

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання індивідуального завдання (розрахункового завдання)**  
з навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів»  
для студентів денної та заочної форм навчання  
за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»

Затверджено  
редакційно-видавничою  
радою університету,  
протокол № 3 від 24.10.2024 р.

Харків  
НТУ «ХП»  
2024

**Методичні вказівки** до виконання індивідуального завдання (розрахункового завдання) з навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів» для студентів денної та заочної форм навчання за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» / уклад.: В. В. Білозеров, О. О. Волков, Т. І. Дробенюк, Г. О. Князева, С. А. Князєв, Т. О. Протасенко, В. В. Субботіна, О. В. Субботін, О. С. Терлецький, Г. А. Федоренко. – Харків : НТУ «ХП», 2024. – 27 с.

Укладачі: В. В. Білозеров

О. О. Волков

Т. І. Дробенюк

Г. О. Князева

С. А. Князєв

Т. О. Протасенко

В. В. Субботіна

О. В. Субботін

О. С. Терлецький

Г. А. Федоренко

Рецензент: В. В. Дмитрик

Кафедра «Матеріалознавство»

## ВСТУП

Навчальна дисципліна «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів» належить до циклу навчальних дисциплін професійної підготовки за освітньо-професійною програмою «Прикладне матеріалознавство, новітні технології та комп'ютерний дизайн матеріалів» другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

В системі підготовки фахівців у вищих навчальних закладах актуальним є індивідуально-орієнтований підхід в організації навчання студентів, що визначено нормативно-правовими актами Міністерства освіти і науки. За цих умов індивідуальне завдання (розрахункове завдання), як одна із форм індивідуального завдання, є складовою програми підготовки з навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів». Метою виконання індивідуального завдання (розрахункового завдання) є підготовка студентами аналітичних та узагальнюючих матеріалів. При підготовці індивідуального завдання (розрахункового завдання) студенти повинні отримати навички опрацювання літературних джерел, складання плану індивідуального завдання (розрахункового завдання) та розкриття теми з використанням нормативного та практичного матеріалу, особистого досвіду тощо. Дана форма письмової роботи базується на реферуванні окремих питань за обраною тематикою з літературних джерел, а також можливому виконанні деяких розрахунків, якщо це необхідно для розв'язання певних завдань. Вона призначена для поточного або підсумкового закріплення навчального матеріалу та контролювання знань і навичок, набутих студентами в процесі навчання. Виклад матеріалу в розрахунковому завданні повинно мати чітку логічну послідовність згідно з обраною темою, власне аналізу та узагальнення інформації, отриманої з досліджених літературних джерел, творчий підхід до теми.

Індивідуальне завдання (розрахункове завдання) широко використовується в навчальному процесі як спосіб оцінювання не тільки знань студента, а ще і його вміння опрацювати та аналізувати джерела інформації.

Методичні вказівки до виконання індивідуального завдання (розрахункового завдання) з навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності

матеріалів» призначені для ознайомлення студентів з основними вимогами до робіт такого типу, правилами оформлення та основними критеріями оцінювання.

Виконання студентом індивідуального завдання (розрахункового завдання) стимулює творчі здібності та дозволяє повністю розкрити його потенціал до самостійної роботи. Під час написання індивідуального завдання (розрахункового завдання) відбувається узагальнення та структурування знань за його тематикою, тому вибір тематики індивідуального завдання (розрахункового завдання) слід проводити з урахуванням подальшої роботи студента в даному напрямку.

## 1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Згідно з освітньо-професійною програмою «Прикладне матеріалознавство, новітні технології та комп'ютерний дизайн матеріалів» другого (магістерського) рівня вищої освіти за спеціальністю 132 «Матеріалознавство» індивідуальне завдання (розрахункове завдання) з навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів» є обов'язковою формою самостійної позааудиторної роботи студентів денної та заочної форм навчання.

Мета навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності» полягає в одержанні уявлення про будову реальних кристалів, основних види дефектів і їх роль у структурних перетвореннях, про механізми міцності та пластичності металевих матеріалів.

Вимоги до студентів при виконанні індивідуального завдання (розрахункового завдання) такі:

- знати основні поняття теорії дефектів кристалічної будови;
- причини появи рівноважних і надлишкових точкових дефектів;
- роль вакансій в само- та гетеродифузії;
- види дислокацій, механізм їх переміщення, вектор Бюргерса, порядок величини щільності дислокацій після різних режимів пластичної та термічної обробки;
- характер взаємодії паралельних дислокацій і таких, що перетинаються;
- характерні вектори повних і часткових дислокацій в типових структурах металів;
- походження дислокацій;
- взаємодію дислокацій з точковими дефектами та одна з одною;
- вплив дислокацій на пластичність і міцність металів;
- вміти оцінювати концентрацію і рухливість рівноважних точкових дефектів при заданій температурі, значення енергії їх утворення та міграції (переміщення);
- визначати енергію утворення та міграції точкових дефектів за результатами ділатометричних вимірювань і електроопору загартованих кристалів, а також за зміною електроопору при їх відпалі;
- аналізувати імовірність різних дислокаційних реакцій в типових структурах металів, використовуючи критерій Франка;
- аналізувати можливість переміщення дислокацій, що виникають у результаті перетинання або розщеплення ковзних дислокацій.

Індивідуальне завдання (розрахункове завдання) є заключним етапом засвоєння навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів».

Виконання індивідуального завдання (розрахункового завдання), в свою чергу, формує у студентів навички, необхідні для подальшого вирішення широкого кола інженерних питань.

Мета методичних вказівок – навчити самостійно користуватись технічною, у тому числі довідковою, літературою розвинути навички до самостійної роботи та наукового дослідження. Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності 132 «Матеріалознавство» другого (магістерського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання закладів вищої освіти.

## 2. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ (РОЗРАХУНКОВОГО ЗАВДАННЯ)

### ВАРІАНТ № 0

1. Надати коротку характеристику точковим дефектам.

Точковими називають дефекти, розмір яких за всіма напрямками співмірний з розмірами атомів, тобто дефекти, зосереджені в одній точці. До цих дефектів відносять вакансії, міжвузлові атоми основного металу, атоми домішок.

Вакансія – це місце в кристалічній ґратці, в якому відсутній атом (незаповнене місце, або дірка). Атом, який зміщується з вузла ґратки в міжвузля, називають міжвузловим.

Домішкові атоми можуть розміщуватися як у вузлах кристалічної ґратки, так і в міжвузлях.

Навколо точкових дефектів кристалічна ґратка завжди викривлена. В чистому металі точкові дефекти майже не змінюють механічні властивості, але вони суттєво впливають на фізичні характеристики (електричні, магнітні). Наявність вакансій зумовлює можливість дифузії в металах. При підвищенні температури значно зростає концентрація вакансій і, як наслідок, прискорюються дифузійні процеси. В сплавах домішкові атоми впливають не тільки на фізичні, але й на механічні властивості.

2. Визначити середню відстань (у параметрах комірки) між вакансіями у металі з ГЦК ґраткою, якщо їх концентрація складає  $4 \cdot 10^{-4}$ . Параметр комірки  $a = 0,4$  нм.

Формула для середньої відстані між вакансіями

Середню відстань між вакансіями  $l$  можна розрахувати як:

$$l = n^{-1/3} \quad (1)$$

де  $n$  – концентрація вакансій (кількість вакансій на одиницю об'єму).

Концентрація вакансій у ГЦК ґратці

У ГЦК ґратці в одній елементарній комірці міститься 4 атоми. Об'єм елементарної комірки:

$$V_{\text{комірки}} = a^3 \quad (2)$$

Концентрація вакансій на одиницю об'єму:

$$n = CN_{\text{атомів}}/V_{\text{комірки}} \quad (3)$$

де:  $C$  – відносна концентрація вакансій ( $4 \cdot 10^{-4}$ ),  $N_{\text{атомів}} = 4$  – кількість атомів у ГЦК комірці.

Розрахунок

Використовуємо параметр комірки

$$a = 0,4 \text{ нм} = 4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

Об'єм елементарної комірки:

$$V_{\text{комірки}} = (0,4 \text{ нм})^3 = 0,064 \text{ нм}^3$$

Концентрація вакансій на одиницю об'єму:

$$n = 4 \cdot 10^{-4} \cdot 4 / 0,064 = 0,025 \text{ нм}^{-3}$$

Середня відстань між вакансіями:

$$l = n^{-1/3} = 0,025^{-1/3} \text{ нм}$$

Розрахунки показали:

Об'єм елементарної комірки:

$$V_{\text{комірки}} = 0,064 \text{ нм}^3$$

Концентрація вакансій на одиницю об'єму:

$$n = 0,025 \text{ нм}^{-3}$$

Середня відстань між вакансіями:

$$l = 3,42 \text{ нм}$$

У параметрах комірки ця відстань дорівнює:

$$l_a = l/a = 3,42/0,4 \text{ нм} = 8,55 \text{ а} \quad (4)$$

Середня відстань між вакансіями дорівнює приблизно 8,55 параметрів комірки.

3. Загальне уявлення про лінійні дефекти кристалічної будови. Вектор Бюргерса.

Лінійними називають дефекти, розмір яких в двох напрямках співмірний з розмірами атомів, а в третьому може бути значним. До дефектів такого виду належать дислокації. Дислокації – це порушення правильності кристалічної будови матеріалу, обумовлені наявністю зайвої площини в кристалі або зміщенням площин однієї відносно іншої. Існують різні типи дислокацій, найпростіші – крайові та гвинтові дислокації, що виникають внаслідок зайвої площини, яку називають екстраплощиною.

Мірою викривлення кристалічних ґраток, а також величини пов'язаної з дислокацією зсуву є вектор Бюргерса. Він характеризується енергією дислокації та силою, що діють на неї. Щоб визначити вектор Бюргерса, будують так званий контур Бюргерса – це замкнутий контур, побудований у реальному (дефектному кристалі) шляхом відкладання навколо дислокації однакового числа міжатомних відстаней. Якщо кристал бездефектний, контур замкнеться. Якщо кристал недосконалий, то для замикання контуру необхідно відкласти на одну міжатомну відстань менше.

4. Навести найбільш характерні системи ковзання (площини та напрямки) дислокацій в гексагональній щільноупакованій ґратці.

Основна площина ковзання:

- Площина:  $\{0001\}$  (базисна площина).
- Напрямок:  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  (щільноупаковані напрямки в базисній площині).
- Ця система є найактивнішою через найменшу енергію активації.

Призматична площина ковзання:

- Площина:  $\{10\bar{1}0\}$  (призматичні площини).

- Напрямок:  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ .

Площини ковзання другого порядку:

- Площина:  $\{10\bar{1}1\}$  (пірамідальні площини).
- Напрямок:  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  або  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$ .

5. Як взаємодіють паралельні крайові дислокації одного знаку, що ковзають в одній площині?

Паралельні крайові дислокації одного знаку, що ковзають в одній площині, взаємодіють через свої напружені поля. Основні механізми взаємодії:

- Відштовхування, якщо дислокації мають однаковий знак (тобто їх вектори Бюргерса спрямовані в один бік), вони створюють напружені поля, які взаємно відштовхуються.

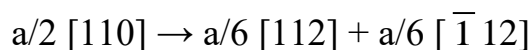
- Розташування дислокацій, унаслідок взаємного відштовхування, дислокації можуть рухатися в протилежні боки в межах однієї площини ковзання, збільшуючи міждислокаційну відстань. У випадку сильного відштовхування це може сприяти збільшенню густини дислокацій у кристалі та обмеженню руху окремих дислокацій.

- Енергетична стабільність: мінімальна енергія системи досягається, коли дислокації розташовуються на максимальній відстані одна від одної у межах площини ковзання.

6. Записати реакцію розщеплення дислокації з вектором  $a/2 [110]$  на часткові дислокації Шоклі в площині (111) у металах з ГЦК ґраткою. За критерієм Франка визначити можливість розщеплення. Що впливає на ширину розщепленої дислокації ?

У металах з ГЦК (гранноцентрованої кубічної) ґраткою дислокації з вектором  $a/2 [110]$  можуть розщеплюватися на два часткові елементи в площині (111), що є щільноупакованою площиною в ГЦК ґратці.

Розщеплення такої дислокації можна описати такою реакцією:



Ця реакція означає, що дислокація з вектором  $a/2 [110]$  розщеплюється на дві часткові дислокації:

- Одна з вектором  $a/6 [112]$
- Друга з вектором  $a/6 [\bar{1}12]$

Це характерне розщеплення для металічних матеріалів з ГЦК ґраткою, де

можливі дві часткові дислокації, які рухаються з меншими енергетичними витратами.

Згідно з критерієм Франка, розщеплення дислокації можливо, якщо енергія розщепленої дислокації менша за енергію первісної дислокації. Розщеплення відбувається, якщо енергетична вигода від утворення часткових дислокацій зменшує загальну енергію дефекту в матеріалі.

Критерій Франка для металічних матеріалів з ГЦК ґраткою є досить важливим, оскільки дозволяє знизити енергію деформації завдяки частковим дислокаціям, які рухаються легше, ніж одна повна дислокація. Тому для матеріалів з ГЦК, де має місце більша кількість можливих систем ковзання, це розщеплення є вигідним і зазвичай відбувається.

Ширина розщепленої дислокації визначається відстанню між частковими дислокаціями і залежить від кількох факторів:

- Кристалічна структура. В ГЦК ґратці можливість розщеплення на часткові дислокації зменшує енергію деформації, що допомагає знижувати ширину розщепленої дислокації.

- Температура. При високих температурах атоми в ґратці мають більшу енергію, що сприяє руху дислокацій і може зменшити ширину розщепленої дислокації. Теплові коливання також можуть допомогти частковим дислокаціям рухатися з більшою швидкістю.

- Розмір часткових дислокацій. Чим більший вектор Бюргерса первісної дислокації, тим більше можливостей для її розщеплення на часткові елементи. Однак на практиці ширина розщеплення також залежить від мікроструктурних дефектів, таких як дисперсні частинки.

- Висока густина дислокацій. Більша концентрація дислокацій може призводити до зменшення ширини розщепленої дислокації через локальну взаємодію між ними.

- Легувальні елементи і домішки. Вони можуть впливати на енергію активації для руху дислокацій і, як результат, на ширину розщепленої дислокації. Наприклад, дисперсні частинки або домішки можуть збільшити енергію взаємодії між частковими дислокаціями, обмежуючи їх рух і збільшуючи ширину.

Таким чином, розщеплення дислокації з вектором  $a/2 [110]$  на часткові дислокації є можливим у металах з ГЦК ґраткою і є вигідним з енергетичної точки зору. Ширина розщепленої дислокації залежить від температури, мікроструктури, концентрації дефектів та інших чинників, таких як наявність легуючих елементів або дисперсних частинок.

### 3. ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ (РОЗРАХУНКОВИХ ЗАВДАНЬ)

#### ВАРІАНТ № 1

1. Порівняти рівноважну концентрацію точкових дефектів у  $\alpha$ -Fe (ОЦК) при кімнатній температурі та поблизу температури плавлення ( $0,95 \cdot T_{пл}$ ). Енергія утворення вакансій – 1,4 еВ; міжвузлових атомів – 5,0 еВ. Температура плавлення заліза – 1 539 °С. Розрахунок проводити з точністю до порядку величини. Ентропійний множник вважати близьким до одиниці.

2. Як змінюється внутрішня енергія, ентропія та вільна енергія кристала при утворенні точкових дефектів?

3. Що характеризує вектор Бюргерса? Навести найбільш характерні вектори Бюргерса повних дислокацій в металах з ГЦК ґраткою.

4. Довести, що сила взаємодії паралельних крайових і гвинтових дислокацій дорівнює нулю.

5. Що називають щільністю дислокацій? Навести її характерні значення для відпалених металів.

6. Записати реакцію розщеплення дислокації с вектором Бюргерса  $a/2 [10\bar{1}]$  у площині (111) на часткові дислокації Шоклі. Виконати рисунок, показати енергетичну можливість розщеплення. Що впливає на ширину розщепленої дислокації?

#### ВАРІАНТ № 2

1. Зразок з міді нагрівають до температури 1 050 °С, а потім різко охолоджують до кімнатної температури. Надати оцінку пересиченню вакансіями кристала міді (на скільки порядків), якщо при гартуванні вдалося «заморозити» 10 % вакансій. Енергія утворення вакансій в міді дорівнює 1,12 еВ.

2. Які дефекти кристалічної будови відносять до термодинамічно стійких?

3. Крайова дислокація, вектор Бюргерса. Ковзання та переповзання крайових дислокацій.

4. Які дислокації називають повними?

5. Чому утворюються атмосфери Коттрелла?

6. Записати реакцію розщеплення повної дислокації з вектором  $1/3 [2\bar{1}\bar{1}]$

0] у площині базису на частковій дислокації Шоклі. Виконати рисунок, надати оцінку зміненню енергії при реакції. Обґрунтувати характер взаємодії часткових дислокацій. Який дефект при цьому виникає ?

### ВАРІАНТ № 3

1. Порівняти рухливість вакансій та міжвузлових атомів в алюмінії при температурі 660 °С. Енергія міграції вакансій – 0,65 еВ; міжвузлових атомів – 0,12 еВ. Розрахунок провести з точністю до першої значущої цифри. Ентропійний множник вважати близьким до одиниці.

2. Надати перелік можливих причин підвищеної концентрації вакансій в кристалах.

3. Загальна характеристика гвинтової дислокації. Вектор Бюргерса, напрямок переміщення. Поперечне ковзання.

4. Якою є величина та напрямок сили, що діє на дислокацію з вектором Бюргерса  $b$  з боку зовнішнього зусилля  $\tau$ .

5. Як взаємодіють крайові паралельні дислокації різних знаків?

6. Дописати реакцію та визначити енергетичний ефект реакції. У якій площині ковзання можлива така реакція ?

$$a / 2 [110] = a / 6 [121] + ..?..$$

### ВАРІАНТ № 4

1. Енергія активації самодифузії міді дорівнює 2,08 еВ, а енергія міграції – 1,08 еВ. Як зміниться концентрація вакансій при підвищенні температури від 500 до 1 000 °С ?

2. Провести зіставлення енергій утворення вакансій та міжвузлових атомів і на цій підставі порівняти між собою концентрації рівноважних точкових дефектів при будь-яких температурах твердого стану.

3. Описати можливі механізми переміщення крайових дислокацій.

4. Які дислокації називають повними ? Визначити найбільш характерний вектор Бюргерса повних дислокацій в металах з ОЦК ґраткою ?

5. Як взаємодіють паралельні крайові дислокації одного знака?

6. Записати реакцію розщеплення повної дислокації з вектором Бюргерса  $a/2[01\bar{1}]$  у площині (111) на частковій дислокації Шоклі. Виконати рисунок, по-

казати енергетичну можливість такого розщеплення, використовуючи критерій Франка. Що впливає на ширину дефекту упаковки, що виникає ?

### ВАРІАНТ № 5

1. Визначити (з точністю до порядку величини) частоту переміщень вакансій у сріблі при температурі, що дорівнює  $0,95 \cdot T_{пл}$ . Енергія активації самодифузії  $E_{сд} = 1,93$  еВ; енергія утворення вакансій  $E_o = 1,10$  еВ. Температура плавлення срібла  $960$  °С.

2. Що називають комплексами точкових дефектів ?

3. Навести схему розміщення атомів довкола негативної крайової дислокації, вкажіть взаємне розташування лінії, вектора Бюргерса та напрямку її можливого переміщення.

4. Чи взаємодіють паралельні крайові та гвинтова дислокації ?

5. Визначити енергію поля пружних викривлень, викликаних утворенням дислокації.

6. Записати реакцію розщеплення повної дислокації з вектором  $1/3 [\bar{2}110]$  у площині базису на часткові дислокації Шоклі. Виконати рисунок, надати оцінку зміни енергії при реакції. Обґрунтувати характер взаємодії часткових дислокацій. Який дефект при цьому виникає ?

### ВАРІАНТ № 6

1. Визначити концентрацію вакансій в алюмінії, якщо поблизу температури плавлення різниця між відносним збільшенням лінійних розмірів зразка ( $\Delta L/L$ ) та відносною зміною параметра кристалічної ґратки ( $\Delta a/a$ ) дорівнювала  $9,4 \cdot 10^{-4}$ . Описати суть цього методу визначення концентрації вакансій, його переваги та недоліки.

2. Порівняти між собою можливі значення концентрації рівноважних вакансій та міжвузлових атомів при різних температурах.

3. Загальне уявлення про дислокації як одновимірні дефекти. Найважливіша характеристика дислокацій – вектор Бюргерса.

4. Як взаємодіють паралельні крайові дислокації одного знака?

5. Дислокаційні реакції. Критерій Франка.

6. Дописати реакцію  $1/3 [2 \bar{1} \bar{1} 0] + [ \bar{1} 2 \bar{1} 0] = ..?..$ . Виконати рисунок, визначити енергетичний ефект реакції.

## ВАРІАНТ № 7

1. До якого типу дефектів кристалічної будови належать комплекси «вакансія – домішковий атом»? Чому такі утворення можуть бути стійкими?
2. Визначити (з точністю до порядку величини) частоту стрибків (перемішень) вакансій в залізі при нагріванні до температури  $0,95 \cdot T_{пл}$ , якщо енергія активації самодифузії  $E_{сд} = 2,8$  еВ, а енергія утворення вакансій  $E_o = 1,5$  еВ. Температура плавлення заліза –  $1539$  °С.
3. Загальна характеристика крайових дислокацій. Вектор Бюргерса.
4. Як взаємодіють дислокації з домішковими атомами ?
5. Як впливає деформація на щільність дислокацій ?
6. Записати реакцію розщеплення дислокації з вектором Бюргерса  $a / 2 [ \bar{1} 01 ]$  у площині (111) на часткові дислокації Шоклі. Виконати рисунок, показати енергетичну можливість розщеплення. Що впливає на ширину розщепленої дислокації ?

## ВАРІАНТ № 8

1. Алюміній нагрівають до температури  $650$  °С, а потім різко охолоджують до кімнатної температури. Дати оцінку ступеня пересичення кристала вакансіями (на скільки порядків), якщо гартуванням удалося «заморозити»  $10$  % вакансій. Енергія утворення вакансій в алюмінії  $E_o = 0,75$  еВ.
2. Надати коротку характеристику видам точкових дефектів.
3. Загальна характеристика гвинтових дислокацій.
4. Від чого залежить швидкість переповзання крайових дислокацій ?
5. Що називають дефектами упаковки ?
6. Записати реакцію розщеплення повної дислокації з вектором  $1/3 [11\bar{2}0]$  у площині базису на часткові дислокації Шоклі. Виконати рисунок, надати оцінку зміни енергії при реакції. Обґрунтувати характер взаємодії часткових дислокацій. Який дефект при цьому виникає ?

## ВАРІАНТ № 9

1. Чи однаковою є вірогідність утворення вакансій та міжвузлових атомів: при нагріванні ? при опроміненні ?
2. Визначити енергію міграції вакансій у попередньо загартованому дуже

тонкому золотому дроті, якщо надлишковий електроопір має однакове значення після ізотермічних відпалів протягом 130 хвилин при температурі 118 °С та 34 хвилин – при 140 °С.

3. Які дефекти відносять до лінійних ?

4. Як взаємодіють крайові дислокації різних знаків, що ковзають в одній площині?

5. Що характеризує вектор Бюргерса ? Навести характерні значення векторів Бюргерса повних і часткових дислокацій металів з ГЦК ґраткою.

6. Записати реакцію розщеплення дислокації з вектором Бюргерса  $a/2 [\bar{1}0\bar{1}]$  у площині  $(11\bar{1})$  на часткові дислокації Шоклі. Виконати рисунок, показати енергетичну можливість розщеплення. Що впливає на ширину розщепленої дислокації ?

#### ВАРІАНТ № 10

1. У чому суть утворення вакансій за Шоттки ?

2. Визначити приріст внутрішньої енергії, обумовленої утворенням вакансій в одному молі золота при 900 °С, якщо енергія утворення вакансій  $E_0 = 0,95$  еВ.

3. Чим визначається швидкість переповзання крайової дислокації ?

4. Визначити силу пружної взаємодії паралельних крайової та гвинтової дислокацій.

5. Від чого залежить енергія пружних викривлень ґратки, обумовлених утворенням дислокацій ?

7. Дописати реакцію  $a/2 [101] = a/6 [112] + ..?..$ , визначити енергетичний ефект розщеплення. Виконати рисунок. У якій площині можлива така реакція ?

#### ВАРІАНТ № 11

1. Визначити (з точністю до порядку величини) концентрацію вакансій в молібдені при нагріванні до температури  $0,95 \cdot T_{пл}$ , якщо енергія активації самодифузії  $E_{сд} = 4,53$  еВ, а енергія міграції  $E_m = 1,53$  еВ. Температура плавлення молібдену 2620 °С.

2. Як змінюється внутрішня енергія, ентропія та вільна енергія при утворенні точкових дефектів ?

3. Механізми ковзання та переповзання крайових дислокацій.

4. Як взаємодіють паралельні гвинтові дислокації одного знака ?
5. Які пороги виникають при перетинанні крайових дислокацій з паралельними векторами Бюргерса ?
6. Описати розщеплення повної гвинтової дислокації з вектором Бюргерса  $a/2 [1 \bar{1} \bar{1}]$  у трьох площинах ковзання типу  $\{110\}$ , що перетинаються. Виконати рисунок, надати оцінку енергії дислокацій та можливості ковзання дислокаційної конфігурації, що виникає при розщепленні.

#### ВАРІАНТ № 12

1. Надати коротку характеристику всім точковим дефектам кристалів.
2. Визначити енергію міграції вакансій в попередньо загартованому дуже тонкому золотому дроті, якщо надлишковий електроопір має однакове значення після ізотермічних відпалів протягом 100 хвилин при температурі 118 °С та 28 хвилин – при 140 °С.
3. Загальна характеристика гвинтової дислокації.
4. Навести приклади металів з ОЦК ґраткою. В елементарній комірці показати вектори Бюргерса, що відповідають тотожній трансляції. Який з них характеризується найменшою енергією ?
5. Що являє собою дефект упаковки в структурі металів з гексагональною щільною упаковкою?
6. Проаналізувати зустріч двох розщеплених дислокацій, що ковзають у площинах, які перетинаються. Вектори повних дислокацій  $a/2 [10 \bar{1}]$  та  $a/2 [0 \bar{1} 1]$ , площини ковзання відповідно  $(\bar{1} 1 \bar{1})$  і  $(111)$ . Який дефект називають вершинною дислокацією, дислокацією Ломер-Коттрелла ? Як вони впливають на пластичність металів?

#### ВАРІАНТ № 13

1. Визначити частку внутрішньої енергії, обумовленої вакансіями в одному молі срібла при 950 °С, якщо енергія їх утворення  $E_0 = 1,10$  еВ.
2. Що може бути причиною надлишкової концентрації точкових дефектів?
3. Утворення гвинтової дислокації.
4. Від чого залежить і куди спрямована сила, що діє на дислокацію?
5. Як взаємодіють паралельні крайові дислокації одного знака, розташовані так, що  $X = Y$  ?

6. Записати реакцію розщеплення дислокації з вектором Бюргерса  $1/3 [\bar{1} \bar{1} 20]$  у площині базису на частковій дислокації Шоклі. Надати оцінку зміненню енергії. Як взаємодіють часткові дислокації ?

#### ВАРІАНТ № 14

1. Порівняти рівноважну концентрацію вакансій та міжвузлових атомів у платині (ГЦК) при кімнатній температурі та поблизу температури плавлення ( $0,95T_{пл}$ ). Енергія утворення вакансій – 1,5 еВ; міжвузлових атомів – 3,5 еВ. Температура плавлення платини – 1773 °С. Розрахунок виконати з точністю до порядку величини. Ентропійний множник вважайте близьким до одиниці.

2. Навести приклади комплексів точкових дефектів.

3. Показати схему зсуву в кристалах, що приводить до утворення правої та лівої гвинтових дислокацій.

4. Енергія дислокації як робота з її утворення в кристалах.

5. Навести приклади металів з ОЦК ґраткою. Який з можливих векторів дислокацій відповідає тотожній трансляції та характеризується найменшою енергією ?

6. Виконати рисунок і надати опис розщеплення повної дислокації з вектором Бюргерса  $a/2 [\bar{1} 1 \bar{1}]$  на частковій у площині (110) ОЦК ґратки. Показати енергетичний ефект цієї реакції. Чи є конфігурація, що утворилася, ковзною або ні?

#### ВАРІАНТ № 15

1. Порівняти рухливість вакансій та міжвузлових атомів у вольфрамі при кімнатній температурі та поблизу температури плавлення ( $0,95T_{пл}$ ). Енергія утворення вакансій – 2,0 еВ; міжвузлових атомів – 0,08 еВ. Температура плавлення вольфраму – 3370 °С. Задачу розв'яжуйте з точністю до першої значущої цифри. Ентропійний множник вважайте близьким до одиниці.

2. За яким законом змінюється концентрація рівноважних точкових дефектів при підвищенні температури ?

3. Показати схему деформації, що приводить до утворення крайових дислокацій у кристалі.

4. Що впливає на величину енергії дислокації, створеної у кристалах ?

5. Навести приклади металів з ОЦК ґраткою та показати в їх елементарній комірці найбільш характерний вектор Бюргерса, що відповідає дислокаціям з

найменшою енергією.

6. Записати реакцію розщеплення повної дислокації з вектором  $a/2[101]$  у площині  $(11\bar{1})$  металів зі структурним типом ГЦК на часткові дислокації Шоклі. За критерієм Франка надати оцінку можливості розщеплення. Який ще дефект виникає при розщепленні ?

#### **4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ (РОЗРАХУНКОВОГО ЗАВДАННЯ)**

Відповідно до навчального плану спеціальності 132 «Матеріалознавство» розрахункове завдання з дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів» виконується самостійно.

Відповідно до навчального плану спеціальності 132 «Матеріалознавство» індивідуальне завдання (розрахункове завдання) з навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів» виконується самостійно.

У процесі виконання індивідуального завдання (розрахункового завдання) студенти закріплюють здобуті теоретичні знання з матеріалознавства, опановують навички роботи з науково-технічною та довідковою літературою.

Індивідуальне завдання (розрахункове завдання) вимагає від студентів використання теоретичних положень навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів» для розуміння впливу дефектів кристалічної будови на властивості матеріалів

Структура індивідуального завдання (розрахункового завдання) спрямована на творчий пошук та індивідуальний підхід в уявленні про дефекти реальних кристалів, що дозволить не тільки пояснити властивості існуючих матеріалів, але й надати рекомендації щодо можливого поліпшення їх механічних характеристик за рахунок оптимізації хімічного складу, режимів пластичної та термічної обробки.

Кожен студент виконує свій варіант індивідуального завдання (розрахункового завдання), який відрізняється від інших. Робота виконується під керівництвом викладача, який у встановленому порядку видає студенту індивідуальне завдання (розрахункове завдання) для виконання, графік його виконання, надає студенту методичну допомогу, необхідну студенту для розв'язання окремих питань, рекомендує необхідну літературу, проводить систематичні консультації за розкладом і контролює хід виконання роботи.

Індивідуальне завдання (розрахункове завдання) оформлюється відповідно до вимог, викладених нижче. Його захист відбувається в установленій термін.

Дослівне копіювання матеріалів інших робіт, підручників, конспектів, методичних вказівок, інших джерел не допускається. Однак допускається використання таких матеріалів за умови обов'язкового посилання на них відповідно до

встановлених правил. Загальні положення, аналізу діаграм стану подвійних сплавів, висновки викладаються в тексті індивідуального завдання (розрахункового завдання) самостійно.

Побудування індивідуального завдання (розрахункового завдання) має бути максимально наближеним до класичної наукової роботи. Вимоги до структури і оформлення якої регламентуються СТЗВО-ХПІ-3.01-2021. Система стандартів з організації навчального процесу. Текстові документи у сфері навчального процесу. Загальні вимоги до виконання.

У встановлений термін, до захисту індивідуального завдання (розрахункового завдання) студент зобов'язаний представити викладачу для перевірки його текстову частину у переплетеному вигляді, яка повинна послідовно містити такі структурні елементи:

- титульний аркуш (див. Додаток 1);
- основну частину;
- список джерел інформації.

Аркуш з переліком питань завдання розташовується після титульного аркушу роботи та не входить в загальну кількість аркушів.

Список джерел інформації являє собою список літератури та електронних ресурсів, звідки був запозичений фактичний матеріал, необхідний для виконання індивідуального завдання (розрахункового завдання). Цей список складають у порядку появи посилань у тексті роботи. Посилання на літературу в тексті роботи розміщують у квадратних дужках після відповідної цитати, наприклад [7]. В даному випадку «7» – це номер у списку літератури тієї публікації, на яку посилається автор. У списку джерел інформації, посилання на кожне джерело записують з абзацу і нумерують арабськи-ми числами. Оформлення списку джерел інформації виконується згідно з СТЗВО-ХПІ-3.01-2021.

Текстову частину індивідуального завдання (розрахункового завдання) оформляють відповідно до вимог СТЗВО-ХПІ-3.01-2021, державною мовою, за допомогою засобів комп'ютерної техніки. Текст роботи друкують з одного боку на аркушах білого паперу формату А4 (210×297 мм), розташування сторінок – книжне, залишаючи береги таких розмірів: лівий – 3 см, правий – 1,5 см, верхній і нижній – 2 см. При наборі тексту висота букв по-винна бути не меншою 2,5 мм. Рекомендується використовувати шрифт Times New Roman (кегель 14) з міжрядковим інтервалом 1,5 і вирівнювання за шириною сторінки. Перший рядок кожного абзацу необхідно починати з відступом на 1 см. Відстань між абзацами така сама, як і між рядками у абзаці – 1,5 інтервали. Шрифт друку повинен бути чітким, чорного кольору, а щільність тексту роботи однаковою. Заголовок першого

розділу завдання необхідно друкувати великими літерами жирним шрифтом з вирівнюванням по центру «ОСНОВНА ЧАСТИНА» друкується. Кожне нове питання індивідуального завдання (розрахункового завдання) необхідно починати з нового аркушу. Заголовок – «СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ» не нумерується. Нумерацію подають арабськими цифрами без знаку §, № і т. п., з крапкою після цифри. Таблиці і рисунки слід розміщувати в тексті безпосередньо після їх першого згадування. Всі сторінки роботи, включаючи список використаних джерел, підлягають нумерації на загальних засадах. Першою сторінкою роботи є титульний аркуш, який включають до загальної нумерації сторінок роботи. На титульному аркуші (сторінка 1) та на аркуші із завданням до індивідуального завдання (розрахункового завдання) (не входить в загальну кількість сторінок) номер сторінок не ставлять. Нумерація починається із сторінки основної частини де розкривається перше питання, та здійснюється у правому верхньому куті сторінки без крапки. Рисунки, таблиці та формули нумерують послідовно арабськими цифрами. Порядкові номери позначають арабськими цифрами у круглих дужках на сторінці праворуч на рівні відповідної формули. Наприклад: «(2.1)» – перша формула другого питання. Кожний рисунок (схема, діаграма, графік) повинний мати порядковий номер та назву, які необхідно розміщувати під ним без крапки. Наприклад: «Рисунок 3.1 – Діаграма фазового складу двокомпонентного сплаву». У тексті де викладено матеріал, який пов'язаний з рисунком на який необхідно вказати розміщують посилання у круглих дужках «(рис. 3.1)», або «див. рис. 3.1». Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву, які необхідно розміщувати над таблицею посередині рядка. Наприклад: «Таблиця 1.1 – Критичні точки сплаву». При перенесенні частини таблиці на наступну сторінку, слово «Таблиця» та її назва вказуються один раз над першою частиною таблиці, а над іншими частинами пишуть: «Продовження табл.», «Закінчення табл.» із зазначенням її номера.

## ДОДАТКИ

### Додаток 1

*Зразок оформлення титульного аркуша*

**Міністерство освіти і науки України**

**Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»**

**Кафедра «Матеріалознавство»**

**РОЗРАХУНКОВЕ ЗАВДАННЯ  
з дисципліни  
«Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів»**

**Виконав(а)**

**ст. гр.**

\_\_\_\_\_  
**Перевірив**

\_\_\_\_\_  
**Дата виконання роботи**

\_\_\_\_\_  
**Особистий підпис студента**

**Харків – 202\_**

# НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Драгобецький В. В., Загірняк В. Є., Коноваленко О. Д. Технологічні основи машинобудування : навч. посіб. Харків : Видавництво «Точка», 2019. 170 с. URL: [http://www.kdu.edu.ua/new/PHD\\_vid/TOMB.pdf](http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/TOMB.pdf)
2. Холявко В. В., Владимирський І. А. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. 272 с. URL: <https://drive.google.com/file/d/12EfrE9mMNRkt095XPRIDaw8NT-wNXQ39/view>
3. Белоконь Ю. О. Фізичні процеси при пластичній деформації : навч. посіб. для здобувачів ступеня вищої освіти магістра спеціальності 136 «Металургія» освітньо-професійної програми «Обробка металів тиском». Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 176 с. URL: [https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1129460/mod\\_resource/content/1/88..pdf](https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/1129460/mod_resource/content/1/88..pdf)
4. Долгов О. М., Колосов Д. Л. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : навч. посіб. ; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 70 с. URL: <http://ir.nmu.org.ua/bitstream/handle/123456789/160176/bd.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
5. Застосування спеціалізованого програмного забезпечення в матеріалознавстві та термічній обробці металів та сплавів : метод. посіб. / Р. В. Подольський, О. І. Бабаченко, Г. А. Кононенко, Н. С. Романова, А. О. Сафронова, Е. С. Клемешов, Україн. держ. ун-т науки і технол. Дніпро : 2022. 66 с. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/metodichniy\\_posibnik\\_podolskiy\\_ta\\_in.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/metodichniy_posibnik_podolskiy_ta_in.pdf)
6. Погребна Н. Е., Куцова В. З., Котова Т. В. Механічна стабільність матеріалів : Навч. посіб. Дніпро : НметАУ, 2021. 109 с. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/kmetved\\_16245.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/kmetved_16245.pdf)
7. Шукаєв С. М., Лавренко Я. І. Міцність при змінних навантаженнях : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою «Динаміка і міцність машин» спеціальності 131 «Прикладна механіка» ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 4.16 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 128 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/3a9fbe84-c2b0-40d9-aa54-d1d0b5125451/download>

8. Долгов О. М. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : Конспект лекцій ; Мін-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2022. 200 с. URL: <https://btpm.nmu.org.ua/ua/download/lecture-course/1329C.pdf>

9. Тітов В. А., Злочевська Н. К. Теорія пластичної деформації-2. Математичні основи пластичної деформації. Конспект лекцій : навч. посіб. для студ. Спеціальності 131 «Прикладна механіка», освітня програма «Технології виробництва літальних апаратів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 1.03 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 75 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ce39995a-df75-441a-b3f9-3b5525ed73e4/content>

10. Hardy H. Engineering elasticity: elasticity with less stress and. Springer, 2022. 275 p.

11. Кодекс етики академічних взаємовідносин та доброчесності Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» СУЯ ХПІ-ВЗЯОД-МР/10.1:2023. URL: <https://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/nv/wp-content/uploads/sites/43/2024/04/Kodeks-etyky-akademichnyh-vzayemovidnosyn-ta-dobrochesnosti-Natsionalnogo-tehnichnogo-universytetu-Harkivskyj-politehnicznyj-institut-.pdf>

12. СТЗВО-ХПІ-3.01-2021. Система стандартів з організації навчально-го процесу. Текстові документи у сфері навчального процесу. Загальні вимоги до виконання / Є. Сокол, Р. Мигущенко, С. Радогуз, В. Пильов, С. Хазієва, Г. Крупа. – На заміну СТЗВО-ХПІ-3.01-2018 ; [чинний з 2022-01-01]. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. 52 с. URL: <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/metodotdel/wp-content/uploads/sites/28/2021/12/STZVO-HPI-3.01-2021-SSONP.-Tekstovi-dokumenty-u-sferi-navchalnogo-protsesu.-Zagalni-vimogi-do-vikonannya.pdf>

## ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ В ІНТЕРНЕТІ

1. <https://studfiles.net/>

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>1. ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ.....</b>	<b>5</b>
<b>2. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ(РОЗРАХУНКОВОГО ЗАВДАННЯ).....</b>	<b>7</b>
<b>3. ВАРІАНТИ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ЗАВДАНЬ (РОЗРАХУНКОВИХ ЗАВДАНЬ).....</b>	<b>10</b>
<b>4. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ОФОРМЛЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ (РОЗРАХУНКОВОГО ЗАВДАННЯ).....</b>	<b>20</b>
<b>ДОДАТОК 1.....</b>	<b>23</b>
<b>НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ.....</b>	<b>24</b>
<b>РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>24</b>
<b>ІНФОРМАЦІЙНІ РЕСУРСИ В ІНТЕРНЕТІ.....</b>	<b>25</b>

Навчальне видання

Методичні вказівки

до виконання індивідуального завдання (розрахункового завдання)  
з навчальної дисципліни «Фізичні основи міцності і пластичності матеріалів»  
для студентів денної та заочної форм навчання  
за спеціальністю 132 «Матеріалознавство»

Укладачі:

БІЛОЗЕРОВ Валерій Володимирович  
ВОЛКОВ Олег Олексійович  
ДРОБЕНЮК Тамара Іванівна  
КНЯЗЄВА Ганна Олександрівна  
КНЯЗЄВ Сергій Анатолійович  
ПРОТАСЕНКО Тетяна Олександрівна  
СУББОТІНА Валерія Валеріївна  
СУББОТІН Олександр Володимирович  
ТЕРЛЕЦЬКИЙ Олександр Семенович  
ФЕДОРЕНКО Ганна Анатоліївна

Відповідальна за випуск проф. Субботіна В. В.  
Роботу до видання рекомендувала проф. Пономаренко О. І.

В авторській редакції

План 2024 р., поз. 967

Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Електронне видання