Режими термічної обробки призначають у відповідності до діаграми стану та діаграми ізотермічного розпаду аустеніту.

Нагрів може відбуватися у нагрівальних печах, паливних або електричних, у соляних ваннах або у ваннах з розплавленим металом, пропусканням крізь виріб електричного струму або за рахунок індукційного нагріву.

З точки зору продуктивності, нагрів з максимальною швидкістю зменшує окалиноутворення, знеуглецювання та ріст аустенітного зерна. Але необхідно враховувати перепад температур по перетину, що призводить до виникнення термічних напружень. Якщо напруження на розтяг перебільшать межу міцності або межу текучості, то можливе жолоблення або утворення тріщин.

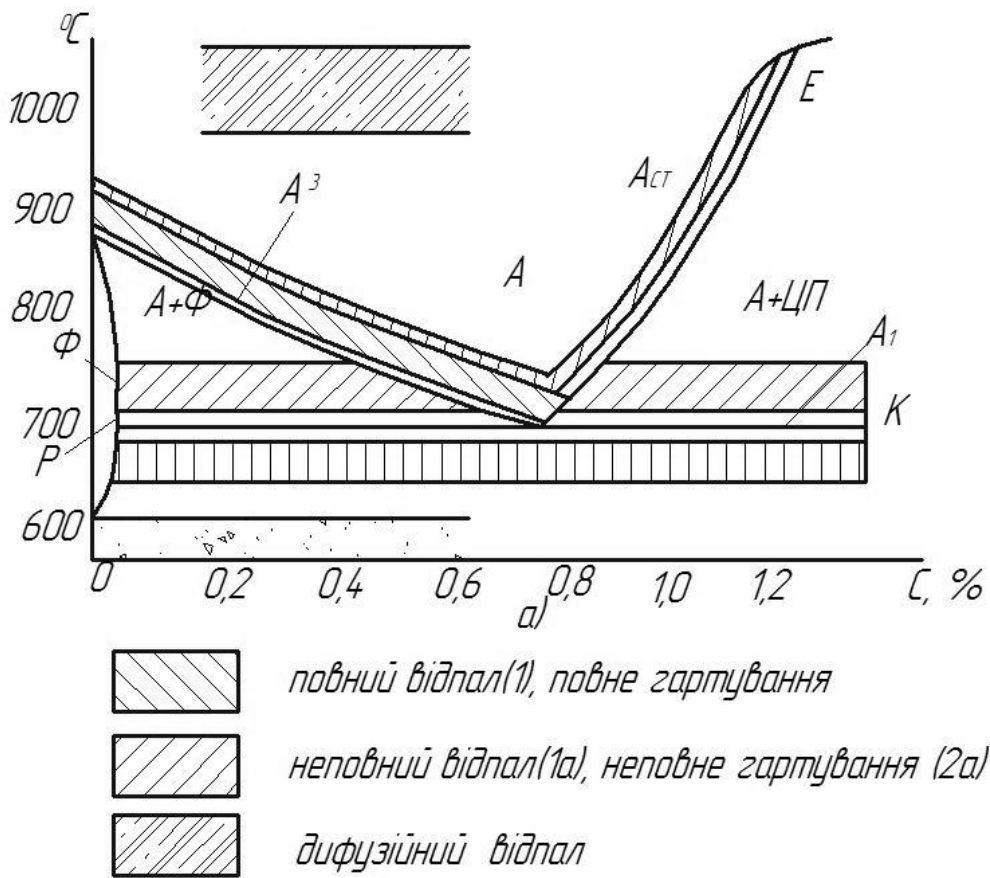


Рисунок 11. 4. Лівий кут діаграми стану залізо – цементит та температурні області нагріву при термічній обробці сталей

Швидкість нагріву тем вища, чим менш легована сталь, однорідна структура, простіша конфігурація.

Швидкість нагріву приймається 0,8...1 хвилина на 1 мм перетину. Час витримки приймається біля 20 % від часу нагріву.

Середовище нагріву при нагріві у печі з газовим середовищем.

Складові можуть впливати на сталь по різному:

- окислювати ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ );

- відновлювати (CO, CH<sub>4</sub>);
- обезвуглецьовувати (O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>);
- навуглецьовувати (CO, CH<sub>4</sub>);
- нейтральне (N<sub>2</sub>, інертні гази).

Окислення з утворенням окалини, унеможливило отримання високої та рівномірної твердості при гартуванні, призводить до зміни розмірів, потребує збільшення припусків на механічну обробку.

Обезвуглецювання (вигорання вуглецю у поверхневому шарі металу) сприяє появі м'яких плям при гартуванні і виникненню напружень на розтяг у поверхневому шарі, які знижують втомлену міцність.

На рис. 11.4 показані температурні області нагріву при термічній обробці сталей.

#### *4 Відпал та нормалізація. Призначення та режими*

Відпал, знижує твердість і підвищує пластичність та в'язкість за рахунок рівноважної дрібнозернистої структури, дозволяє:

- поліпшити оброблюємість заготовок тиском та різанням;
- виправити структуру зварних швів, перегрітої при обробці тиском та литтям сталі;
- підготувати структуру до наступної термічної обробки.

Характерне повільне охолодження зі швидкістю 30...100°C/год.

#### *Відпал першого роду.*

1. *Дифузійний (гомогенізуючий) відпал.* Використовується для усунення ліквідації, вирівнювання хімічного складу сплаву.

В його основі – дифузія. В результаті нагріву вирівнюється склад, розчинюються надлишкові карбіди. Використовується, в основному, для легованих сталей.

Температура нагріву залежить від температури плавлення,  $T_H = 0,8 T_{пл}$ .

Витримка:  $\tau = 8...20$  годин.

2. *Рекристалізаційний відпал* проводиться для зняття напружень після холодної пластичної деформації.

Температура нагріву пов'язана з температурою плавлення:  $T_H = 0,4 T_{пл}$ .

Довготривалість залежить від габаритів виробу.

3. *Відпал для зняття напружень* після гарячої обробки (лиття, зварювання, обробки різанням, коли потрібна висока точність розмірів).

Температура нагріву обирається в залежності від призначення, знаходиться у широкому діапазоні:  $T_H = 160...700^\circ\text{C}$ .

Довготривалість залежить від габаритів виробу

Деталі прецизійних верстатів (ходові гвинти, високонавантажені зубчаті колеса, черв'яки) відпалюють після основної механічної обробки при температурі 570...600°C на протязі 2...3годин, а після кінцевої механічної

обробки, для зняття шліфувальних напружень – при температурі 160...180°C на протязі 2...2,5 годин.

*Відпал другого роду призначений для зміни фазового складу.*

Температура нагріву та час витримки забезпечує потрібні структурні перетворення. Швидкість охолодження повинна бути такою, аби встигли відбутися зворотні дифузійні фазові перетворення. Є підготовчою операцією, якій піддають виливки, поковки, прокат. Відпал понижує твердість та міцність, поліпшує оброблюваність різанням середньо- и високовуглецевих сталей. Подрібнюючи зерно, понижуючи внутрішні напруження та зменшуючи структурну неоднорідність сприяють підвищенню пластичності та в'язкості.

В залежності від температури нагріву розрізняють відпал:

1. *Повний*, з температурою нагріву на 30...50°C вище критичної температури  $A_3$

$$T_n = A_3 + (30...50)^\circ\text{C}$$

Проводиться для доевтектоїдних сталей для виправлення структури.

При такій температурі нагріву аустеніт стає дрібнозернистий, і після охолодження сталь має також дрібнозернисту структуру.

2. *Неповний*, з температурою нагріву на 30...50°C вище критичної температури  $A_1$

Використовується для заевтектоїдних сталей. При такому нагріві в структурі зберігається цементит вторинний, в результаті відпалу цементит набуває сферичну форму (сфероїдизація). Отриманню зернистого цементиту сприяє передуща відпалу гаряча пластична деформація, при якій розбивається цементитна сітка. Структура із зернистим цементитом краще оброблюється та має кращу структуру після гартування. Неповний відпал є обов'язковим для інструментальних сталей.

Іноді неповний відпал використовують для доевтектоїдних сталей, якщо нема потреби поправи структури (сталь дрібнозерниста), а необхідно лише понизити твердість для поліпшення оброблюваності різанням.

3. *Циклічний або маятниковий відпал* використовують, якщо після проведення неповного відпалу цементит залишається пластівчастим. В цьому випадку після нагріву вище температури  $A_1$  має бути охолодження до 680 °C, і потім знову нагрівання до температури 750...760°C та охолодження. В результаті отримують зернистий цементит.

4. *Ізотермічний відпал* – після нагріву до необхідної температури, виріб швидко охолоджують до температури на 50...100°C нижче критичної температури  $A_1$  і витримують до повного перетворення аустеніту в перліт, після охолоджують на спокійному повітрі (рис. 11.5). Температура ізотермічної витримки наближена до температури мінімальної стійкості аустеніту.

В результаті отримують більш однорідну структуру, так як перетворення відбувається при однаковій ступені переохолодження. Значно скорочується довготривалість процесу. Використовують для легованих сталей.



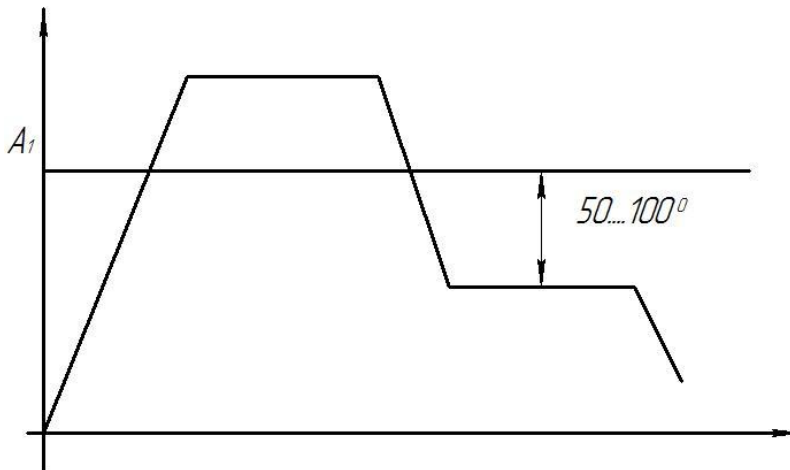


Рисунок 11.5. Режими ізотермічного відпалу

*5. Нормалізація. – різновид відпалу.*

Термічна обробка, при якій виріб нагрівають до аустенітного стану, на 30...50 °С вище  $A_3$  або  $A_{ст}$  з наступним охолодженням на повітрі.

$$T_H = A_3 + (30...50)^\circ\text{C}$$

або

$$T_H = A_{ст} + (30...50)^\circ\text{C}$$

В результаті нормалізації отримують гостру будову евтектоїда (тонкий перліт або сорбіт), зменшуються внутрішні напруження, знешкоджуються хиби, які отримали в процесі попередньої обробки. Твердість та міцність дещо вища ніж після відпалу.

В заевтектоїдних сталях нормалізація знешкоджує грубу сітку вторинного цементиту.

Нормалізацію частіше використовують як проміжну операцію, що поліпшує структуру. Іноді проводять як кінцеву обробку, наприклад, при виготовленні сортового прокату.

Для низьковуглецевих сталей нормалізацію використовують замість відпалу.

Для середньовуглецевих сталей нормалізацію або нормалізацію з високим відпуском застосовують замість гартування з високим відпуском. В цьому випадку механічні властивості дещо нижче, але виріб піддається меншій деформації, виключаючи тріщини.

## **ЛЕКЦІЯ №12. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА МОЖЛИВОСТІ ГАРТУВАННЯ І ВІДПУСКУ**

### План лекції

1. Гартування
2. Способи гартування

3. Відпуск
4. Відпускна крихкість

## Конспект лекції

### Гартування

Конструкційні сталі піддають гартуванню та відпуску для підвищення міцності та твердості, отримання високої пластичності, в'язкості та високої зносостійкості, а інструментальні – для підвищення твердості та зносостійкості.

Верхня межа температур нагріву для заевтектоїдних сталей обмежується, так як це призводить до зростання зерна, що знижує міцність та опір крихкому руйнуванню.

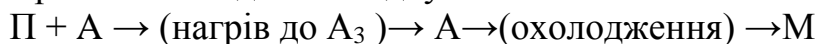
Основними параметрами є температура нагріву та швидкість охолодження. Тривалість нагріву залежить від нагрівального пристрою, за дослідними даними на 1 мм перетину витрачається: у електричній печі – 1,5...2 хвилини; у полум'яній печі – 1 хв.; у соляній ванні – 0,5 хв.; у свинцевій ванні – 0,1...0,15 хв.

За температурою нагріву розрізняють такі види гартування:

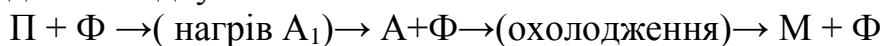
– повне, з температурою нагріву на 30...50°C вище критичної температури  $A_3$

$$T_H = A_3 + (30...50)^\circ\text{C}$$

Використовують його для доевтектоїдних сталей. Зміна структури сталі при нагріві та охолодженні відбувається за схемою:



Неповне гартування доевтектоїдних сталей недопустимо, так як в структурі залишається м'який ферит. Зміна структури сталі при нагріві та охолодженні відбувається за схемою:



Неповне з температурою нагріву на 30...50 °C вище критичної температури  $A_1$

$$T_H = A_1 + (30...50)^\circ\text{C}$$

Використовується для заевтектоїдних сталей. Зміна структури сталі при нагріві та охолодженні відбувається за схемою:



Після охолодження у структурі залишається вторинний цементит, який підвищує твердість та зносостійкість ріжучого інструменту.

Після повного гартування заевтектоїдних сталей отримують дефектну структуру грубого голчастого мартенситу.

Заевтектоїдні сталі перед гартуванням обов'язково піддають відпалу – сфероїдизації, аби цементит мав зернисту форму.

### Охолодження при гартуванні.

Для отримання необхідної структури виріб охолоджують із різною швидкістю, яка у більшому ступені визначається охолоджувальним середовищем, формою виробу та теплопровідністю сталі.

Режим охолодження повинен виключити виникнення великих гартувальних напружень. При високих швидкостях охолодження при гартуванні виникають внутрішні напруження, які можуть призвести до жолоблення та розтріскуванню.

Внутрішні напруження, які врівноважені у межах макроскопічних частин тіла, називаються напруженнями I роду. Вони відповідальні за викривлення форми (жолоблення) та утворення тріщин при термообробці. Причинами виникнення напружень являються:

- різниця температури по перетину деталі при охолодженні;
- різночасове проходження фазових перетворень на різних ділянках виробу.

Для попередження утворення тріщин необхідно уникати напружень на розтяг у поверхневих шарах виробу. На характер розподілення напружень при гартуванні, окрім режиму охолодження, впливає і температура нагріву під гартування. Перегрів сприяє утворенню гартувальних тріщин, збільшує деформації.

Режим охолодження повинен також забезпечити необхідну глибину загартованого шару.

Оптимальний режим охолодження: максимальна швидкість охолодження в інтервалі температур  $A_1 - M_H$ , для попередження розпаду переохолодженого аустеніту в області перлітного перетворення, та мінімальна швидкість охолодження в інтервалі температур мартенситного перетворення  $M_H - M_K$ , з метою зниження залишкових напружень та можливості утворення тріщин. Дуже повільне охолодження може призвести до часткового відпуску мартенситу та збільшенню кількості аустеніту залишкового, і як наслідок зниження твердості.

В якості охолоджуючих середовищ при гартуванні використовують воду із різними температурами, технічні мастила, розчини солей та луги, розплавлені метали.

Вода має суттєвий недолік: висока швидкість охолодження в інтервалі мартенситного перетворення, що призводить до утворення гартувальних дефектів. Із підвищенням температури води погіршується її гартувальна здатність.

Найбільш високою та рівномірною охолоджувальною здатністю вирізняються холодні 8...12 %-кові водні розчини NaCl та NaOH. Вони миттєво руйнують парову сорочку і охолодження відбувається більш рівномірно і на стадії пухирчастого кипіння.

Збільшення охолоджувальної здатності досягають при використанні струменевого або душового охолодження, наприклад, при поверхневому гартуванні.

Для легованих сталей з високою стійкістю аустеніту використовують мінеральне мастило (нафтове). Забезпечує невелику швидкість охолодження в інтервалі температур мартенситного перетворення та постійність гартування. Недоліками мінеральних мастил є підвищена запалюваність, низка

охладжувальна здатність в інтервалі температур перлітного перетворення, висока вартість.

При виборі охолоджувального середовища необхідно враховувати загартованість та прогартованість сталі.

*Загартованість* – здатність сталі набувати високої твердості при гартуванні.

Загартованість визначається вмістом вуглецю. Сталі із вмістом вуглецю менш за 0,20 % не загартовуються.

*Прогартованість* – здатність отримати загартований шар із мартенситною та троосто-мартенситною структурою, який володіє високою твердістю, на визначену глибину.

За глибину загартованої зони приймають відстань від поверхні до середини шару, де в структурі однакові об'єми мартенситу та трооститу.

Чим менше критична швидкість гартування, тим вище прогартованість. Погрубшення зерен підвищує прогартованість.

Якщо швидкість охолодження у серцевині виробу перебільшує критичну то сталь має наскрізну прогартованість.

Нерозчинні частинки та неоднорідність аустеніту зменшують прогартованість.

Характеристикою прогартованості являється критичний діаметр.

*Критичний діаметр* – максимальний перетин, який прогартовується у даному охолоднику на глибину, яка дорівнюється радіусу деталі.

Із введенням у сталь легуючих елементів, загартованість та прогартованість збільшуються (особливо молібден та бор, кобальт – навпаки).

### *Способи гартування*

Залежно від форми деталі, марки сталі та потрібного комплексу властивостей використовують різні способи охолодження (рис. 12.1)

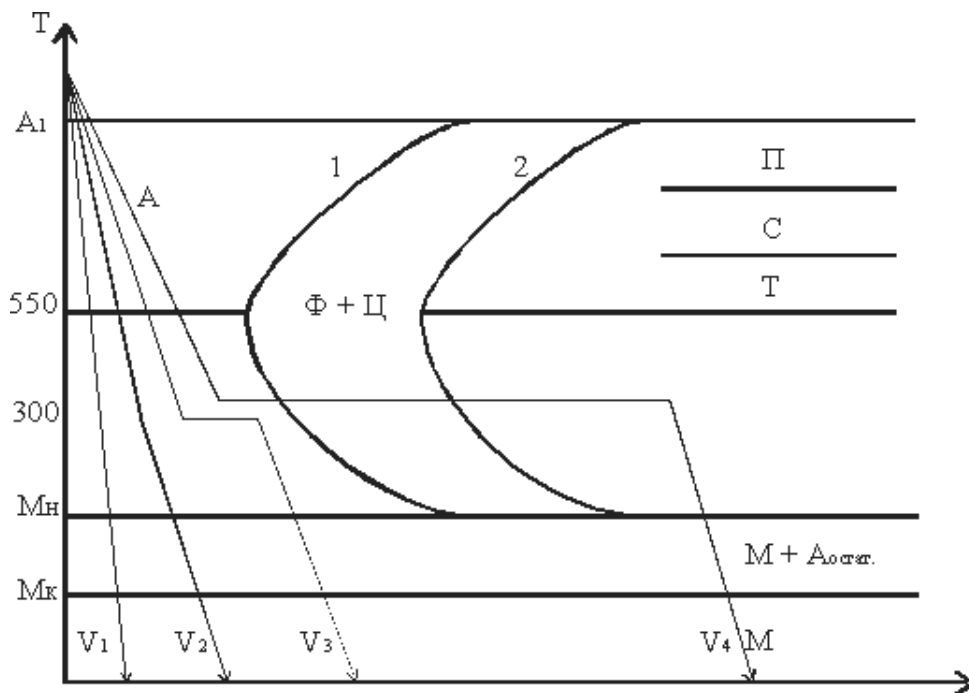


Рисунок 12.1. Режими гартування

### 1. Гартування в одному охолоджувачі (V1).

Нагріту до необхідної температури деталь переносять в охолоджувач і повністю охолоджують. В якості охолоджувального середовища використовують:

- воду – для грубих виробів із вуглецевих сталей;
- масло – для невеликих деталей простої форми із вуглецевих сталей та деталей із легованих сталей.

Основний недолік – значні гартувальні напруження.

### 2. Гартування у двох охолодниках або переривчасте (V2).

Нагріту деталь попередньо охолоджують у більш різкому охолоджувачу (вода) до температури  $\sim 300^{\circ}\text{C}$  і після переносять у більш м'який охолодник (мастило).

і

Переривчасте гартування забезпечує максимальне наближення до оптимального режиму охолодження.

Використовується в основному для гартування інструментів.

Недолік: складність визначення моменту переносу деталі з одного середовища у інше.

### 3. Сходинкове гартування (V3).

Нагріту до потрібної температури деталь поміщають у охолоджувальне середовище, температура якої на  $30 - 50^{\circ}\text{C}$  вище точки  $M_N$  та витримують протягом часу, необхідного для вирівнювання температури по усьому

перетину. Час ізотермічної витримки не перебільшує періоду стійкості аустеніту при заданій температурі.

В якості охолоджувача використовують розплавлені солі або метали. Після ізотермічної витримки деталь охолоджують з невисокою швидкістю.

Спосіб використовується для дрібних та середніх виробів.

#### 4. *Ізотермічне гартування (V4).*

Відрізняється від ступінчастого гартування тривалістю витримки при температурі вище  $M_n$ , в області проміжного перетворення. Ізотермічна витримка забезпечує повне перетворення переохолодженого аустеніту у бейніт. При проміжному перетворенні легованих сталей крім бейніту в структурі зберігається аустеніт залишковий. Структура, що утворилася характеризується поєднанням високої міцності, пластичності та в'язкості. Разом з цим знижується деформація із-за гартувальних напружень, зменшуються і фазові напруження.

У якості охолоджувача використовують розплавлені солі та лугу.

Використовуються для легованих сталей.

#### 5. *Гартування із самовідпуском.*

Нагріті вироби розміщують у охолоднику і витримують до неповного охолодження. Після видалення виробу, його поверхневі шари перенагріваються за рахунок внутрішньої теплоти до необхідної температури, тобто відбувається самовідпуск. Використовується для виробів, які повинні поєднувати високу твердість на поверхні та високу в'язкість в осерді (інструменти ударної дії: молотки, зубила).

##### 6. *Відпуск*

Відпуск являється заключною термічною обробкою.

Метою відпуску є підвищення в'язкості та пластичності, зниження твердості та зменшення внутрішніх напружень загартованих сталей.

З підвищенням температури нагріву міцність зазвичай знижується, а пластичність та в'язкість зростають. Температуру відпуску обирають, виходячи із потрібної міцності конкретної деталі.

Розрізняють три види відпуску:

а) *Низький відпуск з температурою нагріву  $T_n = 150...300^\circ C$ .*

В результаті його проведення частково знімаються гартувальні напруження. Отримують структуру – мартенсит відпуску.

Проводять для інструментальних сталей; після гартування струмами високої частоти; після цементації.

б) *Середній відпуск з температурою нагріву  $T_n = 300...450^\circ C$ .*

Отримують структуру – троостит відпуску, який поєднує високу твердість 40...45HRC з доброю пружністю та в'язкістю.

Використовується для виробів типу пружин, ресор.

в) *Високий відпуск з температурою нагріву  $T_n = 450...650^\circ C$ .*

Отримують структуру, яка поєднує достатньо високу твердість та підвищену ударну в'язкість (оптимальне поєднання властивостей) – сорбіт відпуску.

Використовується для деталей машин, які піддаються ударним навантаженням.

Комплекс термічної обробки, що включає гартування та високий відпуск, називається поліпшенням.

#### *Відпускна крихкість*

За звичай із підвищенням температури відпуску ударна в'язкість збільшується, а швидкість охолодження не впливає на властивості. Але для деяких сталей спостерігається зниження ударної в'язкості. Цей дефект називається відпускнуою крихкістю (рис. 14.2).

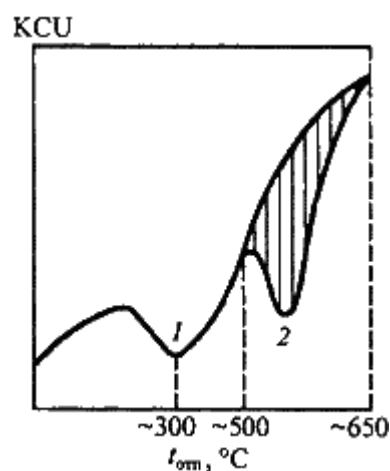


Рис.12.2. Залежність ударної в'язкості від температури відпуску

Відпускна крихкість I роду спостерігається при відпуску в області температур біля  $300^\circ\text{C}$ . Вона не залежить від швидкості охолодження.

Це явище пов'язано з нерівномірністю перетворення відпущеного мартенситу. Процес протікає швидше поблизу границь зерен у порівнянні з об'ємами середині зерна. Біля границь спостерігається концентрація напружень, тому границі крихкі.

Відпускна крихкість I роду “незворотня“, то б то при повторних нагрівах тих же деталей не спостерігається.

Відпускна крихкість II роду спостерігається для легованих сталей при повільному охолодженні після відпуску в області  $450\dots 650^\circ\text{C}$ .

При високому відпуску по границям зерен відбувається утворення та виділення дисперсних включень карбідів. Пригранична зона збіднюється легуючими елементами. При наступному повільному охолодженні відбувається дифузія фосфору до границі зерна. Приграничні зони збагачуються фосфором, понижуються міцність та ударна в'язкість. Цьому дефекту сприяє хром,

марганець та фосфор. Зменшують схильність до відпускнуї крихкості II роду молібден та вольфрам, а також швидке охолодження після відпуску.

Відпускна крихкість II роду “зворотня”, то б то при повторних нагрівах та повільному охолодженні тих же сталей у безпечному інтервалі температур дефект може повторитися.

Сталі, які схильні до відпускнуї крихкості II роду, неможна використовувати для роботи із нагрівом до 650°C без наступного швидкого охолодження.

## **ЛЕКЦІЯ №13. ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛІ: ЦЕМЕНТАЦІЯ, АЗОТУВАННЯ, НІТРОЦЕМЕНТАЦІЯ ТА ДИФУЗІЙНА МЕТАЛІЗАЦІЯ**

### **Мета і задачі:**

1. Хіміко-термічна обробка сталі.
2. Призначення та технологія видів хіміко-термічної обробки: цементациї, азотування, нітроцементациї і дифузійної металізації.
3. Цементация.
4. Цементация у твердому карбюризаторі.
5. Газова цементация.
6. Структура цементованого шару.
7. Термічна обробка після цементациї.
8. Азотування.
9. Цианірування та нітроцементация.
10. Дифузійна металізація.

### **Конспект лекції**

*Хіміко-термічна обробка сталі.*

Хіміко-термічна обробка (ХТО) – процес зміни хімічного складу, мікроструктури та властивостей поверхневого шару деталі.

Зміна хімічного складу поверхневих шарів досягається в результаті їх взаємодії із навколишнім середовищем (твердою, рідкою, газоподібною, плазмовою), в якій відбувається нагрів.

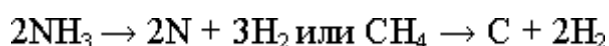
В результаті зміни хімічного складу поверхневого шару змінюється його фазовий склад та мікроструктура.

Основними параметрами хіміко-термічної обробки являються температура нагріву та довготривалість витримки.

В основі будь якого різновиду хіміко-термічної обробки лежать процеси дисоціації, адсорбції, дифузії.

Дисоціація – отримання елемента, що насичує в активованому атомарному стані в результаті хімічних реакцій, а також випаровування.

Наприклад,





Адсорбція – захват поверхнею деталі атомів елементу, що насичує.

Адсорбція – завжди екзотермічний процес, який приводить до зменшення вільної енергії.

Дифузія – переміщення адсорбованих атомів вглибину виробу.

Для втілення процесів адсорбції та дифузії необхідно, аби елемент, який насичує взаємодівав з основним металом, утворюючи тверді розчини або хімічні з'єднання.

Хіміко-термічна обробка являється основним способом поверхневого зміцнення деталей.

Основними різновидами хіміко-термічної обробки являються:

- цементация (насичення поверхневого шару вуглецем);
- азотування (насичення поверхневого шару азотом);
- нітроцементация або ціанування (насичення поверхневого шару одночасно вуглецем та азотом);
- дифузійна металізація (насичення поверхневого шару різними металами).

*Призначення та технологія видів хіміко-термічної обробки: цементації, азотування, нітроцементації та дифузійної металізації*

### Цементация

Цементация – хіміко-термічна обробка, яка полягає у дифузійному насиченні поверхневого шару атомами вуглецю при нагріві до температури 900...950 °С.

Цементации піддають сталі з низьким вмістом вуглецю (до 0,25 %).

Нагрів виробу відбувається у середовищі, яке легко віддає вуглець. Підібравши режими обробки, поверхневий шар насичується вуглецем на необхідну глибину.

Глибина цементации ( $h$ ) – відстань від поверхні виробу до середини зони, де в структурі є однакові об'єми фериту і перліту ( $h = 1...2$  мм).

Ступінь цементации – середній вміст вуглецю у поверхневому шарі (зазвичай, не більше 1,2 %).

Більш високий вміст вуглецю призводить до утворення значної кількості цементиту вторинного, передає шару підвищену крихкість.

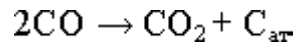
На практиці використовують цементацию у твердому та газовому карбюризаторі (середовищі яке навуглецьовує).

Ділянки деталей, які не підлягають цементации, попередньо покриваються міддю (електролітичним способом) або глиняною сумішшю.

Цементация у твердому карбюризаторі.

Майже готові вироби, із припуском під шліфування, вкладають у металеві ящики і пересипаються твердим карбюризатором. Використовується деревинним вугіллям із домішками вуглекислих солей  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  в кількості 10...40 %. Закриті ящики укладають у піч та витримують при температурі 930...950 °С.

За рахунок кисню повітря відбувається неповне згоряння вугілля з утворенням окиси вуглецю (CO), який розпадається з утворенням атомарного вуглецю за реакцією:



Атоми вуглецю, що утворилися, адсорбуються поверхнею деталі і дифундують вглиб металу.

Недоліками даного способу являються:

- значні витрати часу (для цементації на глибину 0,1 мм витрачається 1 година);

- низька продуктивність процесу;
- громіздке обладнання;
- складність автоматизації процесу.

Спосіб використовується у дрібносерійному виробництві

*Газова цементація.*

Процес відбувається у печах із герметичною камерою, яка наповнена газовим карбюризатором.

Атмосфера вуглецемістких газів включає азот, водень, водяну пару, які утворюють газ-носії, а також окис вуглецю, метан і інші вуглеводні, які є активними газами.

Глибина цементації визначається температурою нагріву та часом витримки.

Переваги способу:

- можливість отримання заданої концентрації вуглецю у шарі (можна регулювати вміст вуглецю, змінюючи співвідношення газів, що створюють атмосферу);

- скорочення довготривалості процесу за рахунок спрощення наступної термічної обробки;

- можливість повної механізації та автоматизації процесу.

Спосіб використовується у серійному та масовому виробництві.

*Структура цементованого шару*

Структура цементованого шару представлена на рис. 13.1.



Рис. 13.1. Структура цементованого шару

На поверхні деталі утворюється шар заевтектоїдної сталі, який складається із перліту та цементиту. При віддаленні від поверхні, вміст вуглецю знижується і наступна зона складається тільки із перліту. Після з'являються зерна фериту, їх кількість, при віддаленні від поверхні збільшується. І, аж ось, структура відповідає вихідному складу.

#### *Термічна обробка після цементації*

В результаті цементації досягається вигідний розподіл вуглецю по перетину. Формує властивості цементованої деталі наступна термообробка. Усі деталі піддають гартуванню з низьким відпуском. Після гартування цементована деталь набуває високу твердість та зносостійкість, підвищується межа контактної витримки та межа витривалості на згин, при збереженні в'язкого осереддя.

Комплекс термічної обробки залежить від матеріалу та призначення деталі.

Графіки різних комплексів термічної обробки представлені на рис. 15.2.

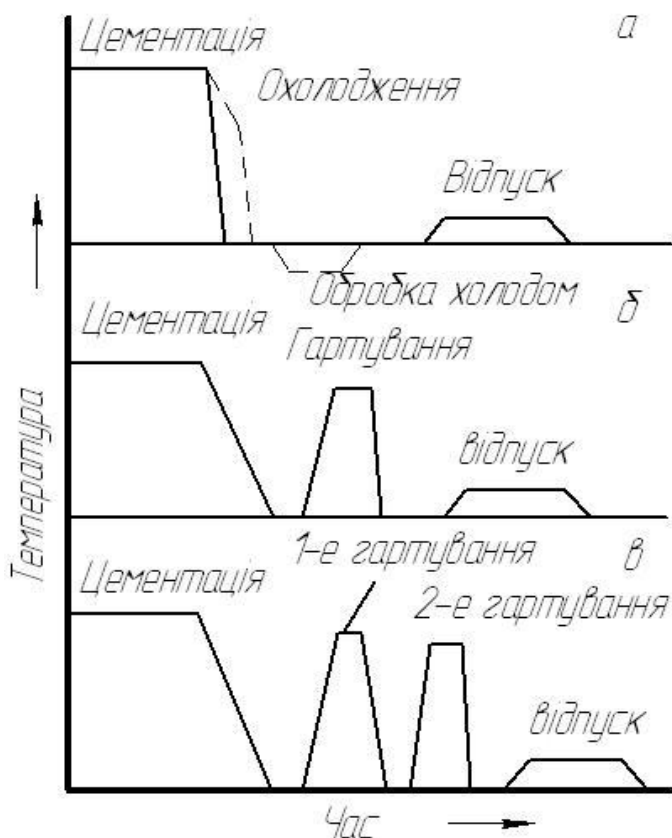


Рис. 13.2. Режими термічної обробки цементованих виробів

Як що сталь спадково дрібнозерниста або деталь невідповідального призначення, то проводять однократне гартування з температури 820...850°C (рис. 15.2 б). При цьому забезпечується отримання високовуглецевого мартенситу в цементованому шарі, а також часткова перекристалізація та подрібнення зерна осереддя.

При газовій цементації деталь по закінченню процесу підстужують до цих температур, а після проводять гартування (нема потреби у повторному нагріві під гартування) (рис. 13.2 а).

Щоб задовольнити особливо високі вимоги, які висуваються до механічних властивостей цементованих деталей, використовують подвійне гартування(рис. 15.2 в).

Перше гартування (або нормалізація) проводиться з температури 880...900°C для виправлення структури осереддя.

Друге гартування проводиться з температури 760...780°C для отримання дрібногочатого мартенситу у поверхневому шарі.

Завершальною операцією термічної обробки завжди є низький відпуск, який проводять при температурі 150...180°C. В результаті відпуску у поверхневому шарі отримують структуру мартенситу відпуску, частково знімаються напруження.

Цементації піддають зубчасті колеса, поршневі кільця, черв'яки, осі, ролики.

#### *Азотування*

Азотування – хіміко-термічна обробка, при якій поверхневі шари насичуються азотом.

Вперше азотування реалізував Чижевській І.П., промислове використання – у двадцяті роки.

При азотуванні збільшуються не тільки твердість та зносостійкість, але також підвищується корозійна стійкість.

При азотуванні деталі завантажують в герметичні печі, куди поступає аміак  $\text{NH}_3$  із визначеною швидкістю. При нагріві аміак дисоціюють за реакцією:  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$ . Атомарний азот поглинається поверхнею і дифундує у глиб деталі.

Процес відбувається у середовищі аміаку при температурі 480...650°C. При цих температурах по реакції  $2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N} + 3\text{H}_2$  виділяється атомарний азот, який дифундує у поверхневі шари деталі. Тому при температурах нижче 500 і вище 700° С азотування не проводять.

Фази, які утворюються в азотованому шарі вуглецевих сталей, не забезпечують високої твердості, та крихкий шар, що утворюється.

Для азотування використовують сталі, які містять алюміній, молібден, хром, титан утворюють дисперсні, тверді й термічно стійкі нітриди, що надають дуже високої поверхневої твердості спеціальним комплексно легованим сталям - *нітралоєм*. Нітриди цих елементів дисперсні та володіють високою твердістю та термічною стійкістю.

Типові сталі, які азотують: 38ХМЮА, 35ХМЮА, 30ХТ2НЗЮ.

Глибина та поверхнева твердість азотованого шару залежать від ряду факторів, з яких основні: температура азотування, тривалість азотування та склад азотуємої сталі.

В залежності від умов роботи деталей розрізняють азотування:

- для підвищення поверхневої твердості та зносостійкості;
- для поліпшення корозійної стійкості (антикорозійне азотування).

У першому випадку процес проводять при температурі 500...560°C протягом 24...90годин, так як швидкість азотування складає 0,01 мм/год. Вміст азоту у поверхневому шарі складає 10...12 %, товщина шару (h) – 0,3...0,6 мм. На поверхні отримують твердість біля 1000 HV. Охолодження проводять разом із піччю у струмені аміаку.

Значне скорочення часу азотування досягається при іонному азотуванні, коли між катодом (деталлю) і анодом (контейнерною установкою) збуджується тліючий розряд. Відбувається іонізація газу, що містить азот, і іони бомбардуючи поверхню катоду, нагрівають його до температури насичення. Катодне розпилення відбувається протягом 5...60 хвилин при напрузі 1100...1400 В та тиску 0,1...0,2 мм рт. ст., робоча напруга 400...1100 В, довго тривалість процесу до 24годин.

Антикорозійне азотування проводять і для легованих, і для вуглецевих сталей. Температура проведення азотування – 650...700°C, довго тривалість процесу – 10годин. На поверхні утворюється шар — ε фази товщиною 0,01...0,03 мм, який володіє високою стійкістю проти корозії. (ε – фаза – твердий розчин на основі нітриду заліза Fe<sub>3</sub>N, який має гексагональну решітку).

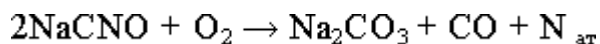
Азотування проводять на готових деталях, які пройшли кінцеву механічну і термічну обробку (гартування з високим відпуском).

Після азотування в осередді деталі зберігається структура сорбіту, яка забезпечує підвищену міцність та в'язкість. Азотований шар, сформований під час насичення, не вимагає додаткової термічної обробки як у випадку цементації.

#### *Ціанування та нітроцементация*

Ціанування – хіміко-термічна обробка, при якій поверхня насичується одночасно вуглецем та азотом.

Відбувається у ваннах із розплавленими ціаністими солями, наприклад NaCN із домішками солей NaCl, BaCl та інших. При окисленні ціаністого натрію утворюється атомарний азот та окис вуглецю:



Глибина шару і концентрація у ньому вуглецю та азоту залежать від температури процесу та його довготривалості.

Ціануванний шар має високу твердість 58...62 HRC і добре опирається зносу. Підвищуються втомлена міцність та корозійна стійкість.

Довготривалість процесу 0,5...2години.

Високотемпературне ціанування – проводиться при температурі 800...950°C, супроводжується першочерговим насиченням сталі вуглецем до 0,6...1,2 %, (рідинна цементация). Вміст азоту у ціанованому шарі 0,2...0,6 %, товщина шару 0,15...2 мм. Після ціанування деталі піддаються гартуванню та низькому відпуску. Кінцева структура ціанованого шару складається з тонкого шару карбонітрідів Fe<sub>2</sub>(C, N), а потім азотистий мартенсит.

У порівнянні з цементациєю високотемпературне ціанування відбувається із більшою швидкістю, призводить до меншої деформації деталей, забезпечує більшу твердість та опір зносу.

Низькотемпературне ціанування – проводиться при температурі 540...600°C, супроводжується першочерговим насиченням сталі азотом для інструментів із швидкоріжучих, високохромистих сталей, є кінцевою обробкою.

Основним недоліком ціанування є отрутість ціаністих солей.

Нітроцементация – газове ціанування, відбувається у газових сумішах із цементуючого газу та дисоційованого аміаку.

Склад газу, температура процесу визначають співвідношення вуглецю і азоту у ціанованому шарі. Глибина шару залежить від температури та часу витримки.

Високотемпературна нітроцементация проводиться при температурі 830...950°C, для машинобудівних деталей із вуглецевих та низьколегованих сталей при підвищеному вмісті аміаку. Завершальною термічною обробкою є гартування з низьким відпуском. Твердість сягає 56...62 HRC.

На автомобілебудівних заводах 95 % деталей піддаються нітроцементации.

Низькотемпературній нітроцементации піддають інструменти із швидкоріжучої сталі після термічної обробки (гартування та відпуск). Процес проводять при температурі 530...570°C, протягом 1,5...3годин. Утворюється поверхневий шар товщиною 0,02...0,004 мм із твердістю 900...1200 HV.

Нітроцементация характеризується небезпечністю у роботі, низькою вартістю.

#### *Дифузійна металізація*

Дифузійна металізація – хіміко-термічна обробка, при якій поверхня сталевих деталей насичується різними елементами: алюмінієм, хромом, кремнієм, бором та іншими.

При насиченні хромом процес називають хромуванням, алюмінієм – алітуванням, кремнієм – сіліцируванням, бором – боруванням.

Дифузійну металізацію можна проводити у твердих, рідких та газоподібних середовищах.

При твердій дифузійній металізації металізатором є феросплав із додаванням хлористого амонію ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ). В результаті реакції металізатора із  $\text{HCl}$  або  $\text{Cl}_2$  утворюється з'єднання хлору металом ( $\text{AlCl}_3$ ,  $\text{CrCl}_2$ ,  $\text{SiCl}_4$ ), які при контакті із поверхнею дисоціюють із створенням вільних атомів.

Рідка дифузійна металізація проводиться зануренням деталі у розплав металу (наприклад, алюміній).

Газова дифузійна металізація проводиться у газових середовищах, які є хлоридами різних металів.

Дифузія металів протікає дуже повільно, так як утворюються розчини заміщення, тому при однакових температурах дифузійні шари в десятки та сотні разів тонші, ніж при цементации.

Дифузійна металізація – процес високовартісний, відбувається при високих температурах (1000...1200°C) протягом довготривалого часу.

Одним із основних властивостей металізованих поверхонь є жаростійкість, тому жаростійкі деталі для робочих температур 1000...1200°C виготовляють із простих вуглецевих сталей із наступним алітируванням, хромуванням або сіліцируванням.

Особливо високою твердістю (2000 HV) та високим опором зносу із-за утворення боридів заліза (FeB, FeB<sub>2</sub>) характеризуються боровані шари, але ці шари дуже крихкі.

## ЛЕКЦІЯ №14. МЕТОДИ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ

### *План лекції*

1. Термомеханічна обробка сталі
2. Поверхнєве зміцнення сталевих деталей
3. Гартування струмами високої частоти.
4. Газополуменеве гартування.
5. Старіння
6. Обробка сталі холодом
7. Зміцнення методом пластичної деформації

### **Конспект лекції**

#### *Термомеханічна обробка сталі*

Одним з технологічних процесів зміцнювальної обробки є термомеханічна обробка (ТМО).

Термомеханічна обробка відноситься до комбінованих способів зміни будови та властивостей матеріалів.

При термомеханічній обробці суміщуються пластична деформація та термічна обробка (гартування попередньо деформованої сталі в аустенітному стані).

Перевагою термомеханічної обробки є те, що при суттєвому збільшенні міцності характеристики пластичності понижуються незначно, а ударна в'язкість вища у 1,5...2 рази у порівнянні із ударною в'язкістю для тієї ж сталі після гартування з низьким відпуском.

Залежно від температури, при якій проводять деформацію, розрізняють високотемпературну термомеханічну обробку (ВТМО) та низькотемпературну термомеханічну обробку (НТМО).

Суть високотемпературної термомеханічної обробки полягає у нагріві сталі до температури аустенітного стану (вище A<sub>3</sub>). При цій температурі

проводять деформацію сталі, що веде до наклепу аустеніту. Сталь з таким станом аустеніту піддають гартуванню (рис. 14.1 а).

Високотемпературна термомеханічна обробка практично знешкоджує розвиток відпускну крихкості в безпечному інтервалі температур, послаблює незворотно відпускну крихкість та різко підвищує ударну в'язкість при кімнатній температурі. Понижується температурний поріг холодноламкості. Високотемпературна термомеханічна обробка підвищує опір крихкому руйнуванню, зменшує чутливість до тріщиноутворення при термічній обробці.

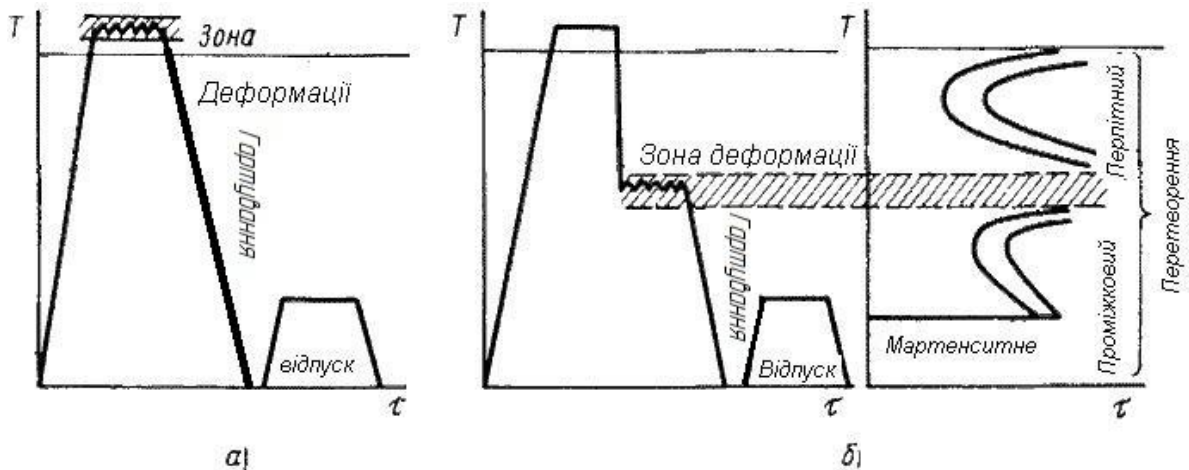


Рисунок 14.1. Схема режимів термомеханічної обробки сталі: а – високотемпературна термомеханічна обробка (ВТМО); б – низькотемпературна термомеханічна обробка (НТМО).

Високотемпературну термомеханічну обробку ефективно використовувати для вуглецевих, легованих, конструкційних, пружинних та інструментальних сталей.

Наступний відпуск при температурі 100...200°C проводиться для збереження високих значень міцності.

Низькотемпературна термомеханічна обробка (аусформиінг).

Сталь нагрівають до аустенітного стану. Після витримують при високій температурі, проводять охолодження до температури, вище температури початку мартенситного перетворення (400...600°C), але нижче температури рекристалізації, і при цій температурі виконують обробку тиском та гартування (рис. 16.1 б).

Низькотемпературна термомеханічна обробка, хоча і дає більш високе зміцнення, але не знижує схильності сталі до відпускну крихкості. Крім того, вона потребує високих ступеней деформації (75...95 %), тому необхідне потужне обладнання.

Низькотемпературну термомеханічну обробку використовують до середньовуглецевих легованих сталей, загартованих на мартенсит, які мають вторинну стабільність аустеніту.



Підвищення міцності при термомеханічній обробці пояснюють тим, що у результаті деформації аустеніту відбувається подрібнення його зерен (блоків). Розміри блоків зменшуються у два – чотири рази у порівнянні зі звичайним гартуванням. Також збільшується щільність дислокацій. При наступному гартуванню такого аустеніту утворюються дрібніші пластинки мартенситу, знижуються напруження.

Механічні властивості після різних видів ТМО для машинобудівних сталей у середньому мають наступні характеристики (см. табл. 14.1):

Таблиця 14.1. Механічні властивості сталі 40 після ТМО

Обробка	$G_B$ , МПа	$G_T$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %
НТМО	2400...2900	2000...2400	5...8	15...30
ВТМО	2100...2700	1900...2200	7...9	25...40
ТО	1400	1100	2	3

Термомеханічну обробку використовують і для інших сплавів.

#### *Поверхнєве зміцнення сталевих деталей*

Конструкційна міцність часто залежить від стану матеріалу у поверхневих шарах деталі. Одним із способів поверхневого зміцнення сталевих деталей є поверхнєве гартування.

У результаті поверхневого гартування збільшується твердість поверхневих шарів деталі з одночасним підвищенням опору стиранню та межі витривалості.

Загальним для усіх видів поверхневого гартування є нагрів поверхневого шару деталі до температури гартування з наступним швидким охолодженням. Ці способи розрізняються методами нагріву деталей. Товщина загартованого шару при поверхневому гартуванні визначається глибиною нагріву.

Найбільше розповсюдження має електротермічне гартування із нагрівом деталей струмами високої частоти (СВЧ) та газополуменеве гартування із нагрівом газово-кисневим або киснево-газовим полум'ям.

#### *Гартування струмами високої частоти.*

Метод розроблено радянським вченим Вологдіним В.П.

Заснований на тому, що якщо у змінне магнітне поле, яке створене провідником-індуктором, помістити металеву деталь, то в ній будуть індукуюватися вихрові струми, які визивають нагрів металу. Чим більша частота струму, тим тонший утворюється загартований шар.

Зазвичай використовуються машинні генератори із частотою 50...15000 Гц та лампові генератори із частотою більше 106 Гц. Глибина загартованого шару – до 2 мм.

Індуктори виготовляються із мідних трубок, в середині яких циркулює вода, завдяки чому вони не нагріваються. Форма індуктора відповідає зовнішній формі деталі, при цьому необхідно мати постійний зазор між індуктором та поверхнею деталі.

Схема технологічного процесу гартування СВЧ представлена на рис. 14.2.

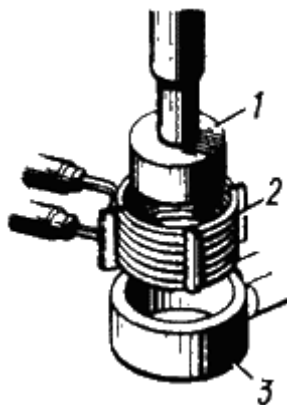


Рисунок 14.2. Схема технологічного процесу гартування СВЧ

Після нагріву протягом 3...5 с індуктора 2 деталь 1 швидко переміщується у спеціальний охолоджувальний пристрій – спрейер 3, через отвори якого на нагріту поверхню розбризкується гартувальна рідина.

Висока швидкість нагріву пересуває фазові перетворення в область більш високих температур. Температура гартування при нагріві струмами високої частоти повинні бути вищими, ніж при звичайному нагріві.

При правильних режимах нагріву після охолодження утворюється структура дрібногочатого мартенситу. Твердість підвищується на 2...4 HRC у порівнянні зі звичайним гартуванням, зростає зносостійкість та межа витривалості.

Перед гартуванням СВЧ деталі піддають нормалізації, а після гартування низькому відпуску при температурі 150...200°C (самовідпуск).

Доцільно використовувати цей метод для деталей із сталей з вмістом вуглецю більше 0,4 %.

Переваги методу:

- більша економічність, нема необхідності нагрівати усю деталь;
- більш високі механічні властивості;
- відсутність обезвуглецювання та окислення поверхні деталі;
- зниження браку по жолобленню та утворення гартувальних тріщин;
- можливість автоматизації процесу;
- використання гартування СВЧ дозволяє замінити леговані сталі на дешеві вуглецеві;
- дозволяє проводити гартування окремих ділянок деталі.

Основний недолік методу – висока вартість індукційних установок та індукторів.

Доцільно використовувати у серійному та масовому виробництві.

*Газополуменеве гартування.*

Нагрів реалізується ацетиленокисневим, газокисневим або гасокисневим полум'ям з температурою 3000...3200°C.

Структура поверхневого шару після гартування складається з мартенситу, мартенситу та фериту. Товщина загартованого шару 2...4 мм, твердість 50...56 HRC.

Метод використовується для гартування масивних деталей, які мають складну поверхню (косозубі шестерні, черв'яки), для гартування сталевих та чавунних прокатних валків. Використовується у масовому та індивідуальному виробництві, а також при ремонтних роботах.

При нагріві масивних деталей пальники та охолоджуючі пристрої переміщуються вздовж деталі, або – навпаки.

Недоліки методу:

- невисока продуктивність;
- складність регулювання глибини загартованого шару і температури нагріву (можливість перегріву).

*Старіння*

Відпуск застосовується до сплавів, які гартувалися на поліморфне перетворення.

До матеріалів, які піддавалися гартуванню без поліморфного перетворення, застосовують старіння.

Гартування без поліморфного перетворення – термічна обробка, яка фіксує при більш низькій температурі стан, властивий сплаву при більш високих температурах (пересичений твердий розчин).

Старіння – термічна обробка, при якій головним процесом являється розпад пересиченого твердого розчину.

В результаті старіння відбувається зміна властивостей загартованих сплавів.

На відміну від відпуску, після старіння збільшується міцність та твердість, та зменшується пластичність.

Старіння сплавів пов'язано із змінною розчинністю надлишкової фази, а зміцнення при старінні відбувається в результаті дисперсійних виділень при розпаді пересиченого твердого розчину та виникаючих при цьому внутрішніх напружень.

У старіючих сплавах виділення із твердих розчинів зустрічаються в наступних основних формах:

- тонкопластинчастої (дископодібної);
- рівноосної (сферичної або кубічної);
- голчатої.

Форма виділень визначається конкуруючими факторами: поверхневою енергією та енергією пружної деформації, яка прагне до мінімуму.

Поверхнева енергія мінімальна для рівноосних виділень. Енергія пружного спотворення мінімальна для виділень в вигляді тонких пластин.

Основне призначення старіння – підвищення міцності та стабілізація властивостей.

Розрізняють старіння природне, штучне та після пластичної деформації.

*Природним старінням* називається власно вільне підвищення міцності та зменшення пластичності загартованого сплаву, яке відбувається в процесі його витримки при нормальній температурі.

Нагрів сплаву збільшує рухомість атомів, що прискорює процес.

Підвищення міцності у процесі витримки при підвищених температурах називається *штучним старінням*.

Межа міцності, межа текучості та твердість сплаву із збільшенням довго тривалості старіння зростають, досягають максимуму і після знижуються (*явище перестарювання*)

При природному старінні перестарювання не відбувається. З підвищенням температури стадія перестарювання досягається раніше.

Якщо загартований сплав, який має структуру пересиченого твердого розчину, піддати пластичній деформації, то тоді прискорюються процеси, які протікають при старінні – це *деформаційне старіння*.

Старіння охоплює усі процеси, які відбуваються у пересиченому твердому розчині: процеси, які готують виділення, та самі процеси виділення.

Для практики велике значення має інкубаційний період – час, протягом якого у загартованому сплаві відбуваються підготовчі процеси, коли зберігається висока пластичність. Це дозволяє проводити холодну деформацію після гартування.

Якщо при старінні відбуваються тільки процеси виділення, то явище називається *дисперсійним твердінням*.

Після старіння підвищується міцність та знижується пластичність низьковуглецевих сталей в результаті дисперсійних виділень у фериті цементиту третинного та нітридів.

Старіння є основним способом зміцнення алюмінієвих та мідних сплавів, а також багатьох жароміцних сплавів.

*Обробка сталі холодом*

Високовуглецеві та більшість легованих сталей мають температуру кінця мартенситного перетворення ( $M_k$ ) нижче  $0^\circ\text{C}$ . Тому у структурі сталі після гартування спостерігається значна кількість залишкового аустеніту, який понижує твердість виробу, а також погіршує магнітні характеристики. Для усунення аустеніту залишкового проводять додаткове охолодження деталі в області від'ємних температур, до температури нижче т.  $M_k$  ( $-80^\circ\text{C}$ ). Звичайно для цього використовують суху кригу.

Така обробка називається обробкою сталі холодом.

Обробку холодом необхідно проводити відразу після гартування, аби не допустити стабілізації аустеніту. Збільшення твердості після обробки холодом зазвичай складає 1...4 HRC.

Після обробки холодом сталь піддається низькому відпуску, так як обробка холодом не знижує внутрішніх напружень.

Холодом обробляють деталі шарикопідшипників, точних механізмів, вимірювальні інструменти.

#### *Зміцнення методом пластичної деформації*

Основне призначення методів механічного зміцнення поверхні – підвищення втомленої міцності.

Методи механічного зміцнення – наклепування поверхневого шару на глибину 0,2...0,4 мм.

Різновидами є дробоструменева обробка та обробка роликками.

*Дробоструменева обробка* – обробка дробом поверхні готових деталей.

Відбувається за допомогою спеціальних дробоструменевих установок, які викидають сталевий або чавунний дріб на поверхню деталей, що обробляються. Діаметр дробу – 0,2...4 мм. Удари дробом визивають пластичну деформацію на глибину 0,2...0,4 мм.

Використовують для зміцнення деталей у канавках, на виступах. Піддають деталі типу пружин, ресор, клітини ланцюгів, гусениць, гільзи, поршні, зубчаті колеса.

При обробці *роликками* деформація відбувається за рахунок тиску ролика із твердого металу на поверхню оброблюємої деталі.

При зусиллях на ролик, що перебільшують межу текучості оброблюємого матеріалу, відбувається наклеп на необхідну глибину. Обробка поліпшує мікрогеометрію. Створення залишкових напружень стиску підвищує межу втомленості та довговічність виробів.

Обкатка роликками використовується при обробці шийок валів, дроту, при калібруванні труб, прутків.

Не потребує спеціального обладнання, можна використовувати токарні або стругальні верстати.

## **ЛЕКЦІЯ №15. КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ. ЛЕГОВАНІ СТАЛІ.**

### **Мета і задачі:**

1. Конструкційні сталі.
2. Леговані сталі
3. Вплив елементів на поліморфізм заліза
4. Вплив легуючих елементів на перетворення у сталі
5. Вплив легуючих елементів на перетворення перліту в аустеніт.
6. Вплив легуючих елементів на перетворення переохолодженого аустеніту.
7. Вплив легуючих елементів на мартенситне перетворення
8. Вплив легуючих елементів на перетворення при відпуску.
9. Класифікація легованих сталей

## Конспект лекції

### *Конструкційні сталі.*

До конструкційних сталей, які використовуються для виготовлення різних деталей машин, ставляться вимоги:

- поєднання високої міцності та достатньої в'язкості;
- добрі технологічні властивості;
- економічність;
- не дефіцитність.

Висока конструкційна міцність сталі, досягається шляхом раціонального вибору хімічного складу, режимів термічної обробки, методів поверхневого зміцнення, поліпшенням металургійної якості.

Вирішальну роль у складі конструкційних сталей відводиться вуглецю. Він збільшує міцність сталі, але знижує пластичність та в'язкість, підвищує поріг холодноламкості. Тому його вміст регламентовано та рідко перебільшує 0,6 %.

Впливають на конструкційну міцність і легуючі елементи. Підвищення конструкційної міцності при легуванні пов'язано із забезпеченням високої прогартованості, зменшенням критичної швидкості гартування.

Використання термічної обробки зміцнення поліпшує комплекс механічних властивостей.

Металургійна якість впливає на конструкційну міцність. Чиста сталь при одних і тих же властивостях на міцність має підвищені характеристики надійності.

### *Леговані сталі*

Елементи, які спеціально вводяться у сталь у визначених концентраціях із цілю зміни її будови та властивостей, називаються *легоючими елементами, а сталі – легованими*.

Вміст леуючих елементів може змінюватися в дуже широких межах: хром або нікель – 1% и більше процентів; ванадій, молибден, титан, ніобій – 0,1... 0,5%; також кремній та марганець – більше 1 %. При вмісті леуючих елементів до 0,1 % – мікролегуванням.

В конструкційних сталях легування відбувається з метою поліпшення механічних властивостей (міцність, пластичність). Крім того змінюються фізичні, хімічні, експлуатаційні властивості.

Леуючі елементи підвищують вартість сталі, тому їх використання повинно бути обґрунтованим.

### *Переваги легованих сталей:*

- особливості проявляються у термічно обробленому стані, тому виготовляються деталі, які піддаються термічній обробці;
- поліпшуванні леговані сталі мають підвищені показники опору пластичним деформаціям ( $\sigma_T$ );

- легуючі елементи стабілізують аустеніт, тому прогартованість легованих сталей вища;
- можливе використання більш «м'яких» охолоджувачів (знижується брак по гартувальним тріщинам та жолобленню), так як гальмується розпад аустеніту;
- підвищується запас в'язкості та опір холодноламкості, що призводить до підвищення надійності деталей машин.

*Недоліки:*

- піддаються незворотній відпускній крихкості II роду;
- у високолегованих сталях після гартування залишається аустеніт залишковий, який знижує твердість та опір втомленості, тому потребує додаткової обробки;
- схильні до дендритної ліквідації, так як швидкість дифузії легуючих елементів у залізі мала. Дендрити збіднюються, а границі – міждендритний матеріал – збагачується легуючим елементом. Утворюється стрічкова структура після кування та прокатування, неоднорідність властивостей вздовж та поперек деформування, тому необхідний дифузійний відпал.
- схильні до створення флокенів.

Флокени – світлі п'ятна на зломі у поперечному перерізі – дрібні тріщини з різною орієнтацією. Причина їх появи – виділення водню, що розчинився у сталі.

При швидкому охолодженні від 200° водень залишається у сталі, виділяючись із твердого розчину, визиває великий внутрішній тиск, який призводить до утворення флокенів.

Міри боротьби: зменшення вмісту водню при плавці та зниження швидкості охолодження в інтервалі флокеноутворення.

*Вплив елементів на поліморфізм заліза*

Всі елементи, які розчинюються у залізі, впливають на температурний інтервал існування його алотропічних модифікацій ( $A_3=911^\circ\text{C}$ ,  $A_4=1392^\circ\text{C}$ ).

В залежності від розташування елементів в періодичній системі та створення кристалічної ґратки легуючого елемента можливі варіанти взаємодії легуючого елемента із залізом. Їм відповідають і типи діаграм стану сплавів системи залізо – легуючий елемент (рис. 15.1)

Більшість елементів або підвищують  $A_4$  та понижують  $A_3$ , розширюючи існування  $\gamma$ -модифікації (рис.15.1.а), або знижують  $A_4$  та підвищують  $A_3$ , звужуючи область існування  $\gamma$ -модифікації (рис.15.1.б).

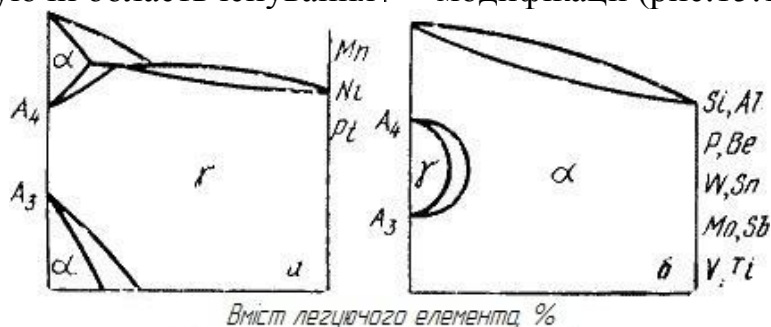


Рисунок 15.1. Схематичні діаграми стану Fe – легуючий елемент. а – для елементів, які розширюють область існування – модифікації; б – для елементів, які звужують область існування – модифікації

Надлишок визначеного вмісту марганцю, нікелю та інших елементів, які мають гранецентровану кубічну гратку, – стан існує як стабільний від кімнатної температури до температури плавлення, такі сплави на основі заліза називаються аустенітними.

При вмісті ванадію, молібдену, кремнію та інших елементів, які мають об'ємно-центровану кубічну гратку з вмістом вище визначеної межі стійким при усіх температурах являється феритний стан. Такі сплави на основі заліза називаються феритними (практично без вуглецеві).

Аустенітні та феритні сплави не мають перетворень при нагріві та охолодженні

#### *Вплив легуючих елементів на перетворення у сталі*

##### *Вплив легуючих елементів на перетворення у сталі перліту в аустеніт.*

Легуючі елементи в більшості випадків розчиняються в аустеніті, утворюючи тверді розчини заміщення. Леговані сталі потребують більш високих температур нагріву та більш довготривалої витримки для отримання однорідного аустеніту, в якому розчинюються карбіди легуючих елементів.

Мала схильність до росту аустенітного зерна – технологічна перевага більшості легованих сталей. Усі легуючі елементи знижують схильність аустенітного зерна до росту, крім марганцю та бору. Елементи, які не утворюють карбідів (кремній, кобальт, мідь, нікель), слабо впливають на ріст зерна. Карбідоутворюючі елементи (хром, молібден, вольфрам, ванадій, титан) сильно подрібнюють зерно.

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

За впливом на стійкість аустеніту та на форму С-подібних кривих легуючі елементи поділяються на дві групи.

Елементи, які розчинюються у фериті та цементиті (кобальт, кремній, алюміній, мідь, нікель), надають лише кількісний вплив на процеси перетворення. гальмують перетворення (більшість елементів), або прискорюють його (кобальт) (рис.17.2 а)



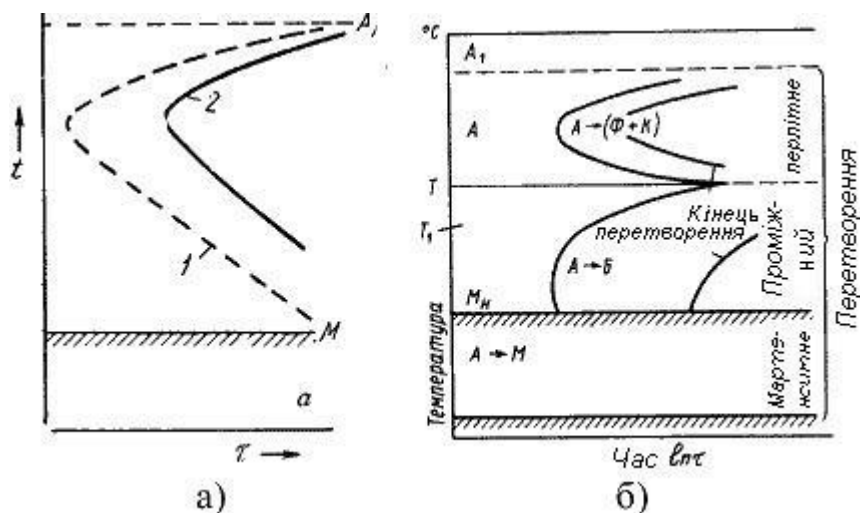


Рисунок 15.2. Вплив легуючих елементів на перетворення переохолодженого аустеніту: а – не карбідоутворюючі елементи; б — карбідоутворюючі елементи

Карбідоутворюючі елементи (хром, молібден, вольфрам, ванадій, титан) вносять і якісні зміни в кінетику ізотермічного перетворення. При різних температурах вони по різному впливають на швидкість розпаду аустеніту: при температурі 700...500°C — гальмують перетворення у перлітній області, при температурі 500...400°C (утворення трооститу) – дуже сильно уповільнюють перетворення, при температурі 400...300°C (проміжне перетворення) – уповільнює перетворення аустеніту в бейніт, але менше, ніж утворення трооститу. Це відбивається на формі С-подібних кривих: спостерігається два максимуму швидкості ізотермічного розпаду, розділених областю високої стійкості переохолодженого аустеніту (рис. 17.2 б)

Температура максимальної стійкості аустеніту залежить від карбідоутворюючого елементу: хром – 400...500°C, вольфрам – 500...550°C, молібден – 550...575°C, ванадій – 575...600°C. Час максимальної стійкості при заданій температурі зростає із збільшенням ступеня легованості (дуже великий для високолегованих сталей).

Важливим являється гальмування швидкості розпаду. Це сприяє збільшенню глибини прогартуваності та переохолодженню аустеніту до інтервалу мартенситного перетворення при повільному охолодженні (мастило, повітря). Збільшує прогартуваність хром, нікель, молібден, марганець, особливо при сумісному легуванні.

#### *Вплив легуючих елементів на мартенситне перетворення*

При нагріві більшості легуючих елементів розчинюються в аустеніті. Карбіди титану та ніобію не розчинюються. Ці карбіди гальмують ріст аустенітного зерна при нагріві і забезпечують отримання дрібногольчатого мартенситу при гартуванні. Інші карбідоутворюючі елементи, а також не карбідоутворюючі, при нагріві розчиняються в аустеніті і при гартуванні утворюють легований мартенсит.

Деякі легуючі елементи (алюміній, кобальт) підвищують мартенситну точку та зменшують кількість залишкового аустеніту, інші не впливають на цю точку (кремній). Більшість елементів понижують мартенситну точку та збільшують кількість залишкового аустеніту.

*Вплив легуючих елементів на перетворення при відпуску.*

Легуючі елементи гальмують процес розпаду мартенситу: нікель, марганець – незначно; хром, молібден, кремній – відчутно. Це пов'язано з тим, що процеси при відпуску мають дифузійний характер, а більшість елементів гальмують карбідне перетворення. Леговані сталі зберігають структуру мартенситу відпуску до температури 400...500°C. Так як у легованих сталях зберігається значна кількість залишкового аустеніту, то перетворення його у мартенсит відпуску сприяє збереженню твердості до високих температур.

Таким чином, леговані сталі при відпуску нагрівають до більш високих температур або збільшують витримку.

*Класифікація легованих сталей*

Сталі класифікуються за такими ознаками .

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

- перлітний;
- мартенситний;
- аустенітний

Сталі перлітного класу характеризуються малим вмістом легуючих елементів; мартенситного – більш значним вмістом; аустенітного – високим вмістом легуючих елементів.

Класифікація пов'язана із кінетикою розпаду аустеніту. Діаграми ізотермічного розпаду аустеніту для сталей різних класів представлені на рис. 15.3

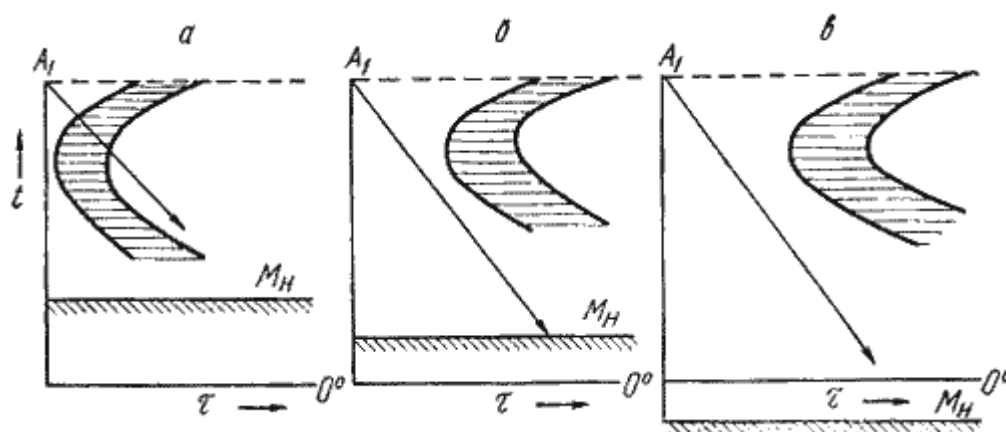


Рисунок 15.3. Діаграми ізотермічного розпаду аустеніту для сталей перлітного (а), мартенситного (б) и аустенітного (в) класів

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

Для сталей перлітного класу крива швидкості охолодження на повітрі перетинає область перлітного розпаду (рис. 15.3.а), тому утворюються структури перліту, сорбіту або трооститу.

Для сталей мартенситного класу область перлітного розпаду зсунута вправо (рис.15.3 б). Охолодження на повітрі не призводить до перетворення у перлітній області. Аустеніт переохолоджується до температури мартенситного перетворення і відбувається утворення мартенситу.

Для сталей аустенітного класу збільшення вмісту вуглецю та легуючих елементів зсуває вправо область перлітного розпаду, а також понижує мартенситну точку, переводячи її в область від'ємних температур (рис. 17.3.в). Сталь охолоджується на повітрі до кімнатної температури, зберігаючи аустенітний стан.

2. По степені легування (за вмістом легуючих елементів):

- низьколеговані – 2,5...5 %;
- середньолеговані – до 10 %;
- високолеговані – більше 10%.

3. За числом легуючих елементів:

- трикомпонентні (залізо, вуглець, легуючий елемент);
- чотирьохкомпонентні (залізо, вуглець, два легуючих елемента) і

таке інше.

4. За складом:

нікелеві, хромисті, хромонікелеві, хромонікельмолібденові і таке інше (ознака – наявність тих або інших легуючих елементів).

5. За призначенням:

- конструкційні;
- інструментальні (ріжучі, вимірювальні, штампові);
- сталі та сплави з особливими властивостями (різко позначеними властивостями – нержавіючі, жароміцні та термостійкі, зносостійкі, з особливими магнітними та електричними властивостями).

*Цементуємі та полішуванні сталі*

*Цементуємі сталі.*

Використовуються для виготовлення деталей, які працюють на знос та піддаються дії змінних та ударних навантажень. Деталі повинні поєднувати високу поверхневу міцність та твердість та достатню в'язкість в середині.

Цементациї піддаються низько вуглецеві сталі із вмістом вуглецю до 0,25%, що дозволяє отримати в'язке осердя. Для деталей, які працюють з великими навантаженнями, використовують сталі з підвищеним вмістом вуглецю (до 0,35 %).

З підвищенням вмісту вуглецю міцність осердя збільшується, а в'язкість знижується. Деталі піддаються ціануванню або нітроцементациї.

Цементуємі вуглецеві сталі 15, 20, 25 використовуються для виготовлення деталей невеликого розміру, які працюють в умовах зношування при малих навантаженнях (втулки, валики, осі, шпильки та інші). Твердість на поверхні складає 60...64 HRC, осердя залишається м'яким.

Цементуємі леговані сталі використовують для грубих та важко навантажених деталей, для яких необхідно мати, крім високої твердості поверхні, достатньо міцне осердя (кулачкові муфти, поршні, пальці, втулки).

Хромисті сталі 15X, 20X використовуються для виготовлення невеликих виробів простої форми, цементуються на глибину  $h = 1 \dots 1,5$  мм. При гартуванні з охолодженням у мастилі, яке виконується після цементації, осердя має бейнітну будову. Внаслідок цього хромисті сталі володіють високою міцністю при дещо меншій пластичності в осередді та більшою міцністю у цементованому шарі.

Додаткове легування хромистих сталей ванадієм (сталь 15XФ), сприяє отриманню дрібнішого зерна, що поліпшує пластичність та в'язкість.

Нікель збільшує глибину цементованого шару, перешкоджає росту зерна та утворенню грубої цементитної сітки, позитивно впливає на властивості осердя. Хромонікелеві сталі 20ХН, 12ХН3А використовують для виготовлення деталей середніх та великих розмірів, які працюють на знос при великих навантаженнях (зубчасті колеса, шліцьові вали). Одночасне легування хромом та нікелем, який розчинюється у фериті, збільшує міцність, пластичність та в'язкість осердя та цементованого шару. Сталі мало чутливі до перегріву. Більша стійкість переохолодженого аустеніту в області перлітного та проміжного перетворень забезпечує високу прогартованість хромонікелевих сталей і дозволяє проводити гартування грубих деталей з охолодженням у мастилі та на повітрі.

Сталі, додатково леговані вольфрамом або молібденом (18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА), використовують для виготовлення грубих важко навантажених деталей. Ці сталі являються кращими конструкційними сталями, але дефіцитність нікелю обмежує їх використання.

Хромомарганцеві сталі використовують замість дорогих хромонікелевих, хоча ці сталі менш стійкі до перегріву і мають меншу в'язкість. Введення невеликої кількості титану (0,06...0,12 %) зменшує схильність сталі до перегріву (сталі 18ХГТ, 30ХГТ).

З метою підвищення міцності легують бором (0,001...0,005 %) 20ХГР, але бор сприяє росту зерна при нагріві.

#### *Поліпшуванні сталі.*

Сталі, які піддають термічному поліпшенню, широко використовують для виготовлення різних деталей, які працюють у складних напружених умовах (під дією різних навантажень, у тому числі змінних та динамічних). Сталі набувають структуру сорбіту, добре сприймають ударні навантаження. Важливе значення має опір крихкому руйнуванню. Поліпшенню піддаються середньовуглецеві сталі із вмістом вуглецю 0,30...0,50 %.

Поліпшуванні вуглецеві сталі 35, 40, 45 дешеві, із них виготовляють деталі, які випробовують невеличкі навантаження (сталь 35), та деталі, які потребують підвищеної міцності (сталі 40, 45). Але термічне поліпшення цих сталей

забезпечує високий комплекс механічних властивостей тільки в деталях невеликого перетину, так як сталі мають низьку прогартованість. Сталі цієї групи можна використовувати і у нормалізованому стані.

Деталі, що потребують високої поверхневої твердості при в'язкому осерді (зубчаті колеса, вали, осі, втулки), піддаються поверхневому гартуванню струмами високої частоти. Для зняття напружень проводять низький відпуск.

#### *Поліпшуванні леговані сталі.*

Поліпшуванні леговані сталі використовують для грубих та більш навантажених відповідальних деталей. Сталі володіють кращим комплексом механічних властивостей: вища міцність при збереженні достатньої в'язкості та пластичності, нижчий поріг холодноламкості.

Хромисті сталі 30Х, 40Х, 50Х використовуються для виготовлення невеликих середньонавантажених деталей. Ці сталі схильні до відпускнуї крихкості, тому після високого відпуску охолодження повинно бути швидким.

Підвищення прогартованості досягається мікролегуванням бором (35ХР). Введення у сталь ванадію значно збільшує в'язкість (40ХФА).

Хромокремністі (33ХС) та хромокремніймарганцовісті (хромансил) (25ХГСА) сталі володіють високою міцністю та помірною в'язкістю. Сталі хромансили добре зварюються, з них виготовляють стикові зварені вузли, кронштейни, деталі для кріплення та інші. Широко використовуються в автомобілебудуванні та авіації.

Хромонікелеві сталі 45ХН, 30ХН3А відзначаються добрим прогартуванням, міцністю та в'язкістю, але чутливі до зворотної відпускнуї крихкості. Для зменшення чутливості вводять молібден або вольфрам. Ванадій сприяє подрібненню зерна.

Сталі 36Х2Н2МФА, 38ХН3ВА і інші володіють кращими властивостями, відносяться до мартенситного класу, слабо знеміцнюються при нагріві до 300...400 °С. з них виготовляються вали та ротори турбін, важко навантажені деталі редукторів та компресорів.

#### *Високоміцні, пружинні, шарикопідшипникові, зносостійкі та автоматні сталі*

##### *Високоміцні сталі.*

Високоміцними, називають сталі, які мають межу міцності більшу за 1500 МПа, яка досягається підбором хімічного складу та оптимальної термічної обробки.

Такий рівень міцності можна отримати у середньовуглецевих легованих сталях, (30ХГСН2А, 40ХН2МА), застосовуючи гартування з низьким відпуском (при температурі 200...250°C) або ізотермічне гартування з утворенням структури нижнього бейніту.

Після ізотермічного гартування середньовуглецевих легованих сталей вони мають дещо меншу міцність, але більшу пластичність та в'язкість. Тому вони більш надійні у роботі, ніж загартовані та низько відпущені.

При високому рівні міцності загартовані та низько відпущені середньо вуглецеві сталі є більш чутливі до концентраторів напружень, схильні до

крихкого руйнування, тому їх рекомендується використовувати для роботи в умовах повільного навантаження.

Легування вольфрамом, молібденом, ванадієм ускладнює процеси знеміцнення при температурі 200...300 °С, сприяє утворенню дрібного зерна, понижує поріг холодноламкості, підвищує опір крихкому руйнуванню.

Висока міцність може бути отримана і за рахунок термомеханічної обробки.

Сталі 30ХГСА, 38ХНЗМА після низькотемпературної термомеханічної обробки мають межу міцності 2800 МПа, відносне видовження та ударна в'язкість збільшується у два рази у порівнянні із звичайною термічною обробкою. Це пов'язано з тим, що часткове виділення вуглецю з аустеніту при деформації полегшує рухомість дислокацій всередині кристалів мартенситу, що сприяє збільшенню пластичності.

Мартенситно-старіючі сталі (03Н18К9М5Т, 04Х11Н9М2Д2ТЮ) мають перевагу за конструкційною міцністю та технологічністю середньовуглецеві леговані сталі. Вони володіють невисокою чутливістю до надрізам, високим опором крихкому руйнуванню та низьким порогом холодноламкості при міцності біля 2000 МПа.

Мартенситно-старіючі сталі являють собою без вуглецеві сплави заліза з нікелем (8..25 %), додатково леговані кобальтом, молібденом, титаном, алюмінієм, хромом та іншими елементами. Завдяки високому вмісту нікелю, кобальту та малій концентрації вуглецю у результаті гартування у воді або на повітрі фіксується високопластичний, але низькоміцний залізонікелевий мартенсит, пересичений легуючими елементами. Основне зміцнення відбувається у процесі старіння при температурі 450...550 °С за рахунок виділення із мартенситної матриці когерентно з нею пов'язаних дрібнодисперсних фаз. Мартенситно-старіючі сталі володіють високою конструкційною міцністю в інтервалі температур від криогенних до 500 °С і рекомендуються для виготовлення корпусів ракетних двигунів, стовбурів артилерійської і стрілецької зброї, корпусів підводних човнів, батискафів, високонавантажених дисків турбомашин, зубчатих коліс, шпindelі, черв'яків і т. ін.

#### *Пружинні сталі.*

Пружини, ресори та інші пружні елементи є найважливішими деталями різних машин та механізмів. У роботі вони випробовують багато чисельні змінні навантаження. Під дією навантаження пружини та ресори пружньо деформуються, а після припинення дії навантаження відновлюють свою початкову форму та розміри. Особливістю роботи є те, що при значних статичних та ударних навантаженнях вони повинні випробовувати тільки пружні деформації, залишкова деформація не допустима. Основні вимоги до пружинних сталей – забезпечення високих значень межі пружності, текучості, витривалості, а також необхідної пластичності та опору крихкому руйнуванню, стійкості до релаксації напружень.

Пружини працюють в області пружних деформацій, коли між діючими напруженнями та деформацією спостерігається пропорційність. При довготривалій роботі пропорційність порушується із-за переходу частини

енергії пружної деформації в енергію пластичної деформації. Напруження при цьому понижуються.

Самовільне пониження напружень при постійній сумарній деформації називається релаксацією напружень.

Релаксація призводить до пониження пружності та надійності роботи пружин.

Пружини виготовляються з вуглецевих (65, 70) та легованих (60С2, 50ХГС, 60С2ХФА, 55ХГР) конструкційних сталей.

Для зміцнення пружних вуглецевих сталей використовують холодну пластичну деформацію за рахунок дробоструменевої та гідроабразивної обробок, в процесі яких у поверхневому шарі деталей наводяться залишкові напруження стиску.

Підвищенні значення межі пружності отримують після гартування із середнім відпуском при температурі 400...480 °С.

Для сталей, які використовують для пружин, необхідно забезпечити наскрізну прогартуваність, аби отримати структуру трооститу по всьому перетину.

Пружні та міцності властивості пружинних сталей досягаються при ізотермічному гартуванні.

Пружинні сталі легують елементами, які підвищують межу пружності – кремнієм, марганцем, хромом, вольфрамом, ванадієм, бором.

З метою підвищення втомленої міцності не допускається обезвуглецювання при нагріві під гартування та є необхідною висока якість поверхні.

Пружини та інші елементи спеціального призначення виготовляють з високохромистих мартенситних (30Х13), мартенситно-старіючих (03Х12Н10Д2Т), аустенітних нержавіючих (12Х18Н10Т), аустеніто-мартенситних (09Х15Н8Ю), швидкоріжучих (Р18) та інших сталей і сплавів.

#### Шарикопідшипникові сталі.

Піддаються дії високих навантажень змінного характеру. Основними вимогами є висока міцність та зносостійкість, висока межа витривалості, відсутність концентраторів напружень, неметалевих включень, порожнин, ліквацій.

Шарикопідшипникові сталі характеризуються високим вмістом вуглецю (біля 1 %) и наявністю хрому (ШХ9, ШХ15), що після гартування забезпечує структуру мартенсит плюс карбіди, високої твердості, зносостійкості, необхідної прогартуваності.

Подальше збільшення прогартуваності досягається додатковим легуванням марганцем, кремнієм (ШХ15СГ).

Термічна обробка включає є відпал, гартування та відпуск. Відпал проводять після кування для зниження твердості та підготовки структури до гартування. Температура гартування складає 790...880 °С залежно від масивності деталей. Охолодження – у маслі (кільця, ролики), у водному розчині соди або солі (кульки). Відпуск сталі проводять при температурі 150...170°С протягом 1...2 годин. Забезпечується твердість 62...66 НРС.

Із сталі ШХ9 виготовляють кульки та ролики невеликих розмірів, із сталі ШХ15 – більш крупні.

Деталі підшипників кочення, які випробовують великі динамічні навантаження (підшипники прокатних станів), виготовляють із сталей 20Х2Н4А та 18ХГТ з наступною глибокою цементацією на глибину 5...10 мм. Для деталей

підшипників, які працюють в азотній кислоті та інших агресивних середовищах, використовують сталь 95X18.

*Сталі для виробів, які працюють при низьких температурах*, необхідно використовувати сталі з пониженим порогом холодноламкості. Особливо сильно понижені температурні пороги холодноламкості у сталях які містять нікель. Ефективними матеріалами є низьколеговані маловуглецеві сталі, які добре зварюються.

Для забезпечення високого комплексу механічних властивостей деталей машин використовуються маловуглецеві сталі, леговані елементами які сприяють дисперсійному зміцненню та утворенню дрібнозернистої структури після термічної обробки, 10XСНД, 15Г2СФ, 12ГН2МФАЮ.

Для роботи при над низьких температурах використовують криогенні сталі та сплави для виготовлення ємкостей для зберігання та перевезення зріджених газів, які мають дуже низьку температуру кипіння (кисень – –183 °С, водень – –253 °С). Основними матеріалами для роботи у подібних умовах є аустенітні сталі із підвищеним вмістом нікелю 10X14Г14Н4Т, 10X18Н10Т, 03X20Н16АГ6.

#### *Зносостійкі сталі.*

Для роботи в умовах зношування, які супроводжуються великими питомими навантаженнями використовується високомарганцева сталь 110Г13Л, яка містить 1...1,4% вуглецю, 12...14 % марганцю. Сталь має аустенітну структуру і відносно низьку твердість (200...250 НВ). В процесі роботи, коли на деталь діють високі навантаження, які визивають в матеріалі напруження, що перебільшують межу текучості, відбувається інтенсивне наклепування сталі і росте її твердість та зносостійкість. При цьому сталь зберігає високу в'язкість. Завдяки цим властивостям сталь широко використовується для виготовлення корпусів шарових млинів, щок каменедробарок, хрестовин рельс, гусеничних траків, козирків землечерпалок.

Схильність до інтенсивного наклепу являється характерною особливістю сталей аустенітного класу.

#### *Автоматні сталі.*

Автоматними називають сталі, які володіють підвищеною оброблюваністю різанням.

Ефективним металургійним заходом підвищення оброблюваності різанням є введення у сталь сірки, селену, телуру, кальцію, які змінюють склад неметалевих включень, а також свинцю, який утворює особисті включення.

Автоматні сталі А12, А20 з підвищеним вмістом сірки та фосфору використовуються для виготовлення малонавантажених деталей на верстатах автоматах (болти, гвинти, гайки, дрібні деталі машин до шиття, текстильних, рахункових та інших машин). Ці сталі володіють кращою оброблюваністю різанням, поверхня деталі після обробки чиста та рівенька. Зносостійкість може бути підвищена цементацією та гартуванням.

Сталі А30 и А40Г призначені для деталей, які випробовують більш високі навантаження.

У автоматних сталях, які містять свинець, (АС11, АС40), підвищується стійкість інструменту у 1...3 рази та швидкість різання на 25...50 %.



Леговані хромисті та хромонікелеві сталі із присадкою свинцю та кальцію (АЦ45Г2, АСЦ30ХМ, АС20ХГНМ) використовують для виготовлення навантажених деталей в автомобільній та тракторній промисловості.

Автоматні сталі піддають дифузійному відпалу при температурі 1100...1150°C, для знешкодження ліквіації сірки.

## ЛЕКЦІЯ №16. КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ ТА ПОКРИТТЯ.

### Зміст

1. Конструкційні матеріали на основі міді
2. Конструкційні матеріали на основі алюмінію
3. Конструкційні матеріали на основі магнію
4. Конструкційні матеріали на основі титану

### Конспект лекції

Кольорові метали є найбільш дорогими та дефіцитними у порівнянні із чорними металами, але область їх використання у техніці безперервно розширюється. Це сплави на основі титану, алюмінію, магнію, міді. Перехід промисловості на сплави із легких металів значно розширює сировинну базу. Титан, алюміній, магній можна отримувати із бідних та складних за вмістом руд, відходів виробництва.

### 1 КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ МІДІ

Властивості міді: температура плавлення 1083°C, густина 8.96 г/см<sup>3</sup>, міцність 220 МПа, відносне видовження 60%, твердість НВ35. Мідь характеризує високі тепло – та електропровідність, пластичність і корозійна стійкість. За тепло – та електропровідністю мідь займає друге місце після срібла, але внаслідок її більшого практичного значення ці властивості прийнято вважати еталоном (100%), по відношенню до якого оцінюються інші метали.

Незважаючи на порівняно невелике розповсюдження міді в природі (0,0047%), вона відноситься до металів, відомих людині з далекої давнини. Цьому сприяло те, що мідь зустрічається в природі у вигляді самородків а також її легка відновлюваність з оксидів і карбонатів. Застосування людиною міді (мідний вік – 7...4 тис. до н.е.), а потім її сплавів (бронзовий вік – 4...1 тис. до н.е.) відіграло значну роль у розвитку матеріальної культури людської цивілізації.

В наш час приблизно половина міді, що виплавляється, використовується переважно в електротехнічній промисловості завдяки високій електропровідності, а половина – для виготовлення сплавів на її основі. Зберігаючи позитивні якості міді (високі тепло - та електропровідність, корозійну стійкість, пластичність та ін.), мідні сплави мають високі механічні, технологічні та експлуатаційні властивості.

Для легування мідних сплавів використовуються переважно такі елементи як олово, цинк, алюміній, кремній, марганець, нікель, берилій, свинець, залізо,

фосфор. В марках мідних сплавів ці елементи позначаються такими літерами: *Zn* – Ц; *Sn* – О; *Al* – А; *Si* – К; *Mn* – Мц; *Ni* – Н; *Be* – Б; *Pb* – С; *Fe* – Ж; *P* – Ф. Мідні сплави поділяються на такі основні групи – латуні, бронзи та мідно-нікелеві сплави.

### 1.1 Латуні

Латуні – це сплави, в яких основним легуючим елементом є цинк. Поділяються на подвійні (прості) та багатокомпонентні (леговані). Двокомпонентні латуні системи *Cu* – *Zn* зараховують до простих, а багатокомпонентні крім цинку містять ще й інші елементи, - до спеціальних. Технічне застосування мають латуні з вмістом цинку до 45%. З діаграми стану сплавів видно, що сплави з вмістом цинку до 39% є однофазними (твердий розчин  $\alpha$ -цинку в міді). Практично діаграма є каскадом з п'яти простих перитектичних діаграм.

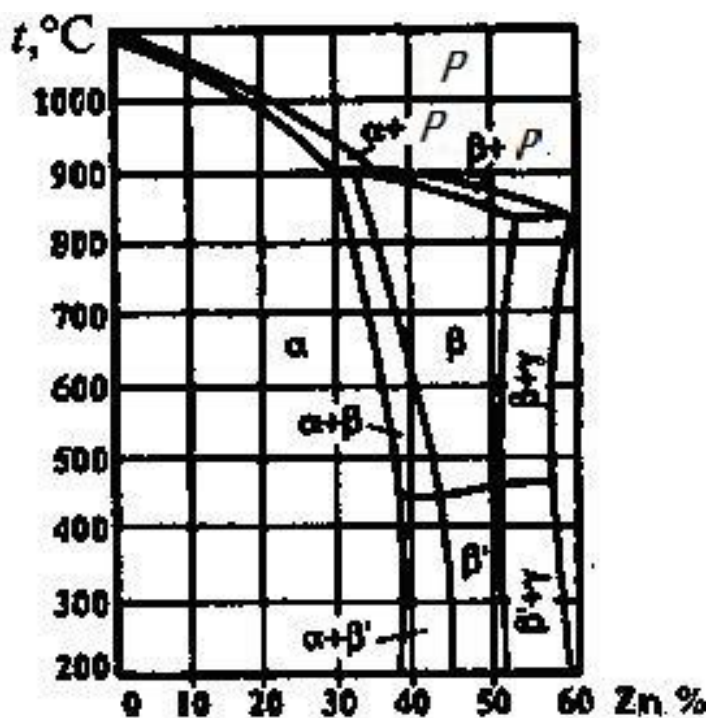


Рисунок 16.1. Діаграма стану мідь – цинк

Лінії ліквідус та солідус латуней розміщені близько одна від одної, отже, ці сплави не зазнають дендритної ліквідації і після холодної обробки тиском та рекристалізаційного відпалу,  $\alpha$ -латунь має низьку твердість і високу пластичність (найбільшу при 30...37% Zn). Ці властивості ( $G_b = 300$  МПа;  $\delta = 40\%$ ) зростають при зменшенні розмірів зерна.  $\beta$ -латунь твердіша (основа – хімічна сполука) і має меншу в'язкість ( $G_b = 400$  МПа;  $\delta = 7\%$ ). Співвідношення цих фаз і буде зумовлювати властивості деталі, виготовленої з латуні. Збільшення вмісту цинку в однофазній латуні здешевлює її, поліпшує оброблюваність різанням і здатність припрацьовуватись ті протистояти

стиранню. Водночас зменшує тепло- та електропровідність, які становлять 20...50% цих характеристик у міді.

Тому однофазні латуні випускають здебільшого у вигляді холоднокатаних напівфабрикатів: штаби, стрічок, дроту і листів, з яких методом високого витягання виготовляють радіаторні трубки, снарядні гільзи, сільфони, трубопроводи, а також деталі, що мають низьку твердість (шайби, втулки, ущільнюючі кільця). Після відпалу мають  $G_v = 250...350$  МПа  $\delta = 50...55\%$ .

Подвійні латуні маркуються літерою Л (латунь) і числом, яке показує середній вміст міді в сплаві (Л96, Л90, Л59 тощо). Решта в сплаві – цинк. Багатокомпонентні латуні, призначені для лиття, маркуються літерами Л (латунь), Ц – (цинк), далі число, що показує вміст цинку в процентах, за ним ставляться літери, які показують наявність того чи іншого легуючого елемента з вказівкою біля нього вмісту цього елемента в процентах. Наприклад, ЛЦ38Мц2С2 – латунь, яка містить 38% *Zn*, 2% *Mn*, 2% *Pb*, решта – мідь. Спеціальні латуні найчастіше двофазні  $\alpha + \beta'$ . Латуні у наклепаному стані, або з високими залишковими напруженнями із вмістом 20% *Zn* схильні до корозійного (сезонного) розтріскування в присутності вологи, кисню, аміаку. Для запобігання розтріскування, напівфабрикати з латуні відпалюють при температурі 250...650°C. а вироби з латуні при температурі 250...270°C.

Оброблювані тиском складні латуні маркують літерою Л, за якою ідуть літери, що позначають легуючі елементи, а за ними перші дві цифри показують вміст міді, а наступні вміст інших елементів (решта цинк), наприклад, марка ЛАНКМц 75-2-2,5-0,5-0,5 означає латунь з масовою часткою *Cu* – 75%; *Al* – 2%; *Ni* – 2,5%; *Si* – 0,5; *Mn* – 0,5%.

Латуні мають високі механічні властивості, добре оброблюються різанням і піддаються обробці тиском, литтям, мають високу корозійну стійкість у прісній та морській воді, високі антифрикційні властивості. Леговані латуні застосовують як для де формівних напівфабрикатів, так і у вигляді фасонних виливків. Використовують у суднобудуванні. Латуні з домішками олова (ЛО70-1) називають морськими.

## 1.2 Бронзи

Бронзи – це сплави міді зі всіма елементами крім цинку, який може входити до складу бронз, але не як основний легуючий елемент. Бронзи поділяються на дві групи – **олов'яні** та **безолов'яні**. В олов'яних бронзах основним легуючим елементом є олово. Подвійні олов'яні бронзи з 9...11% *Sn* (Бр.О10) мають високі антифрикційні властивості і є кращими підшипниковими сплавами. З них виготовляють також вінці зубчатих, черв'ячних коліс для механізмів відповідального призначення. Але внаслідок дороговизни і дефіцитності олова такі бронзи мають обмежене використання. При більшому вмісті олова сплави дуже крихкі.

Століттями застосовували машинну або гарматну бронзу з вмістом олова 9...12%; художню – 3...8%*Sn*; монетну – 4...5% *Sn*, а також бронзу для дзвонів з 20...25% *Sn*. Для економії олова його частково в бронзах замінюють цинком, свинцем, нікелем, фосфором. Такі бронзи дешевші і мають кращі механічні та

технологічні властивості, наприклад, оброблюваність різанням і тиском, корозійну стійкість, рідкотекучість. У легованих олов'яних бронзах вміст олова знаходиться в межах 3...6%.

Безолов'яні бронзи як основний легуючий елемент містять *Al*, *Pb*, *Be*, *Si*, *Mn* і їх називають відповідно алюмінієвими, свинцевими, берилієвими, кремнієвими, марганцевими. Такі бронзи мають високі механічні властивості (алюмінієві), корозійну стійкість, пластичність, теплостійкість (марганцеві), добрі ливарні властивості (кремнієві), міцність, твердість, зносостійкість (берилієві), високі антифрикційні властивості (свинцеві). Безолов'яні бронзи значно дешевші за олов'яні й мають досить широке застосування в промисловості для виготовлення труб, прутків, стрічок, зубчатих коліс, частин насосів і турбін, арматури та деталей хімічного машинобудування й суднобудування тощо.

Бронзи поділяються на деформовні та ливарні. Деформовні бронзи маркуються літерами Бр, після них вказують основні легуючі елементи, а за ними в такому ж самому порядку цифри, які вказують на вміст цих елементів (решта – мідь). Вміст міді як в деформовних так і в ливарних бронзах визначається за різницею від 100%. Наприклад, БрОЦС4-4-4 означає, що до складу цієї бронзи входить по 4% *Sn*, *Zn* і *Pb*, решта – *Cu*; а в бронзі БрАЖН10-4-4 міститься 10% *Al*, по 4% *Fe* та *Ni*, решта – *Cu*.

В ливарних бронзах вміст усіх компонентів у відсотках пишеться відразу після літер, що позначають ці компоненти. Наприклад, БрОЗЦ7С5Н1 означає, що до складу цієї бронзи входить 3% *Sn*, 7% *Zn*, 5% *Pb*, 1% *Ni* решта – *Cu*.

### 1.3 Мідно-нікелеві сплави

Мідно-нікелеві сплави, до яких відносять **мельхіор**, **нейзильбер** та **куніаль**. Ці сплави мають гарні механічні властивості, високу корозійну стійкість, добре обробляються тиском у гарячому та холодному станах. Мельхіори МНЖМц 30-1-1, МН 19 використовують у ювелірній промисловості, з них виготовляють столові прилади – ножі, виделки тощо.

Нейзильбери містять до 35% *Ni* і до 45% *Zn* (наприклад МНЦ 15-20), вони характеризуються високою міцністю, мають красивий сріблястий колір. Використовують цей сплав для виготовлення деталей в електротехніці, ЕОМ, телевізійній техніці, медицині, побутового посуду тощо.

Куніалями називають сплави міді з нікелем та алюмінієм (МНА 13-3, МНА 6-1,5). Вони мають високі механічні властивості, добру корозійну стійкість у воді. Використовують їх у машинобудуванні для виготовлення пружин та спеціальних деталей в електротехніці.

## 2 КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ

Властивості алюмінію: температура плавлення  $660^{\circ}\text{C}$ , густина  $2,7 \text{ г/см}^3$ , міцність  $50\text{...}60 \text{ МН/м}^2$ , твердість  $\text{HB}170 \text{ МПа}$ , відносне видовження до 50%. За розповсюдженням у природі (8.8% за масою) алюміній займає третє місце після кисню та кремнію і перше – серед металів.

Маючи високу електропровідність, алюміній широко застосовується в електротехнічній промисловості. Як конструкційний матеріал використовуються сплави алюмінію з такими елементами як кремній, мідь, марганець, магній, цинк, літій, берилій. Основні позитивні якості алюмінієвих сплавів – це невелика густина, високі електро – та теплопровідність, корозійна стійкість, висока питома міцність.

За способом виробництва виробів з алюмінієвих сплавів останні можна поділити на дві групи: ливарні для фасонних виливків та деформовні (у т.ч. спечені) для виготовлення напівфабрикатів (листів, плит, труб, профілів, дроту, поковок) шляхом деформації (прокатування, кування, штампування тощо).

## 2.1 Ливарні алюмінієві сплави

Ливарні алюмінієві сплави призначені для застосування в ливарному виробництві при виготовленні фасонних виливків, в приладо–, автомобіле–, суднобудуванні, авіації тощо. Серед алюмінієвих ливарних сплавів найбільше застосування отримали силуміни – сплави алюмінію з кремнієм

Силуміни охоплюють подвійні сплави системи  $Al - Si$  з вмістом до 11 - 13%  $Si$  і сплави більш складних систем:  $Al-Si-Mg$ ,  $Al-Si-Cu$ ,  $Al-Si-Mg-Cu$ .

Сплави цієї групи характеризуються добрими ливарними властивостями, порівняно високою корозійною стійкістю, високою щільністю (герметичністю виливків), середньою міцністю (180...260 МПа).

Структуру технічних силумінів складають твердий розчин кремнію, алюмінію і евтектика – суміш твердого розчину і практично чистого кремнію. За наявності інших елементів утворюються потрібні та складні евтектики. Ефективним способом підвищення механічних властивостей силумінів є подрібнення структурних складових методою модифікування. Воно полягає у введенні у розплавлений силумін хлористих і фтористих солей натрію.

Крім силумінів застосовуються також і сплави систем  $Al-Mg$ ,  $Al-Mg-Si$ , що мають високу корозійну стійкість і міцність, систем  $Al - Cu$ ,  $Al - Cu - Mn$ ,  $Al-Cu-Mg$ ,  $Al-Cu-Mg-Mn$  з високою міцністю і жаростійкістю але з гіршими технологічними властивостями ( ливарними), ніж силуміни.

За ДЕСТУ 2839 – 94 ливарні алюмінієві сплави поділяються на п'ять груп:

1. Сплави системи  $Al-Si-Mg$ , які маркуються літерами АК (А – алюміній, К – кремній) і цифрами, що вказують вміст кремнію у відсотках. Наприклад, ливарні алюмінієві сплави АК7, АК12 мають вміст кремнію відповідно 7 і 12%.

2. Сплави системи  $Al-Si-Cu$ , які маркуються літерами АКМ (А – алюміній, К – кремній, М – мідь) і цифрами, які вказують вміст кремнію й міді у відсотках, причому цифру ставлять одразу після відповідної літери. Якщо вміст відповідного компоненту  $\leq 1\%$ , то "1" не ставиться. Наприклад, АК5М, АК5М7 мають вміст кремнію 5% в обох сплавах і відповідно 1 і 7% міді.

3. Сплави системи  $Al-Cu$ , у яких маркування проводиться аналогічно. Приклад таких сплавів АМ5; АМ4,5Кд (літери "Кд" – означають кадмій).

4. Сплави системи *Al-Mg*. Приклад таких сплавів АМг4К1,5; АМг5К тощо (літери "Мг" – означають магній).

5. Сплави алюмінію з іншими компонентами (*Zn* – 3,5...12%, *Mg* – 1,5...2,0%, *Si* – 6...10%). Наприклад, АК7Ц9, АЦ4Мг тощо (літера "Ц" – означає цинк).

Збереглося також маркування ливарних алюмінієвих сплавів літерами АЛ (А – алюміній, Л – ливарний) і цифрами, що вказують тільки на порядковий номер у відповідному ГОСТі, наприклад, АЛ2, АЛ8, АЛ19 та ін.

### 2.3 Деформовні алюмінієві сплави

Деформовні алюмінієві сплави поділяються на такі, що не зміцнюються термічною обробкою і – зміцнюються. До першої групи відносяться подвійні сплави систем *Al-Mg* (АМг) і *Al-Mn* (АМц). Вони мають високу корозійну стійкість, добре зварюються; їх широко використовують в річковому та морському суднобудуванні, при виробництві ракет, гідролітаків, зварних ємностей, трубопроводів, цистерн, холодильників, дверей, віконних рам тощо.

До деформовних алюмінієвих сплавів, які зміцнюються термічною обробкою, відносяться:

**1. Дуралюміні** – сплави системи *Al-Cu-Mg*, в які додатково вводять марганець (0,4...1,8%) для підвищення корозійної стійкості і усунення шкідливого впливу заліза як постійної домішки внаслідок використання недостатньо чистого алюмінію при виготовленні сплавів. Дуралюмін (марки Д1, Д16) має високу міцність ( $\sigma_s = 400...550 \text{ МПа}$ ) і використовується для виготовлення деталей і елементів конструкцій середньої і підвищеної міцності (обшивки, шпангоути, нервюри, лонжерони літаків, кузови вантажних автомобілів тощо).

Винахідником дуралюмінію є вчений Вільм. Цей сплав має  $t_{\text{зак}}^{\circ} = 500^{\circ}\text{C}$ , охолоджується у воді, а потім відбуваються природні і штучні процеси старіння (рис.16.2).

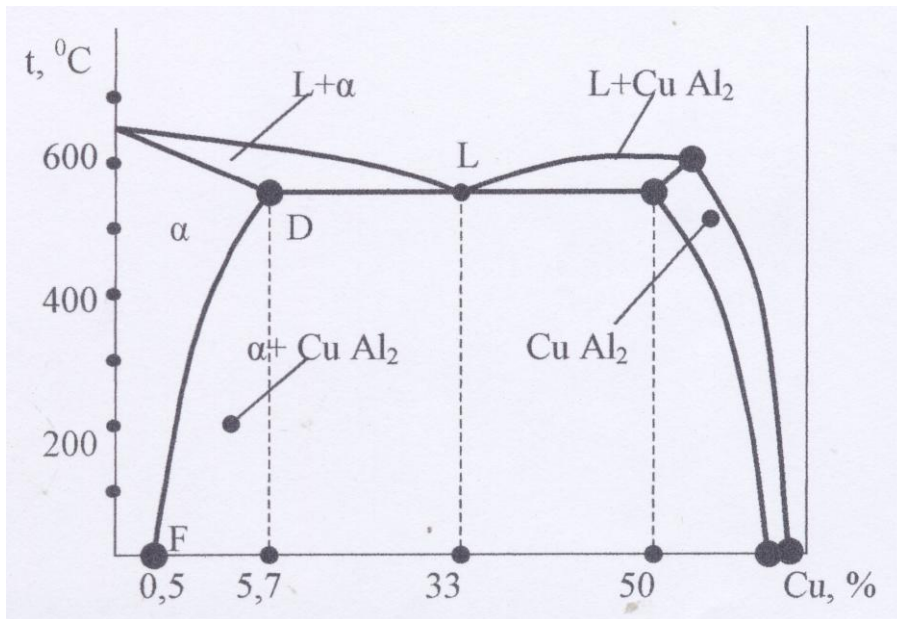


Рисунок 16.2 - Діаграма стану сплаву алюміній - мідь

Максимальна розчинність  $Cu$  в  $Al$  в твердому стані складає 5,7% при  $t=548^\circ C$ . При кімнатній температурі - 0,2-0,5%. Це вказує на те, що сплави, обмежені лінією  $DF$ , можуть термічно оброблятися і зміцнюватися. Зміцнення відбувається за рахунок розпаду термодинамічно нестійкого пересиченого  $\alpha$  - розчину  $Cu$  в  $Al$ . Шляхом дифузії усередині зерен  $\alpha$  - твердого розчину утворюються зміцнені ділянки, збагачені  $Cu$  (зони Гіне - Престона). Крім того, в сплаві виникають дисперсні частинки надмірної фази  $CuAl_2$  (що зміцнює). Цей процес називається старінням (рис. 16). Старіння може бути штучним і природним (кімнатна температура).

При природному старінні  $\sigma_B$  настає через 4-5 діб. В інкубаційний період загартовані деталі можна піддавати різним технічним операціям (заклепка, гнучка). Швидкість старіння залежить від температури. При  $50^\circ C$  загартований стан стійкий. Якщо недовго витримувати природно постарений сплав  $Al$  при температурі  $200-250^\circ C$ , то він розміцнюється і набуває властивостей, характерних для свіжозагартованого стану, набуваючи здатності до природного старіння. Це «повернення».

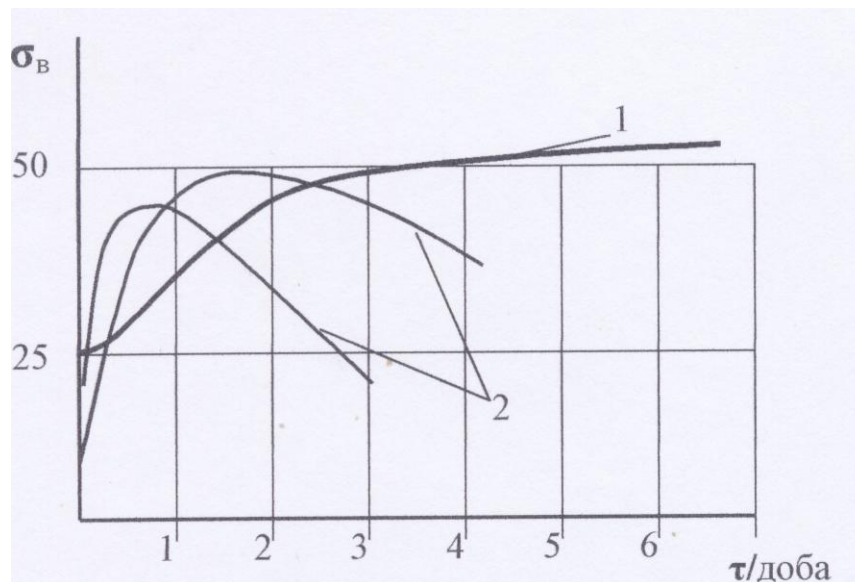


Рисунок 16.3 - Графік старіння дюралюмінію:  
1 - природне старіння; 2 - штучне старіння.

Паяння і зварювання дюралюмінію не створюють рівномірного з основним металом шва. Тому для не рознімного з'єднання деталей з дюралюмінію переважають заклепки. Заклепки також виготовляють з дюралюмінію, причому пластичність загартованих заклепок із сплаву Д1 зберігається лише 2 години, а із сплаву Д16 – 20 хвилин. Тому для заклепок використовують сплав Д18, в якому завдяки меншому вмісту міді та магнію пластичність зберігається після старіння.

2. **Сплави авіаль** (марок АВ) системи *Al-Cu-Mg-Mn* поступаються дюралюмінію міцністю, але більш пластичні в холодному та гарячому стані, добре зварюються й протистоять корозії. З цих сплавів виготовляють різноманітні напівфабрикати (листи, прутки, труби), із яких виготовляють деталі й елементи конструкцій, що несуть помірні навантаження.

3. **Високоміцні алюмінієві сплави** марок В95, В96 - це сплави системи *Al-Mg-Cu-Zn*. Мають високу міцність ( $\sigma_s = 500...700 \text{ МПа}$ ) і використовуються для виготовлення деталей високонавантажених конструкцій.

4. **Алюмінієві сплави для кування й штампування** марок АК4, АК6, АК8 системи *Al-Mg-Cu-Mn-Si*. Використовують для виготовлення деталей складної форми куванням і штампуванням при температурах 450...475 °С. Це крильчатки, фітинги, підмоторні рами, пояси лонжеронів, лопаті гвинтів вертольотів тощо.

Термічна обробка для підвищення міцності деформованих алюмінієвих сплавів полягає у загартуванні виробів із температур 495...525 °С в холодній воді з наступним старінням при 150...180 °С протягом 4...12 год.

До алюмінієвих деформованих сплавів відносять також **спечені сплави**, які виготовляють послідовним брикетуванням, спіканням й пресуванням порошків. До таких сплавів відносяться матеріали зі спеченої алюмінієвої пудри (САП) і спечені алюмінієві сплави (САС).



Матеріали САП складаються з алюмінію й оксиду алюмінію (6...22%). Вихідним матеріалом для одержання пудри алюмінію і його оксиду є порошок алюмінію, який виготовляють розпиленням розплавленого алюмінію. Порошок розмелюється в кульових млинах в атмосфері азоту з додаванням 2...3% кисню для окислення одержаної пудри алюмінію й утворення оксиду алюмінію  $Al_2O_3$ . Вміст оксиду алюмінію в суміші й розмір часток пудри залежить від тривалості розмелювання.

Матеріал САП характеризується високою міцністю, жароміцністю, корозійною стійкістю і термічною стабільністю властивостей. САП добре деформується в холодному й гарячому стані, легко оброблюється різанням, задовільно зварюється. З цього матеріалу виготовляють листи, профілі, штамповані заготовки, труби, фольгу. З них виробляють деталі, які працюють тривалий час при температурах 300...500 °С: поршневі штоки, лопатки компресорів, лопаті турбін і вентиляторів в хімічній і нафтовій промисловості.

Спечені алюмінієві сплави САС виготовляють із порошків, одержаних розпиленням рідких алюмінієвих сплавів певних марок. Практичне значення мають спечені сплави з низьким коефіцієнтом лінійного розширення, близьким до коефіцієнта лінійного розширення сталі, наприклад, сплав САС-1 (2,5...30% Si, 5...7% Ni, решта - Al). Ці сплави замінюють більш важкі сталі при виготовленні окремих деталей приладів. Механічні властивості САС характеризуються досить високою міцністю ( $\sigma_s = 260$  МПа), твердістю (НВ1200 МПа) і низькою пластичністю ( $\delta = 1,0...1,5\%$ ). Цим методом одержують стандартні алюмінієві порошкові сплави Д16П, АК4П та ін. (П - порошковий). Порівняно з ливарними спечені сплави мають більш високу тривалу міцність при температурах 250...350 °С.

### 3 КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ МАГНІЮ

Властивості магнію: температура плавлення 651 °С, густина 1,74 г/см<sup>3</sup>, міцність  $\sigma_s = 15...200$  МПа, твердість НВ300...НВ360 МПа, відносне видовження  $\delta = 8...11,5\%$  (перші значення відносяться до литого магнію, другі - до деформованого). Розповсюдження в земній корі 1,87% за масою (третє місце серед конструкційних металів після заліза та алюмінію). Магнієві сплави поділяються на ливарні для виготовлення фасонних виливків та деформовні для виготовлення заготовок пресуванням, прокаткою, куванням, штампуванням.

Як легуючі елементи в магнієвих сплавах використовують алюміній (до 10%), цинк (до 6%), марганець (до 2,5%), цирконій (до 1,5%).

#### 3.1 Ливарні магнієві сплави

Ливарні магнієві сплави маркуються літерами МЛ і цифрою (порядковий номер), наприклад, МЛ2, МЛ5, МЛ10 та ін. Магнієві ливарні сплави придатні для усіх відомих способів лиття - в піщані, оболонкові форми, в кокілі, під тиском, за моделями, що виплавляються.

### 3.2 Деформовні магнієві сплави

Деформовні магнієві сплави маркуються літерами МА і цифрою (порядковий номер), наприклад, МА1, МА5, МА11 та ін.

Магнієві сплави придатні для роботи при низьких, нормальних та підвищених температурах. Завдяки малій густині ( $\gamma = 1,4...2 \text{ г/см}^3$ ), високій питомій міцності ( $\sigma_s/\gamma = 24$  проти 21 для алюмінієвих, 22 для титанових сплавів, 23 для сталі), здатності поглинати енергію удару і вібраційні коливання, відмінній оброблюваності різанням магнієві сплави широко використовуються в промисловості, передусім для зниження маси виробів, підвищення їх жорсткості. Вони застосовуються в автомобільній, тракторній промисловості (картери двигунів, коробки передач, барабани коліс та інші деталі), в електро- та радіотехніці (корпуси приладів, деталі електродвигунів), в оптичній промисловості (корпуси біноклів, фотоапаратів) та в багатьох інших галузях техніки. Основне обмеження в застосуванні магнієвих сплавів - понижена корозійна стійкість у деяких середовищах.

### 4 КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ТИТАНУ

Властивості титану: температура плавлення  $1672^\circ\text{C}$ , густина  $4,5 \text{ г/см}^3$ , міцність  $\sigma_s = 256 \text{ МПа}$ , відносне видовження  $\delta = 72\%$ , твердість  $HB$  до  $1000 \text{ МПа}$ . Розповсюдженість у земній корі  $0,57\%$  за масою, четверте місце серед конструкційних матеріалів (після заліза, алюмінію й магнію).

Титан сріблясто-білий легкий метал. Чистий іодидний титан, в якому сума домішків складає  $0,05...0,1\%$ , має модуль пружності  $112\,000 \text{ МПа}$ , межа міцності біля  $300 \text{ МПа}$ , відносне видовження  $65\%$ . Наявність домішків сильно впливає на властивості. Для технічного титану ВТ1, із сумарним вмістом домішків  $0,8\%$ , межа міцності складає  $650 \text{ МПа}$ , а відносне видовження –  $20\%$ .

Легкість, висока міцність в інтервалі температур від  $-250^\circ\text{C}$  до помірно високих ( $300...600^\circ\text{C}$ ), відмінна корозійна стійкість забезпечують титановим сплавам широке застосування в багатьох галузях промисловості. Для виготовлення сплавів титан легують алюмінієм (до  $8\%$ ), молібденом (до  $8\%$ ), марганцем (до  $2\%$ ), хромом (до  $11\%$ ), оловом (до  $3\%$ ), ванадієм (до  $6\%$ ), залізом (до  $2\%$ ), цирконієм (до  $12\%$ ), ніобієм (до  $2\%$ ). Титан легують для покращання механічних властивостей, інколи - для підвищення корозійної стійкості (паладієм до  $0,2\%$ ). Більшість титанових сплавів піддаються термічній і хіміко-термічній обробці.

При температурі  $882^\circ\text{C}$  титан випробовує поліморфне перетворення, – титан із гексагональною ґраткою переходить у – титан з об'ємно-центрованою кубічною ґраткою. Наявність поліморфізму у титана створює передумови для поліпшення властивостей титанових сплавів за допомогою термічної обробки.

Титан має низьку теплопровідність. При нормальній температурі володіє високою корозійною стійкістю у атмосфері, у воді, в органічних та неорганічних кислотах (не стійкий у плавиковій, міцних сірчаній та азотній кислотах), завдяки тому, що на повітрі швидко покривається захисною плівкою щільних оксидів. При нагріві вище  $500^\circ\text{C}$  стає дуже активним елементом. Він

або розчинює майже усі речовини, які з ним доторкаються, або утворює з ними хімічні з'єднання.

Титанові сплави мають ряд переваг у порівнянні з іншими:

- поєднання високої міцності (МПа) із доброю пластичністю ( $\delta$ );
- невелика густина, забезпечує високу питому міцність;
- добра жароміцність, до 600...700°C;
- висока коррозійна стійкість у агресивних середовищах.

Однородні титанові сплави, не підпадають впливу старінню, використовують у криогенних установках до гелієвих температур.

У результаті легування титанових сплавів можна отримати необхідний комплекс властивостей. Легуючі елементи, які входять до складу промислових титанових сплавів, утворюють із титаном тверді розчини заміщення та змінюють температуру алотропічного перетворення. Вплив легуючих елементів на поліморфізм титану показано на рис. 16.1.

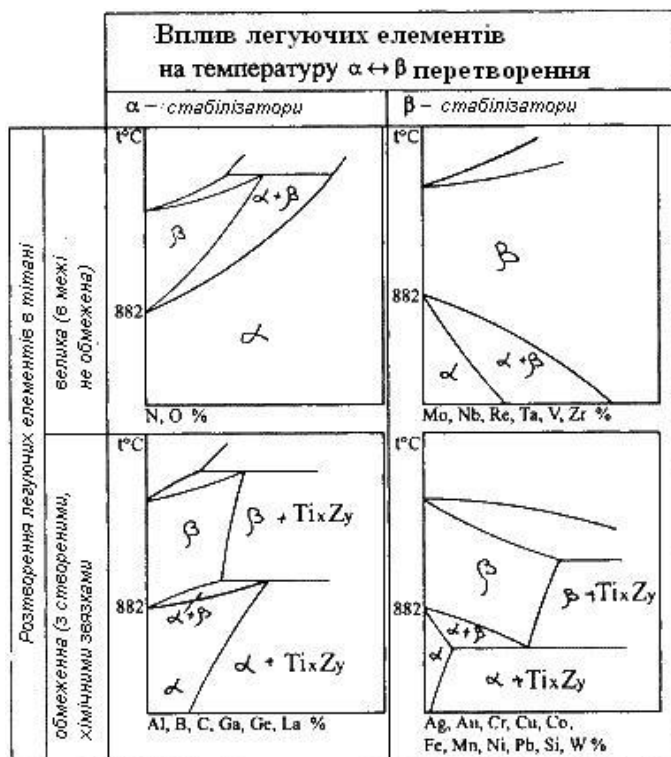


Рисунок 16.1. Вплив легуючих елементів на поліморфізм титану:

Елементи, які підвищують температуру перетворення, сприяє стабілізації — твердого розчину і називаються –стабілізаторами, це— алюміній, кисень, азот, вуглець.

Елементи, що понижують температуру перетворення, сприяють стабілізації – твердого розчину і називаються – стабілізаторами, це – молібден, ванадій, хром, залізо.

Крім  $\alpha$ - і  $\beta$ -стабілізаторів розрізняють нейтральні зміцнювачі: олово, цирконій, гафній.

Сплави на основі титану можна піддавати усім видам термічної обробки, хіміко-термічній та термомеханічній обробки. Зміцнення титанових сплавів досягається легуванням, наклепом, термічною обробкою.

Найчастіше титанові сплави легують алюмінієм, він збільшує міцність та жароміцність, зменшує шкідливий вплив водню, збільшує термічну стабільність. Для підвищення зносостійкості титанових сплавів їх піддають цементації або азотуванню.

Основним недоліком титанових сплавів є погана оброблюваність ріжучим інструментом.

Маркуються титанові сплави літерами VT і цифрою (порядковий номер), наприклад, VT5, VT20 та ін.

Деякі титанові сплави мають добрі ливарні властивості і застосовуються для виготовлення фасонних виливків (VT5Л, VT9Л, VT20Л та ін.).

Титанові сплави використовуються в авіації (обшивка літаків, диски й лопатки компресорів тощо), в ракетній техніці (корпуси двигунів, балони для стиснутих і скраплених газів, сопла тощо), в хімічній промисловості (обладнання для таких середовищ як хлор і його розчини, теплообмінників, які працюють в азотній кислоті), суднобудуванні (гребні гвинти, обшивки морських суден, підводних човнів, торпед), в енергомашинобудуванні (диски й лопаті стаціонарних турбін), в холодильній (криогенній) техніці та інших галузях промисловості.

## ЛЕКЦІЯ №17. НЕМЕТАЛІЧНІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

### Зміст

- 1 Типові термопластичні матеріали
- 2 Типові термореактивні матеріали
- 3 Гумові матеріали
- 4 Композиційні матеріали

### Конспект лекції

У промисловості широко застосовуються неметалічні матеріали: пластичні маси, композиційні й гумові матеріали, клеї, лакофарбні покриття, деревина, кераміка та ін.

Основною складовою неметалів є полімери - з'єднання, що складаються з макромолекул, схожих на витягнуті ланцюжки, окремі ланки яких є атомними угрупованнями (*мономери*).

Макромолекули можуть містити однакові або різні мономери, а іноді - блоки мономерів, що чергуються.

У зв'язку з цим матеріали називають *гомополімерами* (або полімерами), *сополімерами* і *блокосополімерами*.

За походженням полімери діляться на природні (натуральний каучук, азбест, целюлоза та ін.) і синтетичні (поліетилен, полістирол, поліаміди та ін.).

Низькомолекулярні речовини (етилен, стирол та ін.) переробляють в синтетичні полімери трьома способами:

- 1) полімеризацією,
- 2) поліконденсацією,
- 3) хімічним перетворенням.

Полімеризація є процесом з'єднання молекул (мономерів) без виділення побічних продуктів і зміни елементарного складу.

При поліконденсації з'єднуються молекули однакової або різної будови з виділенням побічних низькомолекулярних речовин.

Хімічні перетворення направлені на формування в полімерах нових структур і додання нових властивостей.

За хімічним складом полімери діляться на *органічні, елементоорганічні й неорганічні*. Основну масу складають органічні полімери: смоли і каучук. Їх молекулярний ланцюжок в основному утворений атомами вуглецю. Атоми різних елементів, які вводяться в основний ланцюг, додають полімерам специфічні властивості (кисень - гнучкість, фтор - хімічну стійкість, хлор - вогнестійкість).

До складу основного ланцюга *елементоорганічних* полімерів входять неорганічні атоми кремнію, титану, алюмінію та ін. До цього класу відносяться більш теплостійкі смоли, каучуки, але менш пружні й еластичні, ніж органічні полімери.

Основою *неорганічних полімерів* служать оксиди кремнію, алюмінію, магнію та ін. металів. До них відносяться силікатне скло, кераміка, слюда, азбест, графіт, що відрізняються щільністю, крихкістю і тривалою теплостійкістю.

*Полімери* характеризуються особливістю будови - наявністю ланцюгових молекул, в яких атоми уздовж ланцюга зв'язані міцними хімічними зв'язками. Між макромолекулами існують слабкіші електростатичні й водневі зв'язки, що забезпечує полімерам гнучкість. У деяких полімерів можуть існувати хімічні зв'язки і між макромолекулами, що різко знижує їх еластичність і підвищує міцність.

За структурою макромолекул полімери діляться на лінійні або ланцюгоподібні, розгалужені, стрічкові, просторові, паркетні. Лінійні полімери (поліетилен, поліамізин) відрізняються еластичністю, великою щільністю укладання макромолекул.

Розгалужені полімери (поліізобутилен і різні сополімери) володіють меншою щільністю, менш міцні, більш розчинні і легко плавляться.

Різновидом просторового полімеру є, наприклад, графіт з пластинчастою або паркетною структурою. За фазовим складом полімери аморфні й кристалічні. Перші мають невисоку міцність, але хорошу еластичність, другі можуть мати просторові решітки кристалів. Як правило, співіснують аморфна і кристалічна сфери. Остання додає полімерам теплостійкість, жорсткість і міцність. Відношення об'єму, займаного кристалічною фазою, до загального об'єму полімера, називають ступенем кристалічності.

За поведінкою при нагріві полімери діляться на *термопластичні* й *терморективні*. Термопластичні полімери при підвищених температурах розм'якшуються, а при знижених - тверднуть. Їх можна переробляти у виробі неодноразово, структура полімерів лінійна або розгалужена. Терморективні полімери на першому етапі переробки у виробі мають лінійну структуру і при нагріві розм'якшуються. При зростанні температури макромолекули «зшиваються», полімер твердне і залишається твердим, тобто можлива лише одноразова його переробка.

Багато полімерів володіють малою щільністю і теплостійкістю, а також високою хімічною і корозійною стійкістю. Це гарні електроізоляційні матеріали, що до того ж володіють хорошими оптичними властивостями. Вони відзначаються достатньою міцністю, пружністю, еластичністю, високою технологічністю.

Залежно від температури нагріву полімери можуть знаходитися в одному з трьох фізичних станів: склоподібному, високоеластичному і в'язкотекучому.

*Склоподібний* стан характеризується коливальними рухами лише атомів, що входять до складу мономерів. Ні ланки, ні макромолекули полімеру не переміщуються. Це стан властивий всім полімерам, а полімери з просторовою структурою бувають тільки в склоподібному стані. Переважна деформація полімерів в цьому стані - пружна.

*Високоеластичний стан* забезпечується за рахунок коливання ланок і вигинів макромолекул, що може призвести до значних оборотних змін форми полімера за рахунок сумісних пружних і високоеластичних деформацій. Подібний стан досягається у лінійних, розгалужених і рідкоічастих (типу гум) полімерів.

*В'язкотекучий стан* (рідкий) спостерігається у лінійних і розгалужених полімерів за рахунок високої рухливості макромолекул. У в'язкотекучому стані проводяться переробки полімерів і матеріалів на їх основі у виробі. Полімери у високоеластичному або в'язкотекучому стані піддають повільному розтягуванню. При цьому макромолекули набувають направленої орієнтації і впорядкованої структури, що, у свою чергу, приводить до підвищення міцності й пружності полімерів.

Полімери схильні до теплового, світлового, озонного і атмосферного *старіння* - процесу мимовільної необоротної зміни властивостей. При цьому полімери або розм'якшуються, або підвищують свою твердість і крихкість.

## **1 Типові термопластичні матеріали**

**Пластмасами, або пластиками** називають матеріали, які отримують на основі природних або синтетичних полімерів, які при певній температурі і тиску набувають пластичності, а потім тверднуть, зберігаючи форму при експлуатації. Пластмаси можуть бути з одного полімеру або мати складну композицію. Окрім полімеру до складу пластмас входять також наповнювачі, пластифікатори, затверджувачі, каталізатори, фарбники та ін.

**Термоласти.** Поліетилен залежно від методу виготовлення може мати низьку щільність ( $0,9 - 0,95 \text{ г/см}^3$ ) і ступінь кристалічності 55 - 65%, або високу щільність ( $0,95 - 0,98 \text{ г/см}^3$ ) і ступінь кристалічності 74 - 95%. Хімічно стійкий,

температурний інтервал експлуатації складає 70-100<sup>0</sup>С. Кристалічна фаза додає поліетилену теплостійкість і високу механічну міцність ( $\sigma_B = 8,5 \div 45 \text{ МПа}$ ). Для підвищення стійкості проти старіння в нього вводять 2-3% сажі. Використовується для виробництва плівок, труб, ізоляції проводів і кабелів, покриттів на метал та ін.

**Поліпропілен** ( $\gamma = 0,9 \div 0,92 \text{ мг/м}^3$ ) має значну кількість кристалічної фази. Температура експлуатації від -15 до +150<sup>0</sup>С. Високі фізико-механічні властивості  $\sigma_B = 25 \text{ МПа}$ . Застосовують у виробництві текстильних виробів, плівок, конструкційних деталей і різних ємкостей.

**Полістирол** ( $\gamma = 1,05 \div 1,1 \text{ мг/м}^3$ ) - твердий, жорсткий і прозорий аморфний пластик. Розчиняється в бензолах, але стійкий до слабких кислот, лугів, спиртів, не розчиняється в мастилах і бензині. Використовується в інтервалі температур -20- +80<sup>0</sup>С;  $\sigma_B = 35 \div 40 \text{ МПа}$ . Схильний до старіння і утворення тріщин. *Використання*: деталі радіо і телетехніки, фотоапаратури, корпусів і ручок різних машин, волокон, деталі автомобілів, труб та ін.

**Фторопласт - 4** ( $\gamma = 2,15 \div 2,35 \text{ мг/м}^3$ ), містить кристалічну і аморфну фази. Термічно стійкий (-269 до +250<sup>0</sup>С),  $\sigma_B = 14 \div 35 \text{ МПа}$  зберігається до  $t = 250^0\text{С}$ . Має високу хімічну стійкість проти кислот, лугів, окислювачів і розчинників; не змочується водою, має малий коефіцієнт тертя. *Недоліки*: холодотекучість, виділення фтору при підвищених температурах. *Застосування*: деталі хімічної апаратури, труби для хімікатів, антифрикційні покриття на метали та ін.

**Полівінілхлорид** ( $\gamma = 1,4 \text{ мг/м}^3$ ), аморфна структура, хороша хімічна стійкість, негорючий, атмосферостійкий,  $\sigma_B = 40 \div 60 \text{ МПа}$ .

**Вініпласт** - різновид полівінілхлориду, застосовується у виробництві труб для агресивних середовищ, захисних покриттів металів, гальванічних ванн і т.п. *Недоліки*: низька тривала міцність, термостійкість під навантаженням.

**Пластикат** - різновид полівінілхлориду. *Використання*: у вигляді плівки або як початковий матеріал для виготовлення друкарських валів, прокладок ущільнювачів, конвеєрних стрічок, труб та ін.

**Поліаміди** ( $\gamma = 1,12 \div 1,16 \text{ мг/м}^3$ ) - пластики, що кристалізуються, відомі як капрон, нейлон та ін. Стійкі до бензину, спирту, лугів. Робоча температура 60-110<sup>0</sup>С,  $\sigma_B = 50 \div 100 \text{ МПа}$  (хороший конструкційний матеріал). Висока зносостійкість, ударна міцність, демпфуючі властивості і низький коефіцієнт тертя. *Недоліки* - гігроскопічність і старіння за рахунок окислення. *Застосування*: шківи, зубчасті колеса, підшипники, ущільнювачі, трубопроводи, волокна, канати, антифрикційні й антикорозійні покриття металів.

**Лавсан** ( $\gamma = 1,12 \text{ мг/м}^3$ ) - складний поліефір, кристалічний полімер, при швидкому охолодженні може стати аморфним. Володіє хорошою хімічною стійкістю і морозостійкістю (-70<sup>0</sup>С)  $\sigma_B = 17,5 \text{ МПа}$ , яка може бути збільшена за

рахунок заданої орієнтації молекул. *Застосування*: волокна, тканини, плівки, канати, ремені, зубчасті колеса та ін.

**Термостійкі пластики** - 300°C і більше - поліаміди - ароматичні термопластичні пластики. Сстійкі до розчинників, масел, слабких кислот,  $\sigma_B = 90 \div 130 \text{ МПа}$ , низький коефіцієнт тертя. *Застосування*: плівки, різні деталі машин.

Наповнювачі додають в термопласти в кількості 40 - 70% для підвищення механічних властивостей, зниження вартості й зміни інших параметрів. Наповнювачі - це органічні й неорганічні речовини у вигляді порошків (деревна мука, сажа, слюда,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , тальк графіт), волокон (бавовняне, скляне, азбестове, полімерне), листів (папір, тканини, деревний шпон).

Стабілізатори - різні органічні речовини, які вводять в кількості декількох відсотків для збереження структури молекул і стабілізації властивостей, що уповільнює старіння.

Пластифікатори - додають в кількості 10 - 20% для зменшення крихкості й поліпшення формованості. Пластифікаторами часто служать ефіри, а іноді полімери з гнучкими молекулами.

Спеціальні добавки - змащувальні матеріали, фарбники, добавки для зменшення статичних зарядів і горючості, для захисту від цвілі, прискорювачі й сповільнювачі затвердіння - служать для зміни або посилення яких-небудь властивостей.

Затверджувачі в кількості декількох відсотків додають до термореактивних пластмас. Як затверджувачі використовують органічні перекиси та ін. речовини, сірку (в гумах).

Основою класифікації пластмас служить хімічний склад полімера. Залежно від полімера пластмаси розділяють на *фенолоформальдегідні (фенопласти), епоксидні, поліамідні, поліуретанові, стиролові* та ін.

## **2 Типові термореактивні матеріали**

У **термореактивних пластмасах (реактопластах)** зв'язуючими є термореактивні полімери, найчастіше це епоксидні (склопластики на їх основі здатні до тривалої експлуатації при  $t$  до 200°C), фенолоформальдегідні (до 260°C), кремнійорганічні (до 370°C), поліамідні (до 350°C) смоли, а також неорганічні поліефіри (до 200°C). Зв'язуючі повинні володіти високою адгезією, теплостійкістю, хімічною стійкістю, малою усадкою, технологічністю.

У порошкових пластмасах, прес - порошках ( $\gamma = 1,4 \div 1,45 \text{ мг/м}^3$ ) наповнювачами служать органічні (деревна мука, целюлоза) або мінеральні (графіт, тальк, кварц) порошки. Ці пластмаси володіють хімічною стійкістю, теплостійкістю до 110°C, міцністю  $\sigma_B = 30 \div 60 \text{ МПа}$ , але низькою ударною в'язкістю.

*Застосування*: електроізоляційні деталі, елементи несилкових конструкцій. Прес - порошки, які вироблені на основі епоксидних смол, знайшли застосування в інструментальній справі, виробництві штампів і пристрою, для усунення дефектів литва та ін.



У волокнистих пластмасах, волокнітах ( $\gamma = 1,35 \div 1,45 \text{ мг} / \text{м}^3$ ) наповнювачем є вичоси бавовни. Виготовляють шківи, рукоятки, фланці і т.п.

Азбоволокніти ( $\gamma = 1,95 \text{ мг} / \text{м}^3$ ), як наповнювач використовується волокнистий азбест, більш теплостійкий (до  $200^\circ\text{C}$ ), стійкий до кислот, володіє високими фрикційними властивостями. Використовують для створення гальмівних пристроїв.

Скловолокніти - хімічно стійкі, негорючі, температура експлуатації до  $280^\circ\text{C}$ , мають  $\sigma_B = 80 \div 500 \text{ МПа}$ , технологічні. Із скловолокнітів роблять високоточні, будь-якої конфігурації кріпильні вироби і деталі машин.

У складних пластмасах застосовують листові наповнювачі.

Гітенакси ( $\gamma = 1,3 \div 1,45 \text{ мг} / \text{м}^3$ ) з паперовими наповнювачами підрозділяють на електротехнічні і декоративні. Витримують температуру до  $150^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_B = 80 \div 100 \text{ МПа}$ . Застосовують для виготовлення різних щитків, панелей, облицьовування приміщень.

Текстоліти ( $\gamma = 1,3 \div 1,45 \text{ мг} / \text{м}^3$ ) мають наповнювач з бавовняних тканин, випускають марки ПТК, ПТ та ін. Працюють при температурі  $80 - 125^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_B = 65 \div 100 \text{ МПа}$ , хороший демпфуючий матеріал. *Застосування*: зубчасті колеса, вкладиші підшипників.

Деревно-шаруваті пластики (ДСП) ( $\gamma = 1,3 \div 1,4 \text{ мг} / \text{м}^3$ ), містять наповнювачі у вигляді деревної шпони. Експлуатуються при температурі до  $140 - 200^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_B = 130 \div 300 \text{ МПа}$ , безшумні в роботі й довговічні. З них виготовляють підшипники, шківи, деталі швейних і текстильних машин, автомобілів, вагонів.

В азботекстолітах як наповнювач використовують азбестову тканину. Це конструкційний, фрикційний і термовитримний матеріал, застосовується для гальмівних пристроїв.

До шаруватих пластиків відносяться і склотекстоліти ( $\gamma = 1,4 \div 1,9 \text{ мг} / \text{м}^3$ ) в яких використовують скляні тканини. Склопластики здатні до тривалої експлуатації при  $t = 200 - 400^\circ\text{C}$ , а короткочасно - до декількох тисяч градусів. Хімічно стійкі,  $\sigma_B$  до  $600 \text{ МПа}$ , мають достатню ударну в'язкість і вищу порівняно з металами працездатність. *Недоліки*: анізотропія і невисокий модуль пружності. *Застосування*: корпуси човнів, суден, кузови автомашин та ін.

### **3 Гумові матеріали**

**Гумою** називають продукт вулканізації суміші каучуку з сіркою та іншими добавками.

Основою гуми служить каучук натуральний або синтетичний. Для поліпшення фізико-механічних властивостей каучуків вводять різні добавки (*інгредієнти*).

1. Як вулканізуючі речовини, що беруть участь в утворенні просторово-сіткової структури вулканізату, звичайно застосовують сірку і селен. Для гум електротехнічного призначення замість елементарної сірки, яка взаємодіє з міддю, застосовують органічні сірчисті сполуки (тіурам).

2. Протистарителі - альдоль, нізон, віск, парафін.

3. Пом'якшувальні засоби (пластифікатори) - парафін, вазелін, стеаринова кислота, бітум, рослинні масла та ін.

4. Наповнювачі - сажа, крейда, тальк і т.п., підвищують механічні властивості й здешевлюють гуму.

5. Фарбники.

*Гуми* - хімічно стійкі матеріали, які володіють газо- і водонепроникністю, високою стійкістю до стирання і хорошими електроізоляційними властивостями. Ці матеріали мають низький модуль пружності ( $E = 1 \div 10 \text{ МПа}$ ); є малостискальними, схильні до зниження працездатності за рахунок дії теплоти внаслідок внутрішнього тертя, яке виділяється, при багатократному навантаженні виробу.

До гум загального призначення відносяться натуральний каучук (НК) ( $\gamma = 0,91 \div 0,92 \text{ мг/м}^3$ ). Це аморфний полімер, але в ньому може бути утворена і кристалічна фаза, що приводить до зміцнення НК. Розчиняється в бензині, бензолі та інших розчинниках, утворюючи клеї. Температурний інтервал використання від 70 до 130°C. Механічні властивості НК:  $\sigma_B = 24 \div 34 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 600 \div 700\%$ , залишкове подовження 25 - 40%.

До цієї групи належать гуми марки *СКБ, СКС, СКІ*, що володіють властивостями, близькими до властивостей натурального каучуку. З гум загального призначення проводять ремені, рукави, шини, ізоляцію кабелів та ін.

До спеціальних відносять декілька груп гум. До групи мастилобезостійких входить гума наірит ( $\gamma = 1,225 \text{ мг/м}^3$ ), для якої властиві висока еластичність, вібростійкість, озоностійкість. Поступається гумама загального призначення за морозо- і теплостійкістю. Існують марки мастилобензостійких гум *СКН* ( $\gamma = 0,94 \div 0,99 \text{ мг/м}^3$ ) і *тіокол* ( $\gamma = 1,3 \div 1,4 \text{ мг/м}^3$ ), останній є хорошим герметиком.

Гума *СКТ* ( $\gamma = 1,7 \div 2,0 \text{ мг/м}^3$ ) відноситься до теплостійких, її температурний інтервал експлуатації від 60 до 200°C.

Світлоозоностійкі гуми випускають марок *СКФ* ( $\gamma = 1,8 \div 1,9 \text{ мг/м}^3$ ), *СКЕП* і *бутілкаучук*. Зносостійкі гуми отримують на основі каучуку *СКУ*. Із спеціальних гум виготовляють ремені, транспортні стрічки, мастилобензостійкі ущільнювачі, діафрагми, гнучкі шланги та ін.

Застосування неметалічних матеріалів призводить до значного зниження матеріаломісткості машин і зменшення маси конструкції в 4 - 5 разів. Застосування цих матеріалів забезпечує скорочення виробничого циклу. Трудомісткість виготовлення деталей зменшується в 5 - 6 разів, а собівартість продукції знижується в 2 - 3 рази.

#### **4 Композиційні матеріали**

**Композиційні матеріали** є композицією з м'якої матриці і високоміцних волокон. Волокна армують матрицю і сприймають все навантаження. У цьому полягає принципова відмінність композиційних матеріалів від звичайних сплавів, зміцнених, наприклад, дисперсними частинками. У сплавах основне

навантаження сприймає матриця (твердий розчин), а дисперсні частинки гальмують в ній рух дислокацій, сильно знижуючи тим самим її пластичність. У композиційних матеріалах навантаження сприймають високоміцні волокна, зв'язані між собою пластичною матрицею. Матриця навантажена слабо і служить для передачі й розподілу навантаження між волокнами. Композиційні матеріали відрізняються високим опором розповсюдження тріщин, оскільки при їх утворення, наприклад, через руйнування волокна тріщина «в'язне» в м'якій матриці. Крім того, композиційні матеріали, що використовують високоміцні й високомодульні волокна і легку матрицю, можуть володіти високими питомою міцністю і жорсткістю.

Рівень заданого комплексу властивостей проектується заздалегідь і реалізується у процесі виготовлення матеріалу. При цьому матеріалу надають по можливості форму, що максимально наближається до форми готових деталей і навіть окремих вузлів конструкції.

**Композиційними** називаються складні матеріали, до складу яких входять ті, що сильно відрізняються за властивостями нерозчинні або малорозчинні один в одному компоненти, розділені в матеріалі яскраво вираженою межею. Принцип запозичений у природи - стовбури і стеблини рослин, кістки людин і тварин. Властивості композиційних матеріалів в основному залежать від фізико-механічних властивостей компонентів і міцності зв'язку між ними. Відмітна особливість - в них виявляються достоїнства компонентів, а не їх недоліки. Разом з тим для них властиві риси, якими не володіють окремо взяті компоненти, що входять до їх складу. Для оптимізації властивостей композицій вибирають компоненти з властивостями, що різко відрізняються, але доповнюють один одного.

Основою композиційних матеріалів (матриць) служать метали або сплави (композиційні матеріали на металевій основі), а також полімери, вуглецеві й керамічні матеріали (композиційні матеріали на неметалічній основі).

Матриця зв'язує композиції і надає їй форму. Від властивостей матриці залежать технологічні режими отримання композиційних матеріалів, а також такі важливі експлуатаційні характеристики, як робоча температура, опір втомному руйнуванню, дії навколишнього середовища, щільність і питома міцність. Вироблені композити з комбінованими матрицями, що складаються з чергуючих шарів (два і більше) різного хімічного складу.

Композиційні матеріали з комбінованими матрицями називають **поліматричними**. Для цих матеріалів характерний великий перелік набутих властивостей.

У матриці рівномірно розподілена решта компонентів (наповнювачів). Головну роль у зміцненні композиту відіграють наповнювачі, тому їх часто називають **зміцнювачами**. Зміцнювачі повинні володіти високими міцністю, твердістю і модулем пружності. За цими властивостями вони значно перевершують матрицю.

Властивості композиту залежать також від форми або геометрії, розміру, кількості й характеру розподілу наповнювача (схеми армування).

*За формою наповнювача діляться на три групи:*

- 1) нуль вимірні,
- 2) одновимірні,
- 3) двовимірні.

Нульвимірними називають наповнювачі, які мають в трьох вимірах дуже малі розміри одного порядку (частинки).

Одновимірні - мають малі розміри в двох напрямках і розмір, що значно перевершує їх у третьому вимірюванні (волокна).

Двовимірні - мають два розміри, що співвимірні з розміром композиційного матеріалу, значно перевершують третій (пластини, тканина).

За формою наповнювача композити розділяють на дисперсно-зміцнені й волокнисті.

**Дисперсно-зміцненими** називають композити, зміцнені нульвимірними наповнювачами. До **волокнистих** відносять матеріали, зміцнені одновимірними або одно- і двовимірними наповнювачами.

За схемою армування композити підрозділяють на три групи: з одновісним, двовісним і тривісним армуванням.

Для одновісного (лінійного) армування використовують нульвимірні й одновимірні наповнювачі. Нульвимірні розташовують так, що відстань між ними по одній осі (наприклад, по осі X) значно менше, ніж по двох інших. Об'ємний вміст наповнювача в цьому випадку складає 1-5%. Одновимірні наповнювачі розташовують паралельно один одному.

При двовісному (площинному) армуванні використовують нуль-, одно- і двовірні наповнювачі. Нульвимірні й одновимірні наповнювачі розташовуються в площинах, паралельних один одному. При цьому відстань між ними в межах площини значно менше, ніж між площинами. При такому розташуванні нульвимірного наповнювача його вміст доходить до 15-16%. Одновимірні наповнювачі також розташовані в паралельних площинах. При цьому в межах кожної площини вони розташовані паралельно, а по відношенню до інших площин під різними кутами. Двовимірні наповнювачі розташовані паралельно один одному.

При тривісному (об'ємному) армуванні немає переважного напрямку в розподілі наповнювача. Для армування використовують нульвимірні й одновимірні наповнювачі. Відстані між нуль нульвимірними наповнювачами одного порядку, їх об'ємний вміст може перевищувати 15-16%. Одновимірні наповнювачі вміщують у трьох взаємно перпендикулярних площинах.

Для розширення комплексу властивостей часто використовують одночасно наповнювачів різної форми. Композити, які містять два і більш різних наповнювача, називають **поліармованими**.

**Дисперсно-зміцнені композити.** У них наповнювачами служать дисперсні частинки тугоплавких фаз - оксидів, нітридів, боридів, карбідів ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $BN$ ,  $SiC$  та ін.). Ці матеріали отримують методами порошкової металургії, рідше безпосередньо вводять наповнювачі в рідкий метал перед розливанням із застосуванням ультразвукової обробки для кращого

перемішування. Розміри частинок в межах 0,01 - 0,1мкм, а відстань між ними 0,05 - 0,5мкм.

До цих матеріалів відносять матеріали із *спеченої алюмінієвої пудри* (САП); на нікелевій основі відомі композиції, зміцнені частинками оксидів торія, натрію, гафнію.

*САП* - характеризується високою міцністю, жароміцністю, корозійною стійкістю і термічною стабільністю властивостей. Структура САП - алюмінієва основа з рівномірно розподіленими дисперсними включеннями  $Al_2O_3$ . Добре деформується в гарячому стані, легко обробляється різанням, зварюється контактною, аргонодуговою зваркою. Застосовують *САП-1, САП-2, САП-3*, з них проводять всі види напівфабрикатів: листи, профілі, штаповані заготовки, труби, фольгу. Використовують для деталей, які працюють при температурі 300-500<sup>0</sup>С (поршневі штоки, лопатки компресорів, лопаті вентиляторів і турбін, конденсатори, обмотки трансформаторів в електротехніці).

*Спечені алюмінієві сплави (САС)* виготовляють в основному за тією ж технологією, що і САП, - з порошків, отриманих розпилюванням сплавів заданих складів. Механічні властивості САС -  $\sigma_B = 260 \text{ МПа}$ ,  $HB = 120$ ,  $\delta = 1,5 \div 1\%$ . Сплав САС складу: 25 - 30% *Si*, 5 - 7% *Ni*, решта *Al*, замінює важчі сталі при виготовленні деталей приладів.

**Композити на нікелевій основі.** Як матрицю використовують *Ni* і його сплави з *Cr* (20%), із структурою твердих розчинів, зміцнювачі - частинки оксидів торія, гафнію та ін. Методи отримання цих матеріалів складні: змішення порошків *Cr*, і елементів з порошком *Ni*, що містить дисперсний оксид гафнію, потім холодне пресування і гаряча екструзія брикетів.

**Волокнисті композити.** У них зміцнювачами служать волокна або ниткоподібні кристали чистих елементів і тугоплавких з'єднань (*B, C, Al\_2O\_3, SiC* та ін.), а також дріт з металів і сплавів (*Mo, W, Be* високоміцної сталі та ін.). Використовують безперервні й дискретні волокна діаметром від долей до сотень мкм.

Як матриці використовують метали: *Al, Mg, Ti* жароміцний *Ni* і сплави на їх основі, а також неметали - полімери, вуглецеві, керамічні матеріали.

Властивості залежать від схеми армування. Високими є значення межі витривалості, оскільки відбувається гальмування розвитку тріщин м'якою матрицею.

Зв'язок між волокнами і матрицею забезпечується за рахунок взаємодії між ними і утворення дуже тонкого шару (1-2 мкм) інтерметалевих фаз. Якщо ж немає взаємодії, то його забезпечують волокна спеціального покриття. Зв'язок між компонентами на неметалічній основі здійснюється за допомогою адгезії, тобто шляхом молекулярної взаємодії.

**Композити на неметалічній основі.** Переваги - хороша технологічність, низька щільність і в ряді випадків вищі питома міцність і жорсткість, висока корозійна стійкість, хороші теплозахисні й амортизаційні характеристики, антифрикційні й фрикційні властивості.

*Недоліки:* низька міцність зв'язку волокон з матрицею, різка втрата міцності при підвищенні температури вище 100 - 200<sup>0</sup>С, мала електрична провідність, відсутність здатності до зварювання.

Найбільшого поширення набули композиції з полімерною матрицею: епоксидною, фенолформальдегідною і поліамідною. Як зміцнювачі використовують високоміцні й високомодульні, вуглецеві й борні, скляні й органічні волокна у вигляді ниток, джгутів, стрічок, нетканих матеріалів.

Композиції з вуглецевими волокнами називають вуглеволоконітами, з боровими - бороволоконітами, скляними, - скловолоконітами, органічними, - органоволоконітами.

**Композити на металевій основі.** Найбільш перспективними для матриць є метали, що володіють невеликою щільністю (*Al, Mg, Ti*) і сплави на їх основі, а також *Ni* - як основний компонент жароміцних сплавів.

*Матеріали з Al матрицею* - армують сталевим дротом (КАС), борним волокном (ВКА) і вуглецевим волокном (ВКУ). Як матриця технічний *Al* (АД1) або сплави (*AMrG, B95, D20*). Зміцнення дорожчими волокнами *B, C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>* підвищує вартість, але покращує властивості.

*Матеріали з Mg матрицею* (ВКМ), мають меншу щільність, ніж з *Al*, при приблизно такій же високій міцності 1000 ÷ 1200 МПа.

*Матеріали на Ti основі* - труднощі при створенні через нагрів до високих температур. Титановий сплав ВТ6 (6% *Al*, 4% *V*, решта *Ti*), армований волокнами *Mo, Be, SiC*.

*Композити на Ni основі* (ВКН) - робочі температури до 1000<sup>0</sup>С, тому вводять як зміцнювач вольфрамовий дріт 40 - 70%.

Використання композитів у літальних апаратах знизило їх масу до 40%, збільшило корисне навантаження. Застосовують в турбобудуванні (лопатки турбін).

Особливі властивості дозволяють широко використовувати їх як електроізоляційні матеріали (органоволокніти). У машинобудуванні (корпуси і деталі машин), хімічній промисловості (цистерни, ємкості), суднобудуванні (корпуси човнів, гребні гвинти, підшипники).