



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ 1 № Тема: Вступ до курсу. Атомно-кристалічна будова металів.

ВСТУПНА ЧАСТИНА: Роль матеріалознавства у теплоенергетиці

Сучасна теплоенергетика є однією з найбільш високотехнологічних і водночас найбільш вимогливих до матеріального забезпечення галузей промисловості. Експлуатація теплотехнічного і теплотехнологічного устаткування — парових і водогрійних котлів, магістральних теплових мереж, парових та газових турбін, насосно-компресорних станцій — відбувається в умовах екстремального впливу зовнішніх та внутрішніх факторів. Метали та сплави, з яких виготовлені ці агрегати, піддаються одночасному впливу колосальних механічних напружень, надвисоких температур, різких термічних циклів (нагрівання-охолодження) та безперервної агресивної фізико-хімічної взаємодії з робочими тілами (перегрітою парою, хімічно підготовленою водою, продуктами згоряння палива).

Дисципліна «Матеріалознавство» вивчає фундаментальні закономірності, що пов'язують внутрішню будову матеріалів з їхніми фізичними, хімічними, механічними та експлуатаційними властивостями. Розуміння мікро- та макроструктури металів дозволяє інженеру-теплоенергетику науково обґрунтовано підходити до вибору матеріалу для ремонту чи проектування, прогнозувати термін служби деталей, запобігати аварійним ситуаціям (розривам труб екранів котла, руйнуванню лопаток турбін через втому металу чи повзучість), а також розробляти ефективні методи антикорозійного захисту.

Будь-який аналіз поведінки металевої деталі у макросвіті (наприклад, колектора парового котла) починається з розуміння процесів, що відбуваються у мікросвіті — на рівні взаємодії окремих атомів та електронів.

1. ПРИРОДА МЕТАЛЕВОГО СТАНУ ТА МЕТАЛЕВИЙ ЗВ'ЯЗОК

Усі тверді тіла в природі поділяються на аморфні (з хаотичним розташуванням атомів, наприклад, скло чи смола) та кристалічні (з суворо впорядкованим, закономірним розташуванням атомів у просторі). Всі без винятку метали у твердому агрегатному стані є кристалічними тілами.

Квантово-механічна природа металів З точки зору будови атома, метали характеризуються невеликою кількістю електронів на зовнішньому (валентному) енергетичному рівні (зазвичай 1–3 електрони). Ці валентні електрони відносно слабо зв'язані з ядром атома. Коли атоми металу зближуються на відстані, сумірні з їхніми атомними радіусами (при утворенні твердого тіла), валентні електрони відриваються від своїх оболонок. Внаслідок цього атоми перетворюються на позитивно заряджені іони (катіони), які формують жорсткий просторовий каркас — кристалічну решітку. Відірвані електрони стають колективізованими (спільними для всього шматка металу) і утворюють так званий «електронний газ». Цей електронний газ безперервно і хаотично переміщується між позитивними іонами.

Сутність металевого зв'язку полягає у виникненні потужних електростатичних сил притягання між позитивно зарядженими іонами у вузлах решітки та негативно зарядженим колективізованим електронним газом. Цей зв'язок є ненаправленим (діє однаково в усіх напрямках) і ненасиченим, що докорінно відрізняє його від ковалентного чи іонного зв'язків.

Саме металевий зв'язок зумовлює унікальні базові властивості металів, життєво необхідні в теплоенергетиці:

1. **Висока електро- та теплопровідність:** забезпечується високою рухливістю електронного газу, який миттєво переносить теплову та електричну енергію по всьому об'єму матеріалу (основа роботи будь-якого теплообмінника).
2. **Пластичність (ковкість):** завдяки ненаправленості зв'язку, шари іонів можуть зміщуватися один відносно одного без руйнування самого зв'язку (електронний газ продовжує утримувати зміщені іони).
3. **Металевий блиск та непрозорість:** вільні електрони ефективно відбивають світлові електромагнітні хвилі.



2. ТИПИ ТА ПАРАМЕТРИ КРИСТАЛІЧНИХ РЕШІТОК

Ідеальна кристалічна решітка — це уявна просторова сітка, у вузлах якої розташовані атоми (іони). Найменший об'єм кристалічної решітки, який повністю зберігає всі її геометричні особливості та симетрію, називається **елементарною кристалічною коміркою**.

Для повної академічної характеристики елементарної комірки використовують наступні параметри:

- **Період (параметр) решітки (a , b , c)** — відстань між центрами сусідніх атомів уздовж ребер елементарної комірки. Вимірюється в нанометрах (нм) або ангстремах (Å).
- **Координаційне число (K)** — кількість атомів, що знаходяться на найближчій і однаковій відстані від будь-якого обраного атома в решітці (показник щільності упаковки).
- **Коефіцієнт компактності (упаковки)** — відношення об'єму, який реально займають атоми (вважаючи їх жорсткими кулями), до загального об'єму елементарної комірки.

Більшість металів кристалізується в одній із трьох базових сингоній:

1. Об'ємно-центрована кубічна решітка (ОЦК)

- **Будова:** Атоми розташовані у вершинах куба (8 атомів, кожен належить 8 сусіднім коміркам, тобто $8 \times 1/8 = 1$ атом) та один атом розташований точно в центрі перетину просторових діагоналей куба. Загальна кількість атомів, що належать одній комірці — 2.
- **Параметри:** Координаційне число $K = 8$. Коефіцієнт компактності — 0,68 (тобто 68% об'єму зайнято атомами, 32% — міжвузлові порожнечі).
- **Представники:** Залізо (α -Fe) при кімнатній температурі, хром (Cr), вольфрам (W), ванадій (V), молібден (Mo).

2. Гранецентрована кубічна решітка (ГЦК)

- **Будова:** Атоми розташовані у вершинах куба, а також точно в центрах кожної з шести граней. Центрального атома немає. Загальна кількість атомів на комірку — 4 ($8 \text{ вершин} \times 1/8 + 6 \text{ граней} \times 1/2$).
- **Параметри:** Координаційне число $K = 12$. Коефіцієнт компактності — 0,74 (максимально можлива щільність упаковки для кубічних систем).
- **Представники:** Залізо (γ -Fe) при високих температурах, мідь (Cu), алюміній (Al), нікель (Ni), свинець (Pb), срібло (Ag). Метали з ГЦК решіткою відрізняються найвищою пластичністю.

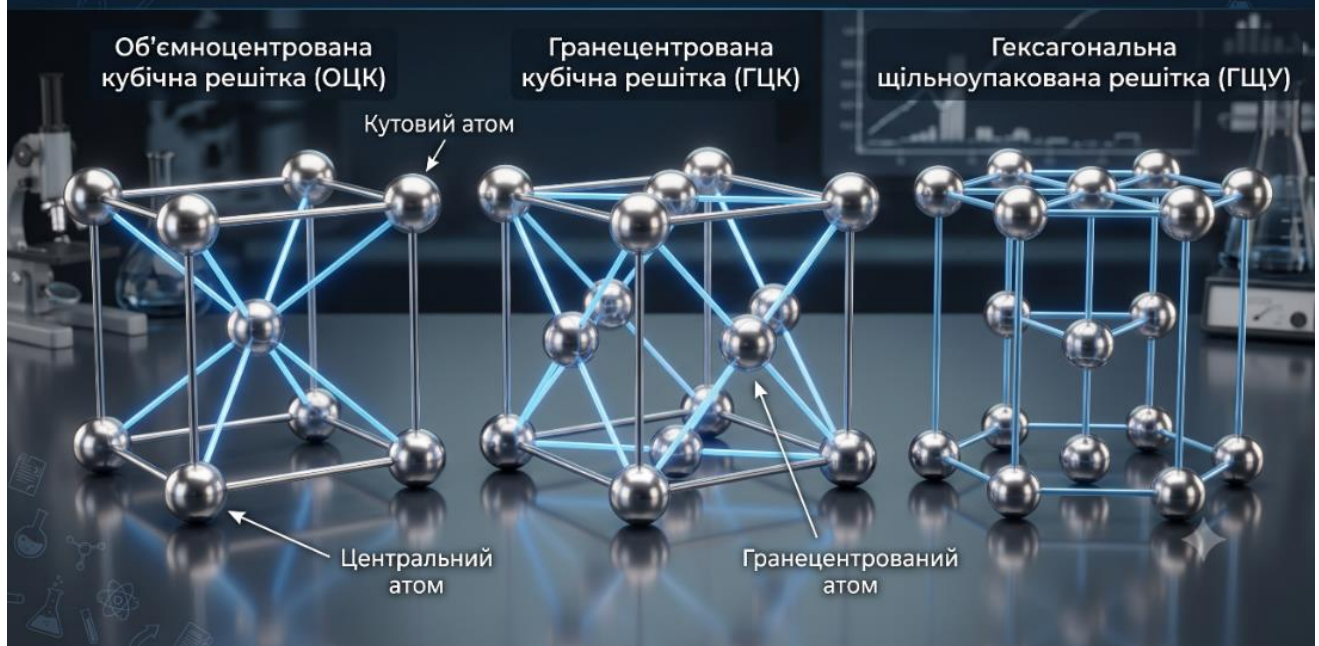
3. Щільноупакована гексагональна решітка (ЩГП)

- **Будова:** Форма шестигранної призми. Атоми розташовані у вершинах 12-гранника, у центрах двох основ (верхньої та нижньої), а також три атоми знаходяться у середній площині всередині призми.
- **Параметри:** Координаційне число $K = 12$. Коефіцієнт компактності — 0,74.
- **Представники:** Титан (Ti), цинк (Zn), магній (Mg), берилій (Be).

Поліморфізм (Алотропія) металів

Здатність деяких металів змінювати тип кристалічної решітки залежно від температури (або тиску) у твердому стані називається поліморфізмом. Найважливішим для теплоенергетики є поліморфізм заліза, оскільки він лежить в основі всієї термічної обробки сталей. При нагріванні вище 911°C залізо з ОЦК-решітки (α -Fe) перебудовується у ГЦК-решітку (γ -Fe). Це супроводжується зміною об'єму (оскільки ГЦК щільніша, об'єм деталі зменшується), що генерує внутрішні напруження — фактор, який обов'язково враховується при розрахунку температурних компенсаторів котельних труб.

ОСНОВНІ ТИПИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ КРИСТАЛІЧНИХ РЕШІТОК



3. АНІЗОТРОПІЯ ТА БУДОВА РЕАЛЬНОГО МЕТАЛУ

Монокристали та полікристали Розглядаючи одиничну елементарну комірку, можна математично довести, що відстань між атомами вздовж ребра куба відрізняється від відстані вздовж діагоналі грані чи просторової діагоналі. Оскільки сили взаємодії між атомами залежать від відстані між ними, властивості кристала (міцність, електропровідність, коефіцієнт лінійного розширення) будуть різними в різних кристалографічних напрямках. Ця залежність властивостей кристала від напрямку випробування називається **анізотропією**. Вона притаманна лише поодиноким ідеальним кристалам — монокристалом (які зараз штучно вирощують, наприклад, для надміцних лопаток газових турбін).

Проте конструкційні матеріали, що застосовуються на практиці (труби, арматура, листовий прокат), є **полікристалічними** тілами. Це означає, що вони складаються з астрономічної кількості дрібних кристаликів (зерен, або кристалітів), розміри яких варіюються від мікрометрів до міліметрів. Оскільки ці мільйони зерен орієнтовані в просторі абсолютно хаотично (їхні кристалографічні осі направлені в різні бічі), анізотропія кожного окремого зерна нівелюється і компенсується сусідніми. Тому в масштабах всієї макродеталі властивості металу виявляються однаковими в усіх напрямках. Ця властивість полікристалічних тіл називається **ізотропією** (або квазіізотропією).



4. ТЕРМОДИНАМІКА І МЕХАНІЗМ ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Кристалізація — це фазовий перехід речовини з рідкого (аморфного) агрегатного стану у твердий (кристалічний). Це фундаментальний процес металургії, адже саме під час кристалізації закладається первинна структура металу, яка визначатиме його механічні характеристики в готовому теплоенергетичному обладнанні.

Термодинамічні умови кристалізації

Згідно з другим законом термодинаміки, будь-яка система прагне до стану з мінімальним запасом вільної енергії (енергії Гіббса, G). При високих температурах вільна енергія рідкого стану менша за енергію твердого стану ($G_{\text{рідк}} < G_{\text{тв}}$), тому метал є рідким. Зі зниженням температури вільні енергії обох фаз вирівнюються при певній теоретичній температурі T_s (температура теоретичної кристалізації).

Проте для того, щоб процес кристалізації реально розпочався, необхідний термодинамічний стимул — різниця вільних енергій (ΔG). Тому розплав потрібно охолодити нижче температури T_s . Різниця між теоретичною (T_s) і фактичною (T_k) температурами кристалізації називається **ступенем переохолодження** ($\Delta T = T_s - T_k$). Що вища швидкість охолодження, то більшим є ступінь переохолодження.

Механізм кристалізації (Теорія Д.К. Чернова)

Видатний металург Д.К. Чернов довів, що кристалізація складається з двох паралельних і одночасних процесів:

1. **Зародження центрів кристалізації (нуклеація):** у переохолодженій рідині спонтанно утворюються мікроскопічні стійкі кристалічні угруповання атомів (зародки).
2. **Ріст кристалів:** до утворених центрів починають інтенсивно приєднуватися атоми з навколишньої рідини.

Кристали в металах найчастіше ростуть не у вигляді правильних багатогранників, а у вигляді розгалужених деревоподібних структур — **дендритів**. Дендрит має головну вісь першого порядку, від якої під суворими кристалографічними кутами відростають осі другого порядку, від них — третього і т.д. Зростання триває доти, доки гілки сусідніх дендритів не зіткнуться між собою. Місця їх зіткнення формують межі зерен, а самі дендрити перетворюються на металеві зерна (кристаліти).

Закон Галла-Петча (Вплив розміру зерна на міцність):

Міцність та надійність металу колосально залежить від розміру зерен. Чим вища швидкість охолодження, тим більше виникає центрів кристалізації і тим менше часу вони мають на ріст. Як наслідок, утворюється дрібнозерниста структура.

Дрібне зерно означає велику площу меж зерен. Межі зерен слугують нездоланими бар'єрами для поширення тріщин і руху дислокацій. Тому сталі з дрібним зерном мають значно вищі показники міцності, границі плинності та ударної в'язкості порівняно з великозернистими металами (що і описується рівнянням Галла-Петча).



5. ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІЧНОЇ БУДОВИ (ІДЕАЛЬНІ ТА РЕАЛЬНІ КРИСТАЛИ)

Розрахунки міцності на основі сил міжатомного зв'язку ідеальної кристалічної решітки дають феноменальні результати (теоретична міцність заліза становить понад 13 000 МПа). На практиці міцність чистого заліза не перевищує 250 МПа, тобто у 50 разів менша! Ця гігантська розбіжність між теоретичною і фактичною міцністю пояснюється наявністю в реальних металах мікроскопічних дефектів кристалічної будови.

Усі дефекти класифікують за їхньою геометрією та вимірами у просторі на чотири групи:

1. Точкові дефекти (нуль-мірні)

Розміри цих дефектів малі у всіх трьох вимірах і не перевищують 1-2 атомних діаметрів. До них належать:

- **Вакансії (дефекти Шотткі):** вільні вузли решітки, які покинули атоми. Виникають через тепловий рух атомів. При високих температурах (робота котельних екранів) концентрація вакансій стрімко зростає, що активізує процеси дифузії та призводить до небезпечного явища — повзучості металу.
- **Міжвузлові атоми (дефекти Френкеля):** атоми, які покинули свій вузол і застрягли у міжвузловому просторі, спричиняючи локальну деформацію решітки.
- **Атоми домішок:** заміщення (коли чужий атом стоїть у вузлі замість основного) або втілення (коли дрібний атом, наприклад вуглецю, втискується між атомами заліза).

2. Лінійні дефекти (одновимірні) — ДИСЛОКАЦІЇ

Це дефекти, розмір яких малий у двох напрямках, але має величезну протяжність (до десятків тисяч міжатомних відстаней) у третьому. Найважливіший тип лінійних дефектів — дислокації.

- **Крайова дислокація:** її можна уявити як зайву «напівплощину» (екстраплощину) атомів, частково введену всередину ідеального кристала. Нижня кромка цієї зайвої напівплощини і є лінією дислокації. Навколо неї кристалічна решітка сильно викривлена: над лінією атоми стиснуті, під нею — розтягнуті.
- **Гвинтова дислокація:** виникає при частковому зсуві однієї частини кристала відносно іншої, утворюючи структуру, що нагадує гвинтові сходи (атоми розташовуються не у площинах, а по спіралі).

Кількість дислокацій вимірюється **щільністю дислокацій** (ρ) — сумарною довжиною всіх ліній дислокацій у кубічному сантиметрі металу (у відпаленій сталі це $10^6 - 10^8 \text{ см}^{-2}$, у сильно деформованій — до 10^{12} см^{-2}).

3. Поверхневі (двовірні) дефекти

Дефекти, малі лише в одному вимірі (їх товщина складає 2-3 атомні шари). Це насамперед **межі зерен** (кристалітів). На межі зіткнення двох зерен з різною орієнтацією атомні шари не можуть ідеально зістикуватися. Виникає перехідна зона з хаотичним розташуванням атомів, скупченням вакансій та домішок. Хоча межі зерен є дефектними зонами, за нормальних температур вони діють як броня, що зміцнює метал, блокуючи просування дислокацій. (Проте при дуже високих температурах, навпаки, саме по межах зерен починається руйнування — міжкристалітна корозія та повзучість).

4. Об'ємні (тривірні) дефекти

Макроскопічні порушення суцільності металу: пори (газові раковини), тріщини, неметалеві макро-включення (шлак, оксиди, сульфіді). Це виключно негативні дефекти, що слугують концентраторами напружень і призводять до передчасного руйнування труб та колекторів.



6. ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ ТА ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛУ (НАКЛЕП)

Теоретична кристалічна решітка мала б деформуватися шляхом жорсткого і одночасного зсуву мільярдів атомних площин одна відносно одної. Для цього знадобилися б космічні зусилля. Але завдяки тому, що у металі є дислокації, пластична деформація відбувається за естафетним принципом — шляхом ковзання дислокацій (переміщення екстраплощини крок за кроком на одну міжатомну відстань, подібно до того, як складка переміщується по килиму). Цей механізм вимагає напружень у тисячі разів менших за теоретичні. Отже, **метал пластичний і здатний куватися чи прокатуватися виключно завдяки наявності дислокацій.**

Феномен наклепу (механічного зміцнення) Коли деталь (наприклад, трубу при холодному згинанні для теплотраси) піддають пластичній деформації, під дією навантажень активуються джерела дислокацій (джерела Франка-Ріда). Метал генерує лавиноподібну кількість нових дислокацій. По мірі зростання їхньої щільності, дислокації починають перетинатися, зчіплюватися між собою, утворюючи дислокаційні клубки та скупчуючись біля меж зерен. Їхній подальший рух стає майже неможливим. З точки зору макроскопічних властивостей це проявляється так: метал різко підвищує свою міцність, твердість та границю плинності, але водночас катастрофічно втрачає пластичність і стає крихким. Це явище називається **наклепом**. Щоб зняти наклеп і повернути деталі початкову пластичність перед

подальшою обробкою чи експлуатацією, теплоенергетики використовують термічну обробку — рекристалізаційний відпал.



КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЇ №2 Тема: Типи кристалічних ґраток. Анізотропія та поліморфізм металів.

ВСТУП: Кристалографія як фундамент експлуатаційної надійності

В умовах сучасних теплових та атомних електростанцій металеві конструкції (пароперегрівники, колектори, магістральні трубопроводи, лопатки турбін) працюють у критичних режимах: за надвисоких температур, величезних внутрішніх тисків та агресивного корозійного впливу. Здатність металу протистояти цим факторам — не деформуватися від повзучості, не тріскатися на морозі та витримувати термічну втому — визначається не стільки його хімічним складом, скільки просторовим розташуванням атомів у твердому стані.

Друга лекція курсу присвячена детальному вивченню архітектури металів: геометрії кристалічних ґраток, залежності властивостей від напрямку (анізотропії) та здатності металів кардинально змінювати свою структуру при нагріванні чи охолодженні (поліморфізму).

1. ГЕОМЕТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ КРИСТАЛІЧНОЇ ҐРАТКИ

Щоб академічно описати просторову структуру будь-якого кристала, в матеріалознавстві використовують концепцію **елементарної кристалічної комірки** (або ґратки). Це найменший, мінімально можливий об'єм кристала, що зберігає всі його геометричні особливості та симетрію. Транслюючи (переміщуючи) цю комірку в трьох вимірах, можна відтворити макроскопічний кристал будь-якого розміру.

Французький фізик Огюст Браве математично довів, що у природі існує лише 14 типів трансляційних ґраток (ґраток Браве), які поділяються на 7 сингоній (кристалографічних систем). Однак абсолютна більшість промислових металів кристалізується лише у трьох найбільш симетричних і щільноупакованих формах.

Для вичерпної характеристики елементарної комірки використовують наступні фізико-геометричні параметри:

1. **Період (параметр) ґратки (a, b, c)** — відстань між центрами найближчих атомів уздовж кристалографічних осей. Вимірюється в нанометрах (нм) або ангстремах (Å). Для металів ця відстань становить від 0,2 до 0,6 нм.
2. **Координаційне число (K)** — кількість атомів, які знаходяться на найближчій, суворо однаковій відстані від будь-якого обраного базового атома в решітці. Чим вище координаційне число, тим щільніше упаковані атоми.
3. **Базис ґратки (n)** — кількість атомів, що реально належать одній елементарній комірці.
4. **Коефіцієнт компактності (щільності упаковки, η)** — відносний показник, що визначає, яку частку загального об'єму елементарної комірки займають самі атоми (вважаючи їх жорсткими нестисливими кулями). Залишок об'єму — це міжвузлові порожнечі, в які можуть дифундувати або втілюватися атоми домішок (наприклад, водень або вуглець).

2. ОСНОВНІ ТИПИ КРИСТАЛІЧНИХ ГРАТОК МЕТАЛІВ

Більшість конструкційних металів, що застосовуються в теплоенергетиці, мають один із трьох базових типів кристалічних ґраток:

2.1. Об'ємно-центрована кубічна ґратка (ОЦК / ВСС)

- **Геометрія:** Атоми розташовані у восьми вершинах куба, а ще один атом знаходиться на перетині просторових діагоналей — у самому центрі об'єму куба.
- **Базис (n):** Комірці належать 2 атоми (8 вершинних атомів належать одночасно 8 сусіднім коміркам, тому $8 \times 1/8 = 1$ атом; плюс 1 центральний атом, який повністю належить цій комірці; $1+1=2$).
- **Координаційне число (K):** 8.
- **Коефіцієнт компактності (η):** 0,68 (тобто 68% об'єму зайнято металом, а 32% — це мікропорожнечі). Це відносно «пухка» структура.
- **Типові представники:** α -залізо (при кімнатній температурі), хром, вольфрам, молібден, ванадій.
- **Експлуатаційні властивості:** Метали з ОЦК-ґраткою характеризуються високою міцністю, але мають серйозний недолік для енергетиків — схильність до **холодноламкості**. При зниженні температури нижче певного порогу вони різко втрачають пластичність і стають крихкими. Це критично важливо враховувати при проєктуванні зовнішніх ділянок трубопроводів, що працюють в умовах зимових морозів.

2.2. Гранецентрована кубічна ґратка (ГЦК / FCC)

- **Геометрія:** Атоми розташовані у восьми вершинах куба і по одному атому — точно в центрі кожної з шести граней. Центрального об'ємного атома немає.
- **Базис (n):** Комірці належать 4 атоми ($8 \times 1/8$ у вершинах + $6 \times 1/2$ на гранях = 4).
- **Координаційне число (K):** 12.
- **Коефіцієнт компактності (η):** 0,74 (максимально можлива щільність упаковки для кулеподібних атомів).
- **Типові представники:** γ -залізо (аустеніт), мідь, алюміній, нікель, свинець, срібло.
- **Експлуатаційні властивості:** Метали з ГЦК-ґраткою мають велику кількість площин легкого ковзання дислокацій. Як наслідок, вони **надзвичайно пластичні**, легко куються і штамнуються в холодному стані. Головна перевага — у них **відсутній поріг холодноламкості**. Саме тому для криогенної техніки або складних умов експлуатації застосовують аустенітні нержавіючі сталі (з ГЦК-структурою) або мідні та алюмінієві сплави.

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