



ПРИТВЕРДЖУЮ

заступник директора з навчально-методичної роботи
ЗНУ Дніпровський професійний технологічний
коледж

Сергій ГОРДІЄНКО

«28» серпня 2026 р.

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ДИСЦИПЛІНИ «МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО»

ЛЕКЦІЯ 1. ВСТУП. АТОМНО-КРИСТАЛІЧНА БУДОВА МЕТАЛІВ. ТИПИ КРИСТАЛІЧНИХ ҐРАТОК. АНІЗОТРОПІЯ ТА ПОЛІМОРФІЗМ (АЛОТРОПІЯ).

1. Вступ до дисципліни. Предмет і завдання матеріалознавства

Сучасне галузеве машинобудування перебуває на етапі стрімкого технологічного розвитку, що характеризується широким впровадженням систем автоматизованого проектування (CAD/CAM/CAE) та верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). Однак, жодна найдосконаліша комп'ютерна програма чи високоточна мехатронна система не здатна забезпечити працездатність деталі, якщо конструкційний матеріал для неї обрано помилково, без урахування його внутрішньої структури та фізико-хімічних властивостей.

Матеріалознавство — це фундаментальна інженерна наука, що вивчає закономірності формування структури металів, сплавів і неметалевих матеріалів та її вплив на макроскопічні механічні, технологічні й експлуатаційні властивості.

Головним завданням вивчення матеріалознавства є формування у майбутнього фахівця професійного інженерно-технологічного світогляду. Це означає здатність встановлювати глибинні причинно-наслідкові зв'язки між атомно-кристалічною будовою на мікрорівні та поведінкою матеріалу в реальних умовах експлуатації (ударні навантаження, тертя, високі температури, агресивні середовища).

Беззаперечне розуміння природи фазових перетворень є критично важливим для гарантування безпеки, надійності та безвідмовності сучасного промислового обладнання, що, своєю чергою, формує безпечне виробниче та інклюзивне середовище.



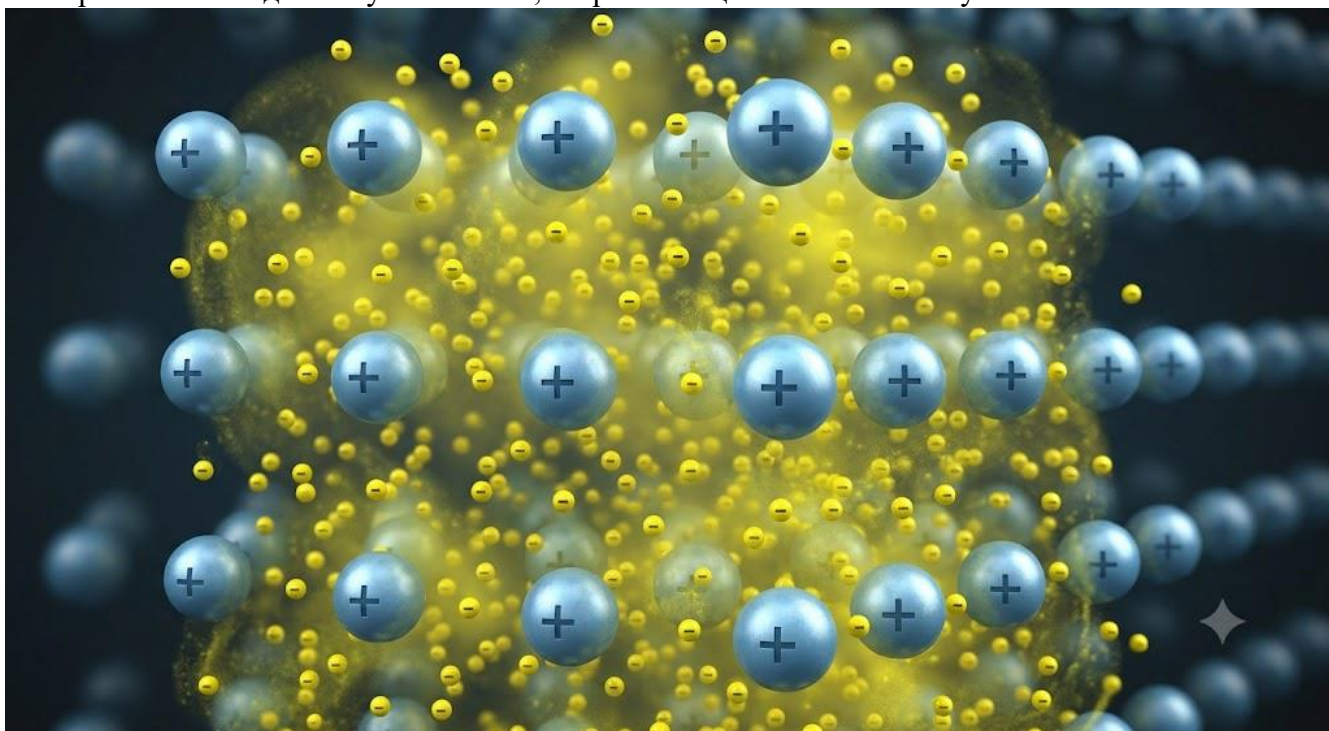
2. Атомно-кристалічна будова металів. Металевий зв'язок

Усі тверді тіла в природі за характером взаємного розташування атомів поділяються на два великі класи: аморфні та кристалічні. В аморфних тілах (наприклад, смола, звичайне скло, бурштін) атоми розташовані хаотично, без певного порядку, утворюючи лише ближній

порядок. Такі речовини ізотропні, не мають чітко визначеної температури плавлення (вони поступово розм'якшуються при нагріванні). Натомість метали та їхні сплави у твердому агрегатному стані є виключно кристалічними тілами. Для них характерне суворо закономірне, періодичне розташування атомів у просторі на значних відстанях — наявність як ближнього, так і дальнього порядку.

Унікальні властивості металів (висока електро- і теплопровідність, пластичність, металевий блиск, позитивний температурний коефіцієнт електричного опору) зумовлені специфічною природою міжатомної взаємодії — **металевим зв'язком**. Атоми металів на зовнішніх енергетичних рівнях мають невелику кількість валентних електронів (від 1 до 3), які слабо утримуються ядром. При зближенні атомів під час кристалізації ці валентні електрони відриваються і стають спільними для всього об'єму кристала. Таким чином, у вузлах кристалічної ґратки розташовуються позитивно заряджені іони (катіони), а простір між ними заповнюється вільними електронами, утворюючи так званий «електронний газ».

Ця модель ідеально пояснює високу пластичність металів. При механічній пластичній деформації шари позитивно заряджених іонів ковзають один відносно одного, проте руйнування зв'язку не відбувається, оскільки «електронний газ» миттєво екранує електростатичне відштовхування іонів, зберігаючи цілісність моноліту.



3. Типи кристалічних ґраток та їхні параметри

Для опису закономірного розташування атомів у просторі використовують поняття кристалічної ґратки. **Кристалічна ґратка** — це уявна просторова сітка, у вузлах якої розташовані атоми (або іони).

Найменший об'єм кристала, який дає повне уявлення про його просторову геометрію та тип симетрії, називається елементарною кристалічною коміркою.

Кожна кристалічна комірка характеризується набором строгих параметрів, які визначають фізичні властивості матеріалу:

Період (константа) ґратки (a, b, c) — відстань між центрами найближчих атомів уздовж кристалографічних осей. Вимірюється у нанометрах ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) або ангстремах ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$). Для більшості металів цей параметр становить $0.2 \div 0.6 \text{ нм}$.

Координаційне число (K) — кількість атомів, які знаходяться на найближчій, однаковій відстані від будь-якого обраного атома у ґратці. Що вище координаційне число, то щільніше упаковані атоми в кристалі.

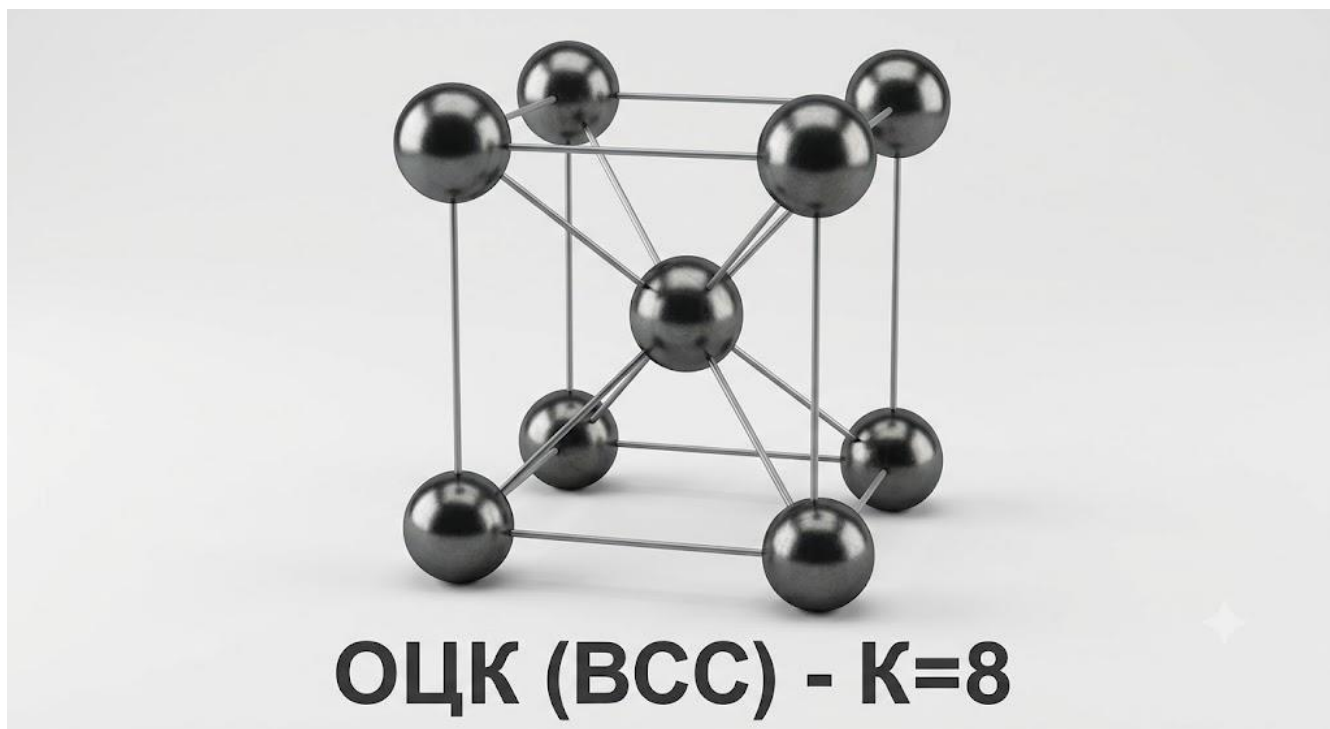
Базис ґратки (n) — кількість атомів, що фактично належать одній елементарній комірці.

Коефіцієнт щільності пакування (η) — відношення об'єму, який реально займають атоми (вважаючи їх жорсткими кулями), до загального об'єму елементарної комірки.

Абсолютна більшість конструкційних металів, що використовуються в машинобудуванні, кристалізуються у трьох основних типах ґраток: об'ємно-центрований кубічний (ОЦК), гранецентрований кубічний (ГЦК) та гексагональний щільноупакований (ГЦП).

3.1. Об'ємно-центрована кубічна ґратка (ОЦК)

В ОЦК-ґратці атоми розташовані у восьми вершинах куба та один атом — безпосередньо у центрі перетину просторових діагоналей (у центрі об'єму). Атоми у вершинах куба належать одночасно восьми сусіднім коміркам, тому на одну комірку припадає лише $8 \times 1/8 = 1$ атом. Разом із центральним атомом базис ОЦК ґратки становить $n = 2$ атоми. Координаційне число для ОЦК дорівнює $K = 8$, а коефіцієнт щільності пакування становить близько 68% ($\eta = 0.68$). Така ґратка не є максимально щільною. Метали з ОЦК ґраткою зазвичай характеризуються високою міцністю, але відносно меншою пластичністю. До них належать: *Fe α* (залізо альфа), хром (*Cr*), вольфрам (*W*), молібден (*Mo*), ванадій (*V*).



3.2. Гранецентрована кубічна ґратка (ГЦК)

У ГЦК-ґратці атоми розташовані у вершинах куба та в центрі кожної з шести його граней. Кожен атом у вершині належить восьми коміркам ($8 \times 1/8 = 1$), а атом на грані — двом коміркам ($6 \times 1/2 = 3$).

Таким чином, базис ГЦК ґратки становить $n = 4$ атоми на комірку. Це максимально щільна структура. Її координаційне число $K = 12$, а коефіцієнт пакування досягає 74% ($\eta = 0.74$). Метали з ГЦК ґраткою відрізняються винятково високою пластичністю та здатністю до глибокої холодної деформації (штампування, витягування). Типові представники: *Fe γ* (залізо гамма), алюміній (*Al*), мідь (*Cu*), нікель (*Ni*), аурум (*Au*), аргентум (*Ag*).



3.3. Гексагональна щільноупакована ґратка (ГЦП)

Елементарна комірка ГЦП ґратки являє собою шестигранну призму. Атоми розташовані у вершинах верхньої та нижньої основ (по 6 атомів), у центрах цих основ (по 1 атому), а також ще 3 атоми знаходяться у середній площині призми, утворюючи трикутник. Загальна кількість атомів, що належать одній комірці (базис), дорівнює $n = 6$. ГЦП ґратка, як і ГЦК, забезпечує максимальну теоретично можливу щільність пакування атомів кулястої форми: координаційне число $K = 12$, коефіцієнт пакування $\eta = 0.74$. Проте, через специфіку ковзання дислокацій у такій структурі, метали з ГЦП ґраткою зазвичай менш пластичні за кімнатної температури. Представники: титан (*Ti*), цинк (*Zn*), магній (*Mg*), берилій (*Be*).

Тип кристалічної ґратки	Абревіатура	Базис ґратки (n)	Координаційне число (K)	Коеф. пакування (η)	Приклади металів
Об'ємно-центрована кубічна	ОЦК	2	8	68%	<i>Fe</i> _α , Cr, W, Mo, V
Гранецентрована кубічна	ГЦК	4	12	74%	<i>Fe</i> _γ , Cu, Al, Ni, Ag
Гексагональна щільноупакована	ГЦП	6	12	74%	<i>Ti</i> _α , Mg, Zn, Be

4. Анізотропія та ізотропія

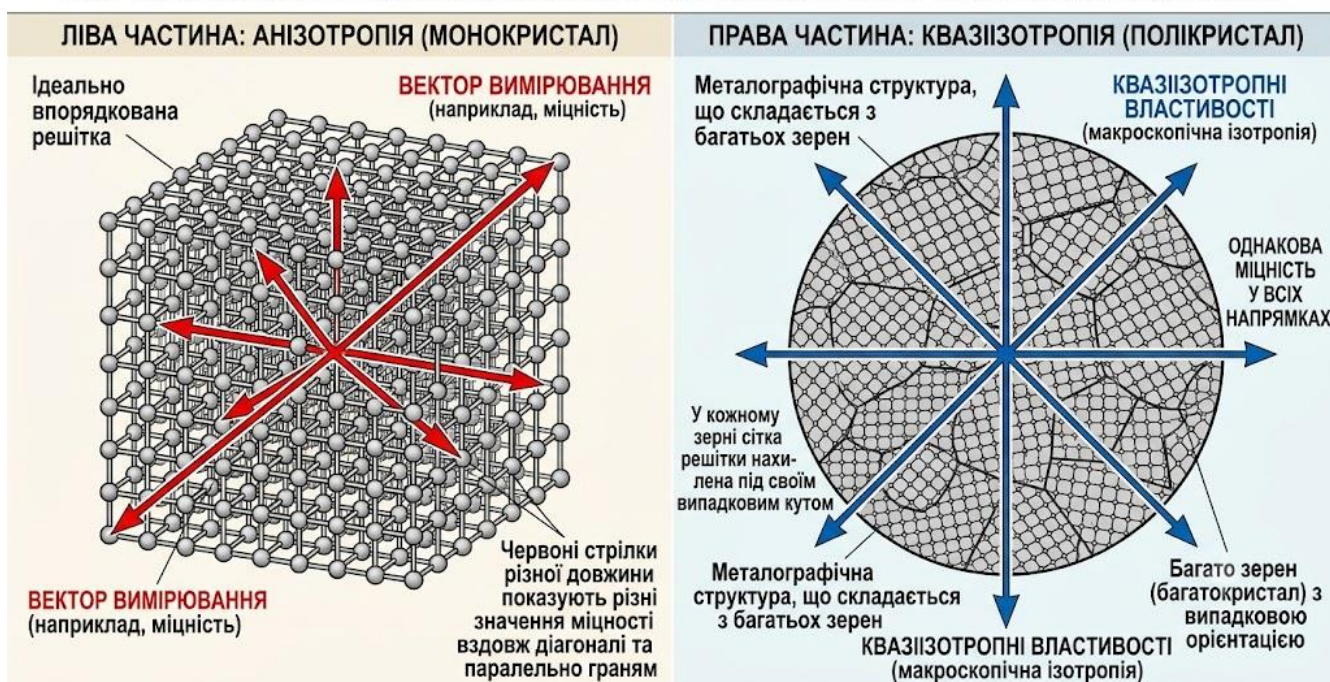
Правильне, закономірне розташування атомів у вузлах кристалічної ґратки призводить до того, що щільність атомів (кількість атомів на одиницю довжини або площі) у різних кристалографічних напрямках є неоднаковою. Оскільки сили міжатомної взаємодії залежать від відстані між атомами, то й властивості кристала будуть різними в різних напрямках. Властивість матеріалів змінювати свої фізичні, хімічні та механічні показники (міцність, електропровідність, теплопровідність, оптичні властивості) залежно від напрямку вимірювання всередині кристала називається **анізотропією**. Анізотропія є фундаментальною і невід'ємною властивістю будь-якого монокристала (одиночного кристалічного утворення з єдиною орієнтацією ґратки у всьому об'ємі).

На противагу цьому, **ізотропія** — це однаковість властивостей у всіх напрямках, що характерно для аморфних тіл, газів та рідин.

У промисловості конструкційні метали та сплави застосовуються не у вигляді монокристалів, а у вигляді полікристалів — тіл, що складаються з величезної кількості дрібних кристаликів (зерен). Кожне окреме зерно є анізотропним монокристалом. Однак у литому або відпаленому металі ці зерна орієнтовані в просторі абсолютно хаотично, випадково. Як наслідок, анізотропія окремих зерен у макроскопічному об'ємі металу статистично усереднюється, взаємокомпенсується. Тому реальні полікристалічні метали практично не проявляють анізотропії і є макроскопічно ізотропними тілами. Це явище в матеріалознавстві називають **квазіізотропією** (уявною ізотропією).

Важливо розуміти, що квазіізотропія може порушуватися. Під час інтенсивної пластичної деформації (наприклад, холодної прокатки або волочіння) кристалографічні осі зерен розвертаються і вишиковуються переважно в напрямку деформації, утворюючи кристалографічну текстуру. Такий метал (наприклад, холоднокатаний сталевий лист) набуває яскраво вираженої анізотропії, що обов'язково враховується при розробці технологічних процесів штампування деталей машин.

ПОРІВНЯЛЬНА МІКРОСТРУКТУРНА СХЕМА: АНІЗОТРОПІЯ ПРОТИ КВАЗІІЗОТРОПІЇ



5. Поліморфізм (Алотропія)

Деякі метали залежно від температури (або тиску) здатні змінювати тип своєї кристалічної ґратки у твердому стані. Це надзвичайно важливе явище називається **поліморфізмом** (якщо стосується простих хімічних речовин, частіше використовується термін **алотропія**).

Поліморфізм є критичним чинником, який лежить в основі більшості видів термічної обробки.

Поліморфні модифікації одного й того ж металу прийнято позначати літерами грецького алфавіту: α , β , γ , δ тощо. При цьому літерою α позначається модифікація, яка існує при найнижчих температурах (аж до абсолютного нуля). Процес переходу однієї кристалічної структури в іншу називається поліморфним перетворенням і супроводжується виділенням або поглинанням прихованої теплоти кристалізації (що фіксується у вигляді горизонтальних площадок на кривих охолодження).

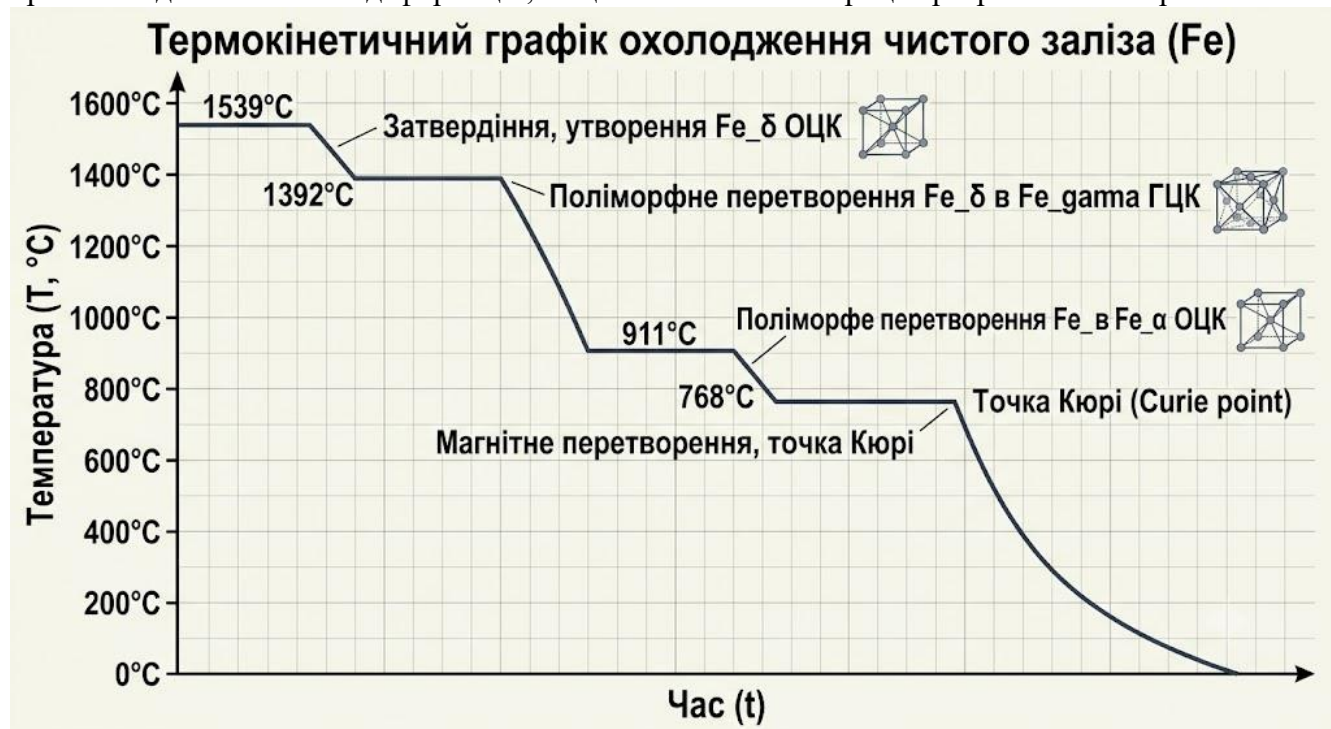
Класичним і технологічно найважливішим прикладом поліморфізму є перетворення чистого заліза (**Fe**). Температура плавлення заліза становить 1539°C. При повільному охолодженні розплаву відбуваються наступні структурні зміни:

1. У діапазоні температур від 1539°C до 1392°C існує **Fe δ** з ОЦК ґраткою.
2. При охолодженні нижче 1392°C відбувається поліморфне перетворення: ОЦК ґратка повністю перебудовується, утворюючи **Fe γ** з ГЦК ґраткою. Модифікація **Fe γ** існує в інтервалі температур 1392°C — 911°C. Саме здатність гамма-заліза розчиняти в собі велику кількість вуглецю є фундаментом теорії гартування сталей.

3. При температурі 911°C відбувається зворотна перебудова: ГЦК гратка знову перетворюється на ОЦК гратку. Утворюється **Fe α** , яке залишається стабільним аж до абсолютного нуля.

4. При температурі 768°C (точка Кюрі) структурної зміни гратки не відбувається, але спостерігається магнітне перетворення — нижче цієї температури **Fe α** стає феромагнітним (сильно притягується магнітом), а вище — парамагнітним.

Кожне поліморфне перетворення супроводжується різкою зміною об'єму матеріалу. Так, перехід ГЦК структури в ОЦК структуру викликає збільшення об'єму металу (оскільки ОЦК менш щільна). У виробничих умовах цей факт є критичним, оскільки напруження, що виникають через зміну об'єму під час гартування масивних валів чи зубчастих коліс, можуть призвести до виникнення деформацій, якщо технологічний процес розроблено некоректно.



Список використаної літератури:

1. Пахолук А.П., Пахолук О.А. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали. Львів: Світ.
2. Попович В. В. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Суми: Університетська книга.
3. Бойко В.М. Матеріалознавство та технологія металів. Київ: Либідь.

ЛЕКЦІЯ 2. ПРОЦЕСИ КРИСТАЛІЗАЦІЇ. ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІЧНОЇ БУДОВИ. БУДОВА СТАЛЕВОГО ЗЛИТКУ.

1. Термодинамічні основи процесів кристалізації

Перехід металу з рідкого (або газоподібного) агрегатного стану у твердий кристалічний називається **кристалізацією**. Цей процес має колосальне значення для галузевого машинобудування, оскільки саме на етапі кристалізації (під час лиття заготовок) формується первинна макро- та мікроструктура металу, яка багато в чому визначає його подальші технологічні та експлуатаційні властивості.

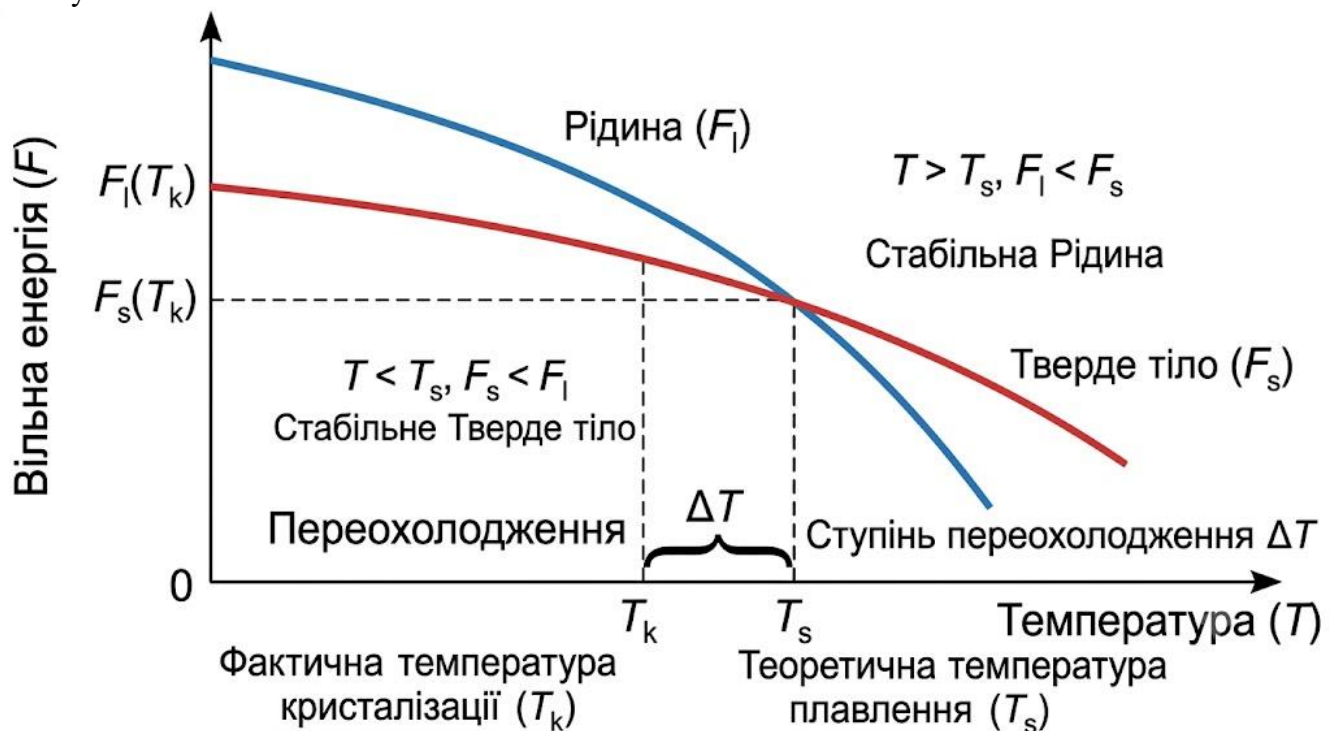
З точки зору термодинаміки, будь-яка система у природі прагне до стану з мінімальним запасом вільної енергії. Вільна енергія (F) — це та частина внутрішньої енергії системи, яка може бути перетворена на корисну роботу при постійній температурі. Залежність вільної енергії від температури для рідкого і твердого станів є різною. При високих температурах менший запас вільної енергії має рідкий стан, а при низьких — твердий. Температура, за якої вільні енергії рідкого (F_p) і твердого (F_m) станів однакові ($F_p = F_m$), називається **теоретичною (рівноважною) температурою кристалізації (T_s)**.

За температури T_s метал може одночасно перебувати як у рідкому, так і у твердому стані нескінченно довго, оскільки термодинамічний стимул для переходу відсутній. Щоб процес кристалізації розпочався, рідину необхідно переохолодити нижче температури T_s . Реальна температура, при якій починається процес затвердіння, називається **фактичною температурою кристалізації (T_k)**.

Різниця між теоретичною і фактичною температурами кристалізації називається **ступенем переохолодження (ΔT)**:

$$\Delta T = T_s - T_k$$

Що вища швидкість охолодження розплаву, то нижчою є фактична температура кристалізації і, відповідно, більшим ступінь переохолодження ΔT . Це явище графічно відображається на кривих охолодження (залежність температури від часу). На кривій ідеального металу при досягненні T_k з'являється горизонтальна площадка, оскільки процес кристалізації супроводжується виділенням прихованої теплоти кристалізації, яка повністю компенсує тепловідвід у навколишнє середовище до моменту повного затвердіння всього об'єму.



2. Механізм процесу кристалізації

Згідно з класичною теорією, розробленою Д.К. Черновим та доповненою Г. Тамманом, процес кристалізації складається з двох елементарних паралельних стадій: **Зародження центрів кристалізації (зародків)**: у переохолодженій рідині завдяки енергетичним

флуктуаціям мимовільно виникають мікроскопічні стійкі угруповання атомів із правильною кристалічною ґраткою. Цей процес може бути гомогенним (самочинне утворення в ідеально чистій рідині) або гетерогенним (утворення зародків на наявних домішках, стінках виливниці, нерозчинених неметалевих включеннях). У реальних промислових умовах кристалізація завжди гетерогенна.

Ріст кристалів: поступове приєднання атомів з рідкої фази до поверхні утворених зародків. Зростаючі кристали правильної форми називаються кристалітами, однак у процесі росту вони стикаються один з одним, втрачають правильну геометричну форму і перетворюються на багатогранні зерна.

Кінцева величина зерна металу (яка критично впливає на механічні властивості — чим дрібніше зерно, тим вища міцність і ударна в'язкість) залежить від співвідношення двох параметрів: **швидкості утворення центрів кристалізації (ШУЦ)** та **швидкості росту кристалів (ШРК)**. Обидва ці параметри залежать від ступеня переохолодження ΔT . При збільшенні переохолодження ШУЦ зростає значно швидше, ніж ШРК. Тому при швидкому охолодженні (великому ΔT) утворюється велика кількість зародків, які не встигають вирости до моменту зіткнення, що призводить до формування дрібнозернистої структури. При повільному охолодженні (малому ΔT) зародків мало, і вони виростають до значних розмірів — формується великозерниста структура.

2.1. Модифікування сплавів

Для штучного подібнення зерна в машинобудуванні застосовують технологічну операцію — **модифікування**. Її суть полягає у введенні в розплавлений метал перед самим його розливанням невеликої кількості спеціальних домішок (модифікаторів). Модифікатори бувають двох типів: *Модифікатори I роду (тугоплавкі)*: не розчиняються у розплаві і слугують додатковими штучними центрами кристалізації (гетерогенне зародження).

Наприклад, титан, ванадій, алюміній у сталях.

Модифікатори II роду (поверхнево-активні): розчиняються в рідкому металі, але осідають (адсорбуються) на поверхні зростаючих кристалів, створюючи бар'єр і штучно гальмуючи швидкість їхнього росту (ШРК). Наприклад, натрій для алюмінієвих сплавів (силумінів), магній для чавунів.

2.2. Дендритна кристалізація

Російський металург Д.К. Чернов у 1868 році довів, що в реальних умовах ріст кристалів металу відбувається не рівномірно у всіх напрямках, а переважно вздовж певних кристалографічних осей, де щільність пакування атомів найбільша. Утворюється структура, що нагадує дерево або папороть — **дендрит**. Спочатку швидко росте головна вісь (вісь першого порядку), потім на ній утворюються гілки другого порядку, на них — третього і т.д. Зрештою проміжки між гілками заповнюються розплавом, що кристалізується в останню чергу, утворюючи суцільне зерно. Межі дендритів часто залишаються місцем скупчення шкідливих домішок, що знижує якість литих деталей.



3. Дефекти кристалічної будови (Ідеальні та реальні кристали)

Модель кристалічної ґратки, розглянута в першій лекції, описує *ідеальний кристал*, де всі вузли строго зайняті атомами без жодних порушень періодичності. Однак у природі та промисловості таких матеріалів не існує. Реальні кристали містять величезну кількість структурних недосконалостей — **дефектів кристалічної будови**. Саме вони визначають механічні (фактичну міцність, пластичність) та фізико-хімічні (електроопір, дифузію) властивості матеріалів. За геометричними розмірами дефекти класифікують на три основні групи: точкові (нульмірні), лінійні (одномірні) та поверхневі (двомірні).

3.1. Точкові дефекти

Мають мікроскопічні розміри у всіх трьох вимірах (співрозмірні з розміром одного або кількох атомів). До них належать: **Вакансії (дірки)**: вузли кристалічної ґратки, які залишилися вільними (не зайнятими атомами).

Вони утворюються внаслідок теплового руху атомів — атом, що отримав надлишкову кінетичну енергію, може покинути свій вузол і вийти на поверхню кристала або перейти в міжвузля.

Кількість вакансій експоненціально зростає з підвищенням температури.

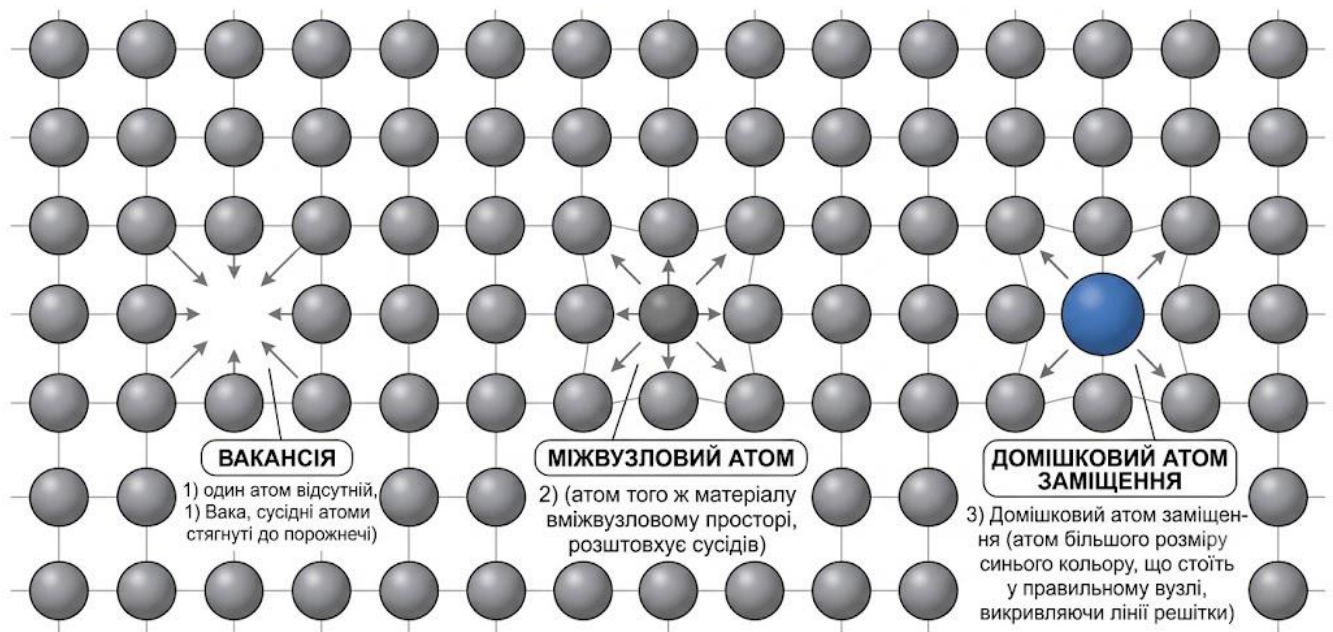
Міжвузлові атоми (дислоковані атоми, атоми впровадження): атоми основного металу або атоми домішок, які розмістилися в просторі між вузлами кристалічної ґратки. Оскільки радіус атома зазвичай більший за розмір міжвузля, це викликає сильне локальне спотворення (розпирання) ґратки.

Атоми заміщення: атоми стороннього елемента (домішки або легуючого елемента), які зайняли місце основного атома у вузлі ґратки. Оскільки їх радіус відрізняється від радіуса основного атома, це також призводить до деформації решітки.

Точкові дефекти є головною причиною протікання процесів дифузії у твердих металах (саме завдяки наявності вакансій можлива хіміко-термічна обробка — цементація, азотування).

Вони також підвищують електричний опір металу.

СХЕМА ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ КРИСТАЛІЧНОЇ ҐРАТКИ



3.2. Лінійні дефекти (Дислокації)

Мають малі розміри у двох вимірах (поперечному перерізі) і значну довжину у третьому. Найважливішим видом лінійних дефектів є **дислокації**. Поняття про дислокації було введено у 1930-х роках Тейлором, Орованом та Полані для пояснення грандіозної розбіжності: теоретично розрахована міцність металів на основі міжатомних сил була у 100-1000 разів вищою за їх фактичну реальну міцність. Причиною виявилася наявність дислокацій — готових ліній ковзання, які дозволяють металу деформуватися не одночасним розривом усіх міжатомних зв'язків у площині (що потребувало б гігантських зусиль), а поступовим "перебіганням" одного дефекту.

Крайова дислокація: являє собою локальне викривлення кристалічної ґратки, викликане наявністю "зайвої" неповної атомної площини (екстраплощини), яка втиснута між правильними площинами і обривається всередині кристала. Нижній край цієї екстраплощини і є лінією крайової дислокації. Навколо неї ґратка сильно стиснута зверху і розтягнута знизу.

Гвинтова дислокація: утворюється в результаті неповного зсуву однієї частини кристала відносно іншої на одну міжатомну відстань. Кристалічні площини закручуються навколо лінії дислокації у вигляді спіралі (гвинта).

Основною характеристикою лінійних дефектів є **щільність дислокацій (ρ)** — сумарна довжина ліній дислокацій в одиниці об'єму кристала (вимірюється в см-2 або м-2). Для відпаленого металу $\rho \approx 106 - 108 \text{ см-2}$, а після сильної пластичної деформації може досягати 10^{12} см-2 .

Вплив дислокацій на міцність:

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