



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з навчально-методичної роботи
ЗНТ Дніпровський професійний технологічний
коледж

Сергій ГОРДІЄНКО

28 серпня 2026 р.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ДИСЦИПЛІНИ «Матеріалознавство та термічна обробка металів і зварних з'єднань»

ЛЕКЦІЯ № 1

Тема: Вступ. Атомно-кристалічна будова металів. Типи кристалічних ґраток.

1. Вступ до матеріалознавства та його зв'язок з прикладною механікою

Матеріалознавство — це фундаментальна міждисциплінарна наука, що вивчає об'єктивні закономірності зв'язку між хімічним складом, внутрішньою атомно-кристалічною будовою (структурою) та фізико-механічними і технологічними властивостями матеріалів. Крім того, матеріалознавство досліджує кінетику та термодинаміку процесів цілеспрямованої зміни структури під впливом теплового, хімічного або деформаційного впливів.

Для фахівців у галузі прикладної механіки та зварювального виробництва глибоке розуміння природи металів є безальтернативною базою. Під час проєктування машин або зварних конструкцій, що розраховуються на міцність, в інженерній практиці (зокрема, в опорі матеріалів) застосовується низка макроскопічних допущень. Приймається допущення, що матеріал є однорідним суцільним середовищем. Крім того, вважається, що матеріал ізотропний, тобто його фізико-механічні властивості є однаковими в усіх напрямках. Проте ці ідеалізовані макроскопічні моделі є справедливими лише завдяки специфічній внутрішній мікроструктурі. У дійсності структура металів складається з безлічі хаотично розташованих мікроскопічно дрібних кристалів (зерен). Саме завдяки своїй дрібнозернистій полікристалічній структурі метали макроскопічно вважаються ізотропними, хоча кожен окремий кристал у їхньому складі є суворо анізотропним.

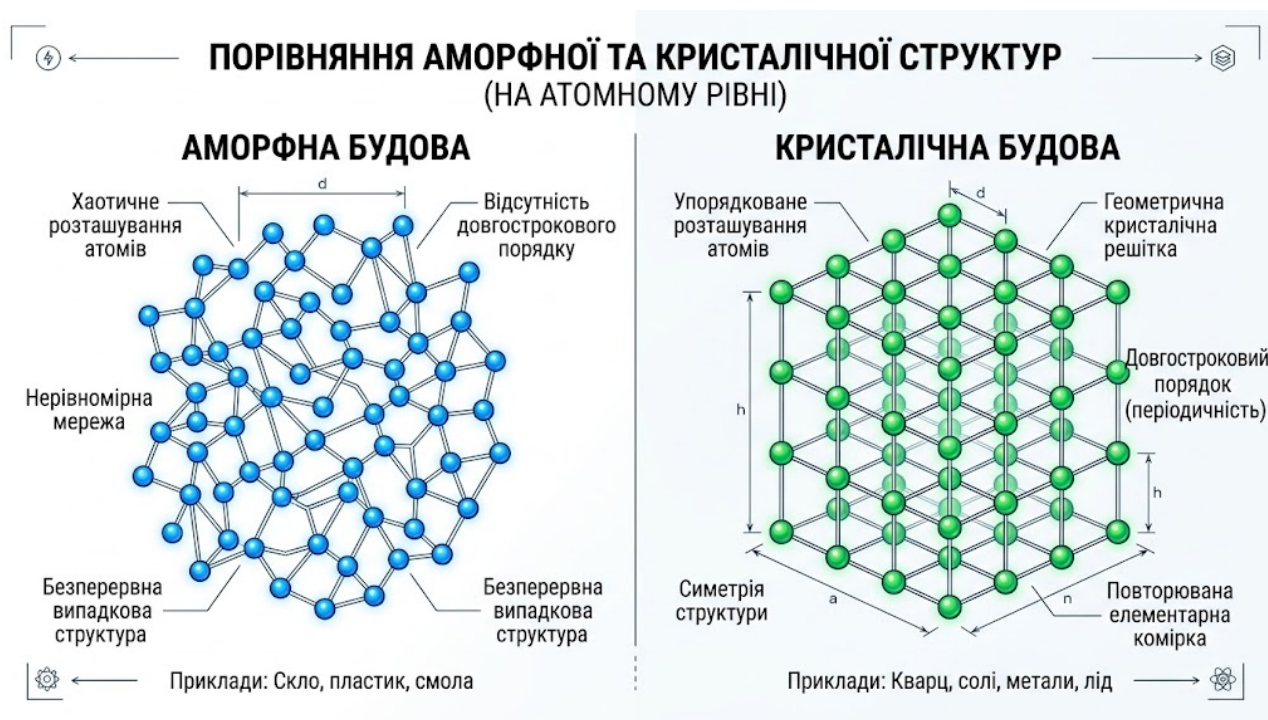
Розуміння того, як ці мікроскопічні кристали утворюються, зростають і деформуються, дозволяє інженерам-механікам науково обґрунтовано підходити до вибору матеріалу та гарантувати надійність конструкції в екстремальних експлуатаційних умовах.

2. Агрегатні стани речовини. Аморфні та кристалічні тіла

Залежно від термодинамічних умов (температури та тиску) речовини можуть перебувати в газоподібному, рідкому або твердому агрегатних станах. У твердому стані речовини можуть існувати у двох принципово різних формах, що визначаються ступенем упорядкованості їхніх атомів (або іонів): **аморфній** та **кристалічний**.

Аморфні тіла (від грец. *amorphos* — безформний) — це матеріали (скло, смоли, каніфоль, більшість полімерів), які характеризуються хаотичним розташуванням атомів та молекул у просторі. У них спостерігається лише **ближній порядок** — закономірне розташування атомів зберігається виключно в межах найближчих сусідів (на відстанях, сумірних із розмірами самих атомів), але на більших відстанях ця закономірність миттєво зникає. Аморфні тіла є ізотропними від природи і не мають строго визначеної температури плавлення (при нагріванні вони поступово розм'якшуються, переходячи у в'язкорідкий стан).

Кристалічні тіла (усі метали в твердому стані, більшість мінералів, солі) характеризуються суворо впорядкованим, періодичним розташуванням атомів у тривимірному просторі. Для них характерний **дальній порядок** — геометрично правильне чергування атомів зберігається на величезних макроскопічних відстанях, утворюючи просторову кристалічну ґратку. Кристалічні тіла мають строго визначену температуру плавлення (і кристалізації), при якій відбувається фазовий перехід з виділенням або поглинанням прихованої теплоти, та характеризуються природною анізотропією (залежністю властивостей від кристалографічного напрямку).



3. Природа металевого стану та металевий хімічний зв'язок

Метали утворюють окремий клас хімічних елементів, які об'єднуються спільними унікальними фізико-хімічними властивостями:

- Високою теплопровідністю та електропровідністю.
- Позитивним температурним коефіцієнтом електричного опору (при нагріванні опір металів зростає внаслідок посилення теплового коливання іонів, що заважає руху електронів).
- Високою здатністю до пластичної деформації (можливістю кування, прокатки, волочіння).
- Характерним «металевим блиском» (непрозорістю і здатністю відбивати світлові хвилі).

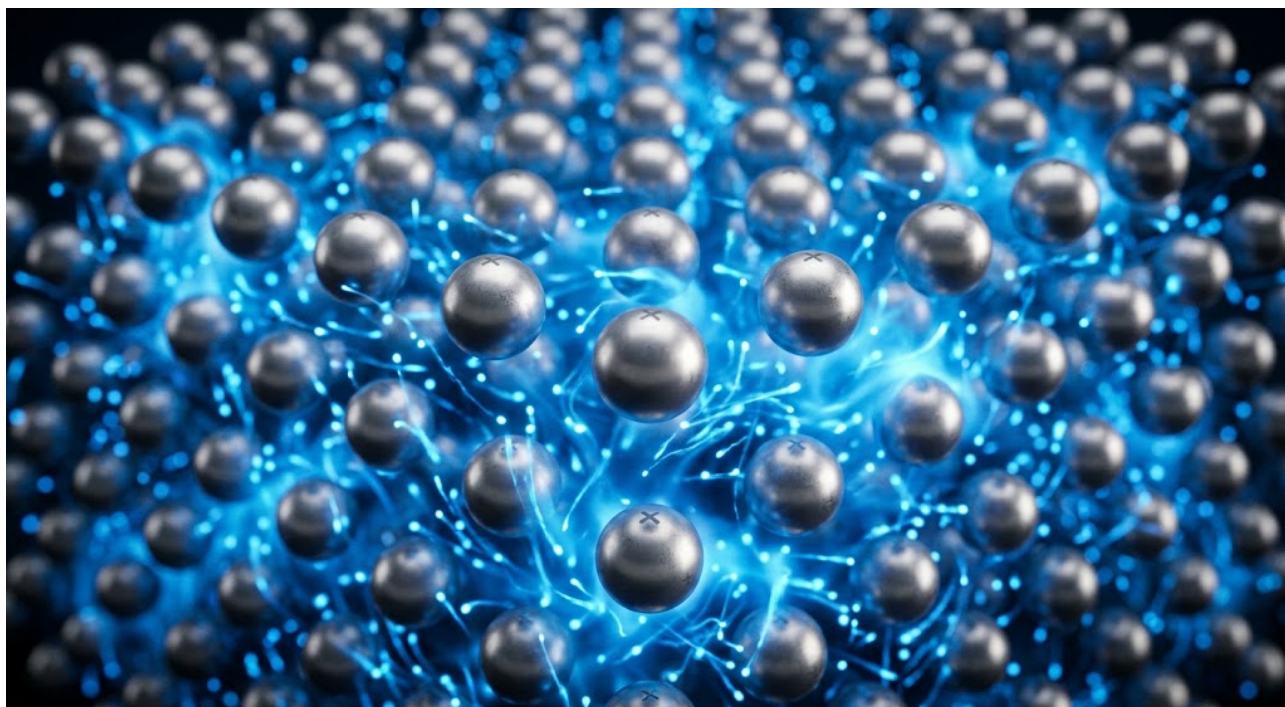
Усі ці макроскопічні властивості є прямим наслідком мікроскопічної природи взаємодії частинок — **металевого хімічного зв'язку**.

Відповідно до квантово-механічної моделі, атоми металів мають на зовнішній валентній оболонці невелику кількість електронів (зазвичай 1–3), які слабо зв'язані з ядром. При зближенні атомів під час кристалізації ці валентні електрони відриваються від своїх атомів і стають колективізованими (належать не одному конкретному атому, а всьому шматку металу).

У результаті у вузлах кристалічної ґратки розташовуються позитивно заряджені іони (і частково нейтральні атоми), а між ними безперервно і хаотично рухається хмара усупільнених вільних електронів, яку прийнято називати **«електронним газом»**.

Металевий зв'язок виникає внаслідок потужного електростатичного притягання між позитивними іонами кристалічної ґратки та негативно зарядженим електронним газом, який компенсує кулонівське відштовхування між однойменно зарядженими іонами.

На відміну від жорсткого та спрямованого ковалентного зв'язку (наприклад, у кристалі алмазу), металевий зв'язок є **ненаправленим** і **ненасиченим**. Саме ця особливість дозволяє атомним площинам металу ковзати одна відносно одної під дією зовнішніх дотичних напружень без руйнування самого зв'язку (електронний газ продовжує утримувати іони разом навіть після їх зміщення). Цей механізм лежить в основі унікальної властивості металів — **пластичності**.



Модель металевих зв'язків: Це наукова 3D-ілюстрація, яка візуалізує модель електронного газу (металевих зв'язків) в матеріалознавстві.

- Основою є суворі просторова решітка з позитивно заряджених іонів металу, які виглядають як масивні сріблясті сфери з невеликими позначками «+».
- Сфери занурені в динамічну синю хмару, що світиться і символізує «море» делокалізованих вільних електронів, які хаотично рухаються між іонами.
- Ілюстрація має кінематографічне освітлення, високий контраст та макроскопічний ефект із розмиттям глибини різкості по краях та на задньому фоні.

4. Ідеальна кристалічна ґратка та її базисні параметри

Для математичного та просторового опису кристалічної будови металів у матеріалознавстві використовують концепцію **просторової кристалічної ґратки** — геометричної абстракції, що являє собою тривимірну сітку ліній, у вузлах перетину яких розташовані центри атомів (або іонів).

Найменший об'єм кристалічної ґратки, трансляція (паралельне перенесення) якого у трьох вимірах дозволяє повністю відтворити весь макроскопічний кристал, називається **елементарною коміркою**.

Геометрія елементарної комірки (її сингонія) повністю описується шістьма базисними параметрами:

Трьома трансляційними періодами (відстанями між центрами найближчих атомів уздовж координатних осей X, Y, Z): позначаються як a, b, c . Вимірюються в ангстремах ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$) або нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$).

Трьома кутами між цими кристалографічними осями: позначаються як α, β, γ .

Для порівняльного аналізу щільності пакування різних типів кристалічних ґраток використовують наступні кристалографічні характеристики:

Координаційне число (K) — кількість атомів, що знаходяться на однаковій і найкоротшій відстані від будь-якого довільно обраного атома у кристалічній ґратці. Чим вище координаційне число, тим щільніше упаковані атоми в просторі.

Базис ґратки (Кількість атомів на комірку, n) — ефективна кількість атомів, що геометрично належать одній елементарній комірці. При розрахунку враховується, що атоми у вершинах куба належать одночасно 8 суміжним коміркам, на гранях — 2 коміркам, а всередині — цілком належать даній комірці.

Щільність пакування (Коефіцієнт компактності, Q) — відношення об'єму, який фактично зайнятий атомами (вважаючи атоми жорсткими недеформівними кулями), до загального об'єму елементарної комірки.

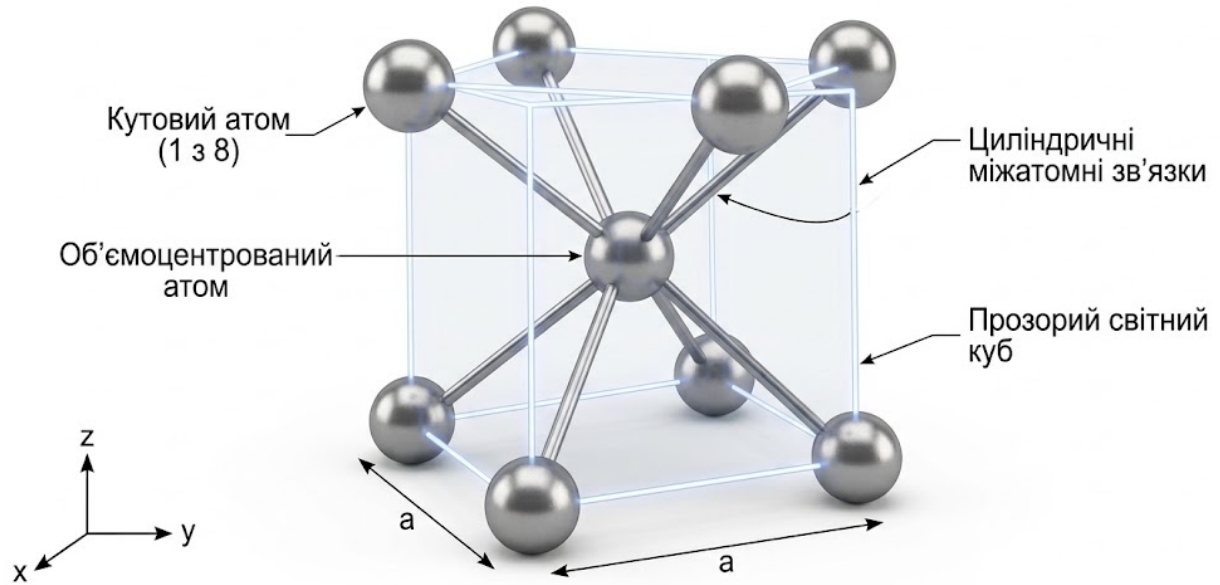
5. Основні типи кристалічних ґраток металів

Незважаючи на велику різноманітність хімічних елементів, переважна більшість промислово важливих металів кристалізується у трьох високосиметричних типах кристалічних ґраток. Їх детальне розуміння є критичним для інженера, оскільки саме тип ґратки зумовлює здатність металу до пластичної деформації, зварюваність та можливість термічного зміцнення.

5.1. Об'ємноцентрована кубічна ґратка (ОЦК)

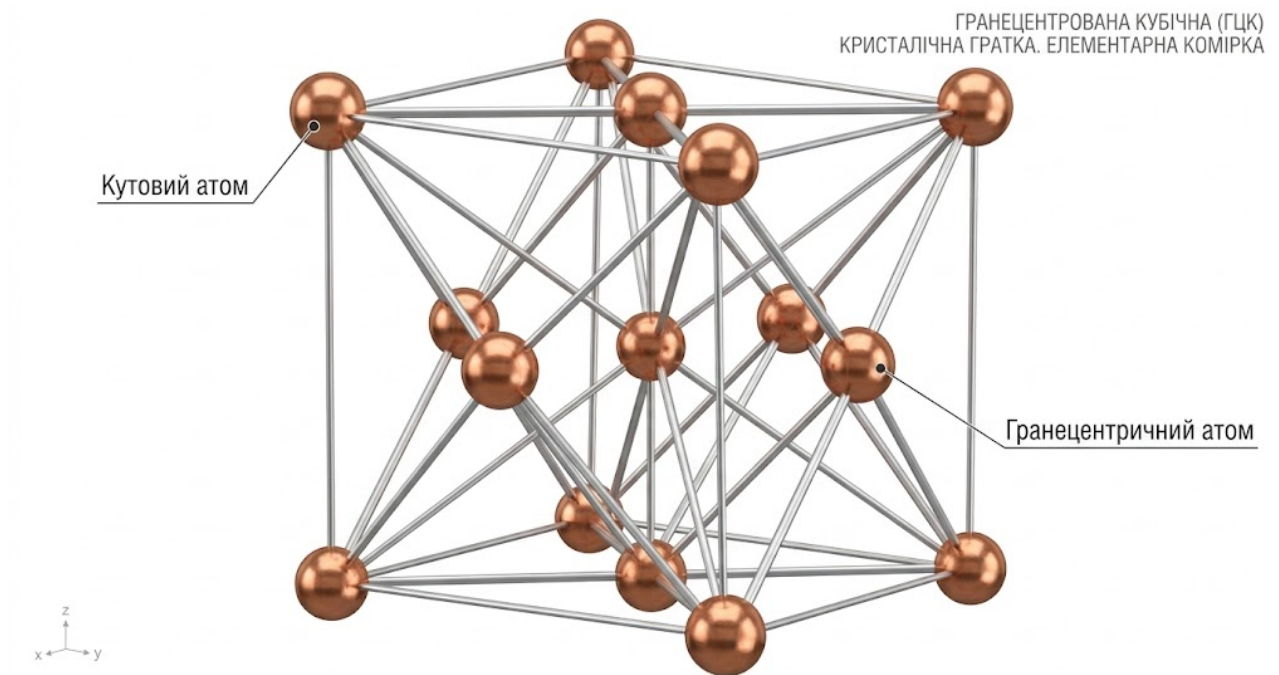
- Геометрія простору: Атоми розташовані у восьми вершинах куба, а ще один атом розміщений рівно у центрі об'єму куба (на точці перетину чотирьох просторових діагоналей).
- Параметри комірки: $a=b=c$; кути $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$.
- Координаційне число: $K=8$. (Кожен атом у центрі оточений 8 атомами у вершинах).
- Базис ґратки: $n=8 \times (1/8) + 1 = 2$ атоми.
- Щільність пакування: 0,68. Тобто атоми займають 68% загального об'єму комірки, а 32% припадає на міжатомні пустоти.
- Типові представники: α -залізо ($\text{Fe } \alpha$ — структурна складова ферит), Вольфрам (W), Молібден (Mo), Ванадій (V), Хром (Cr).
- Технологічні властивості: Метали з ОЦК ґраткою, як правило, мають високу границю міцності та твердість, проте їхня пластичність нижча, ніж у ГЦК металів, через меншу щільність пакування. Окрім того, ОЦК-метали (наприклад, нелеговані сталі) виявляють схильність до холодноламкості — різкого переходу від в'язкого до крихкого руйнування при зниженні температури експлуатації.

ЕЛЕМЕНТАРНА КОМІРКА ОБ'ЄМОЦЕНТРОВАНОЇ КУБІЧНОЇ (ОЦК) КРИСТАЛІЧНОЇ РЕШІТКИ



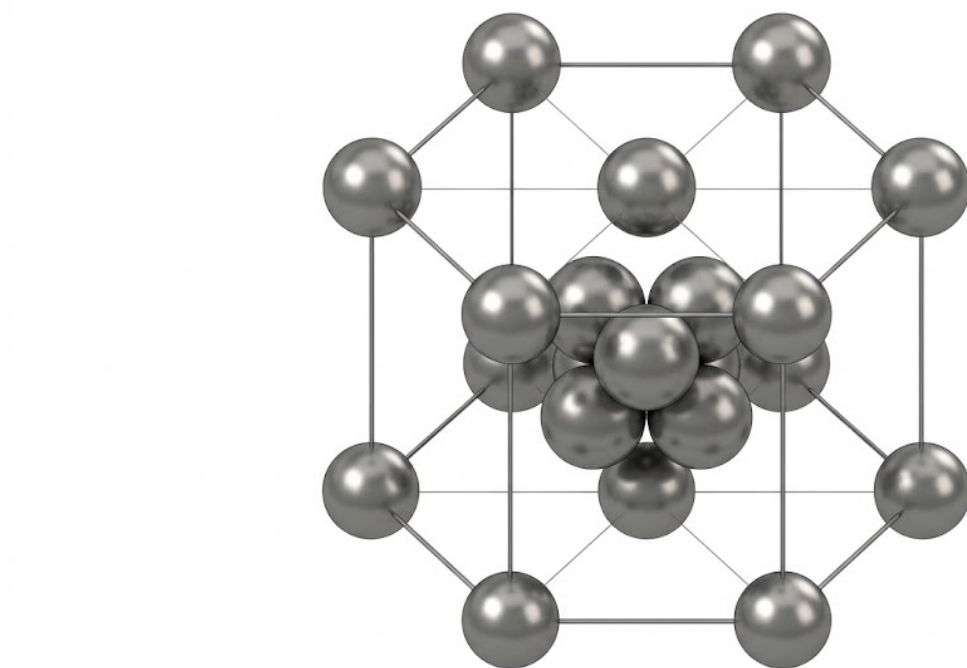
5.2. Гранецентрована кубічна ґратка (ГЦК)

- Геометрія простору: Атоми розташовані у восьми вершинах куба, а також по одному атому знаходиться в геометричному центрі кожної з шести граней куба.
- Параметри комірки: $a=b=c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$.
- Координаційне число: $K=12$.
- Базис ґратки: $n=8\times(1/8)+6\times(1/2)=4$ атоми.
- Щільність пакування: 0,74. Це математично максимально можлива щільність пакування кулястих об'єктів у просторі.
- Типові представники: γ -залізо (Fe γ — структурна складова аустеніт), Алюміній (Al), Мідь (Cu), Нікель (Ni), Золото (Au), Свинець (Pb).
- Технологічні властивості: Завдяки максимальній щільності пакування та наявності великої кількості площин легкого ковзання, метали з ГЦК ґраткою відрізняються винятковою пластичністю. Вони легко піддаються холодній деформації (штампуванню, витяжці), мають відмінну зварюваність і, що принципово важливо, не мають порогу холодноламкості (зберігають високу ударну в'язкість навіть при криогенних температурах).



5.3. Щільнопакована гексагональна ґратка (ЩГ)

- **Геометрія простору:** Елементарна комірка являє собою правильну шестигранну призму. Атоми розташовані у 12 вершинах призми, по одному атому в центрах верхньої та нижньої шестигранних основ, а ще 3 атоми розташовані у середньому перерізі призми (всередині об'єму).
- Параметри комірки: $a=b \neq c$; кути $\alpha=\beta=90^\circ$, $\gamma=120^\circ$.
- Координаційне число: $K=12$.
- Базис ґратки: $n=12 \times (1/6) + 2 \times (1/2) + 3 = 6$ атомів.
- Щільність пакування: 0,74 (також максимально щільна упаковка).
- Типові представники: Титан (Ti), Магній (Mg), Цинк (Zn), Кобальт (Co), Берилій (Be).
- **Технологічні властивості:** Незважаючи на високу щільність пакування, метали з гексагональною ґраткою мають суттєво меншу кількість площин ковзання порівняно з ГЦК. Тому при кімнатній температурі вони характеризуються порівняно низькою пластичністю і гірше піддаються обробці тиском (часто потребують гарячої деформації). Характеризуються сильно вираженою анізотропією властивостей вздовж головної осі c та в базисній площині.



6. Явище поліморфізму (алотропії) металів

Багато металів у твердому стані за різних температурних інтервалів або під дією високого тиску здатні змінювати тип своєї кристалічної ґратки. Здатність металу існувати в різних кристалічних формах називається **поліморфізмом** (або алотропією).

Різні кристалічні форми одного й того ж металу називають алотропічними модифікаціями і позначають літерами грецького алфавіту ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$), починаючи з найнижчої температури (кімнатної). Процес переходу від одного типу кристалічної ґратки до іншого називається поліморфним перетворенням. Цей перехід відбувається з виділенням теплоти (при охолодженні) або з поглинанням теплоти (при нагріванні) і супроводжується зміною об'єму (оскільки змінюється щільність пакування Q).

Фундаментальне і найважливіше для машинобудування практичне значення має поліморфізм заліза (Fe):

- При температурах до $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ залізо має ОЦК ґратку і називається α -залізом (Fe α).
- При нагріванні вище $911\text{ }^{\circ}\text{C}$ і до температури $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ решітка кардинально перебудовується, утворюючи ГЦК ґратку — γ -залізо (Fe γ). У цей момент об'єм металу раптово зменшується (через перехід від $Q=0,68$ до $Q=0,74$).
- При подальшому нагріванні від $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$ і до температури плавлення ($1539\text{ }^{\circ}\text{C}$) залізо знову повертається до ОЦК ґратки — утворюється δ -залізо (Fe δ).

Інженерне значення поліморфізму: Саме завдяки явищу поліморфізму заліза (переходу ОЦК $\leftrightarrow$ ГЦК) та різній розчинності вуглецю в цих ґратках стала можливою термічна обробка сталей (наприклад, гартування). При швидкому охолодженні (гартуванні) вуглець не встигає виділитися з ГЦК ґратки при її перебудові в ОЦК, що призводить до сильного викривлення ґратки і утворення надміцної нерівноважної фази — мартенситу. Це дозволяє радикально підвищувати міцність, твердість та зносостійкість деталей машин та інструментів.

7. Поняття про реальну будову металів

Розглянуті вище кристалічні ґратки описують ідеальну будову монокристала. Однак у реальних промислових умовах метали ніколи не твердіють як один гігантський кристал. У дійсності структура металів складається з безлічі хаотично розташованих мікроскопічно дрібних кристалів неправильної форми, які називаються **зернами** (або кристалітами). Така будова називається полікристалічною.

Кожне окреме зерно всередині себе має правильну кристалічну ґратку, і його властивості є анізотропними. Проте, оскільки в реальному шматку металу містяться мільярди зерен, і їхні кристалографічні осі орієнтовані в просторі абсолютно хаотично і статистично рівномірно, анізотропія окремих зерен взаємно компенсується. В результаті макроскопічний об'єм металу виявляє однакові властивості в усіх напрямках. Саме тому метали завдяки своїй дрібнозернистій структурі вважаються **квазіізотропними** (або просто ізотропними в рамках інженерних розрахунків).

Крім того, реальні метали завжди містять величезну кількість дефектів кристалічної будови (вакансії, дислокації, межі зерен), які переривають ідеальну періодичність ґратки. Саме ці дефекти, а не ідеальні міжатомні сили, визначають реальну границю міцності та границю плинності сталей, що використовуються у зварних конструкціях.

ЛЕКЦІЯ № 2 Тема: Дефекти кристалічної будови (точкові, лінійні, поверхневі). Явище анізотропії.

Ідеальна та реальна кристалічна будова металів У теоретичному матеріалознавстві ідеальний кристал розглядається як математично правильна просторова ґратка, у вузлах якої суворо періодично і без жодних порушень розташовані атоми або іони. Така ідеалізована модель дозволяє розрахувати теоретичну міцність металів, яка базується на силах міжатомної взаємодії. Розрахунки показують, що теоретична опірність зсуву (міцність) ідеального кристала у сотні та тисячі разів перевищує реальну міцність технічних металів.

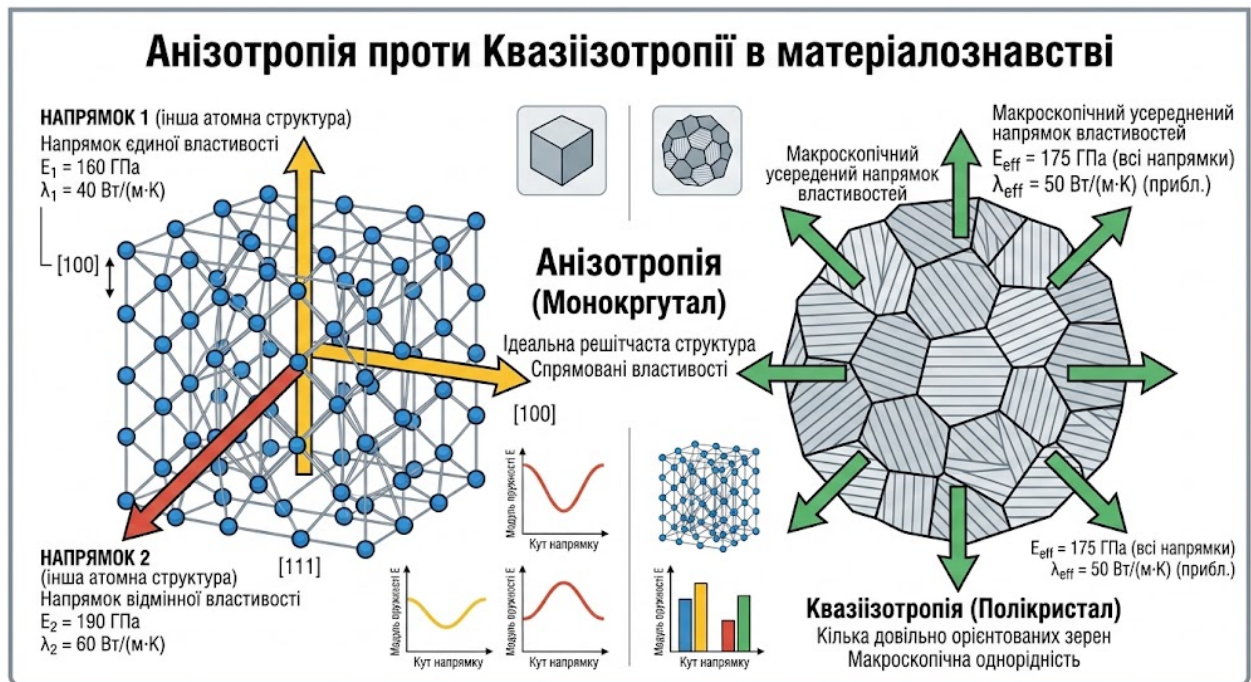
Різке зниження фактичної міцності металів порівняно з теоретичною зумовлене тим, що реальні метали ніколи не мають ідеальної кристалічної будови. У процесі кристалізації з розплаву, під час пластичної деформації, термічної обробки або під впливом високотемпературного зварювального циклу у кристалічній ґратці неминуче утворюється величезна кількість недосконалостей (порушень періодичності). Ці порушення називаються дефектами кристалічної будови. Залежно від геометричних розмірів у просторі, дефекти класифікують на точкові (нульвимірні), лінійні (одновимірні), поверхневі (двовимірні) та об'ємні (тривимірні). Розуміння природи цих дефектів є критичним для інженерної механіки, оскільки саме вони визначають реальні механічні та технологічні властивості металів, а також механізми їх руйнування.

Явище анізотропії та квазіізотропія Анізотропія (від грец. *anisos* — нерівний, *tropos* — напрямок) — це залежність фізико-механічних властивостей кристала (міцності, пружності, теплопровідності, електропровідності) від кристалографічного напрямку вимірювання.

Природа анізотропії криється в самій геометрії кристалічної ґратки. Оскільки відстані між атомами у різних кристалографічних площинах і напрямках неоднакові (різна щільність пакування атомів), сили міжатомного зв'язку також різняться. Відповідно, опір деформації вздовж щільнопакованої площини буде суттєво відрізнятися від опору в напрямку з меншою атомною щільністю. Анізотропія яскраво виражена у монокристалах (одиначних кристалах правильної форми).

Реальні технічні метали та сплави (сталі, чавуни, алюмінієві сплави) є полікристалічними тілами — вони складаються з міриад дрібних кристалів (зерен). У процесі первинної кристалізації ці зерна ростуть хаотично, тому їхні кристалографічні осі орієнтовані в просторі статистично рівномірно і випадково. Внаслідок цього анізотропія кожного окремого зерна компенсується різною орієнтацією сусідніх зерен. Такий макроскопічний об'єм металу виявляє практично однакові властивості в усіх напрямках. Цей стан називається квазіізотропією (уявною ізотропією).

Проте під час обробки металів тиском (прокатка, волочіння, кування) зерна витягуються вздовж напрямку деформації, а їхні кристалографічні осі отримують переважну орієнтацію. Утворюється так звана текстура деформації, і метал набуває яскраво вираженої макроскопічної анізотропії (наприклад, міцність прокату вздовж волокон значно вища, ніж поперек).



Точкові (нульвимірні) дефекти Точкові дефекти — це локальні порушення кристалічної ґратки, розміри яких у всіх трьох вимірах сумірні з розміром одного атома (не перевищують кількох міжатомних відстаней). До них належать:

Вакансії (дефекти Шотткі) — вільні (незайняті) вузли кристалічної ґратки. Вони утворюються внаслідок теплового руху атомів: атом, отримавши надлишкову кінетичну енергію (флуктуацію), покидає своє рівноважне місце у вузлі і виходить на поверхню кристала або на межу зерна. Концентрація вакансій експоненціально зростає при нагріванні металу.

Міжвузлові атоми (дефекти Френкеля) — атоми основного металу, які покинули свої вузли, але не вийшли на поверхню, а застрягли у міжвузлях (пустотах ґратки). Цей процес потребує значної енергії, тому в щільноупакованих металевих ґратках (ГЦК, ЦГГ) зустрічається рідше, ніж утворення вакансій.

Домішкові атоми — чужорідні атоми, які завжди присутні в реальному металі. Вони можуть заміщувати атоми основного металу у вузлах ґратки (домішки заміщення) або розташовуватися між вузлами (домішки втілення). Наприклад, атоми вуглецю у ґратці заліза є типовими домішками втілення.

Точкові дефекти викликають локальне викривлення (пружну деформацію) кристалічної ґратки, що призводить до підвищення електричного опору та деякого збільшення міцності. Але головна технологічна роль точкових дефектів (особливо вакансій) полягає в тому, що вони забезпечують дифузію в твердому стані. Без наявності вакансій неможливі були б процеси хіміко-термічної обробки (цементация, азотування) та гомогенізаційного відпалу.

Документ містить ознайомчий фрагмент (стор. 1–10). Повна версія доступна в електронній бібліотеці закладу після входу в особистий кабінет студента