

ДЕРЖАВНИЙ ЗАКЛАД «ПІВДЕННОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ К.Д. УШИНСЬКОГО»

Кафедра технологічної та професійної освіти

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
ТА ОРГАНІЗАЦІЇ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З НАВЧАЛЬНОЇ
ДИСЦИПЛІНИ «ВИРОБНИЦТВО ТА ОБРОБКА КОНСТРУКЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ»**

**КРИСТАЛІЧНА БУДОВА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ
КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності
014 Середня освіта (Трудове навчання та технології)

ОДЕСА 2023

УДК: 378.62-4

Рекомендовано до друку вченою радою
Державного закладу «Південноукраїнський національний педагогічний
університет імені К. Д. Ушинського»
протокол від «___» червня 2023 року № ___

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Шевчук В. Г., доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики та астрономії Одеського національного університету імені І. І. Мечникова

Брюханов А. О., доктор технічних наук, професор кафедри фізики .

Укладач:

Усов В. В. – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри технологічної та професійної освіти

Методичні рекомендації до практичних занять та організації самостійної роботи з навчальної дисципліни «Виробництво та обробка конструкційних матеріалів» мають на меті допомогти студентам засвоїти теоретичний та практичний матеріал з теми «Кристалічна будова та механічні властивості конструкційних матеріалів».

В роботі представлено методичні рекомендації щодо питань: 1. Визначення параметрів кристалічної ґратки; 2. Недосконалості кристалічної будови (точкові та лінійні дефекти); 3. Пластична деформація і механічні властивості металів; 4. Визначення твердості металів і сплавів.

Наведено короткі теоретичні відомості, порядок виконання роботи та питання, які треба вивчити..

Рекомендовано для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 014 Середня освіта (Трудове навчання та технології) з метою закріплення, поглиблення й узагальнення знань, одержаних під час навчання.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Визначення параметрів кристалічної ґратки.....	5
2. Недосконалості кристалічної будови (точкові та лінійні дефекти).....	9
3 . Пластична деформація і механічні властивості металів.....	14
4. Визначення твердості металів і сплавів.....	23

ВСТУП

Мета даних методичних рекомендацій – надати допомогу здобувачам вищої освіти першого (бакалаврського) рівня зі спеціальності 014 Середня освіта (Трудове навчання та технології) на практичних заняттях з теми «Кристалічна будова та властивості конструкційних матеріалів» з дисципліни «Виробництво та обробка конструкційних матеріалів». В даних методичних рекомендаціях містяться короткі теоретичні відомості, приклади рішення задач, завдання та задачі для самостійного розрахунку, порядок виконання роботи.

1. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КРИСТАЛІЧНОЇ ГРАТКИ КУБІЧНИХ ТА ГЕКСАГОНАЛЬНИХ МЕТАЛІВ

МЕТА: вивчити різні типи кристалічних ґраток, визначити їх параметри і проаналізувати залежність між типами ґраток і густиною пакування атомів.

1.1 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Метали – тіла кристалічні. Вони характеризуються правильним розташуванням у просторі атомів (іонів), які утворюють правильну кристалічну ґратку, що відповідає мінімальній енергії взаємодії атомів. Кристалічну ґратку слід представляти як проведені в просторі у напрямі трьох осей координат уявні прямі лінії, що сполучають найближчі атоми і що проходять через їх центри, біля яких вони здійснюють коливальні рухи. Проведені лінії утворюють об'ємні фігури правильної геометричної форми. Іншими словами, кристалічна решітка це уявні просторові ґрати, у вузлах яких розташовуються частинки, створюючи тверде тіло. Найменший об'єм кристала, що дає уявлення про атомну структуру металу у всьому об'ємі, називається елементарною кристалічною коміркою. Елементарна комірка – елемент об'єму з мінімального числа атомів, багатократним перенесенням якого в просторі можна побудувати весь кристал. Всі ґрати складаються з тотожних елементарних комірок. Така комірка є паралелепіпедом, побудованим на трьох якнайменших векторах \vec{a} , \vec{b} і \vec{c} , модулі яких рівні періодам ідентичності (трансляції) вздовж осей координат. А вектори, як відомо, можна задати значеннями їх величин a , b , c і кутами між векторами і осями координат α , β , γ . Для опису однієї і тієї ж кристалічної структури елементарну комірку можна вибрати різними способами. На рисунку 1 жирними лініями виділені три можливих елементарних комірки для даної структури кристала.

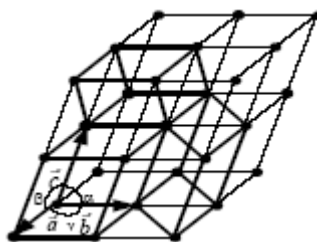


Рис. 1.1 – Схема кристалічної ґратки

Залежно від форми елементарної комірки всі кристали діляться на сім сингоній (кристалічних систем), що володіють певними класами симетрії. Цим сингоніям відповідає 14 можливих просторових ґраток Браве.

Сингонії кристалів в порядку зростання симетрії і відповідні їм параметри і типи ґраток Браве:

Триклинна сингонія. Всі параметри різні: $a \neq b \neq c$; $\alpha \neq \beta \neq \gamma$. Елементарна комірка ґраток Браве примітивна у формі косокутного паралелепіпеда.

Моноклінна сингонія. $a \neq b \neq c$; $\alpha = \gamma = 90^\circ$; $\beta \neq 90^\circ$. Комірка примітивна або базоцентрована у формі прямої призми з паралелограмом в основі.

Ромбічна сингонія. $a \neq b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Комірка примітивна, базоцентрована, об'ємноцентрована або ґранецентрована у формі прямокутного паралелепіпеда.

Сингонія тетрагона. $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$. Комірка примітивна або об'ємноцентрована у формі прямої призми з квадратом в підставі.

Тригональна (або ромбоєдрична). $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$. Комірка ромбоєдрична примітивна у формі ромбоєдра (куба, деформованого уздовж діагоналі) з гранями у вигляді ромбів.

Гексагональна сингонія. $a = b \neq c$; $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$. Примітивна ромбоєдрична комірка у формі прямих призм з ромбами в основі. Складені разом три таких комірки утворюють правильну шестигранну призму.

Кубічна сингонія. $a=b=c$; $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$. Комірка примітивна (проста кубічна), об'ємноцентрована або гранецентрована у формі куба.

Більшість металів мають одну з таких високосиметричних ґраток:

1. кубічна об'ємноцентрована (ОЦК);
2. кубічна гранецентрована (ГЦК);
3. гексагональна щільно упакована (ГЦУ).

Схеми розташування атомів в цих ґратках показані на рисунку 1.2.

Як бачимо, в ОЦК - ґратці атоми розташовані у вершинах куба і один атом у центрі об'єму куба. Таку ґратку мають α -Fe, Cr, Mo, W, V, Nb, β -Ti, β -Zr, β -Hf.

В ГЦК - ґратці атоми розташовані у вершинах куба і у центрі кожної грані. Таку ґратку мають Cu, Ni, Al, Pb, Ag, Au, Pt, Pd, γ -Fe, α -Co.

В гексагональній ґратці атоми розташовані у вершинах і в центрі основ призми, а три атома – в середній площині призми. Таке розташування атомів мають метали: Mg, α -Ti, α -Zr, Cd, Zn, β -Co, Be. Гексагональна ґратка, в якій $c/a = 1,633$, зветься гексагональна щільно упакована (ГПУ – від російського «гексагональная плотноупакованная»)

Основними характеристиками кристалічних ґраток є:

1). Період ґратки a і c - відстані між центрами найближчих атомів. Вимірюється ангстремами ($1\text{Å} = 10^{-10}$ м), кілоіксами ($1\text{kX} = 1,00202 \text{ Å}$) і нанометрами ($1\text{нм} = 10^{-9}$ м).

2). Координаційне число - число атомів, що знаходяться на найближчій і рівній відстані від даного (базового) атома. Чим воно вище, тим більше щільність упаковки атомів. Для кубічної комірки координаційне число позначається буквою К, а гексагональної - Г.

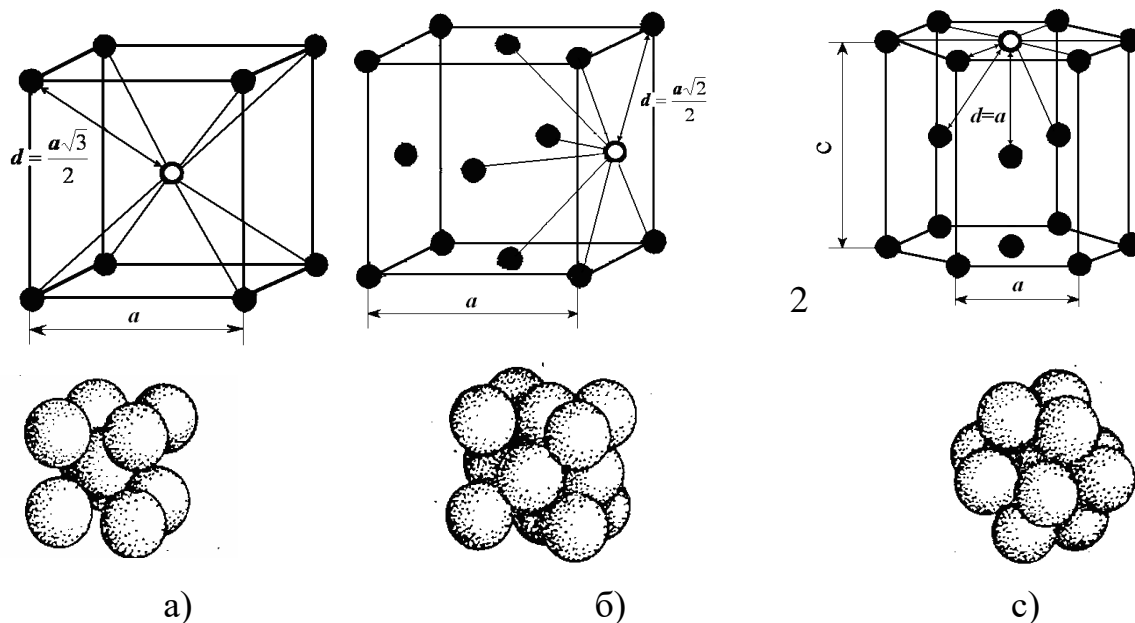


Рис. 1.2 – Елементарні кристалічні комірки: а - ОЦК; б - ГЦК; с – ГЦУ

3). Щільність упакування або коефіцієнт компактності Q атомів в кристалічній ґратці – об'єм, зайнятий атомами, які умовно розглядаються як жорсткі кулі. Щільність упаковки визначають як відношення об'єму, зайнятого атомами до об'єму елементарній комірці

$$Q = (V_{\text{ат.}}/V_{\text{е.к.}}). \quad (1.1)$$

1.2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Проаналізуйте елементарні комірки різних типів кристалічних ґраток і розташування в них атомів (Рис. 1.2). Намалювати ОЦК, ГЦК, і гексагональних металів.

2. Визначити базис, координаційне число і коефіцієнт компактності для кожної з указаних вище ґраток. При обчисленні об'єму атомів вважати їх кульками. Атомний радіус дорівнює половині найменшій відстані між атомами в їх кристалічній ґратці (Рис. 1.2).

3. Результати обчислень занести в таблицю. Зробити висновки.

Кристалічна гратка	Період	Базис (n)	Координаційне число	Коефіцієнт компактності
ОЦК	a	n=2	8	0,66
ГЦК	a	4	12	
ГПУ				
Гексагональна				

2. НЕДОСКОНАЛОСТІ КРИСТАЛІЧНОЇ БУДОВИ (ТОЧКОВІ ТА ЛІНІЙНІ ДЕФЕКТИ)

МЕТА: вивчити різні види недосконалостей, зокрема, точкові дефекти, будову дислокацій, причини їх легкого переміщення в кристалі і впливу на фізико-механічні властивості.

2.1 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У кристалічній гратці реальних металів є різні дефекти (недосконалість), які порушують зв'язки між атомами і роблять вплив на властивості металів. Розрізняють такі структурні недосконалості:

- точкові – малі у всіх трьох вимірюваннях;
- лінійні – малі в двох вимірюваннях і скільки завгодно протяжні в третьому;
- поверхневі – малі в одному вимірюванні;
- об'ємні – великі у всіх трьох напрямках.

Точкові дефекти: вакансії, дислоковані атоми і домішки. Вакансія – відсутність атомів у вузлах кристалічної решітки, «дірки», які утворилися в результаті різних причин (перехід атомів з поверхні в навколишнє середовище або з вузлів грати на поверхню, чи межі зерен, порожнечі, тріщини, в результаті пластичної деформації, опромінювання в циклотроні

або нейтронного опромінювання в ядерному реакторі). Концентрація вакансій в значній мірі визначається температурою тіла. Переміщаючись по кристалу, одиночні вакансії можуть зустрічатися, і об'єднуватися в дівакансії.

Дислокований атом – це атом, що вийшов з вузла ґрати і зайняв місце в міжвузловину. Концентрація дислокованих атомів значно менше, ніж вакансій, оскільки для їх освіти потрібні істотні витрати енергії. При цьому на місці атома, що перемістився, утворюється вакансія.

Домішкові атоми завжди присутні в металі, оскільки практично неможливо виплавити хімічно чистий метал. Вони можуть мати розміри більше або менше розмірів основних атомів і розташовуються у вузлах ґрат або міжвузліях.

Точкові дефекти викликають незначні перекручування ґратки, що може привести до зміни властивостей тіла (електропровідність, магнітні властивості), їх наявність сприяє процесам дифузії і протіканню фазових перетворень в твердому стані. При переміщенні у матеріалі дефекти можуть взаємодіяти.

Рівноважна кількість точкових дефектів n , що припадає на N атомних вузлів кристалу, виражається формулою:

$$n = N \cdot e^{-E/kT}, \quad (2.1)$$

де E – енергія утворення дефекту; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана; T – абсолютна температура.

Лінійні дефекти. Основними лінійними дефектами є дислокації. Дислокації – це дефекти кристалічної будови, що є лініями, упродовж і поблизу яких порушене характерне для кристала правильне розташування атомних площин. Розрізняють краєві і гвинтові дислокації. Структура дислокацій матеріалу характеризується щільністю дислокацій. Щільність дислокацій у кристалі визначається як середнє число ліній дислокацій, що перетинають усередині тіла майданчик площею 1 м^2 або як сумарна довжина ліній дислокацій в об'ємі 1 м^3

$$\rho = \frac{\sum l}{V} (\text{см}^{-2}; \text{м}^{-2}) \quad (2.2)$$

Щільність дислокацій змінюється в широких межах і залежить від стану матеріалу. Після ретельного відпалу щільність дислокацій складає 10^5 - 10^7 м^{-2} у кристалах з сильно деформованою кристалічною ґраткою щільність дислокацій досягає 10^{15} - 10^{16} м^{-2} .

Дислокації можуть переміщатися в кристалі шляхом ковзання та переповзання. Ковзання – це рух дислокації у площині ковзання в напрямку ковзання. Шляхом ковзання дислокацій відбувається пластична деформація кристалів. Тому наявність дислокація в кристалі значно впливає на механічні властивості, зокрема, на міцність.

Переповзанням називається рух крайовій дислокації, при якому відбувається подальше просування зайвої півплощини в глиб кристала або, навпаки, при частковому висуненні цієї площини назовні. Переповзання дислокацій здійснюється за рахунок анігіляції або утворення вакансій решітки у нижнього краю півплощини.

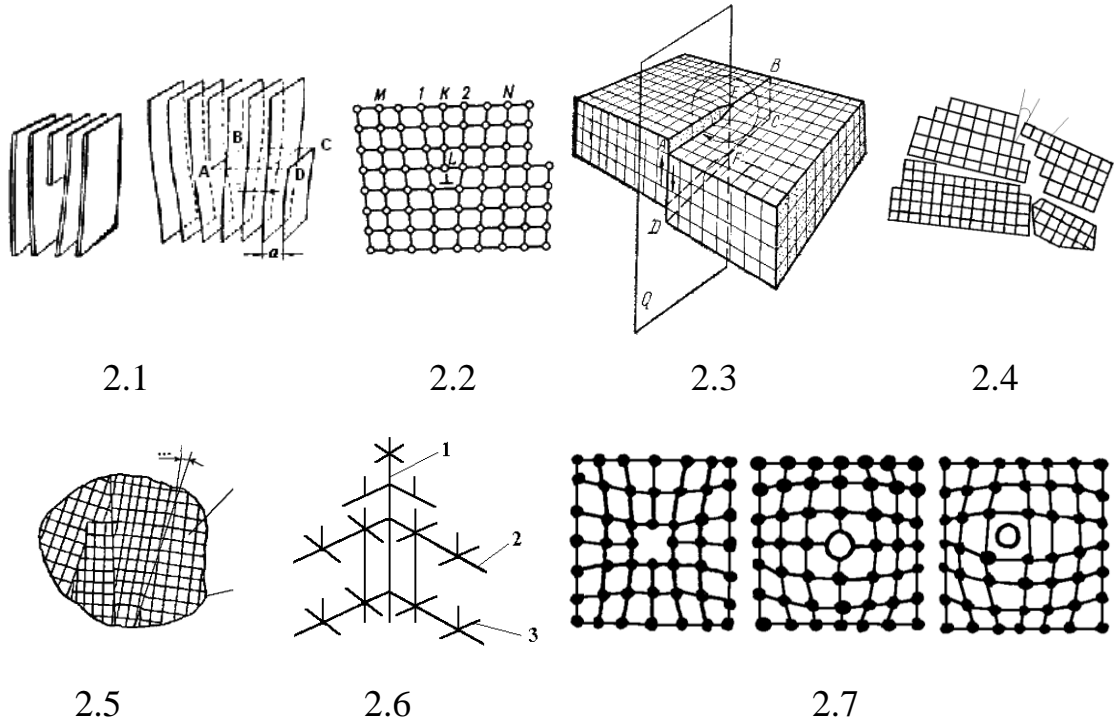
Поверхневі, або двовимірні, дефекти відносяться до розряду макроскопічних - це межі розділу між окремими зернами полікристалу чи між блоками мозаїчної структури кристалу (субзернами), і дефекти упаковки. Розрізняють великокутові і малокутові межі.

Тривимірні, або об'ємні, дефекти – це тріщини, дендрити, включення інших кристалів, газів, рідин і т.д., а також порожнечі. Об'ємні дефекти – це макродефекти, які є ізольованими в кристалі ділянками об'єму, що істотно перевищують об'єм елементарної комірки.

2.2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Вивчити різні види кристалічних дефектів та їх вплив на властивості кристалів.

2. Проаналізувати малюнки від 2.1 до 2.7 і вказати до яких видів дефектів вони відносяться, вкажіть кутові характеристики відповідних дефектів.



Поясніть, як утворюються дислокації, як вони впливають на міцність кристалів, які є способи зміцнення.

3. Розрахуйте задачі.

2.1. Для утворення вакансії в алюмінії потрібна енергія $\approx 0,75$ еВ.

Скільки існує вакансій при кімнатній температурі в стану термодинамічної рівноваги? При 550°C ?

Рішення. Рівноважна кількість вакансій n_v на N атомних вузлів виражається формулою:

$$n_v = N \cdot e^{-E_v/kT}, \quad (1)$$

где E_v – енергія утворення вакансій; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана; T – абсолютна температура.

1). Знайдемо кількість вакансій при кімнатній температурі (≈ 300 К).

Відомо, що $1 \text{ еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1\text{В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. З формули (1) знайдемо, що

$$\frac{n_v}{N} = e^{-\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,75}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2}} = e^{-29} = \frac{1}{e^{29}}.$$

Логарифмуючи останню рівність, одержимо

$$\ln \frac{n_v}{N} = -29 \text{ або } 2,4 \cdot \lg \frac{n_v}{N} \approx -29, \text{ або } \lg \frac{n_v}{N} = -12.$$

Звідси одержимо, що $n_v/N \approx 1 \cdot 10^{-12}$, тобто одна вакансія припадає на 10^{12} атомів.

2). Знайдемо кількість вакансій при температурі $550^\circ\text{C} = 550 + 273 = 823\text{K}$. Підставимо у формулу (1) відповідні чисельні дані. Одержимо, що

$$\frac{n_v}{N} = e^{-\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,75}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 823}} = e^{-10,6} = \frac{1}{e^{10,6}}$$

Логарифмуючи останню рівність, одержимо

$$\ln \frac{n_v}{N} = -10,6 \text{ або } 2,4 \cdot \lg \frac{n_v}{N} \approx -10,6, \text{ або } \lg \frac{n_v}{N} = -4,4 \approx -4.$$

Звідси одержимо, що $n_v/N \approx 1 \cdot 10^{-4}$, тобто одна вакансія припадає на 10^4 атомів.

2.2. Для утворення дефекту впровадження в алюмінії потрібна енергія E_d біля 3 еВ. Розрахувати відношення концентрації n_i дефектів впровадження до концентрації n_v вакансій при кімнатній температурі і при 550°C .

2.3. Припустимо, що алюмінієвий зразок швидко охолоджений від температури, близької до точки плавлення (660°C), і всі вакансії, що були при високій температурі, збереглися при кімнатній температурі. Кількість вакансій при кімнатній температурі перевищує їх рівноважну кількість при кімнатній температурі. Допустимо, що вакансії «відпалюють» з часом, і у результаті досягається концентрація, рівноважна при кімнатній температурі. Якщо «відпал» відбувається адіабатично, чи нагріватиметься або охолоджуватиметься тверде тіло? Якщо буде, то наскільки?

2.4. Утворення або зникнення вакансій в твердому тілі викликає зміну його густини. Чи підвищуватиметься або зменшуватиметься густина

алюмінію в процесі відпалу при кімнатній температурі? Чи можна зміряти цю зміну за допомогою існуючої експериментальної техніки?

2.5. Через 1 см^2 кристала проходить 10^6 прямолінійних крайових дислокацій ($\rho = 10^6$). На яку відстань переповзе кожна дислокація, якщо нагрівати кристал від 0 до 1000 К? Прийняти $E_v = 1 \text{ еВ}$, $a = 2 \text{ ангстрема}$.

3. ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

МЕТА: вивчити фізичну природу деформації та руйнування. Вивчити основні методи дослідження механічних властивостей металів і фізичний зміст характеристик, що визначаються різними методами випробувань.

3.1 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Основними механічними властивостями є міцність, пружність, пластичність, в'язкість, твердість.

Міцність – здатність матеріалу чинити опір деформаціям і руйнуванню. Випробування проводяться на спеціальних розривних машинах, які записують діаграму розтягування стандартних чи пропорційних зразків. Діаграма розтягування показує залежність діючого навантаження P (Н) від подовження зразка Δl (м), тобто $P = f(\Delta l)$. Але для отримання даних по механічних властивостях діаграми перебудовують і отримують залежність напруженості $\sigma = \frac{P}{F_0}$ (F_0 – площа поперечного перетину зразка до початку

випробувань) (Н/м^2) (від відносного подовження $\delta \left(\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \right)$) (Рис. 3.1).

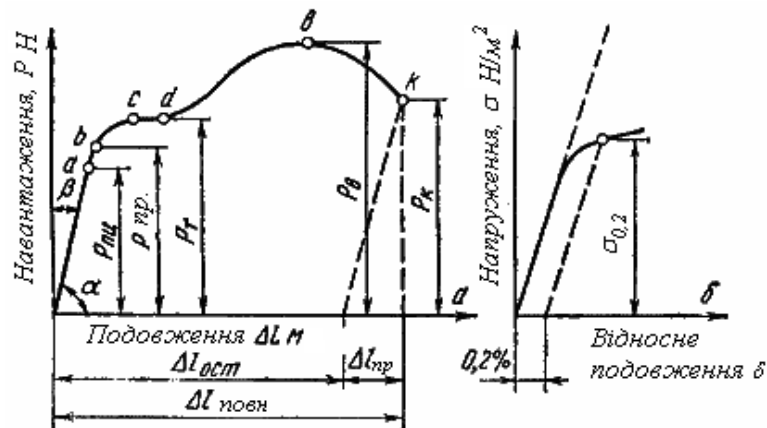


Рис. 3.1. Діаграма розтягування: а – абсолютна, б – відносна,

показано схему визначення умовної межі текучості. Ділянка oa на діаграмі (Рис. 3.1) відповідає пружній деформації матеріалу, коли виконується закон Гука

$$\sigma = E\varepsilon \quad (E - \text{модуль Юнга}) \quad (3.1)$$

$$E = \sigma/\varepsilon$$

Напруження, відповідне пружній граничній деформації в точці а, називається межею пропорційності.

Межа пропорційності ($\sigma_{пч}$) – максимальне напруження, до якої зберігається лінійна залежність між напруженням і деформацією.

$$\sigma_{пч} = \frac{P_{пч}}{F_0} \quad (3.2)$$

де F_0 – площа поперечного перетину зразка до початку випробувань.

Оскільки практично неможливо встановити точку переходу в непружний стан, то встановлюють умовну межу пружності – максимальне напруження, до якого зразок одержує тільки пружну деформацію. Рахують напруження, при якому залишкова деформація дуже мала (0,005...0,05%).

У позначенні указується значення залишкової деформації ($\sigma_{0,05}$).

$$\sigma_{0,05} = \frac{F_{0,05}}{F_0} \quad (3.3)$$

Межа текучості характеризує опір матеріалу невеликим пластичним деформаціям. Залежно від природи матеріалу використовують фізичну або умовну межу текучості.

Фізична межа текучості – це напруження, при якому відбувається збільшення деформації при постійному навантаженні (наявність горизонтального майданчика на діаграмі розтягування).

$$\sigma_{\text{ж}} = \frac{P_{\text{ж}}}{F_0} \quad (3.4)$$

Умовна межа текучості – це напруження, що викликає залишкову деформацію $\delta = 0,2\%$

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} \quad (3.5)$$

Межа міцності – напруження, відповідне максимальному навантаженню, яке витримує зразок до руйнування (тимчасовий опір розриву або σ_B).

$$\sigma_6 = \frac{P_6}{F_0}, \quad (3.6)$$

Істинний опір руйнуванню S_B – це максимальне напруження, яке витримує матеріал в момент, передуючий руйнуванню зразка, визначений відносно кінцевої площі F_x поперечного перетину зразка після руйнування.

Істинні напруження S_i визначають як відношення навантаження до площі поперечного перетину в даний момент часу.

$$S_i = \frac{P_i}{F_i} \quad (3.7)$$

де F_i – площа поперечного перетину зразка у даний момент часу.

При випробуванні на розтягування визначаються і характеристики пластичності.

Пластичність – здібність матеріалу до пластичної деформації, тобто здатність одержувати залишкову зміну форми і розмірів без порушення суцільності.

Характеристики пластичності:

- відносне подовження (δ)

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\% = \frac{\Delta l_{ост}}{l_0} 100\% \quad (3.8)$$

де l_0 і l_k – відповідно початкова і кінцева довжина зразка; $\Delta l_{ост}$ – абсолютне подовження зразка, визначається вимірюванням зразка після розриву.

- відносне звуження

$$\Psi = \frac{F_0 - F_x}{F_0} 100\% \quad (3.9)$$

де F_0 – початкова площа поперечного перетину; F_x – площа поперечного перетину в шийці після розриву.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити основні методи дослідження механічних властивостей металів і фізичний зміст характеристик, що визначаються різними методами випробувань.

2. З діаграмам «напруження – відносна деформація», представлених на рисунку 3.2, визначити модуль Юнга E , межу пропорційності $\sigma_{пл}$, умовну межу пружності $\sigma_{0,05}$, фізичну і умовну межу текучості $\sigma_{0,2}$, межу міцності σ_b , відносне подовження δ , відносне звужування ψ . Проаналізувати результати і зробіть висновки.

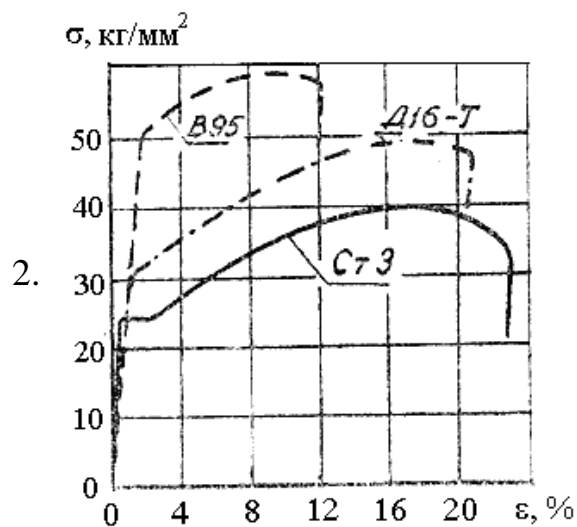


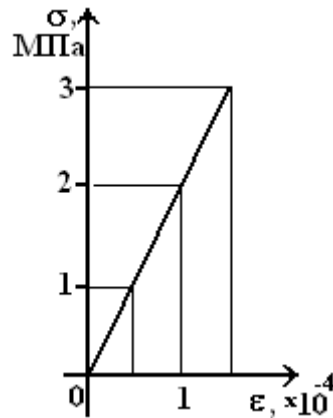
Рис. 3.2.

3.3 РОЗРАХУВАТИ ЗАДАЧІ

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ.

1. Якого виду деформації випробовує: а) ніжка лавки; б) сидіння лавки; в) натягнута струна гітари; г) гвинт м'ясорубки; д) свердло; е) зуби пили?
2. Якого виду деформації виникають в стрижні, на якому кріпляться дверні петлі? Якого виду деформації виникають в щабліні, коли гімнаст здійснює повний оборот («сонце»)?
3. Для чого рама велосипеда робиться з порожнистих трубок, а не з суцільних стрижнів?
4. До закріпленого одним кінцем дроту діаметром 2 мм підвішений вантаж масою 10 кг. Знайти механічну напругу в дроті.
5. На два дроти, діаметри яких відрізняються в 3 рази, діють дві однакові розтягуючі сили. Порівняти виникаючі в них напруги.
6. Балка завдовжки 5 м з площею поперечного перетину 100 см^2 під дією сил по 10 кН, прикладених до її кінців, стиснулася на 1 см. Знайти відносне стиснення і механічну напругу.
7. При розтягуванні алюмінієвого дроту завдовжки 2 м в ній виникла механічна напруга 35 МПа. Знайти відносне і абсолютне подовження.
8. Знайти напругу, що виникає в сталевому тросі, при його відносному подовженні 0,001.
9. У скільки абсолютне подовження мідного дроту більше, ніж сталевого (такої ж довжини і такого ж поперечного перетину), при дії на них однакових розтягуючих сил?
10. До кінців сталевого дроту завдовжки 3 м і перетином 1 мм^2 прикладені розтягуючі сили по 200 Н кожна. Знайти абсолютне і відносне подовження.

11. На мал. представлений графік залежності пружної напруги, що виникає в бетонній палі, від її відносного стиснення. Знайти модуль пружності бетону.



12. Які сили треба прикласти до кінців сталевого дроту завдовжки 4 м і перетином $0,5 \text{ мм}^2$ для подовження її на 2 мм?

13. У скільки разів відносно подовження риболовецької леси діаметром 0,2 мм більше, ніж леси діаметром 0,4 мм, якщо до кінців леси прикладені однакові сили?

14. До дроту був підвішений вантаж. Потім дріт зігнули навпіл і підвісили той же вантаж. Порівняти абсолютне і відносне подовження дроту в обох випадках.

15. У скільки разів зміниться абсолютне подовження дроту, якщо, не міняючи навантаження, замінити дріт іншої з того ж матеріалу, але велику довжину, що має удвічі, і в 2 рази більший діаметр?

16. На капроновій риболовецькій волосіні написано: $\varnothing 0,12 \text{ мм}$, розривне навантаження 0,75 кг. Знайти межу міцності на розрив даного сорту капрону.

17. Зі скількох сталевих дротів діаметром 2 мм повинен полягати трос, розрахований на підйом вантажу 2 т?

18. При океанологічних дослідженнях для узяття проби ґрунту з дна океану на сталевому тросі опускають особливий прилад. Яка гранична глибина занурення? Масою приладу нехтувати.

19. Яку силу треба прикласти до кінців сталевго стрижня з площею поперечного перетину 10 см^2 , щоб не дати йому розширитися при нагріванні від 0 до 30°C .

20. До сталевго дроту радіусом 1 мм підвішений вантаж. Під дією цього вантажу дріт одержав таке ж подовження, як при нагріванні на 20°C . Знайти масу вантажу.

21. Мідний дріт натягнутий гарячіше при температурі 150°C між двома міцними нерухомими стінками. При якій температурі, остигаючи, розірветься дріт? Вважати, що закон Гука справедливий аж до розриву дроту.

22. При розтягуванні мідного дроту, поперечний перетин якого $1,5 \text{ мм}^2$, початок залишкової деформації спостерігалосся при навантаженні $44,1 \text{ Н}$. Якою є межа пружності матеріалу дроту?

23. Яким повинен бути граничний діаметр сталевго троса, щоб він витримав навантаження $9,8 \text{ кН}$?

24. Знайти довжину мідного дроту, який, будучи підвішений вертикально, починає рватися під дією власної сили тяжіння.

25. Для вимірювання глибини моря з пароплава спустили гирю на сталевому тросі. Яку найбільшу глибину можна зміряти у такий спосіб? Щільність морської води 1000 кг/м^3 . Масою гирі в порівнянні з масою троса нехтувати.

26. З даху хати звішується сталевий дріт завдовжки 40 м і діаметром 2 мм . Яке навантаження може витримати цей дріт? На скільки подовжиться цей дріт, якщо на ньому повисне людина масою 70 кг ? Чи спостерігатиметься залишкова деформація, коли людина відпустить дріт? Межа пружності сталі 294 МПа .

27. До сталевго дроту радіусом 1 мм підвішений вантаж масою 100 кг . На який найбільший кут можна відхилити дріт з вантажем, щоб він не розірвався при проходженні цим вантажем положення рівноваги?

28. До залізного дроту завдовжки 50 см і діаметром 1 мм прив'язана гиля масою 1 кг. З якою частотою можна рівномірно обертати у вертикальній площині такий дріт з вантажем, щоб він не розірвався?

29. Однорідний мідний стрижень завдовжки 1 м рівномірно обертається навколо вертикальної осі, що проходить через один з його кінців. При якій частоті (швидкості) обертання стрижень розірветься?

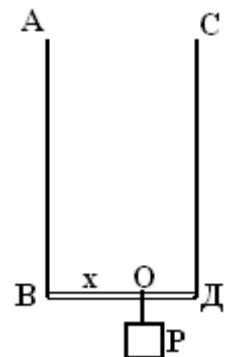
30. Однорідний стрижень рівномірно обертається навколо вертикальної осі, що проходить через його середину. Стрижень розривається, коли лінійна швидкість кінця стрижня досягає 380 м/с. Знайти межу міцності матеріалу стрижня. Густина матеріалу стрижня $7,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

31. До сталевого дроту завдовжки 1 м і радіусом 1 мм підвісили вантаж масою 100 кг. Чому рівна робота розтягування дроту?

32. З гумового шнура завдовжки 42 см радіусом 3 мм зроблена рогатка. Хлопчик, стріляючи з рогатки, розтягнув гумовий шнур на $\Delta l = 20$ см. Знайти чому рівний модуль Юнга для цієї гуми, якщо відомо, що камінь масою 0,02 кг, пущений з рогатки, полетів із швидкістю 20 м/с. Зміною перетину шнура при розтягуванні нехтувати.

33. Є гумовий шланг завдовжки 50 см і внутрішнім діаметром 1 см. Шланг натягнули так, що його довжина стала на $\Delta l = 10$ см більше. Знайти внутрішній діаметр натягнутого шланга, якщо коефіцієнт Пуассона для гуми $\sigma = 0,5$.

34. На рис. АВ – залізний дріт, СД – мідний дріт такої ж довжини і з таким же поперечним перетином, ВД – стрижень завдовжки 80 см. На стрижень підвісили вантаж масою 2 кг. На якій відстані від точки В треба його підвісити, щоб стрижень залишився горизонтальним?



4. ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ.

МЕТА: здобути практичні навички у визначенні твердості металів методами Брінелля, Роквелла, Віккерса; проаналізувати залежність між твердістю і межею міцності для відпаленої сталі; проаналізувати співвідношення між значеннями твердості, визначеними різними методами.

4.1 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Твердість – це здібність поверхневого шару матеріалу чинити опір проникненню в його поверхню наконечника приладу (індентора), що не деформується при випробуванні. Для багатьох сплавів має місце чітка залежність між твердістю, механічними та експлуатаційними характеристиками. Тому вимірювання твердості є найбільш поширеним методом механічних досліджень. Найбільшого поширення набули методи Брінелля, Роквелла, Віккерса і мікротвердості. Схеми випробувань представлені на мал. 4.1.

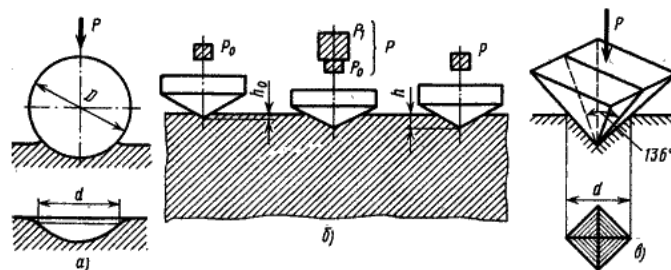


Рис. 4.1 – Схеми визначення твердості: а – по Брінелю; б – по Роквеллу;
в – по Вікерсу

Метод Брінелля (1900 р.)

Як індентор використовується сталеві загартована кулька діаметром D 2,5; 5; 10 мм, залежно від товщини виробу. Навантаження P , з яким кульку вдавлюють у матеріал, залежить від діаметру кульки і вимірюваної твердості:

- для термічно оброблених сталі і чавуну – $P = 30D^2$;
- литої бронзи і латуні – $P = 10D^2$;
- алюмінію і інших дуже м'яких металів – $P = 2,5D^2$.

Тривалість витримки τ : для сталі і чавуну – 10с, для латуні і бронзи – 30с. Твердість визначається як відношення прикладеного навантаження P до сферичної площі поверхні відбитку F (Рис. 4.1, а):

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4.1)$$

де D – діаметр кульки, м (мм); d – діаметр відбитка, м (мм), P – навантаження на кульку, Н.

Стандартними умовами є $D = 10$ мм; $P = 30000$ Н; $\tau = 10$ с. В цьому випадку твердість по Брінеллю позначається, наприклад, твердість HB 250. В інших випадках указуються умови в такій послідовності: число твердості HB, діаметр індентора, величину навантаження, час навантаження (HB D / P / τ) число твердості. Наприклад, число твердості 230 і випробування відбувалось кулькою діаметром 5 мм, при навантаженні 2500 Н з витримкою під навантаженням 30 с позначається таким чином: 230 HB 5/ 250 /30. Для розрахунку твердості за Брінеллем вимірюють діаметр лунки і по ньому знаходять твердості по таблицях, що додаються до приладу.

Знаючи твердість по Брінеллю (HB), можна визначити межу міцності на розтягування σ_b (тимчасовий опір):

$$\sigma_A = k \cdot HB, \quad (4.2)$$

де k – коефіцієнт, залежний від матеріалу:

- $k = 0,35$ – сталь, алюміній і його сплави;
- $k = 0,55$ – мідь, латунь і бронза відпалені;
- $k = 0,4$ – мідь, латунь і бронза після наклепу.

До недоліків метода Брінеля відносяться: обмеженість застосування (до HB450 чи 4500 МПа); неможливість випробувань тонких виробів (<2...3мм) і тонких поверхневих шарів (< 1мм).

Метод Роквела (1925 р).

Інденторами у цьому методі є алмазний конус з кутом при вершині 120° і радіусом закруглення 0,2 мм або стальна загартована кулька діаметром 1,588 мм (1/16 дюйма) в залежності від міцності випробуваного матеріалу. Навантаження на індентор прикладають послідовно: спочатку попереднє P_0 , яке дорівнює 100 Н, потім основне (Рис. 4.1, б). Загальне навантаження вибирається в залежності від індентора і досліджуваного матеріалу (таблиця 4.1).

Твердість по Роквелу вимірюють безпосередньо за шкалою приладу в умовних одиницях. Залежно від природи матеріалу використовують три шкали твердості (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1.

Шкали для визначення твердості по Роквелу

Шкала	Позначення	Індентор	Навантаження, Н (кгс)			Область застосування, число твердості за Роквеллом
			P_0	P_1	P_2	
А	HRA	Алмазний конус, 1200	98 (10)	490 (50)	588 (60)	Для особливо твердих матеріалів, 25-100
В	HRB	Сталева	98 (10)	883 (90)	981 (100)	Для відносно

		кулька, Ø 1/16"				м'яких матеріалів, 20-67
C	HRC	Алмазний конус, 1200	98 (10)	1373 (140)	1471 (150)	Для відносно твердих матеріалів, 70-85

Метод Вікерса (1923 р.)

Твердість визначається по величині відбитку (Рис. 4.1, в). В цьому методі індентором є алмазна чотиригранна піраміда з кутом при вершині 136°.

Твердість за Вікерсом позначається HV і розраховується як відношення прикладеного навантаження P (Н) до площі поверхні відбитку F:

$$HV = \frac{P}{F} = 1,8544 \frac{P}{d^2} \cdot 10^{-6}, \text{ Н/м}^2, \quad (4.3)$$

де d – середнє арифметичне значення довжини двох діагоналей відбитку, м, що вимірюється після зняття навантаження.

Навантаження P складає 50, 100, 200, 300, 500, 1000, 1200 Н. Це дозволяє визначити твердість самих різних по твердості матеріалів. Мінімальна товщина досліджуваного матеріалу може бути 0,3...0,5 мм, а поверхневого шару 0,03...0,05 мм.

Діагональ відбитку d вимірюється за допомогою мікроскопа, встановленого на приладі.

Згідно з Держстандартом HB і HV записують без позначання одиниць, наприклад, HB 230, HV 250. Якщо число твердості хочуть вказати у мегапаскалях, то після нього вказують одиниці, наприклад, HB 2300 МПа, HV 2500 МПа.

Спосіб мікротвердості

Мікротвердість застосовується для визначення твердості окремих структурних складових і фаз сплаву, дуже тонких поверхневих шарів (соті долі міліметра). Цей спосіб аналогічний способу Віккерса. Індентор – піраміда менших розмірів, навантаження P при втискуванні складають 0,05...5 Н. Мікротвердість визначають за формулою для способу Віккерсу (4.3).

4.2 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

1. Вивчити способи визначення твердості по Брінеллю, Роквеллу, Віккерса і мікротвердості. Пояснити переваги метода твердості по зрівнянню з іншими методами визначення механічних властивостей.

2. Перевести значення чисел твердості, заданих викладачем у таблиці 4.2 у твердість по Брінеллю, користуючись таблицею 4.3. По значенням твердості по Брінеллю визначити межу міцності на розтягування σ_B вуглецевих сталей, алюмінієвого сплаву (таблиця 4.2). Побудувати графік залежності твердості нормалізованих сталей від кількості вуглецю в них (Рис. 4.2). Зробити висновки.

Таблиця 4.2

% C	HRB	HRC	HB, МПа	σ_B , МПа
0,2	64	-	1070	374
0,45	82	-	1490	522
0,6	94	-		
0,8	98	-		
1	-	23		
1,2	-	29		

Д16	64			
-----	----	--	--	--

HB

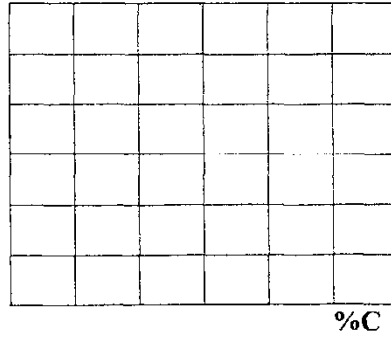


Рис. 4.2

Таблиця 4.3

Переведення чисел твердості

Твердість HV	Твердість HB	Твердість HR по шкалі			Твердість HV	Твердість HB	Твердість HR по шкалі			Твердість HV	Твердість HB	Твердість HR по шкалі							
		C	A	B			C	A	B			C	A	B					
1234	780	72	84	—	228	229	20	61	100	401	388	41	71	—	149	149	—	—	82
1116	745	70	83	—	222	223	19	60	99	390	375	40	70	—	148	146	—	—	81
1022	712	68	82	—	217	217	17	60	98	386	363	39	70	—	143	143	—	—	80
941	682	66	81	—	213	212	15	59	97	361	352	38	69	—	140	140	—	—	79
868	673	64	80	—	208	207	14	59	95	344	341	36	68	—	138	137	—	—	78
804	627	62	79	—	201	201	13	58	94	334	331	35	67	—	134	134	—	—	77
746	601	60	78	—	197	197	12	58	93	320	321	33	67	—	131	131	—	—	76
694	578	58	78	—	192	192	11	57	92	311	311	32	66	—	129	128	—	—	75
650	555	56	77	—	186	187	9	57	92	303	302	31	66	—	127	126	—	—	74
606	534	54	76	—	183	183	8	56	90	292	293	30	65	—	123	123	—	—	73
587	514	52	75	—	178	179	7	56	90	285	285	29	65	—	121	121	—	—	72
551	495	50	74	—	174	174	6	55	89	278	277	28	64	—	118	118	—	—	71
534	477	49	74	—	171	170	4	55	88	270	269	27	64	—	116	116	—	—	70
502	461	48	73	—	166	167	3	54	87	261	262	26	63	—	115	114	—	—	68
474	444	46	73	—	162	163	2	53	86	255	255	25	63	—	113	111	—	—	67
460	429	45	72	—	159	159	1	53	85	249	248	24	62	—	110	110	—	—	66
435	415	43	72	—	155	156	—	—	84	240	241	23	62	102	109	109	—	—	65
423	401	42	71	—	152	152	—	—	83	235	235	21	61	101	108	107	—	—	64

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Усов В.В. Матеріалознавство та технології: Навчальний посібник для самостійного вивчення дисципліни. Одеса: Університет Ушинського. 2019. 227 с.
<http://dspace.pdpu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/5252/1/Usov%2C%20Valentyn%20Valentynovych.pdf>
2. Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лопатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник. Херсон: Олді-плюс. Київ: Видавництво Ліра- К. 2013. 612 с.
http://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/aftandilmater.pdf
3. Бочар І. Й. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів (лабораторний практикум). Тернопіль: ТДПУ. 2002. 76 с.
<https://studfile.net/preview/5252583/>
4. Василенко І. І., Широков В. В., Василенко Ю. І. Конструкційні та електротехнічні матеріали. Навчальний посібник. Львів: «Магнолія-2006». 242 с. http://library.kpi.kharkov.ua/files/new_postupleniya/vasilenkok.pdf
5. Косенко В. А. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство. Київ: Видавництво Університет «Україна». 2012. 252 с.
6. Курська Т. М., Чернобай Г. О., Єрмоменко С. Б. Матеріалознавство та технологія матеріалів. Конспект лекцій. Х.: УЦЗУ. 2008. 136 с.
7. Леонтєв В. О., Бевз С. В., Видмиш В. А. Електротехнічні матеріали : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ. 2013. 122 с.
8. Опальчук А. С., Котречко О. О., Роговський Л. Л. Лабораторний практикум з технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства. Навчальний посібник. За ред. А.С. Опальчука. Київ: Вища освіта. 2006. 287 с.
https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/navchal_posibnik_tkm_15.pdf