

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни
“МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАТЕРІАЛИ
ЕЛЕКТРОННИХ АПАРАТІВ”
(частина 1)

для студентів спеціальності
172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(спеціалізації «Радіоелектронні апарати та засоби»
та «Інтелектуальні технології мікросистемної
радіоелектронної техніки»)
усіх форм навчання

Конспект лекцій з дисципліни "Матеріалознавство та матеріали електронних апаратів" (частина 1) для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» (спеціалізації «Радіоелектронні апарати та засоби» та «Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки») усіх форм навчання / Уклад.: Фурманова Н.І., Фарафонов О.Ю. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 62 с.

Укладачі: Фурманова Наталія Іванівна, канд. техн. наук,
доцент кафедри ІТЕЗ;
Фарафонов Олексій Юрійович, канд. техн. наук,
доцент, доцент кафедри ІТЕЗ.

Рецензент: Миронова Наталія Олексіївна, канд. техн. наук,
доцент кафедри ПЗ

Відповідальний за випуск: Шило Галина Миколаївна, канд.
техн. наук, доцент, в.о. зав. каф. ІТЕЗ

Розглянуто
на засіданні кафедри ІТЕЗ
протокол № 6 від 23.01.17 р.

Затверджено
на засіданні НМК ФРЕТ
протокол № 5 від 26.01.17 р.

ЗМІСТ:

| | |
|---|-----------|
| 1 ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ. АТОМНО-КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ..... | 4 |
| 1.1 Характеристика і класифікація металів | 5 |
| 1.2 Атомно-кристалічна структура металів | 7 |
| 1.3 Дефекти кристалічної будови металів | 10 |
| 1.4 Властивості матеріалів | 13 |
| 2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ. МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ..... | 15 |
| 2.1 Методи дослідження структури матеріалів | 15 |
| 2.2 Основні механічні властивості матеріалів та їхні характеристики..... | 18 |
| 2.3 Твердість та методи її визначення | 21 |
| 3 ТЕОРІЯ СПЛАВІВ. ДІАГРАМИ СТАНУ СПЛАВІВ..... | 24 |
| 3.1 Основи теорії сплавів | 24 |
| 3.2 Діаграми стану сплавів..... | 26 |
| 3.3 Основні види діаграм стану двокомпонентних сплавів | 28 |
| 3.3.1 Діаграма стану сплавів, компоненти яких необмежено розчинні у рідкому стані та практично не розчинні у твердому | 28 |
| 4 КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ І СПЛАВИ. ВЛАСТИВОСТІ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ТА ОБЛАСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ..... | 33 |
| 4.1 Алюміній та його сплави..... | 33 |
| 4.2 Мідь та сплави на її основі..... | 37 |
| 4.3 Титан, магній та їх сплави..... | 42 |
| 5 БУДОВА ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ. ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗО-ВУГЛЕЦЬ. ЧАВУНИ ТА СТАЛІ..... | 45 |
| 5.1 Діаграма стану системи залізо-вуглець | 45 |
| 5.2 Формування структури сталей..... | 49 |
| 5.3 Формування структури білих чавунів | 50 |
| 6 КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СТАЛІ. ЧАВУНИ... 52 | 52 |
| 6.1 Вуглецеві сталі..... | 52 |
| 6.2 Леговані сталі..... | 54 |
| 6.3 Класифікація легованих сталей..... | 55 |
| 6.4 Конструкційні леговані сталі..... | 56 |
| 6.5 Сталі зі спеціальним властивостями..... | 58 |
| 6.6 Чавуни, їх класифікація, структура та властивості..... | 59 |
| ЛІТЕРАТУРА..... | 62 |

1 ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ. АТОМНО-КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Матеріалознавство – це прикладна наука, що вивчає будову (структуру) та властивості матеріалів, встановлює зв'язок між їхнім складом, будовою і властивостями, вивчає залежність будови і властивостей від методів виробництва та обробки матеріалів, а також зміну їх під впливом зовнішніх чинників: силових, теплових (термічних), радіаційних та інших.

Технологія – (від грецького *techne* – мистецтво, майстерність, уміння та *logos* – наука, вчення) – це сукупність методів обробки, виготовлення, зміну стану, властивостей, форми сировини, матеріалу або напівфабрикату, що здійснюються в процесі виробництва продукції (виробів). Завдання технології як науки - з'ясування фізичних, хімічних, механічних та інших закономірностей з метою визначення та практичного використання найефективніших і економічних виробничих процесів. Технологія пов'язана з відповідними галузями виробництва: технологія загального машинобудування, літакобудування, виготовлення будь-яких виробів, матеріалів тощо.

Конструкційними називають матеріали, з яких виготовляють деталі машин, приладів, елементи різних конструкцій, інструменти, тобто матеріали, здатні витримувати значні механічні навантаження. Технологія конструкційних матеріалів – наука про сучасні методи одержання та обробки конструкційних матеріалів з метою виготовлення конструкцій і деталей необхідних розмірів, конфігурації, стану (чистоти) поверхні та властивостей.

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 та низькі температури, агресивні середовища, високий рівень радіації тощо), тому в багатьох випадках тільки надання специфічних властивостей матеріалам, що застосовуються, можна забезпечити надійність та 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, яких 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.

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, деревина, силікатні матеріали - кераміка, скло та ін.

Нині в загальному обсязі застосовуваних конструкційних матеріалів пластмаси становлять дещо більше 5% (за вагою, а не за асортиментом виготовлюваних виробів). У США вже тепер пластмаси складають більше 15%, кольорові метали – 30%. В Україні до недавнього часу частка чорних металів становила 90%. Україна посідає четверте місце в світі після Японії, США та Росії по виробництву чорної металургії.

1.1 Характеристика і класифікація металів

Метали – найбільш розповсюджені у природі елементи. Це хімічно прості речовини, які мають особливий (металевий) блиск, високу пластичність, електро- й теплопровідність. У техніці поняття "метал" означає речовину, що має вказані характерні властивості. Цей термін також використовують при визначенні металевих сплавів. За визначенням М.В.Ломоносова, "метали – суть світлі тіла, які кувати можна".

Метали – це елементи, атоми яких складаються з позитивно зарядженого ядра, навколо якого на різній відстані обертаються негативно заряджені електрони, утворюючи певні електронні оболонки. Зовнішня електронна оболонка металів містить невелику кількість електронів (1..2). Сила притягування ядра атома до зовнішніх (валентних) електронів значною мірою компенсується електронами внутрішніх оболонок. Тому атоми металів досить легко втрачають зовнішні електрони і перетворюються на позитивно заряджені іони. Вільні електрони легко переміщуються в усіх напрямках між утвореними позитивно зарядженими іонами, нагадуючи рух частинок газу ("електронний газ"). Існування водночас нейтральних й іонізованих атомів та вільних електронів є основою уявлень щодо особливого типу міжатомного зв'язку, притаманного тільки металам – *металевого*. В металі постійно відбувається обмін електронами між нейтральними та іонізованими атомами, завжди є певна кількість електронів, що на даний момент не належать якомусь з атомів. Якщо створити у металі різницю потенціалів, рух електронів набуде певного напрямку і виникне електричний струм. Наявністю вільних електронів пояснюють існування спільних для всіх металів властивостей (пластичність, непрозорість, блиск, високі електро- і теплопровідність), а їх кількість – різний ступінь "металевості" окремих металів.

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.

Чорні метали загалом мають темно-сірий колір, більш високі температури плавлення, значну твердість і щільність, здатні до поліморфних перетворень (крім Ni). Серед них розрізняють залізні - Fe, Co, Ni, Mn; тугоплавкі – температура плавлення яких вища за температуру плавлення заліза (понад 1539 °C) - W, Mo, Re, Nb, Ti, V, Cr; уранові – актиніди; рідкісноземельні (РЗМ) - La, Ce, Nd, Pr та ін. 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 і сплави на її основі (бронза, латунь). 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.

1.2 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 (кригічних) температур плавлення та кристалізації. Залежно від зовнішніх умов їхні властивості змінюються поступово. Аморфний стан металів реалізується за умов інтенсивного охолодження під час кристалізації.

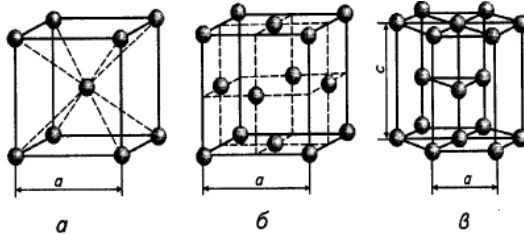
За звичайних умов тверднення метали у твердому стані мають кристалічну будову. Для кристалічного стану характерно, перш за все, певне закономірне розташування атомів у просторі. Кожен атом (іон) у кристалі оточений певною кількістю найближчих атомів, розташованих на однаковій відстані від нього. Розташування атомів у кристалі зручно зображувати у вигляді просторових схем – **елементарних кристалічних комірок**. Під цим розуміється найменший комплекс атомів, що дозволяє відтворити при багатократному повторенні просторову кристалічну ґратку (рис. 1.1).

Просторове розташування атомів у кристалічному тілі залежить від природи металу, характеру міжатомних зв'язків, температури, тиску.

Серед промислових металів найпоширенішим є утворення трьох основних типів кристалічних ґраток:

- **об'ємноцентровану кубічну ґратку** (елементарна комірка має 9 атомів) мають K, Na, Li, Ta, W, V, Cr, Nb, Ba, Fe_α, Ti_β та інші метали;
- **гранецентровану кубічну ґратку** (елементарна комірка має 14 атомів) мають Ag, Au, Pt, Pd, Ir, Cu, Ca_α та ін.;

- *гексагональну ґратку щільного пакування* (елементарна комірка має 17 атомів) мають Mg, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Be, Ti_α, Ca_β та інші метали.



а – об'ємцентрована кубічна (ОЦК);

б – гранецентрована кубічна (ГЦК);

в – гексагональна щільного пакування (ГЦП)

Рисунок 1.1 – Елементарні кристалічні комірки металів

Залежно від температури та 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 α , при більш високій – β , далі – γ тощо. Перехід від однієї модифікації до іншої називають *поліморфним перетворенням*. 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.

Відомі поліморфні перетворення для таких металів:

$Fe_{\alpha} \leftrightarrow Fe_{\gamma} \leftrightarrow Fe_{\beta}$; $Sn_{\alpha} \leftrightarrow Sn_{\beta}$; $Mn_{\alpha} \leftrightarrow Mn_{\beta} \leftrightarrow Mn_{\gamma} \leftrightarrow Mn_{\delta}$; Ca, Li, Na, Cs, Zn, Sn, 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. Основні параметри кристалічних ґраток:

1. *Елементарна комірка* – це найменша кількість (комплекс) атомів, яка при багаторазовому повторенні у просторі дозволяє побудувати просторову кристалічну ґратку певної системи.

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

3. **Кут** між цими відрізками позначають α, β, γ . Співвідношення відрізків і кутів визначає форму комірки.

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

5. **Координаційне число** (K) характеризує щільність пакування ґратки, визначає кількість найближчих і рівновіддалених атомів у певній кристалічній ґратці. Координаційне число простої кубічної ґратки позначають K_6 (літера вказує на тип ґратки, цифра – на кількість атомів), об'ємноцентрованої кубічної – K_8 ; гранецентрованої кубічної – K_{12} ; гексагональної щільного пакування – G_{12} ; гексагональної – G_6 .

6. **Базис** – це кількість атомів (іонів), що належать до однієї комірки.

7. **Атомний радіус** – половина відстані між центрами найближчих атомів у кристалічній ґратці певної кристалічної системи.

8. **Коефіцієнт компактності** – це відношення об'єму, що займають атоми (іони), до всього об'єму комірки даного типу.

Для характеристики просторової орієнтації кристалічної ґратки використовують також **індекси площин та напрямків** (рис. 1.2). Площини позначають у круглих дужках, наприклад (100). Сукупності аналогічних площин позначають цифрами у фігурних дужках, наприклад {100}. При позначенні напрямків використовують прямокутні дужки, наприклад [100].

Із спостережень за розташуванням атомів у різних площинах кристалічної ґратки видно, що насиченість цих площин атомами неоднакова. Також різні й відстані між атомами та сили міжатомного зв'язку. Так, в ОЦК-ґратці площині (100) належить лише один атом $[(1/4) \times 4]$, площині (110) – два: один вносять атоми, що знаходяться у вершинах $[(1/4) \times 4]$, і один – атом у центрі куба. У ГЦК-ґратці найщільніше атоми розташовуються у площині (111), а в ОЦК-ґратці – у площині (110).

Це зумовлює різний рівень фізико-механічних властивостей окремих кристалів (монокристалів) у різних площинах і напрямках кристалічної ґратки – так звану **анізотропію**.

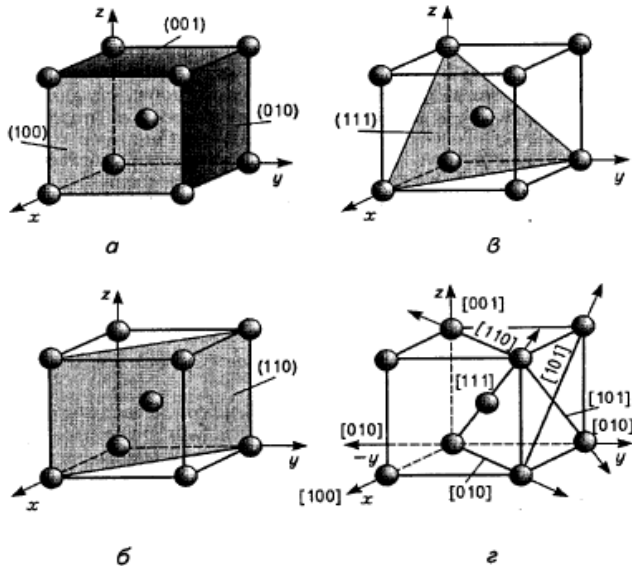


Рисунок 1.2 – Індеси кристалографічних площин (а – в) і напрямків (г) в об'ємноцентрованій кубічній ґратці (ОЦК)

Це характерна особливість кристалічного тіла на відміну від аморфних з неупорядкованою насиченістю атомами у різних напрямках, тобто ізотропних.

Реальні технічні метали є полікристалами, тобто складаються зі значної кількості по-різному орієнтованих у просторі анізотропних кристалів (зерен). Тому властивості таких полікристалів у всіх напрямках усереднюються і практично не відрізняються. Проте такі технологічні операції, як кування, прокатування, штампування, можуть створювати певну переважну орієнтацію зерен і призвести до анізотропії полікристалічного металу.

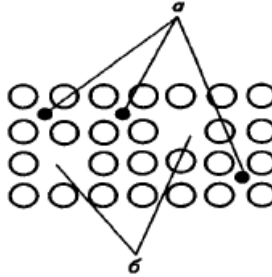
1.3 Дефекти кристалічної будови металів

Реальні полікристалічні метали завжди мають недосконалості (дефекти) кристалічної будови. Характер і ступінь порушення досконалості кристалічної будови значною мірою визначають властивості металів. недосконалості будови кристалічної ґратки за геометричними ознаками поділяють на:

- **точкові** (нуль-вимірні);
- **лінійні** (одновимірні);
- **поверхневі** (двовимірні).

До **точкових дефектів** (невеликі розміри у трьох вимірах) відносять вакансії, міжвузлові та домішкові атоми.

Вакансія – це вузли кристалічної ґратки, в яких атоми відсутні (рис. 1.3, б). На вільне місце у ґрат ці може переміщуватись інший атом, лишаючи нове вакантне місце. Це сприяє дифузії та самодифузії металу. Кількість вакансій за кімнатної температури незначна (приблизно одна вакансія на 10^{18} атомів), але дуже зростає при підвищенні температури. Так, при температурі, що майже дорівнює температурі плавлення, одна вакансія припадає вже на 10^4 атомів металу.



а – міжвузлові атоми; б - вакансії

Рисунок 1.3 – Точкові дефекти у кристалічній ґратці

Міжвузлові атоми – це атоми, що вийшли з вузла кристалічної ґратки і зайняли місце у міжвузлях (рис.1.3, а).

Домішкові атоми – це атоми іншого елемента, які розташовуються у вузлах або міжвузлях кристалічної ґратки металу (сплаву).

Точковий дефект розглядають як центр стиснення або розширення у пружному середовищі, що зумовлює викривлення біля нього кристалічної ґратки. Точкові дефекти можуть взаємодіяти між собою, утворюючи пари або комплекси різних недосконалостей.

До **лінійних дефектів** відносять такі, що мають невеликі розміри у двох вимірах і значну протяжність у третьому. Це може бути низка вакансій або міжвузлових атомів. Особливим і найважливішим видом лінійної недосконалості є крайові і гвинтові дислокації (рис. 1.4).

Крайова дислокація – це локалізоване викривлення кристалічної ґратки внаслідок присутності в ній «зайвої» напівплощини (екстра-площини). Край цієї площини утворює дефект ґратки – лінійну (крайову) дислокацію, біля якої виникають пружні викривлення ґратки і відбувається зміщення атомів відносно їх нормальних положень при невеликому дотичному напруженні. У цьому випадку екстраплощина шляхом незначного зміщення перейде у повну площину кристала, а функції екстраплощини будуть передані сусідній площині. Якщо екстраплощина знаходиться у верхній частині кристала, то дислокацію називають *позитивною* і позначають \perp , а якщо у нижній – то негативною і позначають ∇ . Ця відмінність між ними дуже умовна, і якщо перевертати кристал, то позитивна дислокація змінюється на негативну і навпаки. Дислокації однакового знаку відштовхуються, а різного – притягуються.

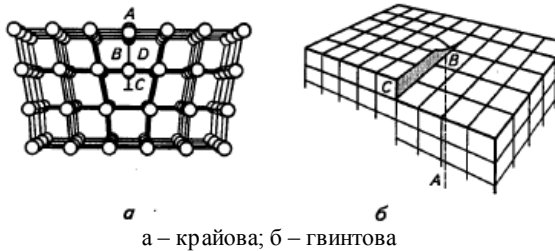


Рисунок 1.4 – Схеми дислокацій у кристалічній ґратці металу:

Порушення порядку розташування атомів може призвести до утворення іншого виду дефекту – *гвинтової дислокації*. У цьому випадку кристал можна уявити як такий, що складається з однієї атомної площини, закрученої у вигляді гвинтової поверхні (рис. 1.4, б). На відміну від крайової гвинтова дислокація паралельна до вектору зсуву. Розрізняють: *правосторонні* (за рухом годинникової стрілки) і *лівосторонні* (проти руху годинника) гвинтові дислокації.

Навколо дислокації утворюється викривлення кристалічної ґратки. Енергію викривлення ґратки характеризує так званий вектор Бюргера, з величиною якого пов'язують здатність дислокації до переміщення.

Важливе значення має характеристика кількості дислокацій – *густина дислокацій*. Це сумарна довжина дислокацій (ΣL), що

виражається у сантиметрах на одиницю об'єму ($V, \text{см}^3$), тобто $\rho=L/V, \text{см}^{-2}$. У реальних кристалах металів вона становить $\sim 10^6 \dots 10^8 \text{см}^{-2}$ дислокацій. Рухливість їх висока і вони здатні до розмноження під дією зовнішніх зусиль, прикладених до металу. За значної пластичної деформації густина дислокацій зростає до $10^{10} \dots 10^{12} \text{см}^{-2}$. Густина дислокацій та їхнє розташування значною мірою впливають на властивості металів.

Реальний металевий кристал містить не лише атомно-кристалічні дефекти (вакансії, дислокації), а й структурні недосконалості (блоки, фрагменти, субзерна).

Поверхневі дефекти незначні за розмірами лише в одному вимірюванні – це поверхні розділу між окремими зернами або субзернами у полікристалічному металі. Полікристал складається з великої кількості зерен, кристалічні ґратки яких роз орієнтовані (за кристалографічними напрямками) на кути до кількох десятків градусів. Тому границі між зернами називають ***великокутовими***. Кожне зерно складається з окремих фрагментів – субзерен, роз орієнтованих один від одного на один або кілька градусів. Границі між ними називають ***малюкутовими***. Субзерна, у свою чергу, складаються немовби з мозаїки окремих блоків розміром $1000 \dots 100\,000 \text{Å}$, кристалографічні площини яких розорієнтовані на невеликий кут – менше 1° .

До **об'ємних дефектів** відносять скупчення точкових дефектів, що утворюють пори, а також вкраплення іншої фази.

1.4 Властивості матеріалів

Властивості матеріалів в основному поділяються на фізичні, механічні, хімічні, технологічні та експлуатаційні (спеціальні). Властивості металів і сплавів залежать від їх складу та стану. Домішки, які є в металу або в сплаві, значно змінюють його властивості.

До ***фізичних властивостей*** відносять: теплові властивості (теплоємність, теплопровідність, температуру плавлення, теплове розширення), електричну провідність, магнітну проникність, густину, колір тощо.

Під ***механічними властивостями*** розуміють здатність металу чинити опір дії зовнішніх сил. При виборі матеріалу для виготовлення

деталей машин необхідно перш за все враховувати його механічні властивості: міцність, пружність, жорсткість, пластичність, ударну в'язкість, твердість та витривалість та інші.

До *хімічних властивостей* відноситься хімічна стійкість проти дії зовнішнього середовища (кислот, лугів, прісної та морської води, вологого повітря, газів, високої температури тощо). Не всі метали однаково стійкі проти корозії. Так, свинець дуже стійкий проти дії деяких кислот та лугів, а залізо і мідь такими властивостями не володіють. Золото і платина мають високу хімічну стійкість у воді, а залізо, мідь, магній у воді руйнуються. Для досягнення високої хімічної стійкості металічних деталей машин виробляють спеціальні нержавіючі кислотостійкі сталі, а також виконують різні захисні покриття.

Технологічні властивості характеризують здатність металу піддаватись різним методам обробки – різанню (точіння, фрезерування, шліфування та інші), обробці тиском (прокатування, штампування, пресування, волочіння, кування), зварюванню, литтю (рідко текучість, усадка).

Експлуатаційні властивості визначають залежно від умов роботи спеціальними випробуваннями. Однією з найважливіших експлуатаційних властивостей є зносостійкість. Зносостійкість – властивість матеріалу чинити опір зносу, тобто поступовому зменшенню розмірів і зміні форми тіла внаслідок руйнування поверхневого шару виробу при терті. Випробування металів на знос проводять у лабораторних і експлуатаційних умовах шляхом вимірювання розмірів, зважування зразків та іншими методами. До експлуатаційних властивостей належать також холодостійкість, жароміцність, антифрикційність, поведінка металів при підвищених її знижених температурах і тиску. Крім того, це властивості, яких метали і сплави звичайно не мають, але набувають їх введенням спеціальних домішок при виплавці.

2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ. МЕХАНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Методи дослідження структури матеріалів

З метою виявлення придатності металу або сплаву до виготовлення з нього деталі необхідно знати його властивості. Метали характеризуються фізичними, хімічними, технологічними та іншими спеціальними властивостями. Встановлено залежність між властивостями та їх внутрішньою будовою, знайдено засоби змінювання властивостей у необхідному напрямі.

Структура металів та сплавів залежить від їх хімічного складу та способу одержання. Контролюють та досліджують метали та сплави макро- і мікроаналізом, рентгеноскопією, термічним, дилатометричним, електричним, магнітним, ультразвуковим, люмінесцентним, кольоровим способами та ін. Фізичні способи аналізу та контролювання металів та сплавів застосовують для виявлення внутрішніх дефектів (пористості, шлакових і газових включень) при дослідженні кристалічної будови. Для визначення внутрішніх дефектів можна застосовувати рентгенівський аналіз, спосіб радіоактивних ізотопів, ультразвуковий та магнітний способи.

При вивченні кристалічної будови металів та визначенні дефектів застосовують радіаційні способи дослідження. До них належать просвічування рентгенівським та γ -випромінюванням. Цей спосіб ґрунтується на здатності рентгенівського та γ -проміння проходити крізь непрозорі для видимого світла тіла, а також і метали, діяти на фотоемulsійний шар, іонізувати гази та ін. Рентгенівське випромінювання, на відміну від світла, має довжину хвилі в 10 000 разів меншу, що дає змогу йому проникати в глибину металу, відбиватися від атомів, поглинатися по-різному ділянками суцільного металу та металу з тріщинами, газовими та шлаковими включеннями. Якщо на шляху встановити фотографічну пластинку чи плівку, то одержимо фотографічне зображення дефектів деталі, яку досліджують. Дефекти можна спостерігати на висвітлю вальному екрані, якщо його розмістити на шляху проміння за об'єктом, що

досліджується. Глибина проникнення рентгенівського проміння при контролюванні, наприклад, сталевих деталей – 100 мм, а алюмінієвих – 400 мм. Цей спосіб застосовують для контролювання відлитих, відкованих, зварених деталей з метою виявлення на певній глибині раковин, пустот, газових бульбашок і пор, тріщин і волосовин, непроварів тощо.

Рентгенівський аналіз будови металів ґрунтується на тому, що проміння, яке проникає всередину кристалічних тіл, відбивається від атомних площин кристалів і виявляє розміщення атомів. При дослідженні об'єкта на нього спрямовують рентгенівське проміння. На плівці чи пластинці, яка знаходиться під об'єктом, фіксується рентгенограма, яка є джерелом визначення якості деталі. Об'єкти, товщиною більше 500 мм, досліджуються апаратами потужного випромінювання. Це прискорювачі електронів: лінійні, бетатрони та мікротрони.

Джерелами γ -випромінювання є радіоактивні ізопои. Нукліди тулій-170, іридій-192, цезій-137, кобальт-60 знаходяться в герметично закритій ампулі, яка розміщена в радіаційній головці із захисним блоком. Для виготовлення блоків застосовують захисні матеріали. Для дослідження металів і сплавів використовують пересувні та стаціонарні дефектоскопи, що мають дистанційне керування. Вони зручні та надійні в експлуатації. Прилади ці конструктивно прості, міцні і дають змогу якісно виконувати радіографію, радіоскопію та радіометрію.

Радіографією називають фіксування на фотоплівці чи на папері з ксеропластика рентгенівського та γ -випромінювання. Радіографія дає змогу виявити дрібні дефекти в металах, що досліджуються.

Радіоскопією називають перетворення пучків, що проникли через деталь, на видиме на екрані зображення внутрішньої структури, яке можна передавати на відстань.

Радіометрія – дослідження металів, при якому за допомогою електричних сигналів реєструють внутрішню будову об'єкта, що дає змогу дати найповнішу характеристику деталі. Особливості способу: легкість автоматизації контролювання деталі, висока чутливість та ін.

Для вивчення дифузії при плавленні металів та для дослідження і контролювання спрацювання тертьових частин деталей застосовують *мічені атоми (радіоактивні ізопои)*. Спосіб полягає в тому, що при контролюванні можна спостерігати сліди мічених атомів та виявляти

внутрішню структуру сплаву. Дійсно, за мікрорадіоавтографією (рис. 2.1) можна легко визначити розподіл олова в нікелі. Застосовують також термічний, дилатометричний, електричний та магнітний способи контролювання.



Рисунок 2.1 – Рентгенограма металу

Термічним аналізом називають спосіб дослідження металів та сплавів при нагріванні та охолодженні об'єкта, що контролюється, його застосовують для встановлення критичних точок при побудові діаграми стану сплавів. Одержані діаграми стану сплавів дають необхідну характеристику температурного перетворення сплавів. Це дає змогу раціонально вибирати умови початку і кінця обробки металів або сплавів.

Дилатометричним аналізом називають спосіб дослідження металів та сплавів за зміною довжини при нагріванні чи охолодженні об'єкта, що контролюється. Для випробування застосовують стандартні зразки, які дають змогу визначити критичні точки та коефіцієнти теплового розширення металів та сплавів. Одержані за допомогою дилатометрів дані дають змогу побудувати діаграму в координатах температура нагрівання – подовження зразка. По діаграмі визначають фазові перетворення в металах, температуру алотропічних перетворень у залізі тощо. Якщо вивчають електроопір зразків, то будують відповідні діаграми, а спосіб називають електричним. Магнітну дефектоскопію використовують для виявлення дефектів у чавунних та сталевих деталях. Цей спосіб дає змогу знайти тріщини, волосовими, бульбашки, пори та раковини в металі. В основі способу – залежність магнітних властивостей від структури або складу. Для виявлення дефектів застосовують магнітні дефектоскопи, за допомогою яких намагнічують об'єкти, що контролюють. На поверхню об'єкта наносять магнітну суспензію чи феромагнітний

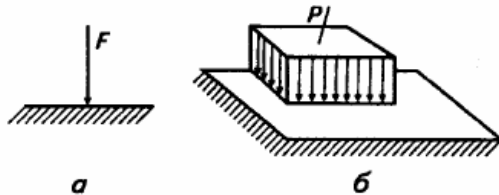
порошок. У деталі з дефектами магнітні силові лінії обгинають місця дефектів, утворюючи рисунки з часток порошку, що дає змогу виявити візуально місця розміщення, форму та характер дефекту. Після огляду деталей розмагнічують.

Для контролювання якості виливків, поковок і деталей застосовують **ультразвукову дефектоскопію**. Застосування ультразвукового дефектоскопа більш поширене, ніж магнітного. Ультразвук застосовують для аналізу деталей з будь-яких металів та сплавів, виявлення макро- і мікрodefektів, що знаходяться в об'єкті на значній глибині. Суть дослідження полягає в тому, що приладом ультразвукові коливання з частотою 20..30 кГц посилаються в глибину об'єкта. Ультразвукові коливання, подібно до світлових променів, відбиваються і не проходять через тріщини, раковини, створюючи акустичну тінь.

2.2 Основні механічні властивості матеріалів та їхні характеристики

Механічні властивості пов'язані з поняттям про навантаження, деформацію та напруження.

Навантаження – це зовнішні сили, що прикладаються до тіла (матеріалу). Вони бувають зосереджені або розподілені по довжині, поверхні та об'єму (рис. 2.2). Зосереджена сила позначається літерою F , вимірюється в ньютонах (Н), в техніці – в меганьютонах (МН). Розподілена сила по поверхні – це тиск P , вимірюється в паскалях (Па), частіше – в мегапаскалях (МПа). Під дією зовнішніх сил тіло (матеріал) деформується, тобто змінюються його розміри і форма (конфігурація).



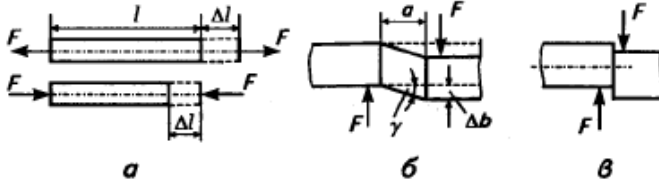
а – зосереджена сила F (Н);
б – розподілена сила по поверхні – тиск P (Н/м²; МН/м²)

Рисунок 2.2 – Основні види навантаження

Деформація – це зміни форми і розмірів тіла під дією навантаження зовнішніми силами.

1. Видовження при розтягуванні або вкорочення при стисканні (рис. 2.3, а).

2. Зсув або зріз (рис. 2.3, б, в).



а – видовження (при розтягуванні) або вкорочення (при стисканні);
б – зсув; в – зріз

Рисунок 2.3 – Види деформацій

Деформації позначаються так:

Δl – абсолютне видовження (мм, см);

$\varepsilon = \Delta l / l$ – відносне видовження, як відносна величина (без розмірності), або у відсотках (%);

l – початкова довжина стержня;

Δa – абсолютний зсув (мм, см); $\Delta a / a \approx \gamma$ – відносний зсув або просто кут зсуву.

Деформації бувають пружні і пластичні. *Пружні* – це такі, що повністю зникають після усунення зовнішніх сил, що їх спричинили. *Пластичні* (або залишкові) – це такі, що не зникають, тобто залишаються після розвантаження. Виникнення пружних деформацій в матеріалі неодмінно супроводжується появою в ньому напружень. При навантаженні тіла, тобто при його деформуванні, в ньому виникають сили пружності, додаткові до тих сил взаємодії між атомами, що існують у не навантаженому тілі. Напруження – це величина сили пружності, що діє на одиницю площі перерізу тіла. Напруження позначається літерою σ . У кількісному виразі напруження в заданій точці тіла визначається відношенням сили, або навантаження F , що діє на площинку S довкола цієї точки, до величини цієї площинки. Тобто

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (2.1)$$

де F – навантаження;

S – площа, на яку можна вважати, це навантаження діє.

Напруження, яке діє перпендикулярно (нормально) до площі перерізу, називається *нормальним*.

При невеликому навантаженні абсолютне видовження Δl пропорційне навантаженню F , тобто діє відомий з курсу фізики закон Гука:

$$\Delta l = \frac{Fl}{ES}, \text{ або } \sigma = E\varepsilon, \quad (2.2)$$

де E – модуль Юнга, який характеризує жорсткість матеріалу.

Жорсткість – це властивість матеріалу чинити опір прагненню зовнішніх сил пружно деформувати матеріал. З формули (2.1) видно, що чим більший модуль E , тим меншою є деформація Δl і навпаки: видовження Δl тим більше, чим меншою є жорсткість матеріалу, тобто чим менший модуль E .

Значення модуля E для деяких найхарактерніших матеріалів наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення модуля Юнга для деяких матеріалів

| Матеріал | E , МПа | Матеріал | E , МПа |
|-------------------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|
| Алмаз | $12,9 \cdot 10^3$ | Деревина (вздовж волокон) | $1,11 \cdot 10^3$ |
| Алюміній та його сплави | $0,7 \cdot 10^3$ | Деревина (впоперек волокон) | $0,007 \cdot 10^3$ |
| Залізо, сталі | $2,0 \cdot 10^3$ | Текстоліт | $8,0 \cdot 10^3$ |
| Мідь та її сплави | $1,0 \cdot 10^3$ | Гетинакс | $1,6 \cdot 10^3$ |
| Золото | $0,8 \cdot 10^3$ | Вініпласт | $3,54 \cdot 10^3$ |
| Вольфрам | $4,0 \cdot 10^3$ | Капрон | $1,7 \cdot 10^3$ |
| Скло | $0,56 \cdot 10^3$ | Фторопласт, поліетилен | $7,0 \cdot 10^3$ |
| Свинець | $0,17 \cdot 10^3$ | Каучук, гуми | $8,0 \cdot 10^3$ |

Міцність матеріалів – це їх здатність витримувати навантаження, не руйнуючись. **Пружність** – це здатність матеріалів повністю відновлювати свою форму і розміри після усунення причин, що спричинили деформацію.

Характеристики міцності, пружності, так само як і характеристики жорсткості визначають експериментально. Для цього навантаження (силу F) поступово збільшують, а видовження Δl заміряють і будують діаграму в координатах $F - \Delta l$. Вона характеризує

властивості зразка з розмірами: l_0 – довжина і S_0 – площа поперечного перерізу. Для того, щоб мати характеристики матеріалу, незалежні від розмірів зразка чи деталі, діаграму F - Δl перебудовують у діаграму σ - ϵ , поділивши F на S ($F/S=\sigma$), а Δl на l ($\Delta l/l=\epsilon$). При цьому змінюється лише масштаб діаграми, і характеризує вона властивості матеріалу.

2.3 Твердість та методи її визначення

Твердість – це властивість матеріалів чинити опір проникненню в них загострених, твердих тіл – інденторів (англ. Indent – зазубрена, виїм).

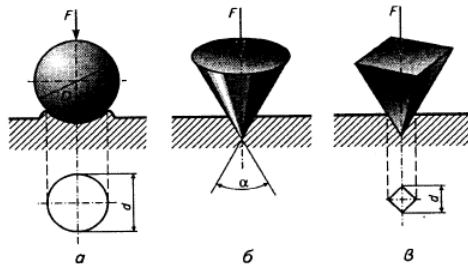
Методів визначення твердості чимало: дряпанням, динамічні, статичні. Найбільш поширені статичні – вдавлюванням індентора в поверхневі шари випробуваного матеріалу. Індентор – кулька, конус або пірамідка – виготовляються з алмазу, загартованої сталі або з твердого сплаву.

Метод Брінелля. Число твердості – HB, індентор – сталева кулька діаметром D , що дорівнює 10; 5 або 2,5 мм, вдавлюється навантаженням F (Н). За допомогою спеціального мікроскопа вимірюється діаметр d відбитка (мм), а відтак визначається число твердості HB (рис. 2.4, а):

$$HB = F/S, \quad (2.3)$$

де S – площа поверхні відбитка (мм^2), тобто сферичного сегмента.

Для того, щоб при випробуванні кульками різних діаметрів одержувати однакові числа твердості, діаметр D і навантаження F обирають відповідно до довідникових даних.



а – за Брінеллем; б – за Роквеллом; в – за Віккерсом

Рисунок 2.4 – Визначення твердості

Метод Брінелля дає надійні результати в межах 80...4500 НВ.

Значення НВ для деяких матеріалів: свинець (30...80), золото (130...250), залізо (500...800), сталі (1500...3000), загартовані сталі (6000...7000).

Метод Роквелла. Число твердості – HR, індентор – алмазний конус (рис.2.4, б) або загартована сталева кулька $D=1,59$ мм. Навантаження F на індентор складається з двох частин:

$$F = F_0 + F_1,$$

де $F_0=0,1$ кН – попереднє навантаження;

$F_1=0,5; 0,9$ або $1,4$ кН – основне навантаження.

Отже, сумарне, або загальне, навантаження F може бути: 0,6; 1,0 або 1,5 кН.

Число твердості, за Роквеллом, пов'язане з глибиною проникнення індентора й автоматично визначається твердоміром за допомогою індикатора, що має три "шкали Роквелла" А, В, С, а відтак – три можливі числа твердості HRA (для дуже твердих матеріалів), HRB (для м'яких та середніх матеріалів), HRC (для середніх та твердих матеріалів).

HR не має розмірності, вимірюється в межах твердості 20...100 HR, наприклад для загартованих сталей 60...70 HR.

Метод Віккерса. Число твердості – HV, індентор – алмазна чотиригранна піраміда (рис. 2.4, в). Величина навантаження дорівнює 10; 30; 50; 100; 200; 300; 500; 1000 та 1200 Н (частіше 100 Н). Тривалість навантаження для чорних металів становить 10...15 с, для кольорових – 30 с. При відомому навантаженні F вимірюється (за допомогою вмонтованого у прес мікроскопа) діагональ відбитка d (рис.2.4, в) і визначається число твердості HV (S - площа поверхні відбитка):

$$HV = F/S = 18,54F/d^2.$$

Методом Віккерса можна визначити твердість будь-яких матеріалів – від найм'якших і до алмаза (практично до 9 000 МПа).

Між значеннями твердості, виміряними різними методами, існує відповідна кореляція, яку подають у вигляді таблиць, номограм тощо.

Числа твердості за Брінеллем і Віккерсом практично співпадають до 4 000 МПа, тобто $HV=HB$.

При визначенні твердості дуже тонких стрічок, фольг, дроту малих діаметрів, тонких деформованих шарів, гальванічного покриття,

напилення, тобто при визначенні мікротвердості, теж застосовується вдавлювання алмазної пірамідки з кутом при вершині $\alpha=136^\circ$ при навантаженні, що може становити 0,05...50 Н. Випробування проводять на приладі ПМТ-3.

Метод Мооса – десятибальна шкала для визначення твердості мінералів. Визначається твердість дряпанням (алмазним або твердосплавним наконечником) і характеризується кількістю балів НМ (від 1 до 10): тальк – 1; гіпс – 2; кальцит – 3; флюорит – 4; апатит – 5; ортоклаз – 6; кварц – 7; топаз – 8; корунд, сапфір – 9; алмаз – 10.

Між твердістю та міцністю (границею міцності σ_b) є досить стійка кореляція (співвідношення або взаємний зв'язок), а саме:

$$\sigma_b = kНВ.$$

Для широкого класу матеріалів (при руйнуванні яких утворюється шийка) $k = 0,25...0,55$, тобто $\sigma_b = (0,25...0,55)НВ$.

Твердість значною мірою зумовлює іншу властивість матеріалів – *зносостійкість*, тобто здатність матеріалів чинити зношуванню. **Зношування** (спрацювання) – це процес зміни розмірів, форми, маси або стану поверхневих шарів матеріалу під впливом тертя та зовнішнього середовища. Зношування (спрацювання) буває: абразивне, корозійно-механічне, ерозійне тощо.

3 ТЕОРІЯ СПЛАВІВ. ДІАГРАМИ СТАНУ СПЛАВІВ

3.1 Основи теорії сплавів

Сплав – це речовина, яку одержують поєднанням (сплавленням, спіканням, електролізом) двох або більше елементів. Структура і властивості сплавів значною мірою відрізняються від структури і властивостей елементів, що їх утворюють. Сплав, виготовлений переважно з металів, який має металеві властивості, називають *металевим сплавом*. Порівняно з чистими металами сплави мають більш цінний комплекс механічних, фізичних і технологічних властивостей. Залежно від кількості елементів (компонентів), що входять до складу розплаву, розрізняють двохкомпонентні, трикомпонентні або багатоконпонентні сплави (системи). У розплаві всі компоненти сплаву знаходяться в атомарному стані, утворюючи рідкий однорідний розчин із статично однаковим хімічним складом. Під час тверднення (кристалізації) атоми компонентів розташовуються у певному порядку, утворюючи кристалічну речовину – *сплав*. При цьому існує три типи взаємодії компонентів сплаву:

- утворення механічної суміші компонентів;
- утворення хімічних сполук;
- утворення твердих розчинів.

У разі формування *механічної суміші* компонентів сплаву атоми кожного з компонентів утворюють власні кристалічні ґратки, тобто кожний елемент кристалізується самостійно. Механічну суміш, яку утворюють два компоненти, що нездатні взаєморозчинюватись або утворювати хімічну сполуку при кристалізації з рідкого стану, називають *евтектикою*. Структура сплавів такого типу (Sn – Zn, Sb – Pb) неоднорідна (гетерогенна). Слід очікувати, що властивості цих сплавів будуть усередненими, виходячи з рівня властивостей компонентів та їхнього кількісного вмісту у сплаві.

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

компонентів сплаву. При цьому утворюється речовина з новими властивостями, для якій характерно: чітке співвідношення кількості атомів елементів, що її утворюють A_nB_m (наприклад, Fe_3C , Fe_2O_3); наявність власного типу кристалічної ґратки; певна (постійна) температура плавлення; суттєва відмінність у властивостях порівняно з вихідними елементами; стрибкоподібна зміна властивостей при зміні хімічного складу.

Якщо при переході сплаву з рідкого стану в твердий зберігається однорідність і розчинність елементів, що його утворюють, такий сплав називають **твердим розчином**. При утворенні твердого розчину один з елементів зберігає власну кристалічну ґратку (розчинник), а інший у вигляді окремих атомів розподіляється у його кристалічній ґратці. Залежно від характеру їх розміщення в ґратці розчинника розрізняють тверді розчини заміщення й тверді розчини втілення. При утворенні **твердих розчинів заміщення** атоми компонента, що розчиняється, заміщують частину атомів розчинника у вузлах його кристалічної ґратки. Необмежену розчинність (здатність утворювати тверді розчини при будь-яких пропорціях компонентів) мають лише метали з кристалічною ґраткою одного типу за умови, що параметри їхніх ґраток відрізняються не більше, ніж на 8...15%.

Проте допустимі відміни в параметрах для різних пар металів різні. Взаємодію елементів у сплавах і характер структури зумовлює фізична природа елементів, тобто тип кристалічної ґратки, розташування елементів у періодичній системі Д.І.Менделєєва тощо. Дійсно, метали, розташовані поблизу один від одного у таблиці Д.І.Менделєєва, мають необмежену розчинність: $Cu(29)$ і $Ni(28)$; $Fe(26)$ і $Ni(28)$; $Fe(26)$ і $Cr(24)$; $Fe(26)$ і $Co(27)$; $Co(27)$ і $Ni(28)$; або розташовані в одній групі: $As(33)$ і $Sb(51)$; $Au(79)$ і $Ag(47)$; $Au(79)$ і $Cu(29)$ (цифри у дужках означають номер елемента).

Елементи з кристалічними ґратками різного типу, якщо їхні атоми близькі за розмірами, можуть розчинюватись один в одному обмежено. Чим більша різниця в розмірах атомів компонентів, тим менше вони розчиняються у твердому стані. Обмежена розчинність компонентів характерна також при утворенні ними твердих розчинів втілення, тобто таких, коли атоми розчинених компонентів розташовуються (втілюються) у міжвузельних об'ємах метала-розчинника. При цьому атоми розміщуються не в будь-якому

міжвузлі, а лише в тих, де для них достатньо вільного об'єму. Ці порожнини малі за розміром, у них можуть розміститись елементи, атоми яких мають відповідні невеликі розміри (водень, азот, вуглець, бор). Вміст їх у твердому розчині втілення не перевищує 1...2%. Тобто такі сплави є твердими розчинами з обмеженою розчинністю компонентів. Властивості сплавів, що утворюють тверді розчини, відрізняються від властивостей елементів компонентів. Проте сплави зберігають основні властивості металів, а саме: здатність до пластичної деформації, електропровідність тощо. Відзначимо також, що на відміну від механічної суміші твердий розчин є однорідним (однофазним), складається з одного виду кристалів, має одну (певну) кристалічну ґратку; на відміну від хімічної сполуки твердий розчин існує не за строго визначеного співвідношення компонентів, а в інтервалі концентрацій. У металознавстві чисті компоненти позначають латинськими літерами *A, B, C*, а тверді розчини – грецькими літерами α, β, γ тощо.

3.2 Діаграми стану сплавів

Важливо знати стан і структуру сплавів залежно від зміни температури і концентрації компонентів, що їх утворюють. Такий зв'язок наочно відображають **діаграми стану сплавів**, які будують на основі результатів експериментів з використанням методів термічного, магнітного, металографічного та інших аналізів.

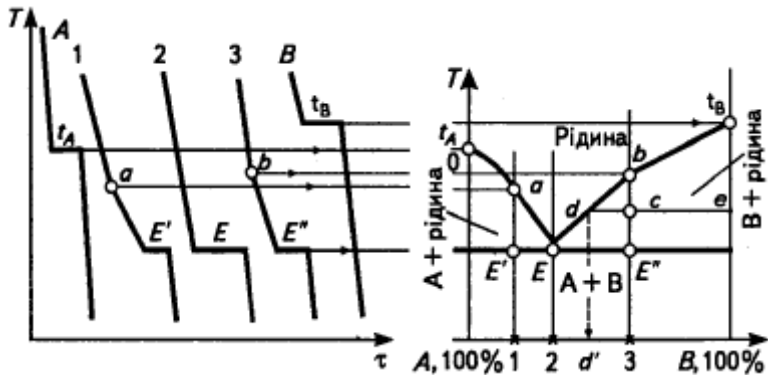
Температури, при яких відбуваються зміни стану (перетворення) сплаву, називають **критичними**: $T_{пл}$ - температура плавлення; $T_{кр}$ – температура кристалізації тощо. Для побудови діаграм стану необхідно знати критичні температури сплаву. Визначають їх на основі аналізу швидкостей охолодження (нагрівання), графічно зображених у координатах «температура-час». Кристалічні речовини (метали, сплави) мають певну фіксовану температуру плавлення (при нагріванні) та кристалізації (при охолодженні). Кристалізація (тверднення) чистих металів відбувається за постійної температури, а сплавів – в інтервалі температур. Побудова діаграм стану базується на експериментальному одержанні серії графіків охолодження розплавів з різним (заданим) вмістом компонентів системи та визначення за ними критичних температур (точок) фазових перетворень. Температура початку кристалізації сплаву називають точками **ліквідус**

(від. лат. liquidus - рідкий), а закінчення кристалізації – *солідус* (від лат. solidus – твердий). Для побудови діаграми стану на осі абсцис відкладають концентрацію компонентів досліджуваних сплавів (рис.3.1).

Крайня точка ліворуч по осі концентрації відповідає 100% компонента А і 0% В (початок осі абсцис), а крайня точка праворуч відповідає 100% компонента В і 0% А. Значення температури відкладають по осі ординат. Сплави з різним вмістом компонентів А і В мають різний фазовий склад, структуру, а отже і властивості. Діаграми стану дають уяву про формування структури і фазового складу будь-якого сплаву даної системи залежно від: концентрації компонентів, температури, заданої швидкості охолодження; дозволяють простежити зміни (за визначених умов) певних фізичних і механічних властивостей.

Перш ніж розглядати діаграми стану, слід визначити деякі терміни і поняття.

Система – це сукупність металів або металевих сплавів, обраних для спостереження впливу на них певних факторів (температури, тиску, концентрації). Систему називають *рівноважною*, якщо перетворення в ній при нагріванні та охолодженні відбуваються зворотно, а рівноважні умови досягаються за незначних ступенів перегріву чи переохолодження.



а – графіки охолодження, отримані методом термічного аналізу;

б – діаграма фазової рівноваги компонентів А і В

Рисунок 3.1 – Схема побудови діаграми стану двокомпонентної системи (А-В) з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому стані і нерозчинних у твердому

Компонент – незалежна складова частина системи (сплаву). Компонентами можуть бути чисті метали (елементи) або стійкі хімічні сполуки. Кількість компонентів позначають літерою *K*.

Фаза – це хімічно однорідна частина системи, відокремлена від інших частин (фаз) поверхнею розділу. У сплавах фазами можуть бути чисті метали, рідкі або тверді розчини, хімічні сполуки. Фази відрізняються одна від одної за: агрегатним станом; хімічним складом; типом кристалічної ґратки. Кількість співіснуючих у сплаві фаз позначають літерою *Ф*.

Число ступенів свободи визначає кількість незалежних перемінних (температура, концентрація, тиск), які, не порушуючи рівноваги системи, можна змінювати у певних межах. Рівноважним називають такий стан сплаву, що не змінюється у часі. Число ступенів свободи позначають літерою *С*.

Закономірності всіх змін системи, залежно від внутрішніх і зовнішніх умов, підпорядковані **правилу фаз Гіббса**:

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

де *С* – число ступенів свободи;

K – кількість компонентів;

V – зовнішні перемінні фактори (температура, тиск);

Ф – кількість фаз.

3.3 Основні види діаграм стану двокомпонентних сплавів

3.3.1 Діаграма стану сплавів, компоненти яких необмежено розчинні у рідкому стані та практично не розчинні у твердому

До таких сплавів відносять, наприклад, сплави систем Pb-Sb, Sn-Zn. У твердому стані вони утворюють механічну суміш кристалів компонентів. Така суміш, якщо вона закристалізувалась з рідини за температури нижчої від температур плавлення компонентів сплаву, називається **евтектикою**, або евтектичною сумішшю (eutektos – з грецької означає легкоплавкий). Сплави хімічного складу, при якому кристалізується лише евтектика (точка *E* діаграми), називають **евтектичними**. Сплави, що за складом розташовані на діаграмі ліворуч від евтектичного, називають доевтектичними, а праворуч – заевтектичними.

Розглянемо діаграму стану першого типу (рис. 3.1). Якщо два компоненти у твердому стані нерозчинні один в одному (утворюють механічну суміш), добавка одного компонента до іншого знижує температуру початку тверднення (лінія ліквідус на діаграмі). Температура ж закінчення тверднення (лінія солідус) не залежить від складу сплаву даної системи і однакова для всіх сплавів, утворених даною парою компонентів. При температурах точок a і v у розплаві утворюються кристали A (у сплаві 1) і B (у сплаві 3). Структура доевтектичного сплаву 1 складається з первинних кристалів компонента A і евтектики $A+B$ у співвідношенні за об'ємом 50 : 50% (за правилом відрізків). Структура евтектичного сплаву 2 на 100% складається з евтектичної суміші $A+B$. Сплав 3 (заевтектичний) має структуру, що складається з кристалів компонента B і евтектики $A+B$ при їхньому об'ємному співвідношенні 50 : 50%.

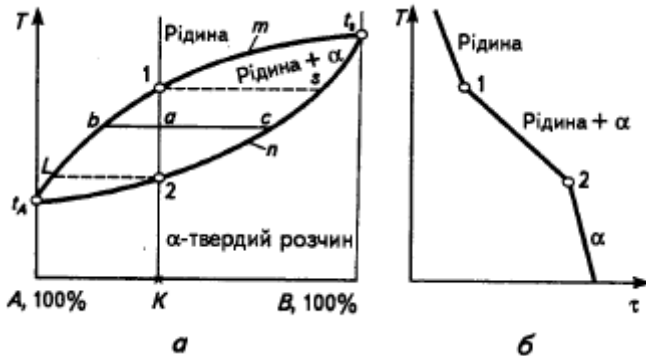
Склад і кількість кожної фази у будь-якій двофазовій області діаграми стану дозволяє визначити **правило відрізків**. Для визначення вмісту компонентів у фазах сплаву, на діаграмі стану проводять горизонтальну лінію (коноду) до перетину з лініями, що обмежують цю область. Проекції точок перетину коноди з лініями діаграми на вісь концентрації показують склад фаз. Так, для сплаву 3 (див. рис.3.1) при температурі точки c рідина за своїм складом відповідає точці d' на осі абсцис.

Для визначення кількісного співвідношення фаз визначають довжину відрізків коноди від заданої точки діаграми до точок, що відповідають складу фаз.

Наприклад (рис.3.1), у сплаві 3 при температурі точки c кількість рідини пропорційна відріzkу ce і становить 70%, а кількість первинних B -кристалів пропорційна відріzkу dc і дорівнює 30%.

3.3.2 Діаграма стану сплавів, які утворюють у твердому стані кристалічні тверді розчини з необмеженою взаємною розчинністю компонентів

У процесі охолодження таких сплавів з розплаву випадають кристали твердого розчину з різним співвідношенням компонентів. Верхня крива m (рис. 3.2) – ліквідус, нижня n – солідус.



а – діаграма стану; б – крива охолодження
Рисунок 3.2 – Сплав з необмеженою розчинністю компонентів у рідкому та твердому станах

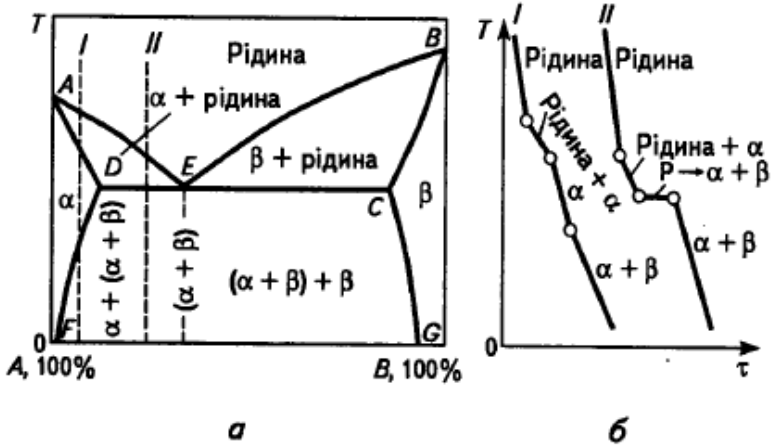
Внаслідок процесів дифузії концентрація сплаву вирівнюється (найактивніше – при повільному охолодженні). Прикладом таких сплавів може служити система сплавів Cu – Ni.

3.3.3 Діаграма сплавів, компоненти яких утворюють тверді розчини з обмеженою розчинністю

Така діаграма характерна, наприклад, для системи сплавів Cu–Ag (рис. 3.3). Крива AEB – ліквідус, крива $ADECB$ – солідус. Кристали твердого розчину втілення атомів компонента В у кристалічній ґратці компонента А (α -твердий розчин) випадають при температурах відповідно лінії AD . При температурах і концентраціях компонентів, що відповідають лінії CB , кристалізуються тверді розчини втілення атомів компонента А у кристалічній ґратці компонента В (β -твердий розчин). Сплав, склад якого відповідає точці E на діаграмі, кристалізується з утворенням евтектики ($\alpha+\beta$).

Сплави між точками D і C після кристалізації з розплаву складаються з кристалів α -твердого розчину і евтектики ($\alpha+\beta$), а між точками C і E – з кристалів β -твердого розчину і евтектики ($\alpha+\beta$). Сплави з вмістом компонента B , меншим ніж у точці D , закінчують кристалізацію по лінії AD і складаються з кристалів α . При зниженні температури (лінії DF) ці кристали стають пересиченими щодо компонента B , тому з твердого α -розчину утворюються кристали β -

твердого розчину. Таку кристалізацію з твердого розчину називають вторинною, а з рідкого – первинною. У сплавах з вмістом компонента B більшим ніж у точці E , при температурах нижчих лінії EC , з кристалів твердого β -розчину утворюються кристали $\alpha_{вт}$.



а – діаграма стану; б – криві охолодження

Рисунок 3.3 – Сплави з обмеженою розчинністю компонентів у твердому стані

3.3.4 Діаграма стану сплавів з утворенням хімічної сполуки

Такий тип діаграми (рис.3.4) характерний, наприклад, для сплавів системи $Mg - Ca$. Хімічну сполуку A_nB_m (Mg_4Ca_3) можна розглядати як третій компонент, що поділяє діаграму стану системи $A - B$ ($Mg - Ca$) на дві діаграми першого типу: системи $A - A_nB_m$ ($Mg - Mg_4Ca_3$) та $A_nB_m - B$ ($Mg_4Ca_3 - Ca$).

Визначення зв'язку властивостей сплавів з типом діаграми стану є важливою передумовою для створення нових сплавів і прогнозування їхніх властивостей.

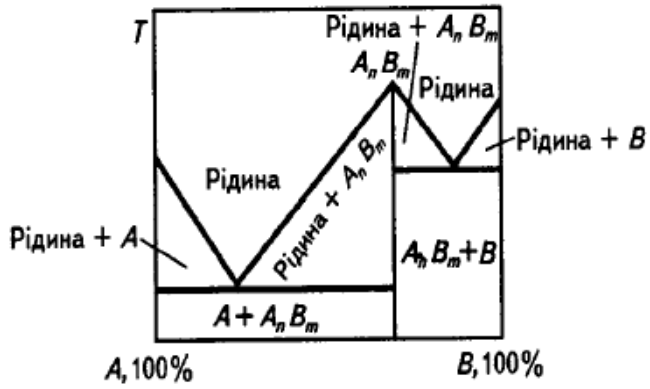


Рисунок 3.4 – Діаграма стану сплавів, компоненти яких утворюють хімічну сполуку

4 КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ І СПЛАВИ. ВЛАСТИВОСТІ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ТА ОБЛАСТІ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Кольорові метали мають комплекс цінних властивостей, таких, наприклад, як теплопровідність (алюміній, мідь), низьку температуру плавлення (свинець, олово), малу питому вагу (алюміній, магній) тощо. Проте застосування їх у чистому вигляді досить обмежене. Широко застосовуються у промисловості сплави кольорових металів – латуні, бронзи, бабіти (на основі міді, цинку, олова, свинцю), а також дюралю міни і силуміни (на основі алюмінію), сплави на основі титану, магнію. На основі кольорових металів та їхніх сплавів створюються також композиційні матеріали та такі, що виготовляють методами порошкової металургії.

4.1 Алюміній та його сплави

Алюміній – легкий метал третьої групи періодичної системи елементів, сріблясто-білого кольору, з густиною $2,7 \text{ г/см}^3$, високою електро-, теплопровідністю та корозійною стійкістю (утворює щільну поверхневу плівку оксиду Al_2O_3). Температура плавлення алюмінію, залежно від чистоти металу, становить $660...667^\circ\text{C}$. Прокатний і відпалений алюміній високої чистоти має міцність $\sigma_{\text{в}} = 60 \text{ МПа}$, модуль пружності $E = 7 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, пластичність: $\delta = 50\%$, $\psi = 85\%$, твердість 25 НВ. Алюміній високо пластичний, маломіцний матеріал, добре обробляється тиском, зварюється, але погано піддається обробці різанням. Як конструкційний матеріал його не застосовують. Постійні домішки (Fe, Si, Ti, Mn, Cu, Zn, Cr) знижують фізико-хімічні характеристики і пластичність алюмінію: А999 (0,001% домішок), А995 (0,005% домішок), А99 (0,01% домішок), а також А97, А95.

Введення легуючих елементів дозволило створити низку алюмінієвих сплавів з різними фізико-механічними та технологічними властивостями. Сплави алюмінію поєднують у собі кращі властивості чистого алюмінію і підвищені характеристики легуючих елементів. Так, залізо, титан, нікель підвищують жароміцність сплавів; мідь, марганець, магній забезпечують зростання характеристик міцності. Легуванням і відповідною термічною обробкою досягають

підвищення міцності алюмінію (σ_b) від 100 до 500 МПа, твердості – від 20 до 150 НВ.

За технологією виготовлення заготовок і виробів усі промислові сплави алюмінію поділяють на три групи: *деформовані*, *ливарні*, *спечені*.

Сплави, що піддають деформуванню, повинні забезпечувати високу технологічну пластичність для здійснення операцій прокатування, кування, пресування тощо. Деформовані сплави алюмінію поділяють на такі, що зміцнюють термічною обробкою, і такі, що не зміцнюють.

До **термічно незміцнюваних сплавів** належать технічний алюміній (АД, АД1, АД0), сплави алюмінію з марганцем (позначають АМц) і сплави з магнієм та марганцем (позначають АМг). Вони володіють помірною міцністю, пластичністю, добре зварюються, корозійно стійкі. Залежно від стану поставки листу (0,5...10 мм) у позначенні марки сплаву додають літери. В разі поставки сплаву у відпаленому стані пишуть літеру М – м'які (АМгМ), при незначному наклепуванні – літеру П (АМгП), при значному – літеру Н (АМгН). Так, міцність і пластичність сплаву АМцН складає $\sigma_b = 220$ МПа, $\delta = 5\%$, а сплаву АМцМ - $\sigma_b = 130$ МПа, $\delta = 20\%$.

Мало навантажені деталі зварювальних і клепанних конструкцій, деталі глибокої витяжки виготовляють зі сплавів типу АМцН, а також АМг2М, АМг3М ($\sigma_b = 170..200$ МПа, $\delta = 4..18\%$). Деталі конструкцій середнього навантаження та високої корозійної стійкості виготовляють зі сплавів типу АМг5М, АМг6М ($\sigma_b = 280$ МПа, $\delta = 15\%$). Зі сплавів АМц і АМг виготовляють лист, прутки, дріг.

Термічно зміцнювані сплави алюмінію за хімічним складом і властивостями більш різноманітні. Їх поділяють на:

- сплави підвищеної пластичності АВ, АД31, АД33 (на основі системи Al-Mg-Si);
- конструкційні сплави (Al-Cu-Mg) – дюралю міни марок Д1, Д16, Д18, В65;
- ковочні (Al-Mg-Si-Cu) марок АК6, АК8;
- високоміцні (Al-Zn-Mg-Cu) марок В95, В96;
- жароміцні сплави систем (Al-Cu-Mg) марок АК4-1 та (Al-Cu-Mn) Д20.

Сплави підвищеної пластичності – авіалі (АВ, АД31, АД33) – містять у своєму складі, крім алюмінію, 0,4...1,2% Mg, 0,3...1,2% Si,

0,15...0,35% Mn, добре зварюються, корозійно стійкі. Термічна обробка їх складається з гартування від 515...525 °С і старіння (природного або штучного). Штучне старіння проходить значно швидше і здійснюється при 160...170 °С протягом 12...15 год. одразу ж після гартування. Після гартування та штучного старіння властивості сплаву АВ дорівнюють: $\sigma_b = 260...380$ МПа, $\sigma_T = 200...250$ МПа, $\delta = 14...20\%$. Зі сплавів АВ, АД3 виготовляють листи, труби, пресовані профілі, заготовки, ковани деталі двигунів, лопасті гвинтів вертольотів тощо.

Конструкційні сплави (дюралюміні) широко застосовуються у різних галузях техніки. Їх маркують літерою Д, після якої стоїть цифра, що відповідає умовному номеру сплаву. Термічна обробка дюралюмінів складається з гартування від 500...510 °С (охолодженням у киплячій воді) і старіння. Природне старіння здійснюють за кімнатної температури протягом 5...7 днів, штучне – за температур 150...190 °С протягом 4...12 год. або при 250 °С протягом 2...4 год. Особливістю гартування дюралюмінів є необхідність додержуватися температурного режиму, наприклад, 505±5 °С (для Д1) і 500±5 °С (для Д16, Д18). Дюралюмін Д16 має найбільшу міцність після гартування та природного старіння: $\sigma_b = 480$ МПа, $\sigma_T = 320$ МПа, $\delta = 14\%$ (лонжерони, шпангоути, обшивки літаків). Дюралюміні виробляють у вигляді листа, пресованих і катаних профілів, прутків, труб. Для підвищення корозійної стійкості їх піддають плакуванню. Відповідно при маркуванні таких сплавів додають літеру А, наприклад Д16А, Д18А. Сплави Д18 і В65 є основними алюмінієвими заклепочними сплавами. Найбільш широко дюралюміні застосовуються в авіаційній промисловості та будівництві.

Алюмінієві сплави, придатні для кування (ковочні), позначають лігерами АК і відносять до системи Al-Cu-Mg-Si. Вони пластичні, стійкі до утворення тріщин під час гарячої пластичної деформації. Ці сплави (АК6, АК8) за хімічним складом близькі до дюралюмінів і відрізняються високим вмістом кремнію (0,7...1,2%). Сплави АК6 і АК8 застосовують після гартування від 520±5 °С (АК6) і 505±5 °С (АК8) та штучного старіння при 160...170 °С протягом 12...15 год. після термічної обробки механічні властивості цих сплавів такі: $\sigma_b = 400$ МПа, $\delta = 12\%$ (АК6); $\sigma_b = 480$ МПа, $\delta = 19\%$ (АК8). Проте обидва сплави мають низьку корозійну стійкість і потребують додаткових заходів щодо захисту від корозії. З них виготовляють

штамповані та куті деталі складної форми і середньої міцності (АК6) – під моторні рами, кріпінж, а також високо навантажені штамповані деталі (АК8), як пояси лонжеронів, лопасті гвинтів вертольотів, бандажі вагонів.

Високоміцні алюмінієві сплави (В95, В96) окрім міді і магнію містять у своєму складі значну кількість цинку (5...8,6%). Підвищену міцність цих сплавів зумовлює наявність в їхній структурі після гартування від 460...470 °С у воді і штучного старіння при 120...140 °С протягом 24...16 год. після термічної обробки механічні властивості для сплаву В95 такі: $\sigma_b = 550...600$ МПа, $\sigma_T = 530...550$ МПа, $\delta = 8\%$; для сплаву В96 $\sigma_b = 700$ МПа, $\sigma_T = 650$ МПа, $\delta = 7\%$. Сплави В95 і В96 застосовують у літакобудуванні для конструкцій високого навантаження і тривалої експлуатації за температур до 100 °С. До недоліків цих матеріалів відносять невисоку пластичність, в'язкість руйнування і низьку корозійну стійкість під напруженням. Підвищення цих характеристик сприяє двоступінчасте пом'якшуюче старіння.

Жароміцні сплави використовують для експлуатації при температурах до 300 °С (поршні, головки циліндрів, диски і лопатки компресорів реактивних двигунів, обшивка надзвукових літаків). Найбільш поширені сплави типу АК4-1 системи Al-Cu-Mg-Si з добавками заліза та нікелю; Д20 системи Al-Cu-Mn з добавками титану та цирконію. Після гартування від $530 \pm 5^\circ\text{C}$ і штучного старіння сплав АК4-1 має такі механічні характеристики: $\sigma_b = 300...180$ МПа, $\sigma_T = 190...120$ МПа, $\delta = 18...12\%$. Сплав Д20 має такі характеристики механічних властивостей: $\sigma_b = 420$ МПа, $\sigma_T = 330$ МПа, $\delta = 11\%$. Перспективними жароміцними сплавами алюмінію є сплави системи Al-Mg-Li, що поєднують високу міцність, низьку питому вагу і достатню жароміцність.

Ливарні сплави алюмінію використовують для виготовлення фасонних виливків різної форми та призначення. До їх складу входять ті самі легуючі компоненти, що й до деформованих сплавів, але у більшій кількості (до 9...13% для кожного компонента). Промисловість виробляє ливарні алюмінієві сплави (АЛ) марок від АЛ1 до АЛ33. при маркуванні цих сплавів літера А означає, що сплав алюмінієвий, літера Л – що сплав ливарний, а цифра – порядковий номер сплаву. За хімічним складом ливарні алюмінієві сплави можна

поділити на кілька груп. Наприклад, алюміній з кремнієм (АЛ2, АЛ4, АЛ9) або алюміній з магнієм (АЛ8, АЛ13, АЛ22 та інші).

Типовими є сплави системи Al-Si (10...13% Si) – силуміни. Розчинність Si в Al мала (0,8% при 500 °С; 0,05% при 20 °С). Тому сплави, які складаються лише з Al та Si, практично не зміцнюються термічною обробкою і в системі Al-Si можуть бути сплави, що частково або повністю складаються з евтектики. Введення в силуміни Cu, Mg сприяє зміцненню сплаву при старінні; Ti, Zr подрібнюють структуру; Mn покращує корозійну стійкість; Ni і Fe підвищують жаростійкість.

Властивості алюмінієвих ливарних сплавів залежать від способу лиття та виду термічної обробки, швидкості охолодження при твердненні виливка і під час гартування. Для ливарних сплавів алюмінію характерна більш груба крупнозерниста структура. Це зумовлює режими їх термічної обробки. Тому для гартування силуміни нагрівають до 520...540 °С і витримують 5..10 год для більш повного розчинення включень. Штучне старіння здійснюють при 150...180 °С протягом 10...20 год. з силумінів виготовляють деталі, які працюють при невеликих (АЛ2), середніх (АЛ4) і вібраційних (АЛ8) навантаженнях, а також при підвищенні до 150...170 °С температурах (АЛ1, ОВ) тощо.

Спечені алюмінієві порошки (САП) сплави на основі Al та Al_2O_3 одержують шляхом брикетування порошку алюмінію, вакуумної дегазації брикетів з подальшим їх спіканням під тиском. Вміст Al_2O_3 у спечених сплавах алюмінію знаходиться у межах від 6...9% (САП1) до 18...22% (САП4). Дрібні частинки Al_2O_3 гальмують рух дислокацій у сплаві і підвищують його міцність. Жаростійкість САП матеріалів при тривалому нагріванні зберігається до 500 °С, а при короткочасному – до 1000 °С.

4.2 Мідь та сплави на її основі

За обсягами виробництва мідь посідає третє місце після заліза та алюмінію. Запаси її у земній корі дорівнюють 0,01%, у сульфідних рудах ($CuFeS$ – мідний колчедан, Cu_2S – халькопірит, CuS – халькозин) – від 0,5 до 5%. Мідь має ГЦК-кристалічну ґратку, температура плавлення становить 1038 °С, питома вага $\rho=8,9$ г/см³.

Одержують мідь із збагаченого концентрату (11...35% Cu), який спочатку обпалюють при 600...850 °С для часткового зниження вмісту сірки, а потім для відділення від рудних домішок плавлять при 1300...1500 °С на штейн (сплав сульфідів Cu_2S і Fe). Мідний штейн містить 16..60% Cu, а також S і Fe. Штейн переплавляють у спеціальному конверторі з продувкою розплаву повітрям при 950...1050 °С і одержують чорнову мідь, що містить до 1...2% домішок. Очищують чорнову мідь шляхом вогневого або електролітичного рафінування. Чиста мідь має 11 марок – М00б, М0б, М1б, М1у, М1, М1р, М1ф, М2р, М3р, М2, М3. Сумарна кількість домішок у марці найвищої чистоти М00б – 0,01%, а в марці М3 – 0,5%.

Залежно від механічних властивостей розрізняють також тверду (нагартовану) мідь – МТ і м'яку (відпалену) – ММ. Механічні властивості чистої відпаленої міді такі: $\sigma_{\text{в}} = 220...240$ МПа, 40...80 НВ, $\delta = 45...50\%$, $\psi = 60...75\%$. Цінними властивостями міді є її висока електро- та теплопровідність, пластичність, низька окислюваність. Для електротехнічних потреб чисту мідь постачають у вигляді дроту, прутка, стрічки, листа, смуги і труб. Як конструкційний матеріал використовують сплави міді з оловом, цинком, алюмінієм, кремнієм, марганцем тощо. Легування міді підвищує її механічні, технологічні та експлуатаційні властивості. Залежно від хімічного складу розрізняють три основні групи сплавів міді: бронзи, латуні і сплави міді з нікелем.

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

Маркують бронзи літерами Бр, далі літерами позначають елементи, що входять до складу бронзи: О – олово, Ц – цинк, А – алюміній, С – свинець, Ж – залізо, Мц – марганець, Б – берилій та ін. Після цього цифрами вказують середній вміст елементів у процентах (вміст міді цифрами не вказують). Наприклад, марка БрОЦ4-3 означає, що бронза містить 4% олова, 3% цинку, решта – мідь; БрОЦС5-5-5 – бронза містить олова, цинку та свинцю по 5%, решта – мідь.

Олов'яністі бронзи (БрОЗ, БрО6, БрОС25-8 та ін.), залежно від вмісту олова і фазового стану, поділяють на однофазні (до 5% Sn) із структурою α -твердого розчину і двофазні (більше 5% Sn). Однофазні бронзи пластичні і добре піддаються деформуванню, з них виготовляють фольгу, сітки, дріт, прутки, стрічки тощо у нагартваному (твердому) і відпаленому (м'якому) станах. Двофазні олов'яністі бронзи з більшим вмістом олова (до 15...20%) використовують як ливарні матеріали для виготовлення різних фасонних виливків. Їх також додатково легують цинком (4...10%), свинцем (3...6%), фосфором (0,4...1,0%).

Олов'яністі бронзи корозійно стійкі у морській воді, NaOH, Na₂CO₃, не стійкі у розчинах HNO₃ і HCl, мають досить високі механічні властивості: $\sigma_b = 150...350$ МПа, 60...90 НВ, $\delta = 3...5\%$, добре оброблюються різанням. Олов'яністі бронзи типу БрОЦНЗ-7-5 використовують для арматури, яка експлуатується на повітрі, у прісній воді, маслі, парі і при температурах до 250 °С; бронза типу БрОЦС5-5-5 – для антифрикційних деталей, арматури тощо.

Алюмінієві бронзи (4...11% Al) мають високу корозійну стійкість, високі механічні та технологічні властивості (БрАЖ9-4, БрАЖН10-4-4, БрКМц3-1, БрС30 та ін.). Однофазні бронзи з вмістом алюмінію до 8...9% добре обробляються тиском у гарячому і холодному стані. Двофазні бронзи з вмістом алюмінію 9...11%, а також заліза, нікелю, марганцю мають більшу міцність, піддаються обробці тиском у гарячому стані. З алюмінієвих бронз виготовляють арматуру трубопроводів для різних середовищ (окрім морської води) і температур до 250 °С (БрАЖ9-4, БрАЖ9-4Л); деталі для експлуатації в середовищі морської води, гвинти, лопасті (БрАМц9-2Л0); втулки, підшипники ковзання (БрАМц10-2); фланці, шестерні та інші відповідальні деталі (БрАЖМц10-3-1,5).

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

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

вище 800 °С і піддають штучному старінню при 350 °С. Використовують берилієву бронзу для виготовлення виробів відповідального призначення: пружні контакти, пружини, мембрани, без іскровий інструмент для ведення вибухонебезпечних гірничих робіт.

Кремнієві бронзи містять у своєму складі 1...3% Si (БрКН1-3, БрКМЦ3-1), слугують заміниками олов'янистих бронз (наприклад, БрОЦС6-6-3). Вони мають високі ливарні властивості, корозійну стійкість, пружність, допускають гарячу обробку тиском і обробку різанням. З кремнієвих бронз виготовляють прутки, смугу, виливки, заготовки для виробів, які працюють за температур до 500 °С.

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

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

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

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

Однофазні латуні (Л62, Л68, Л80) пластичні, легко деформуються. Постачають їх у вигляді напівфабрикатів – прутки, дрiт, смуга, стрічки тощо. З латуней типу Л62, Л68 виготовляють стрічки, гільзи патронів, радіаторні трубки, дрiт, фольгу. Латунь марки Л80 (томпак) має колір золота. Використовують її при виготовленні ювелірних і декоративних виробів, а також для

відповідальних деталей. Механічні властивості однофазних латуней (Л68, Л80, Л90) такі: $\sigma_b = 260...320$ МПа, $53...55$ НВ, $\delta = 45...55\%$.

Двофазні $\alpha + \beta$ -латуні мало пластичні, і вироби з них виготовляють в основному методом лиття. З ливарних латуней виробляють арматуру, фасонне лиття, втулки (ЛС59-1Л); антифрикційні деталі (ЛМц58-2-2); корозійностійкі деталі (ЛА67-2,5); гребні гвинти, лопасті, арматуру, що експлуатується до 300 °С (ЛМцЖ55-3-1).

Додаткове легування латуней різними елементами підвищує їхні експлуатаційні властивості. Так, легування $1...2\%$ свинцю поліпшує оброблюваність сплаву різанням (ЛС59 – автоматна латунь); олово підвищує корозійну стійкість у морській воді; алюміній і нікель підвищують механічні властивості. ЛАН59-3-2).

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

Куніалі (Cu-Ni-Al) містять у своєму складі до 15% Ni, $1,5...3\%$ Al, решта – мідь. Такі сплави піддають термічній обробці – гартуванню з наступним старінням. Куніалі використовують для виробництва деталей підвищеної міцності, виготовлення пружин, а також різних електромеханічних виробів.

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

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

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

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

Константан (Cu-Ni-Mn) – $40...43\%$ Ni, $0,5...1,5\%$ Mn, решта – мідь (МНМц40-1,5).

4.3 Титан, магній та їх сплави

Титан – сріблясто-сірий метал з температурою плавлення 1672 °С, з малою питомою вагою ($\rho = 4,5 \text{ г/см}^3$) і високою корозійною стійкістю належить до перехідних металів четвертої групи періодичної системи елементів. Механічні характеристики титану такі: $\sigma_{\text{в}} = 270 \text{ МПа}$, 100...140 НВ, $\delta = 25\%$. Міцність технічно чистого титану залежить від чистоти металу. Домішки вуглецю, кисню, водню знижують його пластичність, опір корозії і зварюваність. Особливо шкідливими є домішки водню. Механічні властивості технічно чистого титану (марки ВТ-0, ВТ1-00, ВТ-1) знаходяться на рівні властивостей звичайних конструкційних сталей. З нього виготовляють катані і пресовані труби, лист, дрiт, поковки. Він добре зварюється, має високі механічні характеристики, корозійну стійкість і жароміцність, але важко обробляється різанням, має низькі антифрикційні властивості.

Легування титану певними елементами дозволяє значно підвищити його механічні ($\sigma_{\text{в}} \geq 1500 \text{ МПа}$, $\delta = 10...15\%$) та спеціальні властивості. Так, Al підвищує жароміцність і механічні властивості титану, V, Mo, Cr, Mn – жароміцність. Титан є поліморфним металом і існує у двох алотропічних модифікаціях – α і β . Температура поліморфного перетворення дорівнює 882,5 °С. Нижче цієї температури титан має гексагональну кристалічну ґратку, а вище – ґратку об'ємноцентрованого куба. Легуючі елементи, які входять до складу промислових титанових сплавів, утворюючи з титаном тверді розчини заміщення, змінюють температуру поліморфного перетворення $\alpha - \beta$. Такі елементи, як Al, O, N підвищують температуру перетворення, розширюють область існування α -твердого розчину на діаграмі стану (α -стабілізатори); елементи V, Mo, Cr, Mn, Fe знижують температуру перетворення (β -стабілізатори).

Залежно від структури рівноважного стані титанові сплави поділяють на α -сплави (однофазні) та β -сплави (двофазні). Так, основними промисловими сплавами титану зі структурою $\alpha + \beta$ є ВТ5 (4,5...5% Al; 3,5...4,5% V), ВТ8 (5,8...6,8% Al; 2,8...3,8% Mo). За технологічним призначенням їх поділяють на ливарні і такі, що піддаються деформуванню. За міцністю титанові сплави поділяють на три групи:

- низької міцності з $\sigma_{\text{в}} = 300...700 \text{ МПа}$ (ВТ1);

- середньої - з $\sigma_b = 700 \dots 1000$ МПа (BT3, BT4, BT5);

- високої міцності з $\sigma_b > 1000$ МПа (BT6, BT14, BT15) після гартування та старіння.

Титанові сплави можна піддавати всім основним видам термічної обробки, а також хіміко-термічній обробці, змінюючи їхні властивості у потрібному напрямку. Ливарні сплави мають більш низькі механічні властивості порівняно з аналогічними деформованими. Для лиття використовують сплави, що відповідають хімічному складові сплавів BT5, BT14, маркують їх з додаванням літери Л (BT5Л, BT14Л), або спеціальні ливарні сплави.

Титан та його сплави використовують в авіації та ракетобудуванні, хімічній промисловості, суднобудуванні і криогенній техніці.

Магній – найбільш легкий з кольорових технічних металів – ($\rho = 1,75$ г/см³), не має алотропічних перетворень. Температура плавлення магнію 650 °С. Технічно чистий магній має низькі механічні властивості ($\sigma_b = 180$ МПа, 30 НВ, $\delta = 5\%$), схильний до samozапалювання, тепло- та електропровідність його низькі. Використовується в техніці у вигляді сплавів. До складу магнієвих сплавів входять Al, Mn, Zn, Zr. При цьому міцність зростає до 360...520 МПа. Сплави магнію поділяють на: деформовані та ливарні.

Деформовані магнієві сплави призначені для виготовлення напівфабрикатів (пруток, лист, профіль) обробкою тиском. За нормальних температур магній деформується погано. Для підвищення пластичності його сплавів застосовують обробку тиском при 360...520 °С залежно від марки сплаву. Такі сплави маркують літерами МА і цифрами (МА1, МА2-1, МА14), які означають порядковий номер сплаву. Сплав МА1 (містить 1,3...2,5% Mn) має добру технологічну пластичність, зварюваність і корозійну стійкість. Відноситься до сплавів низької міцності. Додаткове легування його цезієм, приблизно 0,2% (МА8), подрібнює зерно, підвищує механічні властивості та здатність до холодної деформації. Сплав МА2-1 належить до системи Mg-Al-Zn, має досить високі механічні властивості і технологічну пластичність. Піддається всім видам листового штампування та прокатування. З деформованих магнієвих сплавів виготовляють деталі літаків, автомобілів і прядильних верстатів.

Ливарні магнієві сплави використовують для виготовлення деталей методом лиття. Їх маркують літерами МЛ і цифрами, що

означають порядковий номер сплаву (МЛ5, МЛ:, МЛ-10, МЛ-12). Наприклад, сплави МЛ5 і МЛ6 належать до системи Mg-Al-Zn. Найпоширенішими з цієї групи сплавів є МЛ5 (7,5...9% Al; 0,2...0,8% Zn; 0,15...0,5% Mn). Виливки з магнієвих сплавів іноді піддають гартуванню з наступним старінням. Деякі сплави МЛ застосовують для високо навантажених деталей авіаційної промисловості (картери, корпуси приладів, форми шасі тощо). З огляду на низьку корозійну стійкість магнієвих сплавів вироби з них піддають окисдуванню з наступним нанесенням на них лакофарбових покриттів.

5 БУДОВА ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ. ДІАГРАМА СТАНУ ЗАЛІЗО-ВУГЛЕЦЬ. ЧАВУНИ ТА СТАЛІ

5.1 Діаграма стану системи залізо-вуглець

Залежно від вмісту вуглецю залізовуглецеві сплави поділяють на сталі (до 2% С) і чавуни (більше 2%). Діаграма стану системи Fe-C графічно зображує фазовий стан залізовуглецевих сплавів залежно від вмісту вуглецю та температури за умови дуже повільного їх охолодження або нагрівання. Основою для побудови такої діаграми (рис. 5.1) є дослідження Д.К. Чернова, пов'язані з відкриттям критичних температур (точок), що залежать від вмісту вуглецю у сплаві, а також уявлень щодо закономірності зміни при певних температурах структурного стану і властивостей залізовуглецевих сплавів. Діаграму Fe-C використовують у теорії та практиці термічної обробки сталей і чавунів.

Діаграма Fe-C показана лише для інтервалу концентрації вуглецю від 0 до 6,67%, тобто до утворення хімічної сполуки Fe₃C (цементит). Лише ця частина має практичне значення, оскільки сплави з більш високим вмістом вуглецю дуже крихкі. По осі абсцис на діаграмі показано концентрацію вуглецю в масових частках (мас.%), а по осі ординат – температуру в градусах Цельсія (T, °C). Якщо розглядати Fe₃C як компонент, то для переведення концентрації вуглецю в концентрацію цементиту вміст вуглецю слід помножити на 15.

При охолодженні залізовуглецевих сплавів вуглець може не тільки хімічно взаємодіяти з залізом, утворюючи Fe₃C, але й виділятися у вільному стані у вигляді графіту. Тому розрізняють дві діаграми стану: залізо-цементит (Fe - Fe₃C) і залізо – графіт (Fe – C).

На діаграмі перша зображена суцільними лініями, друга – штриховими. Оскільки цементит за певних умов розпадається з утворенням вільного вуглецю (графіту), то діаграму в системі Fe - Fe₃C називають *нестабільною* (метастабільною), а у системі Fe – C – *стабільною*.

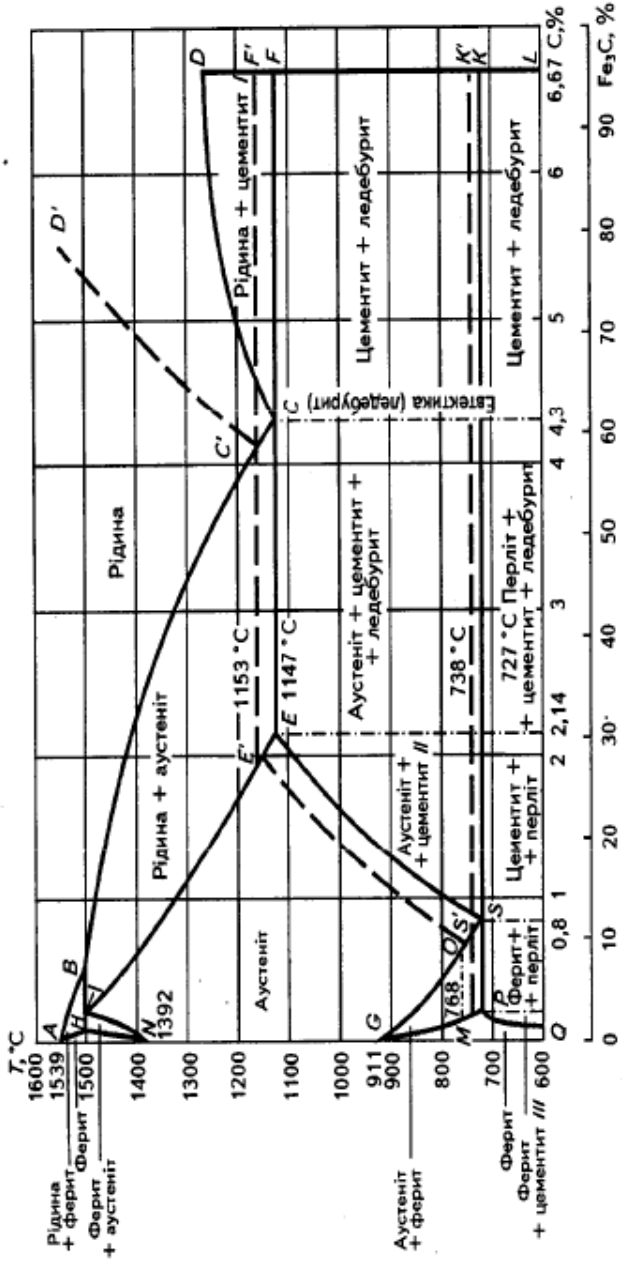


Рисунок 5.1 - Діаграма стану залізовуглецевих сплавів

Основними фазами залізовуглецевих сплавів є рідкі та тверді розчини вуглецю у залізі, цементит та графіт (рис. 5.2). У розплаві заліза при температурі 1147 °С розчиняється до 4,3% вуглецю. У твердих розчинах заліза (ферит, аустеніт) розчинність вуглецю значно менша.

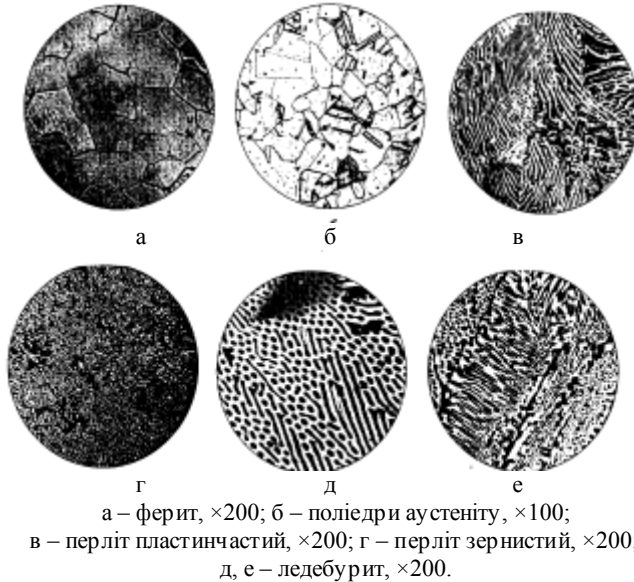


Рисунок 5.2 – Мікроструктури залізовуглецевих сплавів:

Твердий розчин вуглецю на основі об'ємноцентрованої кубічної ґратки (ОЦК) заліза називають **феритом** (Φ). Високотемпературний δ -ферит містить максимальну кількість вуглецю – 0,1%. У низькотемпературному α -фериті максимальна розчинність вуглецю становить 0,025% при 727 °С, а при зниженні температури зменшується практично до нуля. Ферит м'який (80...100 НВ), пластичний, нижче 768 °С магнітний.

Твердий розчин проникнення вуглецю на основі гранецентрованої кубічної ґратки (ГЦК) γ -заліза називають **аустенітом** (A). Розчинність вуглецю в γ -залізі при зростанні температури підвищується і досягає максимуму (2,14% С) при 1147 °С. Аустеніт пластичний, немагнітний, твердість його 170 НВ.

Хімічна сполука, яка утворюється в залізовуглецевих сплавах, карбід заліза Fe_3C , має назву **цементит** (*C*). Це найбільш тверда (780 НВ) і крихка фаза в системі залізо – вуглець, нижче 217 °С магнітна. Цементит містить 6,68% С, має складну орторомбічну кристалічну ґратку з 12 атомами заліза і 4 атомами вуглецю, температура плавлення становить близько 1600 °С.

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

Евтектичну суміш аустеніту і цементиту (вище 727°С) або перліту і цементиту (нижче 727 °С) називають **ледебурит** (*L*). він утворюється при вмісті вуглецю 4,3% за температури 1147 °С, твердий (800 НВ) і крихкий. Це – структурна складова білих чавунів.

У промислових чавунах основною структурною складовою є **графіт**. Це одна з поліморфних модифікацій (різновидів) структурно вільного вуглецю з гексагональною кристалічною ґраткою. Твердість і міцність графіту низькі. У сірих чавунах він має вигляд пластин різної форми і розмірів, у ковкому – форму пластівців, у високоміцному – кулясту форму.

Лінії діаграми стану системи Fe - Fe_3C (рис. 5.1) показують (визначають), за яких температур в залізовуглецевих сплавах відбуваються перетворення. Лінія *ABCD*, що об'єднує точки початку кристалізації розплавів з різним вмістом вуглецю, називається **лінією ліквідусу**. Лінія *AHIECF*, що відповідає точкам закінчення кристалізації, називається **лінією солідусу**. *GOS* – лінія верхньої границі області рівноваги α - і γ -фаз. При охолодженні по цій лінії починається виділення α -фази (при нагріванні - γ -фази). *SE* – лінія початку перетворення аустеніту з утворенням цементиту при охолодженні (критичні точки A_{rm}), при нагріванні сплаву критичні точки A_{cm} . *PQ* – лінія початку виділення цементиту (третинного) при охолодженні або розчинення третинного цементиту при нагріванні.

Однофазні області δ -фериту, α -фериту та аустеніту обмежені відповідно лініями *AHN*, *GPQ* і *NIESG*. Лінія *HIB* при перитектичній температурі 1499 °С характеризується наявністю трьох фаз: δ -фериту, аустеніту і рідини (розплаву). Сплави по лінії *ECF*, що відповідає евтектичній температурі 1147 °С, складаються з рідини, аустеніту і

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

Характерні точки на діаграмі відповідають певним температурам і концентраціям вуглецю (мас.%).

Точка *A* відповідає температурі плавлення (або тверднення) чистого заліза (1539 °С). Точка *B* вказує на вміст вуглецю (0,5%) у рідкій фазі при перитектичній температурі (1499 °С). Точка *H* відповідає граничній кількості вуглецю (0,1%) у δ -фазі при перитектичній температурі. Точка *I* вказує на вміст вуглецю (0,16%) в аустеніті, який перебуває в рівновазі з δ -фазою і рідиною при перитектичній температурі. Точка *C* вказує на вміст вуглецю (4,3%) у рідкій фазі в стану рівноваги з аустенітом при евтектичній температурі (1147 °С). Точка *E* відповідає 2,14% С в аустеніті, що перебуває в рівновазі з цементитом при евтектичній температурі. Точка *S* відповідає 0,8% С в аустеніті, який перебуває в рівновазі з перлітом (ферит+цементит) при евтектоїдній температурі (727°С). Точка *P* відповідає 0,02% С – граничній кількості вуглецю, розчиненого у фериті, що перебуває у рівновазі з аустенітом і цементитом при евтектоїдній температурі.

5.2 Формування структури сталей

Залежно від вмісту вуглецю сталі поділяють у відповідності з діаграмою стану на:

- доевтектоїдні (від 0,025% до 0,8% С);
- евтектоїдні (0,8% С);
- заевтектоїдні (більше 0,8% і до 2,14% С).

Відповідно кристалізація сталей може проходити в один, два або три етапи. В температурному інтервалі між лініями *HIB* та *IE* кристалізується аустеніт. Подальше формування структури залежить від складу сталі. В евтектоїдній сталі аустеніт залишається стабільним при охолодженні до точки *S*. При охолодженні відносно цієї точки при постійній температурі відбувається евтектоїдне перетворення. В результаті утворюється структура, що складається з суміші зерен (пластин) α -фериту і цементиту. Таку евтектоїдну суміш називають **перлітом**.

При охолодженні доевтектоїдної сталі нижче лінії **GS** аустеніт втрачає стабільність і починається поліморфне перетворення його у ферит. Кристали фериту утворюються переважно на стиках зерен аустеніту і ростуть здебільшого у вигляді рівноважних зерен. Перетворення супроводжується зміною складу аустеніту відповідно лінії **GS**. При евтектоїдній температурі $727\text{ }^{\circ}\text{C}$ аустеніт завжди набуває евтектоїдної концентрації. При деякому переохолодженні відбувається евтектоїд не перетворення.

Таким чином, структура доевтектоїдної сталі буде складатись з фериту та перліту. У заевтектоїдній сталі нижче лінії **ES** аустеніт стає пересиченим щодо вуглецю. Надлишковий вуглець виділяється з аустеніту у вигляді вторинного цементиту по границях аустенітних зерен. Під час охолодження в інтервалі температур перетворення аустеніт збіднюється вуглецем відповідно лінії **ES**. Як і в доевтектоїдній сталі, аустеніт при евтектоїдній температурі матиме евтектоїдну концентрацію вуглецю і при подальшому охолодженні за постійної температури перетвориться на перліт. Структура заевтектоїдної сталі складатиметься з перліту і вторинного цементиту. Перетворення при нагріванні сталей відбувається у зворотному порядку.

5.3 Формування структури білих чавунів

У білих чавунах весь надлишковий вуглець перебуває у зв'язаному стані, тобто у вигляді цементиту - Fe_3C . Структура чавуну формується за умов не дуже повільного охолодження розплаву у відповідності з метастабільною діаграмою системи залізо-цементит.

Розглянемо формування структури до евтектичного чавуну. Його кристалізація відбувається у два етапи. В інтервалі температур від лінії ліквідус до солідуса кристалізується аустеніт. При цьому склад рідкої фази змінюється відповідно нахилу лінії **BC** діаграми, тобто розплав збагачується вуглецем. При евтектичній температурі концентрація рідкої фази буде відповідно точці **C**, тобто буде евтектичною. Евтектичний розплав, при деякому переохолодженні відносно евтектичної температури ($1147\text{ }^{\circ}\text{C}$), кристалізується в евтектику, яка складається з суміші аустеніту і цементиту (ледебурит). Провідною фазою під час евтектичної кристалізації є цементит,

пластини якого пересікаються гілками аустеніту. По закінченні кристалізації структура чавуну складається з аустеніту та ледебуригу.

При подальшому охолодженні в інтервалі температур від 1147 °С до 727 °С аустеніт збіднюється вуглецем відповідно до лінії *ES* діаграми. З нього виділяється вторинний цементит, який може нашаровуватись на цементит ледебуригу, утворювати приграничну сітку або пластини. Здебільшого вторинний цементит у чавуні не є самостійною структурною складовою. При переохолодженні відносно евтектоїдної лінії діаграми аустеніт складу точки *S* перетворюється на евтектоїд – перліт. Таким чином структура до евтектичного білого чавуну буде складатись з перліту та ледебуригу. Оскільки у ледебуриті аустеніт також перетворився на перліт, такий ледебурит інколи називають **видозміненим**.

Користуючись діаграмою, неважко визначити, що структура евтектичного чавуну після повного охолодження являє собою ледебурит (видозмінений), а заевтектичного складається з первинного цементиту та ледебуригу.

6 КОНСТРУКЦІЙНІ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ СТАЛІ. ЧАВУНИ

6.1 Вуглецеві сталі

Залізовуглецеві сплави з вмістом вуглецю від 0,025 до 2,14% називають **сталями**. Залежно від вмісту вуглецю сталі поділяють на:

- низьковуглецеві (до 0,25% С);
- середньовуглецеві (0,25...0,6% С);
- високовуглецеві (більше 0,6% С).

За структурою у рівноважному стані їх поділяють на:

- доевтектоїдні;
- евтектоїдні;
- заевтектоїдні.

Доевтектоїдні сталі (від 0,025 до 0,8% С) мають структуру, яка складається з зерен фериту і перліту (ферит + цементит). Зі зростанням вмісту вуглецю зменшується кількість фериту і зростає кількість перліту. **Евтектоїдна сталь** містить 0,8% С і структура її складається лише з перліту пластинчастої будови. **Заевтектоїдні сталі** (0,8...2,14% С) мають структуру перліту, по границях зерен якого розташований надлишковий цементит.

За призначенням та якістю розрізняють такі групи:

- вуглецеві конструкційні сталі звичайної якості та якісні. Якісні вуглецеві конструкційні сталі, в свою чергу, розділяють на будівельні (низьковуглецеві) та машинобудівельні (середньо- та низьковуглецеві);

- вуглецеві інструментальні якісні та високоякісні сталі.

Марки, хімічний склад і властивості сталей встановлюють відповідними державними стандартами. Вуглецеву конструкційну сталь звичайної якості за ГОСТ 380-88 розділяють на групи сталей, які постачаються:

А – з гарантованими механічними властивостями;

Б – з гарантованим хімічним складом;

В – з гарантованими механічними властивостями і з окремими вимогами щодо хімічного складу.

Конструкційну сталь звичайної якості групи А позначають Ст.0, Ст.1, Ст.2, Ст.3, Ст.4, Ст.5, Ст.6. Цифри (умовний номер марки)

вказують на середній вміст вуглецю у десятих долях відсотка. Чим більше цифра, тим вище вміст вуглецю. Ці сталі виплавляють в конвертерах або мартенівських печах.

Для сталей групи Б вказують спосіб виробництва літерами М, Б чи К (мартенівський, бесемерівський чи конвертерний). Наприклад, МСт.0, МСт.1, БСт.0, КСт.1 і т.д. Сталь групи В виготовляють в мартенівських печах і конвертерах і позначають ВМСт.1, ВКСт.2, ВКСт.3 та т.д.

З гарячекатаної сталі групи А виготовляють деталі машин і механізмів механічною обробкою, не піддаючи попередньо гарячій обробці (куванню, штамповці, зварюванню).

Сталь групи Б призначена для виготовлення деталей гарячою обробкою (куванням, штамповою і т.д.).

Зі сталі групи В виготовляють вузли машин та механізмів зварюванням. Сталі підвищеної якості (групи В) використовують головним чином в мостосуднобудуванні.

Вуглецеву конструкційну якісну сталь розділяють на дві групи: з нормальним вмістом марганцю, з підвищеним вмістом марганцю. Сталі першої групи позначають 08, 10, 15, 20, ..., 85. Цифри показують середній вміст вуглецю в сталі в сотих долях відсотка. Наприклад, сталь 30 містить 0,27...0,35% С. Сталі другої групи з підвищеним вмістом (до 1,2%) марганцю позначають 15Г, 20Г, ..., 70Г (буква Г вказує на підвищений вміст марганцю).

Конструкційні якісні вуглецеві сталі одержують в основних конвертерах, мартенівських та електричних печах.

Сталі першої групи 08, 10, 15 і 20 використовують для малонавантажених деталей і елементів зварних, кованих, штампованих конструкцій; сталі 25, 30, 35, 40 і 45 – для виготовлення деталей, що зазнають помірних напружень; сталі 50, 55, 60, 65 і 70 – для виготовлення деталей підвищеної міцності.

Вуглецева інструментальна якісна сталь позначається У7, У8, У9, У10, У11, У12, У13. Літера У означає "сталь вуглецева інструментальна", а цифра – середній вміст вуглецю в десятих долях відсотка. З цих сталей виготовляють ріжучий, вимірювальний і штамповий інструмент, який має високу твердість і міцність після термічної обробки.

Вуглецеву інструментальну високоякісну сталь позначають, як і якісну, з додаванням букви А: У7А, У8А, У9А і т.д. Високоякісна

сталь містить менше сірки та фосфору, а також неметалевих включень, має вищі механічні властивості. Витоплюють високоякісну вуглецеву інструментальну сталь в електродугових та кислих мартенівських печах, а також в основних мартенівських печах.

6.2 Леговані сталі

Легуючі компоненти входять до сталі для надання їй спеціальних властивостей. До легуючих компонентів відносяться Cr, Ni, W, Mo, V, Cu, Al, Nb, Mn, B, Co тощо. Крім того, для зменшення газонасиченості сталі і вмісту сірки використовують лігатуру (допоміжні сплави) рідкоземельних металів, яка складається з 50% церію, 25% лантану, 15% неодиму і 10% інших рідкоземельних елементів.

Сталі, до складу яких вводять один або кілька легуючих компонентів для надання їм потрібних властивостей, називають спеціальними або легованими.

Залежно від того, яким компонентом сталь легована, її називають хромовою, нікелевою, ванадієвою тощо. Якщо сталь легована кількома компонентами, її називають хромонікелевою, хромомарганцевою, хромонікельвольфрамовою тощо. Основна мета легування – зміна будови і фізико-механічних властивостей сталі (твердості, міцності, опору зносу і корозії), надання їй особливих фізичних і хімічних властивостей – здатність служити в умовах високих і низьких температур, високого і низького тиску, різного агресивного середовища і т.д. Переваги легованої сталі найбільшою мірою виявляються після її термічної обробки.

Властивості сталі залежать від кількості легуючих елементів і їх взаємодії з вуглецем і залізом. Легуючі компоненти утворюють з залізом тверді розчини і хімічні сполуки. Нікель і кобальт утворюють розчини заміщення з необмеженою розчинністю, решта елементів – з обмеженою розчинністю. Якщо вони присутні у кількостях, що перевищують границю розчинності, їх надлишок утворює з залізом хімічні сполуки (наприклад, FeCr, FeV, Fe₃W₂, Fe₃Mo₂ тощо). При утворенні твердих розчинів змінюються всі властивості сталі, особливо фізичні і механічні, при утворенні хімічних сполук – тільки механічні властивості сталі. Всі легуючі компоненти зміщують

критичні точки A_3 (910 °С) і A_4 (1401 °С), зв'язані з алотропічними перетвореннями Fe. Їх можна розділити на дві нерівні групи:

- Ni, Pt, Mn, що знижують точку A_3 і підвищують точку A_4 , при цьому ділянка стабільного існування аустеніту розширюється, а ділянка стабільного існування фериту звужується;

- Cr, W, Mo, Al, Si, V, Ti та інші компоненти підвищують точку A_3 і знижують точку A_4 .

Перша група легуючих компонентів знижує точку евтектоїдного перетворення A_1 , а друга підвищує її. Всі легуючі компоненти, крім марганцю, при нагріванні затримують ріст зерен аустеніту, що дозволяє піддавати леговані сталі обробці тиском у більш широкому інтервалі температур, не побоюючись перегріву. Mn, Si, Ni, W, Mo, Cr та інші легуючі компоненти підвищують границю міцності і твердість; Ni, V, Co підвищують в'язкість; Mn, Ni, Cr посилюють опір стиранню; Ni, Cr, Cu, Si, Mo та інші елементи підвищують корозійну стійкість.

6.3 Класифікація легованих сталей

Леговані сталі класифікують за призначенням, хімічним складом, структурою, вмістом легуючих компонентів та іншими ознаками.

За призначенням леговані сталі ділять на три групи:

- конструкційні, призначені для виготовлення деталей машин і елементів конструкцій;

- інструментальні – для виготовлення ріжучого, штампового, вимірювального та іншого інструмента;

- сталі і сплави з особливими властивостями – нержавіючі, жароміцні, теплостійкі та інші.

За хімічним складом класифікація здійснюється так, що умовне позначення показує приблизний хімічний склад сталі. Легуючі елементи позначають українськими літерами: А – азот, Б - ніобій, В – вольфрам, Г – марганець, Д – мідь, К – кобальт, М – молібден, Н – нікель, П – фосфор, Р – бор, С – кремній, Т- титан, Ф – ванадій, Х – хром, Ц – цирконій, Ч – рідко земельні метали, Ю – алюміній. Наприклад, 20ХГ – хромомарганцева сталь, що містить $\approx 0,20\%$ С, 1% Mn, 1% Cr; 35Х2МА – високоякісна (буква А в кінці марки вказує на знижений вміст шкідливих домішок, а в середині марки – на вміст

азоту в сталі) хромомолібденова сталь, яка містить $\approx 0,35\%$ С, 2% Cr і 1% Mo.

За структурою в відпаленому стані леговані сталі розділяють на доєвтектоїдні (Ф+П); евтектоїдні (П)4; заєвтектоїдні (П+Ц2); ледебуритні (Л).

За структурою в нормалізованому стані сталі поділяють на:

- перлітні при вмісті легуючих компонентів до 5% ;
- мартенситні при вмісті легуючих компонентів до 15% ;
- аустенітні при вмісті легуючих компонентів до $20\ldots 30\%$

(головним чином Ni та Mn).

Найпоширеніші леговані сталі доєвтектоїдного, евтектоїдного і перлітного класів (це низько- і середньо леговані конструкційні і інструментальні сталі). Сталі мартенситного, аустенітного, заєвтектоїдного і ледебуритного класів – високолеговані.

За вмістом легуючих компонентів сталі поділяють на:

- низьколеговані (до $2,5\%$ легуючих компонентів);
- середньо леговані ($2,5\ldots 10\%$ легуючих компонентів);
- високолеговані (понад 10% легуючих компонентів).

6.4 Конструкційні леговані сталі

Конструкційними називають сталі, які застосовуються для виготовлення деталей машин (машинобудівельні сталі), конструкцій і споруд (будівельні сталі). До конструкційних сталей відносять також сталі зі спеціальними властивостями – зносостійкі, корозійно стійкі, жаростійкі, жароміцні тощо.

Конструкції та деталі машин працюють за умов високих динамічних навантажень, високих концентрацій напружень, високих та низьких температур. Ці фактори призводять до крихкого руйнування, що значно знижує надійність конструкцій та машин. Конструкційні сталі повинні мати високу границю текучості $\sigma_{0,2}$ в поєднанні з високою пластичністю (δ , ψ), опором крихкому руйнуванню, низьким порогом холодноламкості. Довговічність роботи конструкцій і машин залежить від опору втомлюваності, зносу, корозії сталі. Всі наведені характеристики визначають конструкційну міцність сталі. Міцність сталі підвищують зміцненням шляхом термічної, термомеханічної, хіміко-термічної та деформаційної обробок, добором хімічного складу. Конструкційна сталь повинна

мати добрі технологічні властивості: оброблюваність тиском (прокатка, кування, штампова і т.д.) і різання, малу схильність до знеуглецювання, деформацій і тріщиноутворення при відпалі тощо. Будівельні конструкційні сталі, крім того, повинні добре зварюватись.

Конструкційні леговані сталі поділяють на:

- сталі для цементації;
- поліпшувальні;
- високоміцні.

Сталі для цементації використовують для виробів, які працюють за умов тертя, ударних і перемінних навантажень. Надійність і ресурс роботи таких виробів забезпечується конструктивною міцністю і в'язкістю серцевини металу. Для цього сталі, призначені для цементації, насичують з поверхні вуглецем (цементують) і далі піддають гартуванню з низьким відпуском, що забезпечує високу твердість (58...63 HRC) поверхні деталі і потрібну в'язкість серцевини. Хімічний склад таких сталей обмежений вмістом вуглецю до 0,25%, сумарним вмістом легуючих компонентів для низьколегованих сталей до 2,5% і для середньолегованих – 2,5...10%. Для виробів малих розмірів, що працюють за умов тертя і середніх навантажень, використовують сталі типу 15ХА, 20Х. Відповідальні деталі для експлуатації при високих і ударних навантаженнях і великих швидкостях виготовляються зі сталей типу 15ХФ, 18ХГ, 25ХГМ. Типовий режим термічної обробки після цементації – гартування з низьким відпуском для одержання структури мартенситу.

Поліпшувані сталі – це низьколеговані сталі з вмістом вуглецю 0,3...0,5%. Для забезпечення потрібних властивостей міцності, пластичності та в'язкості їх піддають гартуванню з високим відпуском (500...600 °С), тобто поліпшують. Загальна кількість легуючих компонентів у поліпшуваних сталях становить 3...5%, основний легуючий елемент – хром (0,8...1,1%). Розрізняють хромисті сталі – 40Х, 45Х, для прогартуваності їх додатково легують бором 0,002...0,003% (40ХР) або до 1% марганцем (40ХГ). З них виготовляють деталі для роботи за умов підвищених напружень і знакозмінних навантажень – шатуни, колінчасті вали. Хромомарганцеві сталі, леговані Si та Mn (хромансил), наприклад 30ХГС, добре зварюються. Для великих відповідальних і важконавантажуваних деталей складної форми використовують сталі

зі значною кількістю Ni та Mo, наприклад 40ХНМ, 30ХН2МФ, 40ХН2МФ, 40ХН2МА тощо.

Високоміцні леговані сталі використовують для виготовлення особливо відповідальних і важконавантажених деталей, які експлуатують за умов різко змінюваних навантажень (деталі шасі, конструкції фюзеляжів тощо). Це комплексно-леговані середньовуглецеві сталі (0,3...0,6% С), які зміцнюють термічною обробкою або піддають термомеханічній обробці. Наприклад, 30ХГСН2А, 40ХГСН3ВА.

6.5 Сталі зі спеціальними властивостями

Спеціальні леговані сталі – це високолеговані сталі з явно вираженими особливими властивостями (корозійна стійкість, жаростійкість, жароміцність тощо).

Неіржавіючі або корозійностійкі сталі володіють високою хімічною стійкістю в агресивних середовищах. Одержують їх введенням до складу низько- і середньо вуглецевих сталей значної кількості хрому (не менше 12,5%) і нікелю, а також додатково титану, алюмінію і марганцю. Найпоширеніші хромисті і хромонікелеві сталі. Залежно від структури розрізняють корозійностійкі сталі аустенітні (12Х18Н9, 12Х18Н10, 04Х18Н10, 10Х14Г14Н3), феритні (12Х17, 08Х17Т), мартенситні (40Х13), аустенітно-мартенситні (09Х15Н18Ю) та аустенітно-феритні (08Х21Н6М2Т). Широко їх застосовують у харчовій, нафтопереробній галузях промисловості, а також у транспортному машинобудуванні і будівництві. Розроблено також високолеговані сталі для агресивних середовищ (80% розчин Н2SO4) зі складною системою легування елементами Cr, N, Mo, Cu.

Жаростійкі (жаровиностійкі) сталі – це такі, що здатні чинити опір корозійному руйнуванню під дією повітря або газового середовища при високих температурах (400...900 °С). Жаростійкі сталі містять у своєму складі Al, Cr, Si і не утворюють жаровини. Стійкість таких сталей зумовлено утворенням на поверхні виробів щільних захисних плівок оксидів вказаних легуючих елементів. Так, для виробів з робочими температурами до 850...900 °С (клапани двигунів внутрішнього згорання) використовують сталі 40Х9С2, 08Х17Т; для температур до 1100 °С (сопла, жарові труби газових турбін) – сталі

типу 36X18H25C2. Хромиста сталь з 30% Cr стійка до температури 1200 °С.

Жароміцні сталі – це такі, що забезпечують здатність виготовлених з них виробів витримувати механічні навантаження без деформації й руйнування за високих температур (500...1000 °С). Вони містять у своєму складі хром, кремній, нікель, молібден та інші елементи. Залежно від призначення розрізняють клапанні сталі, котлотурбінні, газотурбінні сталі, а також сплави з високою жароміцністю.

Для температур 300...500 °С використовують Cr-Si-сталі мартенситного класу (сильхроми) типу 40X9C2, 40X10C2M. З них виготовляють клапани двигунів автомобілів і тракторів. Високолеговані аустенітні сталі типу 17X18H9 (гомогенні) або 45X14H14B2M (гетерогенні – з дрібними карбідними або інтерметалідними фазами) використовують за температур 600...900 °С. Аустенітні сталі досить міцні, але в'язкі і погано обробляються різанням. З них виготовляють парові котли, лопатки газових турбін, сопла реактивних двигунів тощо. Для більш високих температур (800...1000 °С) використовують хромонікелеві сплави - ніхромі і німоніки з мінімальним вмістом вуглецю (0,06...0,12% C). Вони містять більше 55% Ni і переважають за властивостями кращі жароміцні сталі. За структурою їх поділяють на гомогенні (ніхромі ХН60Ю, ХН78Т та інші) і гетерогенні (німоніки ХН77ТЮ, ХН77ТЮР тощо), леговані, окрім хрому, ще й елементами, які утворюють з нікелем дисперсні інтерметалідні зміцнюючі фази типу (Ni, Co, Cr)₃Ti, (Ni, Co, Cr)₃Al тощо. Маркування нікелевих сплавів здійснюють літерами, які означають елементи, і цифрами, що вказують на вміст нікелю. Так, сплав ХН70ВМТЮ містить 70% Ni, а також Cr, W, Mo, Ti, Al. Жароміцні сплави на основі кобальту використовують обмежено, наприклад для лопаток соплового апарата реактивних двигунів.

6.6 Чавуни, їх класифікація, структура та властивості

На утворення тієї чи іншої мікроструктури чавуну сильно впливають його хімічний склад і швидкість охолодження відливки. Залежно від стану вуглецю в чавуні розрізняють:

- білий чавун, в якому весь вуглець зв'язаний в цементит;

- сірий чавун, в якому більша частина або весь вуглець знаходиться у вигляді графіту, що має пластинчасту форму;

- високоміцний чавун, в якому більша частина або весь вуглець являє собою графіт, що має кулясту форму.

Структура сірого чавуну: ферит, перліт та графіт (сірий ферито-перлітний чавун); перліт, графіт (сірий перлітний чавун). Структура високоміцного чавуну: ферит, перліт і кулястий графіт; перліт і кулястий графіт; ферит і кулястий графіт.

Сірі чавуни маркують літерами СЧ. Державний стандарт встановлює такі марки сірих чавунів: СЧ 10, СЧ 15, СЧ 18 і т.д. Іноді в дужках після марки вміщують числові значення твердості за Брінеллем. Наприклад, марка СЧ 15 (163-229).

Високоміцні чавуни маркують літерами ВЧ. Встановлюють такі марки високоміцних чавунів: ВЧ 45, ВЧ 50, ВЧ 60, ВЧ 70, ВЧ 80, ВЧ 100. І тут в дужках після найменування можуть стояти числові значення твердості НВ. Після літер ВЧ стоїть число, що означає тимчасовий опір при розтягненні, наприклад, ВЧ 45 (160-220).

Ковкий чавун одержують у результаті тривалого відпалу білого чавуну. При відпалі відбувається розпад цементиту (процес графізації). За складом вихідні білі чавуни доєвтектичні і мають структуру – ледебурит, цементит вторинний і перліт. Ковкі чавуни маркують літерами КЧ. Державний стандарт встановлює такі марки ковких чавунів: КЧ 30-6, КЧ 33-8, КЧ 35-10, КЧ 37-12,....., КЧ 60-3, КЧ 63-2 (перше число вказує на границю міцності при розтягненні, друга – відносне видовження).

Чавун має вищі ливарні властивості, він дешевший від сталі, проте не здатний в звичайних умовах оброблятися тиском. У чавунах є домішки Si, Mn, P і S. Чавуни зі спеціальними властивостями, крім того, містять легуючі елементи Ni, Cr, Cu, Mo тощо. Домішки впливають на кількість і будову графіту, який виділяється. Вуглець у звичайних сірих чавунах міститься в кількості 2, 7...3,7%. З підвищенням вмісту вуглецю збільшується виділення графіту. У всіх випадках для товстостінних відливок застосовують нижчі границі вмісту вуглецю, для тонкостінних – верхні. Сукупний вміст вуглецю та кремнію суттєво впливає на структуру і хімічний склад чавуну. Швидкість охолодження відливки також суттєво впливає на структуру чавуну. Зі збільшенням швидкості охолодження відливки кількість цементиту зростає, зі зменшенням – збільшується вміст графіту. Тому

при одному і тому самому хімічному складові чавуну відливки з різною товщиною стінок будуть мати різну мікроструктуру, а отже, і різні механічні властивості. Марганець розчиняється в чавуні з утворенням твердих розчинів з феритом та цементитом. До деякої міри він перешкоджає графітизації чавуну, нейтралізує шкідливий вплив сірки на чавун. Вміст марганцю у сірому чавуні 0,5...0,8%. Збільшення вмісту марганцю до 0,8...1,0% підвищує механічні властивості чавуну, особливо у відливках з тонкими стінками. Фосфор практично не впливає на процес графітизації. У кількості 0,1...0,3% P знаходиться в чавуні в розчиненому стані. Фосфор підвищує крихкість чавуну, бо при наявності його в кількості 0,5...0,7% утворюється фосфідна евтектика $\text{Fe-Fe}_3\text{P-Fe}_3\text{C}$, яка має температуру плавлення 950 °С. Ця евтектика виділяється у вигляді крихкої суцільної сітки на межах зерен. Фосфор поліпшує текучість рідкого сплаву, його зносостійкість, проте погіршує оброблюваність чавуну. Для відповідальних відливок припускається до 0,2...0,3% P. Відливки, які працюють на стирання, можуть містити до 0,7...0,8% P, тонкостінні відливки і відливки художнього лиття – близько 1% P. Шкідливий вплив сірки нейтралізують додаванням марганцю в кількостях, що перевищують вміст сірки у 5-7 разів. Утворюється MnS , який має температуру плавлення 1620 °С. Крім того, переважна частина MnS переходить до шлакової фази. Вміст сірки у чавуні обмежується 0,12%, а у високоміцних – 0,03%.

Легуючі елементи (Ni, Cr, Cu, Ti, Mo) покращують властивості чавуну; Ni та Cr звичайно застосовують сукупно. В результаті легування чавуну перліг подрібнюється або утворюються інші, ще більш тонкі структури.

ЛІТЕРАТУРА

1. Атаманюк В.В. Технологія конструкційних матеріалів. – Київ: Кондор, 2006.- 528 с.
2. Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів. – Київ: «Либідь», 2002.-326 с.
3. Геллер Ю.А., Рахштад А.Г. Материаловедение. — М.: Металлургия, 1984. — 345 с.
4. Гуляев А.П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1986. — 368 с.
5. Диаграмма состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: Справочник /под ред. О.А. Банных и М.Е. Дрица. — М.: Металлургия, 1986. — 128 с.
6. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1980. — 511с.
7. Мозберг Р.К. Материаловедение: Учеб. пособие. — 2-е изд., перераб. — М.: Высш. шк., 1991. — 448 с.
8. Материаловедение /Под ред. Б.Н. Арзамасова. –М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
9. Соломахо, В.Л. Справочник конструктора-приборостроителя. Проектирование. Основные нормы / В.Л. Соломахо [и др.]. – Минск : Выш. школа, 1983. – 272 с.