



ПІДПИСАНО

заступник директора з навчально-методичної роботи  
ЗПТ «Дніпровський професійний технологічний  
коледж»

Сергій ГОРДІЄНКО

«28» серпня 2026 р.

## МЕТОДИЧНІ РОЗРОБКИ ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНОГО

Дисципліна: «Матеріалознавство» (СХ16) Спеціальність: 144 «Теплоенергетика»  
Освітньо-професійний ступінь: Фаховий молодший бакалавр

**ТЕМА 1 : Аналіз моделей кристалічних ґраток. Візуалізація структурних дефектів.**

**МЕТА ЗАНЯТТЯ:** Фундаментальне засвоєння знань про атомно-кристалічну будову металів, просторове моделювання типів кристалічних ґраток, явищ анізотропії та поліморфізму. Набуття практичних навичок аналізу та візуалізації дефектів кристалічної будови (точкових, лінійних, поверхневих) та оцінки їхнього впливу на механічні й експлуатаційні властивості теплоенергетичного обладнання.

**Особлива умова (Trauma-Informed Approach):** Оскільки вивчення дефектів кристалічної решітки передбачає аналіз причин аварійного руйнування металу під дією високих температур (наприклад, втоми або повзучості), розгляд реальних кейсів розриву котельних труб здійснюється виключно в академічному та інженерно-технічному руслі. Здобувачі мають право виконувати завдання асинхронно та письмово через систему LMS, якщо колективне обговорення інженерних катастроф викликає дискомфорт.

### 1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

#### 1.1. Атомно-кристалічна будова металів

Усі метали в твердому стані є кристалічними тілами, тобто їхні атоми (позитивно заряджені іони) розташовані у просторі в строго визначеному геометричному порядку, утворюючи просторову кристалічну ґратку. Зв'язок між іонами здійснюється за допомогою вільного електронного газу (металевий зв'язок), що зумовлює високу теплопровідність, електропровідність та пластичність металів — критично важливі параметри для теплоенергетики.

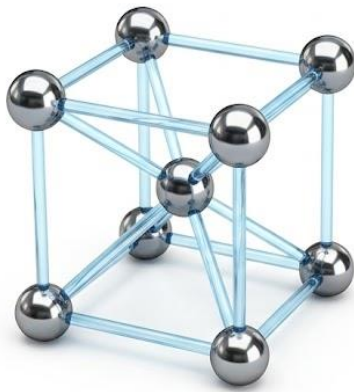
Найменший об'єм кристала, який дає повне уявлення про його просторову симетрію, називається **елементарною коміркою**. Кристалічні ґратки характеризуються такими параметрами: **Період ґратки ( $a, b, c$ )** — відстань між центрами найближчих атомів. Вимірюється в ангстремах ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ) або нанометрах.

**Координаційне число ( $K$ )** — кількість найближчих атомів, що знаходяться на однаковій відстані від будь-якого обраного атома.

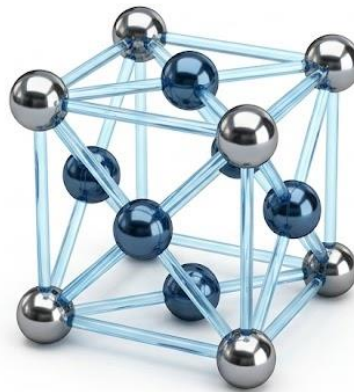
**Базис (кількість атомів на комірку,  $n$ )** — кількість атомів, що належать одній елементарній комірці.

**Коефіцієнт компактності (Щільність упаковки,  $Q$ )** — відношення об'єму, зайнятого атомами, до загального об'єму комірки.

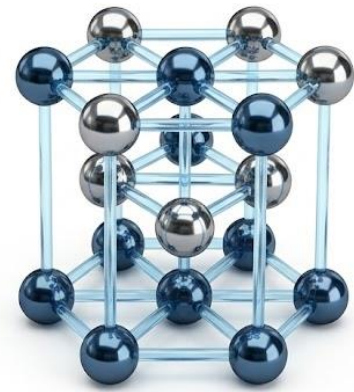
#### 1.2. Основні типи кристалічних ґраток металів



ОБ'ЄМНОЦЕНТРОВАНА  
КУБІЧНА (ОЦК)



ГРАНЕЦЕНТРОВАНА  
КУБІЧНА (ГЦК)



ГЕКСАГОНАЛЬНА  
ЩІЛЬНОУПАКОВАНА (ГЩУ)

I

Більшість металів, що застосовуються в теплоенергетиці (сталі, чавуни, мідні та алюмінієві сплави), кристалізуються у трьох основних типах ґраток: **Об'ємно-центрована кубічна (ОЦК, BCC - Body-Centered Cubic)**: Атоми розташовані у вершинах куба і один атом — у центрі його об'єму.

*Приклади:* **Fe $\alpha$**  (ферит, до 911 °C), Cr, W, Mo, V.

*Характеристики:*  **$K = 8$ ,  $n = 2$ ,  $Q = 0.68$**  (68%).

**Гранецентрована кубічна (ГЦК, FCC - Face-Centered Cubic)**: Атоми знаходяться у вершинах куба та в центрі кожної з шести його граней.

*Приклади:* **Fe $\gamma$**  (аустеніт, 911-1392 °C), Al, Cu, Ni.

*Характеристики:*  **$K = 12$ ,  $n = 4$ ,  $Q = 0.74$**  (74%). Метали з такою ґраткою мають найвищу пластичність.

**Гексагональна щільноупакована (ГЩУ, HCP - Hexagonal Close-Packed)**: Атоми розташовані у вершинах і центрах основ правильної шестигранної призми, а також три атоми всередині її об'єму.

*Приклади:* Ti, Mg, Zn.

*Характеристики:*  **$K = 12$ ,  $n = 6$ ,  $Q = 0.74$** .

### 1.3. Поліморфізм (Алотропія)

Здатність металу змінювати тип кристалічної ґратки залежно від температури (або тиску) називається **поліморфізмом**, а різні кристалічні форми — поліморфними модифікаціями. У матеріалознавстві поліморфізм заліза має вирішальне значення для проведення термічної обробки сталей. Залізо має модифікації **Fe $\alpha$**  (ОЦК ґратка) та **Fe $\gamma$**  (ГЦК ґратка). Фазові перетворення супроводжуються зміною об'єму (оскільки змінюється коефіцієнт компактності), що може викликати внутрішні напруження в деталях котлів при різких перепадах температур.

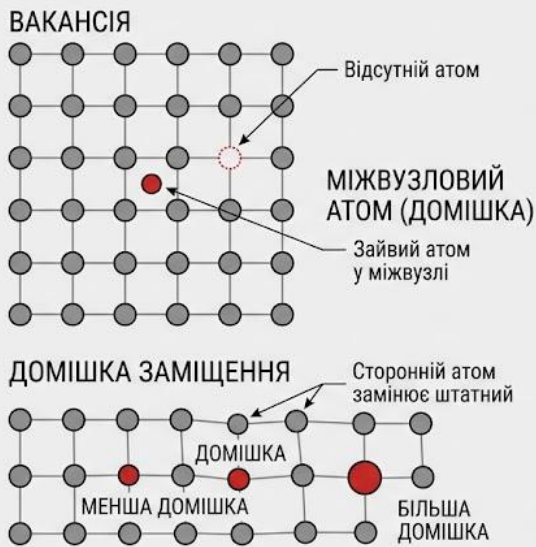
### 1.4. Дефекти кристалічної будови

Реальні метали ніколи не мають ідеальної кристалічної решітки. Наявність дефектів радикально змінює макроскопічні механічні властивості (міцність, твердість, пластичність). Класифікація дефектів здійснюється за їх геометричними розмірами:

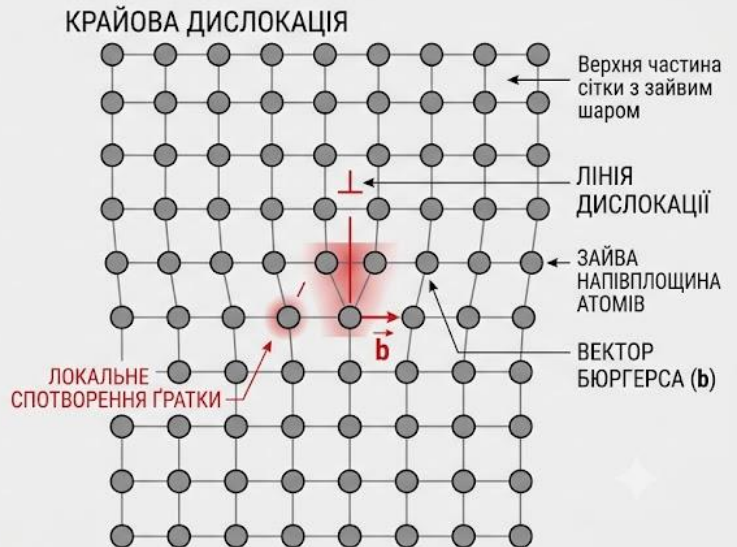
**[PROMPT ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ СХЕМИ 1: Класифікація дефектів]**

# КЛАСИФІКАЦІЯ ДЕФЕКТІВ КРИСТАЛІЧНОЇ ҐРАТКИ

## ТОЧКОВІ ДЕФЕКТИ



## ЛІНІЙНІ ДЕФЕКТИ



**Точкові дефекти:** Їхні розміри у всіх трьох вимірах не перевищують розміру атома.

- *Вакансії (дефекти Шотткі):* відсутність атома у вузлі ґратки. Утворюються внаслідок теплових коливань.

- *Дислоковані атоми (дефекти Френкеля):* атоми, що вийшли з вузла і розмістилися в міжвузлі.

- *Домішкові атоми:* атоми впровадження (наприклад, вуглець у залізі) та атоми заміщення (хром у залізі).

**Лінійні дефекти (Дислокації):** Їхня довжина набагато більша за поперечні розміри. Вони є найважливішими дефектами, оскільки саме дислокації визначають механізм пластичної деформації металу.

- *Крайова дислокація:* являє собою край "зайвої" напівплощини атомів (екстраплощини), введеної в кристал.

- *Гвинтова дислокація:* утворюється внаслідок зсуву однієї частини кристала відносно іншої.

*Примітка для інженерів-теплоенергетиків:* Скупчення дислокацій біля перешкод (наприклад, границь зерен) під дією високих температур і навантажень у паропроводах призводить до мікротріщин і є основною причиною **втоми та повзучості металу**.

**Поверхневі дефекти:** Мають малу товщину (кілька атомних шарів), але значну площу. Це границі зерен (кристалітів) та фрагментів. Чим дрібніше зерно, тим більша загальна площа границь, що перешкоджає руху дислокацій, тим самим підвищуючи міцність металу.

## 2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА (ІНЖЕНЕРНІ КЕЙСИ ТА РОЗРАХУНКИ)

### ЗАВДАННЯ 1. Візуалізація та розрахунок щільності упаковки ОЦК та ГЦК ґраток.

*Умова:* Для заданих типів ґраток розрахувати коефіцієнт компактності  $Q$ . Прийняти, що атоми є жорсткими кулями радіусом  $R$ , які торкаються одна одної за напрямками найщільнішої упаковки.

*Алгоритм виконання:*

Для ОЦК ґратки атоми торкаються по просторовій діагоналі куба. Довжина діагоналі дорівнює  $4R$ , звідси період ґратки  $a = 4R / \sqrt{3}$ .

Об'єм комірки  $V = a^3$ . Об'єм атомів у комірці:  $V_a = n \cdot (4/3)\pi R^3$ , де  $n = 2$ .

Розрахувати  $Q = V_a / V$ .

Аналогічно розрахувати  $Q$  для ГЦК (діагональ грані дорівнює  $4R$ ,  $a = 4R / \sqrt{2}$ ,  $n = 4$ ).

*Звітність:* Представити детальний математичний висновок та зробити висновок, як зміна  $Q$  при переході  $Fe\alpha \rightarrow Fe\gamma$  впливає на зміну лінійних розмірів сталевих деталей під час їх термічної обробки.

### ЗАВДАННЯ 2. Розрахунок теоретичної густини металу за параметрами кристалічної ґратки.

**Умова:** Визначити теоретичну густину міді (Cu), що застосовується в трубних пучках теплообмінників. Відомо, що мідь має ГЦК ґратку, період ґратки  $a = 0.361$  нм, атомна маса  $A = 63.54$  г/моль.

**Розрахункова формула:**

$$\rho = (n \times A) / (V_c \times N_A)$$

де  $n$  — кількість атомів у комірці;  $V_c$  — об'єм комірки ( $a^3$ , перевести в см<sup>3</sup>);  $N_A$  — число Авогадро ( $6.022 \times 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>).

**Звітність:** Порівняти отриманий результат із довідковою густиною міді (8.96 г/см<sup>3</sup>) та пояснити причини можливих відхилень (наявність макро- та мікродофектів у реальному литому металі).

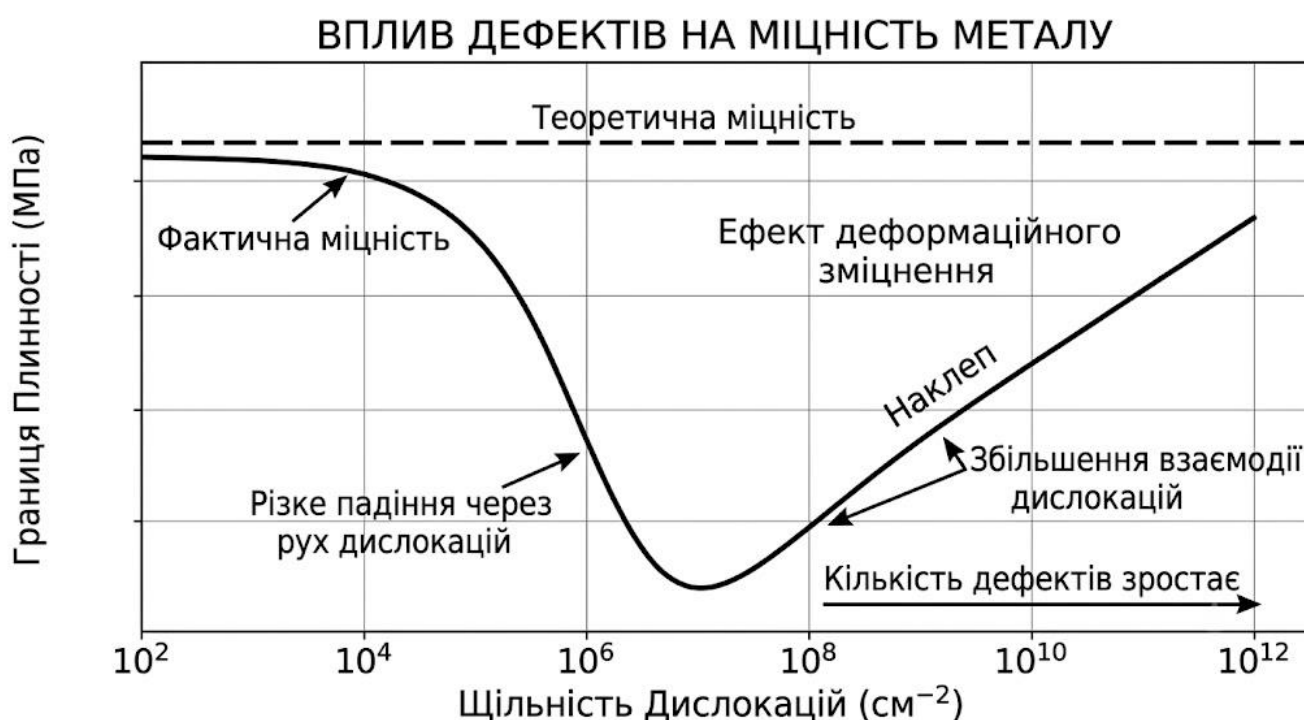
### ЗАВДАННЯ 3. Аналіз дофектів та їх вплив на повзучість (Проблемно-орієнтований кейс).

**Опис ситуації:** Паропровід високого тиску з легованої сталі тривалий час експлуатувався за температури 540 °С. Під час ультразвукової дофектоскопії виявлено мікротріщини на границях зерен, хоча номінальні навантаження не були перевищені.

**Аналітичне завдання:** Користуючись створеною раніше теоретичною базою, письмово поясніть роль точкових дофектів (вакансій) та лінійних дофектів (дислокацій) у механізмі повзучості (крипу).

Відповідь оформити у вигляді тез (до 150 слів).

**Опорні слова:** дифузія вакансій, переповзання дислокацій, скупчення на границях зерен, міжкристалітна тріщина.



### 3. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ТА ЗАХИСТУ

1. Що таке кристалічна ґратка та елементарна комірка?
2. Чим відрізняється ОЦК ґратка від ГЦК за кількістю атомів та щільністю упаковки?
3. Яке явище називається поліморфізмом? Наведіть приклад поліморфізму заліза та вкажіть температурний інтервал існування модифікацій.
4. Які дофекти належать до точкових, а які до лінійних? У чому фізичний зміст дофектів Френкеля та Шотткі?
5. Як дислокації впливають на міцність та пластичність металу? Опишіть механізм наклепу (деформаційного зміцнення).

### 4. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РОБОТИ

|      |                                   |
|------|-----------------------------------|
| Бали | Дескриптор досягнення результатів |
|------|-----------------------------------|

|                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>3 бали</b><br>(Відмінно)      | Здобувач демонструє глибокі знання будови кристалічної ґратки. Безпомилково розраховує коефіцієнт компактності та густину (Завдання 1, 2). Технічно грамотно обґрунтовує механізм повзучості на основі руху дислокацій. Професійно оперує інженерною термінологією. |
| <b>2 бали</b><br>(Добре)         | Завдання виконано в повному обсязі, проте наявні незначні неточності в алгоритмах математичного розрахунку або одиничні неточності під час аналізу впливу дефектів на повзучість.                                                                                   |
| <b>1 бали</b><br>(Задовільно)    | Здобувач володіє базовим матеріалом, але розрахункові завдання виконує з помилками, потребує постійних підказок. Пояснення ролі дефектів поверхневе.                                                                                                                |
| <b>0 балів</b><br>(Незадовільно) | Повна відсутність знань. Завдання не виконані. Відмова від асинхронної письмової здачі без поважних причин.                                                                                                                                                         |

**ТЕМА 2:** Аналітичні та інструментальні методи випробувань металів на твердість (за Брінеллем, Роквеллом, Віккерсом).

**МЕТА ЗАНЯТТЯ:** Фундаментальне засвоєння фізичної сутності твердості як найважливішої механічної характеристики конструкційних та інструментальних матеріалів. Вивчення теоретичних засад, методики проведення та обмежень стандартизованих методів вимірювання твердості.

Набуття компетенцій щодо обґрунтованого вибору методу контролю залежно від структурного стану, габаритів та термічної обробки деталі. Формування навичок перерахунку значень твердості між різними шкалами та прогнозування границі міцності на основі показників твердості.

## 1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

### 1.1. Фізична сутність твердості

Твердість — це здатність матеріалу чинити опір пластичній деформації або крихкому руйнуванню в поверхневому шарі під час місцевого контактного впливу при втисненні в нього іншого, більш твердого тіла (індентора), яке не отримує залишкових деформацій. На відміну від випробувань на розтягнення, випробування на твердість є неруйнівним методом контролю (або умовно неруйнівним), що дозволяє оцінювати механічні властивості готових деталей безпосередньо в цехових чи лабораторних умовах.

Залежно від швидкості прикладання навантаження розрізняють статичні, динамічні та кінетичні методи. У сучасному промисловому матеріалознавстві домінуючими є статичні методи втиснення індентора: метод Брінелля (ISO 6506), метод Роквелла (ISO 6508) та метод Віккерса (ISO 6507).

### 1.2. Метод Брінелля (Brinell Hardness Test)

Метод полягає у втисненні в плоску поверхню досліджуваного зразка сталевий загартований кульки (або кульки з твердого сплаву карбиду вольфраму) діаметром  $D$  під дією заданого зусилля  $P$  протягом певного часу.

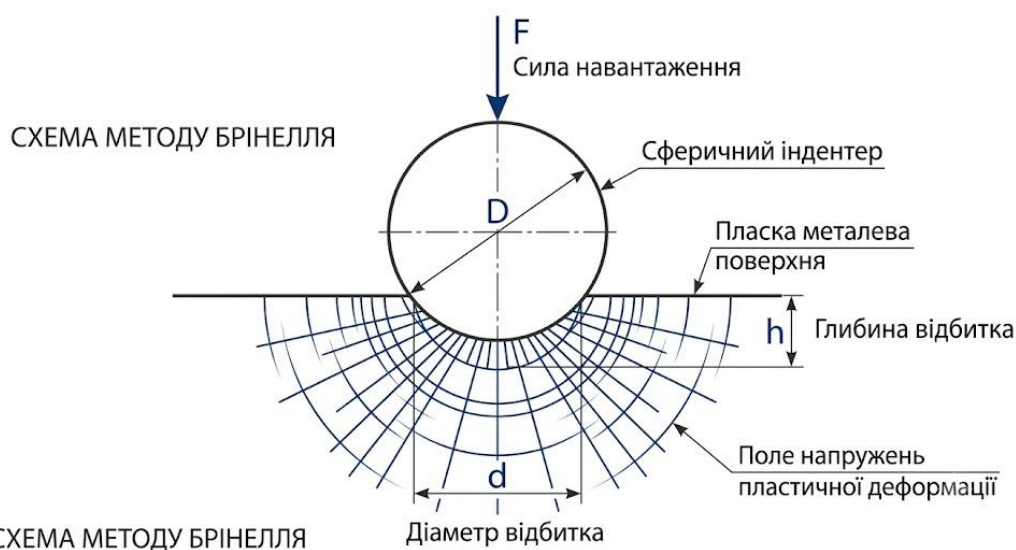
Після зняття навантаження на поверхні залишається відбиток у вигляді кульового сегмента з діаметром  $d$ .

Число твердості за Брінеллем ( $HB$ ) визначається як відношення прикладеного навантаження до площі сферичної поверхні відбитка:

$$HB = P / F = 2P / [\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})]$$

де:

- $P$  — зусилля втиснення, кгс (або Н, тоді формула адаптується через коефіцієнт 0,102);
- $D$  — діаметр індентора (стандартні значення 10; 5; 2,5 мм);
- $d$  — діаметр відбитка, мм (вимірюється за допомогою відлікового мікроскопа з точністю до 0,05 мм).



**Обмеження методу Брінелля:** Не застосовується для матеріалів з твердістю вище 450 HB (при використанні сталевий кульки), оскільки індентор сам зазнає пластичної деформації, що

спотворює результати. Товщина зразка повинна бути не менше 10-кратної глибини відбитка. Метод ідеально підходить для неоднорідних сплавів (чавуни, кольорові метали), оскільки велика площа відбитка усереднює властивості мікроструктури.

### 1.3. Метод Роквелла (Rockwell Hardness Test)

На відміну від методу Брінелля, твердість за Роквеллом визначається не за площею відбитка, а за глибиною проникнення індентора. Це робить процес вимірювання значно швидшим, оскільки значення твердості зчитується безпосередньо зі шкали приладу (індикатора годинникового типу або цифрового дисплея).

Як індентор використовують алмазний конус з кутом при вершині  $120^\circ$  (шкали A і C) або сталеву загартовану кульку діаметром  $1/16$  дюйма (1,588 мм) (шкала B).

Випробування проходить у два етапи для усунення впливу шорсткості поверхні:

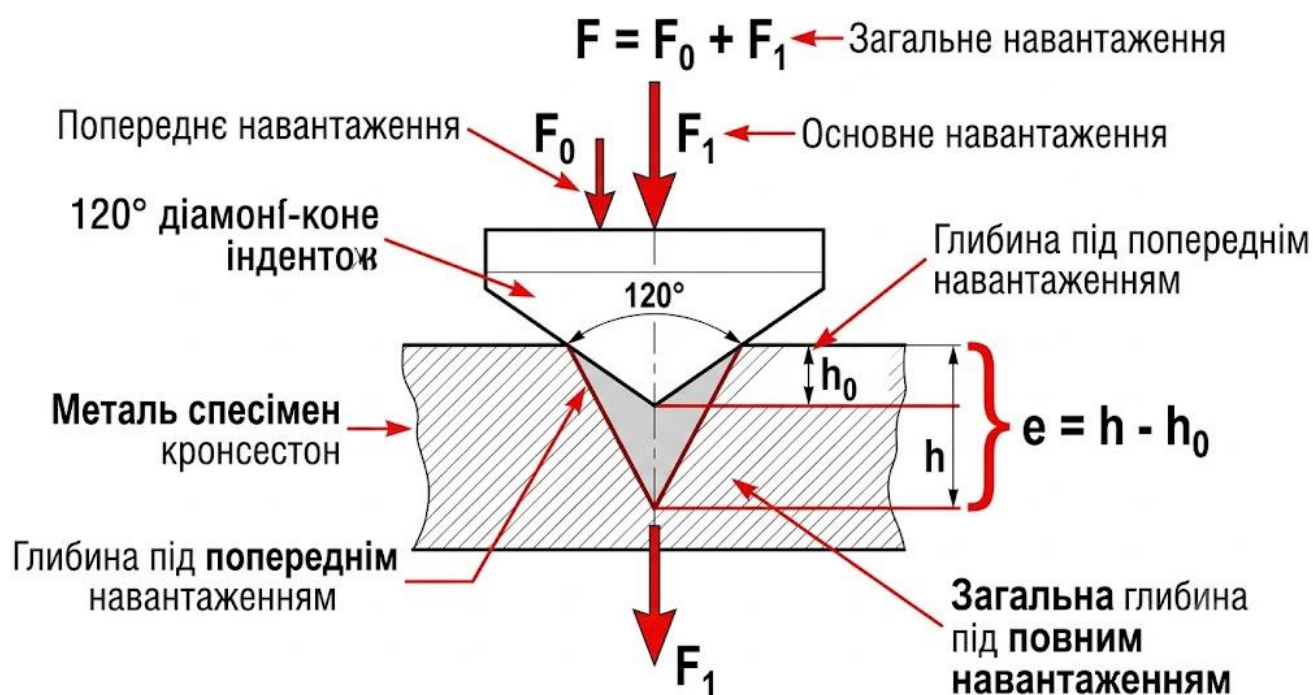
Прикладання попереднього навантаження  $P_0 = 10$  кгс (фіксується нульова точка глибини).

Прикладання основного навантаження  $P_1$  (загальне навантаження  $P = P_0 + P_1$ ).

Формули розрахунку (закладені в кінематику приладу):

$$HRC\ (HRA) = 100 - (h - h_0) / 0,002 \quad HRB = 130 - (h - h_0) / 0,002$$

де  $(h - h_0)$  — залишкова глибина проникнення індентора після зняття основного навантаження; 0,002 мм — ціна поділки шкали індикатора.



### 1.4. Метод Віккерса (Vickers Hardness Test)

Універсальний мікро- та макрометод, що застосовується для визначення твердості деталей малої товщини, тонких поверхневих шарів (після цементації, азотування), а також надтвердих матеріалів.

Індентором є правильна чотиригранна алмазна піраміда з кутом між протилежними гранями  $\alpha = 136^\circ$ .

Цей кут обраний математично не випадково: він забезпечує геометричну подібність відбитків Віккерса до ідеальних відбитків Брінелля (де  $d = 0,375D$ ).

Число твердості  $HV$  визначається як відношення навантаження  $P$  (від 1 до 120 кгс) до площі бічної поверхні пірамідального відбитка:

$$HV = 2P \times \sin(\alpha/2) / d^2 \approx 1,854 \times (P / d^2)$$

де  $d$  — середнє арифметичне довжин обох діагоналей відбитка ( $d_1$  та  $d_2$ ), які вимірюються за допомогою вбудованого мікроскопа високої роздільної здатності.



## 2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА (ІНЖЕНЕРНІ КЕЙСИ ТА АНАЛІТИЧНІ ЗАДАЧІ)

### ЗАВДАННЯ 1. Аналітичний розрахунок твердості за Брінеллем та прогнозування міцності.

**Умова:** На заводі важкого машинобудування проводиться контроль якості виливка з конструкційної сталі 45 (у стані нормалізації). Випробування проведено за методом Брінелля.

Діаметр твердосплавної кульки  $D = 10$  мм. Навантаження  $P = 3000$  кгс. Час витримки — 10 с. Відліковий мікроскоп показав діаметр відбитка  $d = 4,2$  мм.

#### Алгоритм виконання:

Використовуючи формулу  $HB = 2P / [\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})]$ , розрахувати точне значення твердості.

Знаючи емпіричну залежність між твердістю за Брінеллем та границею міцності при розтягненні (тимчасовим опором) для вуглецевих сталей:  $\sigma_B \approx 0,34 \times HB$  (МПа), обчислити орієнтовну границю міцності даного матеріалу.

**Звітність:** Представити покроковий розрахунок. Пояснити, чому для даного матеріалу обрано навантаження саме 3000 кгс, а не 250 кгс (посилання на коефіцієнт  $K = P/D^2 = 30$  для сталей).

### ЗАВДАННЯ 2. Експертний вибір методу контролю твердості.

**Умова:** Дано три різні деталі, що працюють у теплоенергетичному обладнанні та суміжних вузлах. Необхідно для кожної деталі призначити оптимальний метод вимірювання твердості (Брінелль, Роквелл або Віккерс) і письмово обґрунтувати свій вибір.

**Деталь А:** Блок циліндрів із сірого чавуну (великогабаритний виливок з неоднорідними включеннями графіту).

**Деталь Б:** Робоча лопатка турбіни після іонно-плазмового азотування поверхні (товщина зміцненого шару 0,15 мм).

**Деталь В:** Загартоване зубчасте колесо редуктора приводу димососа (очікувана твердість понад 55 HRC).

**Аналітичне завдання:** Заповнити таблицю обґрунтувань у звіті. Вказати можливі фатальні наслідки помилкового вибору методу (наприклад, пробивання тонкого шару азотування індексом Брінелля).

### ЗАВДАННЯ 3. Вирішення проблемно-орієнтованого кейсу: Масштабний ефект та перерахунок шкал.

**Опис ситуації:** На тепловій електростанції під час ремонту паропроводу необхідно перевірити твердість зварного шва. Через складну геометрію та неможливість підрізування зразка портативним твердоміром було отримано значення 250 HV (за Віккерсом). У

технічній документації на труби маркування допустимої міцності та твердості вказано в одиницях Брінелля (HB).

#### Алгоритм виконання:

Користуючись таблицями переведу або наближеним правилом для середніх значень ( $HB \approx HV$  у діапазоні до 300 одиниць, оскільки кут індентора Віккерса узгоджений зі сферою Брінелля), конвертувати значення.

Розрахувати площу відбитка для Віккерса, якщо навантаження під час тесту становило 10 кгс ( $P = 10$ ). Формула:  $F = P / HV$ . Знайти середню діагональ відбитка  $d$ .

**Звітність:** Представити розрахунок діагоналі мікроскопічного відбитка. Зробити висновок щодо доцільності застосування методу Віккерса для зварних швів (зокрема, для побудови епюри розподілу твердості в зоні термічного впливу).

### 3. КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ ТА ЗАХИСТУ

1. Дайте класичне матеріалознавче визначення поняття «твердість». Чому твердість не є самостійною фізичною константою матеріалу?
2. Поясніть фізичний зміст чисел твердості за Брінеллем та Віккерсом (яку саме розмірність вони мають приховано в собі, незважаючи на безрозмірне позначення в стандартах).
3. У чому полягає принципова відмінність методу Роквелла від методів Брінелля та Віккерса за алгоритмом отримання результату? Для чого в Роквеллі використовується попереднє навантаження?
4. Чому метод Брінелля не можна застосовувати для вимірювання твердості загартованих інструментальних сталей та твердих сплавів? Які процеси відбудуться в системі «індентор-зразок»?
5. Який з методів і чому є найбільш чутливим до мікрогеометрії (шорсткості) поверхні досліджуваного зразка?
6. Запишіть та поясніть математичну кореляцію між твердістю (HB) та границею міцності ( $\sigma_B$ ) для пластичних матеріалів. Які фізичні механізми деформації зумовлюють цю кореляцію?

### 4. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ РОБОТИ

Б

|                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>3 бали</b><br>(Відмінно)      | Здобувач демонструє вичерпні знання щодо фізики процесів індентування.<br>Безпомилково виконує аналітичні розрахунки в Завданнях 1 та 3. Аргументовано, з використанням професійної лексики, обґрунтовує вибір методів для різних структурних станів (Завдання 2). Дає розгорнуті відповіді на всі контрольні питання. |
| <b>2 бали</b><br>(Добре)         | Завдання виконано в повному обсязі. Здобувач розуміє межі застосування кожного методу, проте припускається незначних арифметичних помилок у перерахунках або недостатньо глибоко пояснює вплив структури металу на вибір індентора.                                                                                    |
| <b>1 бали</b><br>(Задовільно)    | Здобувач володіє базовими визначеннями, але плутає шкали Роквелла (А, В, С). Розрахункові задачі виконані частково або містять критичні помилки. Вибір методів у Завданні 2 здійснено без належного технічного обґрунтування.                                                                                          |
| <b>0 балів</b><br>(Незадовільно) | Здобувач не орієнтується в методах вимірювання твердості. Задачі не вирішені. Практична робота не подана на перевірку у встановлений термін.                                                                                                                                                                           |

### **ТЕМА 3: Мікроструктурний аналіз залізо-вуглецевих сплавів (робота з мікрошліфами).**

**МЕТА ЗАНЯТТЯ:** Фундаментальне засвоєння методології металографічного аналізу.

Вивчення технології виготовлення мікрошліфів та принципів роботи з оптичним металографічним мікроскопом. Ідентифікація фаз та структурних складових залізо-вуглецевих сплавів (сталей та чавунів) у рівноважному стані. Набуття компетенцій щодо встановлення кореляції між хімічним складом, мікроструктурою та макроскопічними механічними властивостями сплавів на основі діаграми стану Fe-Fe<sub>3</sub>C.

## **1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ**

### **1.1. Основи металографічного аналізу**

Мікроструктурний (металографічний) аналіз — це метод дослідження будови металів і сплавів за допомогою оптичних (світлових) або електронних мікроскопів. На відміну від макроаналізу, який вивчає будову неозброєним оком або при малих збільшеннях (до 30 крат), мікроаналіз дозволяє вивчати форму, розмір, взаємне розташування та кількісне співвідношення фаз (зерен) при збільшеннях від 50 до 2000 крат (оптична мікроскопія) і до кількох мільйонів крат (електронна мікроскопія).

Мікроструктура формується в процесі кристалізації, пластичної деформації та термічної обробки, і є першопричиною формування експлуатаційних властивостей деталей машин і механізмів.

### **1.2. Технологія приготування мікрошліфів**

Для проведення мікроаналізу необхідно підготувати спеціальний зразок — **мікрошліф**.

Процес виготовлення складається з наступних строго регламентованих етапів: **Вирізання зразка:** Здійснюється абразивними кругами з інтенсивним охолодженням емульсією, щоб уникнути структурних змін через локальне нагрівання (припали).

**Торцювання та шліфування:** Обробка поверхні на наждачних паперах із поступовим зменшенням розміру абразивного зерна (від грубого P120 до надтонкого P2000). При зміні паперу напрямок шліфування змінюють на 90° для контролю видалення попередніх рисок.

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