

ЛЕКЦІЯ 17

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО БУДОВУ , СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

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.

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 специфіч них 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.

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. **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. Найявністю

вільних електронів пояснюють існування спільних для всіх металів властивостей (пластичність, непрозорість, блиск, високі електро- і теплопровідність), а їх кількістю – 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.

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 (критич них) 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.

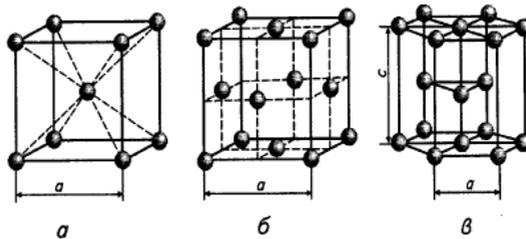
Просторове розташування атомів у кристалічному тілі залежить від природи металу, характеру міжатомних зв'язків, температури, тиску.

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 $_{\alpha}$, Ti $_{\beta}$ та інші метали;

- **гранецентровану кубічну ґратку** (елементарна комірка має 14 атомів) мають Ag, Au, Pt, Pd, Ir, Cu, Ca $_{\alpha}$ та ін.;

- **гексагональну ґратку щільного пакування** (елементарна комірка має 17 атомів) мають Mg, Cd, Re, Os, Ru, Zn, Be, Ti $_{\alpha}$, Ca $_{\beta}$ та інші метали.



а – об'ємноцентрована кубічна (ОЦК);

б – гранецентрована кубічна (ГЦК);

в – гексагональна щільного пакування (ГЩП)

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** (К) характеризує щільність пакування ґратки, визначає кількість найближчих і рівновіддалених атомів у певній кристалічній ґратці. Коорд інаційне число простої кубічної ґратки позначають К6 (літера вказує на тип ґратки, цифра – на кількість атомів), об'ємноцентрованої кубічної – К8; гранецентрованої кубічної – К12; гексагональної щільного пакування – Г12; гексагональної – Г6.

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.

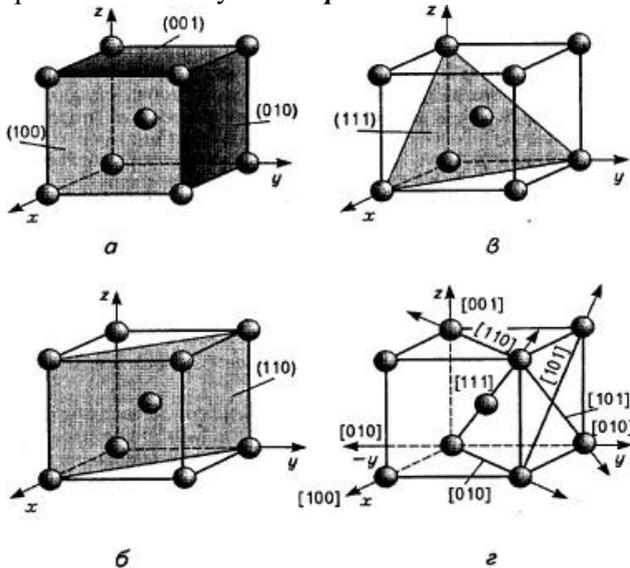
8. **Коефіцієнт компактності** – це відношення об'єму, що займають атоми (іони), до всього об'єму комірки даного типу.

Для характеристики просторової орієнтації кристалічної ґратки використовують також **індекси площин та напрямків**. 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 лощин атомами неоднакова. Також різні й відстані між атомами та сили міжатомного

зв'язку. Так, в ОЦК-гратці 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-гратці найщільніше атоми розташовуються у площині (111), а в ОЦК-гратці – у площині (110).

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



Індекси 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.

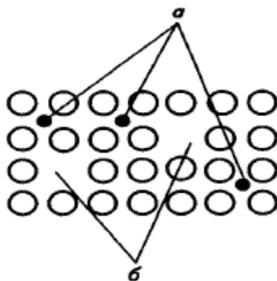
Дефекти кристалічної будови металів

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. 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

Точкові дефекти у кристалічній ґратці

Міжвузлові атоми – це атоми, що вийшли з вузла кристалічної ґратки і зайняли місце у міжвузлях.

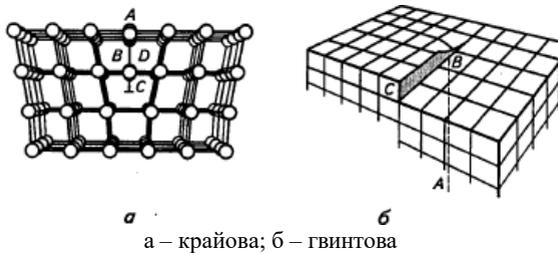
Домішкові атоми – це атоми іншого елемента, які розташовуються у вузлах або міжвузлях кристалічної ґратки металу (сплаву).

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.

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 кристалу, 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.



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 , см³), тобто $\rho = L/V$, см⁻². У реальних кристалах металів вона становить $\sim 10^6 \dots 10^8$ 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 $10^{10} \dots 10^{12}$ 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 $1000 \dots 100\,000$ 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.

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 іншим и 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.