

О.М. Юрченко, Ж.О. Кормош, О.В. Парасюк

Основи матеріалознавства
Частина 1. Властивості матеріалів та методи їх дослідження

Конспект лекцій
для студентів хімічного факультету
спеціальностей 161 «Хімічні технології та інженерія» та 102 «Хімія»



СХІДНОЄВРОПЕЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ЛЕСІ УКРАЇНКИ
ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра аналітичної хімії та екотехнологій

О.М. Юрченко, Ж.О. Кормош, О.В.Парасюк

Основи матеріалознавства
Частина 1. Властивості матеріалів та методи їх дослідження

Конспект лекцій
для студентів хімічного факультету
спеціальностей 161 «Хімічні технології та інженерія» та 102 «Хімія»

Луцьк
2018

УДК 669.01(075)
ББК 24.я73
Ю83

*Рекомендовано до друку науково-методичною радою Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки
(протокол №5 від 21 лютого 2018 р.)*

Укладачі: к.ф.-м.н. Юрченко О.М., к.х.н. Кормош Ж.О., к.х.н. Парасюк О.В.

*Рецензенти: доктор педагогічних наук, професор кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету Гулай О.І.
кандидат хімічних наук, доцент кафедри органічної хімії та фармації СНУ імені Лесі Українки Супрунович С.В.*

Ю83 Основи матеріалознавства. Частина 1. Властивості матеріалів та методи їх дослідження. Конспект лекцій для студентів хімічного факультету / Укладачі: Юрченко О.М., Кормош Ж.О., Парасюк О.В. – Луцьк: Вежа-друк. – 44 с.

Анотація: дане видання містить пояснювальну записку, навчальну програму курсу, конспект лекцій.

Рекомендовано студентам хімічного факультету.

**УДК 669.01(075)
ББК 24.я73
Ю83**

©Юрченко О.М., Кормош Ж.О.,
Парасюк О.В.
2018

Пояснювальна записка

Даний конспект лекцій призначений студентам хімічного факультету при вивченні курсу «Основи матеріалознавства»

Метою навчальної дисципліни «Основи матеріалознавства» є пізнання природи, будови і властивостей матеріалів, а також методів їх удосконалення та зміцнення для найбільш ефективного використання в техніці.

Основними завданнями вивчення дисциплін є:

- ознайомитись з кристалічною будовою речовин, основними типами кристалічних ґраток, дефектами структури, явищами анізотропії та поліморфізму;

- вивчити фізичну суть явищ, що відбуваються в матеріалах при впливі на них різних чинників в умовах виробництва і експлуатації і показати їх вплив на властивості матеріалів;

- навчити встановлювати залежність між складом, будовою та властивостями матеріалів;

- вивчити способи зміцнення матеріалів, що забезпечують високу надійність і довговічність деталей машин, інструментів і інших виробів;

- вивчити основні групи металевих і неметалевих матеріалів, їх властивості і область застосування.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми **студенти повинні:**

знати :

- атомно-кристалічну будову металів, дефекти кристалічної будови;
- фізичну суть явищ, що відбуваються в матеріалах в умовах виробництва і експлуатації; їх взаємозв'язок з властивостями; основні властивості сучасних металевих і неметалевих матеріалів.

вміти :

- оцінити поведінку матеріалу і причини відмови деталей машин при дії на них різних експлуатаційних чинників; в результаті аналізу умов експлуатації і виробництва вірно вибирати матеріал, призначати його обробку з метою отримання заданої структури і властивостей, що забезпечують високу надійність і довговічність деталей машин.

Програма навчальної дисципліни

Змістовий модуль 1. Будова речовини. Властивості матеріалів та методи їх дослідження.

Тема 1. Будова речовини.

Предмет і завдання курсу „Будова речовини та основи матеріалознавства”. Конструкційні матеріали. Неметалеві матеріали. Полімери. Основні етапи розвитку.

Аморфний і кристалічний стан твердої речовини. Анізотропія, ізотропія. Полікристалічні та монокристалічні тверді тіла. Текстура. Ковалентні, іонні, металічні, молекулярні кристали, відмінність в їх

властивостях. .

Поліморфізм. Вплив поліморфізму на поведінку металів та сплавів при нагріванні, охолодженні, хімічній обробці, експлуатації в широкому температурному діапазоні.

Атомно-кристалічна будова металів. Кристалічні ґратки та кристалічні комірки. Близькій та дальній порядки. Дефекти в твердих тілах. Класифікація дефектів. Точкові, лінійні, поверхневі дефекти.

Дифузія в твердих тілах.

Основні фізико-хімічні властивості матеріалів: колір, густина, температура плавлення, питома теплопровідність, питома теплота плавлення, теплопровідність, питомий електричний опір, коефіцієнт лінійного та об'ємного розширення, міцність, статична та динамічна в'язкість, твердість.

Тема 2. Властивості матеріалів та методи їх дослідження.

Загальна характеристика методів аналізу матеріалів. Вимоги до властивостей конструкційних матеріалів. Методи прямого дослідження властивостей матеріалів. Методи посередніх або непрямих досліджень. Фізичні й хімічні методи досліджень.

Макроструктурний аналіз. Аналіз зламу зразка. Види зламів металів та сплавів. Виявлення глибини загартованого чи цементованого шару, міжкристалітних прошарків, тріщин, структури та дефектів макроструктури. Темплети. Травники для виявлення структури та дефектів макроструктури. Ліквація. Виявлення розміщення волокон у заготовці.

Мікроаналіз. Підготовка зразків для мікроаналізу. Приготування шліфів. Абразивне шліфування. Механічне та електролітичне полірування. Хімічне травлення поверхні шліфів. Склади деяких травників та їх застосування. Дослідження величини зерна, його розташування, форми, розміру і кількості фаз за допомогою мікроаналізу. Найбільш поширені оптичні мікроскопи для металографічних досліджень. Оптичні мікроскопи спеціального призначення: поляризаційні, люмінесцентні, інтерференційні.

Електронна мікроскопія. Електронні мікроскопи. Класифікація мікроскопів за методом формування електронного пучка: магнітні, електростатичні, змішані (електромагнітні). Класифікація мікроскопів за методом дослідження: просвічуючі, відбивні, емісійні, растрові. Дослідження з допомогою електронних мікроскопів дефектів кристалічної ґратки, структури сплавів, дисперсних структур, ізотермічного перетворення та ін.

Метод мікрорентгеноспектрального аналізу. Мікроаналізатори. Принцип роботи мікроаналізаторів.

Дослідження механічних властивостей матеріалів. Визначення механічних властивостей готових деталей та окремих зразків, вирізаних з матеріалу. Механічні властивості матеріалів: міцність та пластичність.

Дослідження на розтяг. Особливості дослідження на розтяг. Форма та розміри зразків для досліджень на розтяг. Діаграму розтягу. Межа пропорційності. Межа пружності. Межа текучості. Межа міцності. Крихкі та пластичні матеріали.

Методи визначення твердості матеріалів. Поняття твердості.

Індентор. Визначення твердості за Брінеллем, Роквеллом, Віккерсом.

Дослідження ударної в'язкості матеріалів. Динамічна міцність. Дослідження ударом на злам зразка з надрізом. Схема роботи маятникового копра. Ударна в'язкість.

Визначення хімічних властивостей матеріалів. Стійкість металів та сплавів до загальної корозії, міжкристалітної корозії та корозійного розтріскування.

Методи дослідження на загальну корозію: у рідині при повному зануренні зразка; багаторазове занурення в рідину протягом певного часу; у киплячому соляному розчині; у навколишній атмосфері; у парах рідини. Швидкість корозії, корозійна стійкість.

Дослідження на міжкристалітну корозію. Хімічні реактиви для цих досліджень. Оцінка ступеня розвитку міжкристалітної корозії: якісно з допомогою мікроскопа, дослідженням на звук, на згин тощо; кількісно за втратою маси, зміною електроопору.

Дослідження на корозійне розтріскування. Методи оцінки стійкості металів до корозійного розтріскування (за часом початку розтріскування; процентом зразків, які розтріскались під час випробувань; відносною зміною межі міцності металу за певний час витримки в корозійному середовищі).

Розділ 1. Вступ. Будова речовини.

Матеріалознавство – це наука, що вивчає матеріали і закономірності, що визначають залежність їх властивостей від складу, будови, способів отримання, обробки і експлуатації.

Необхідно також знати сукупність методів виготовлення, обробки, зміни стану сировини чи матеріалу певними засобами виробництва. Не знаючи основ технології матеріалів, не можна знати, як проводити термічну обробку, змінювати властивості металів і сплавів, правильно й найбільш ефективно використовувати ці матеріали.

Інтенсивний розвиток матеріалознавства почався, коли П.П. Аносов (1799-1875) для дослідження сортів сталі використав мікроструктуру. Російський металург Д.К. Чернов (1839-1921) встановив, що в сталі при певних температурах відбуваються фазові переходи, наслідком яких є зміна властивостей сталей і в 1876 р. заклав основи сучасної теорії кристалізації металів.

М.С. Курнаков на початку 20 ст. застосував для дослідження металів методи ФХА (електричного, дилатометричного, магнітного). Рентгенівський аналіз дозволив встановити кристалічну структуру твердої фази і її зміну під впливом обробки (М. Лауе, Г. Дебай, Г. Вульф, У.Г. Брегг, У.Л. Брегг, А. Вестгейн, В. Фрагмон). В 30-ті роки Е. Бейн, Р. Мейл, С. Велер значну увагу приділяють фазовим переходам у сплавах.

Основою неметалевих матеріалів є полімери. Бутлеров ввів вчення про зв'язок будови та властивостей. Промислове виробництво перших синтетичних пластмас (фенопластів) стало можливим внаслідок фундаментальних досліджень, проведених Т. С. Петровим. Праці С.В. Лебедева дозволили здійснити промисловий синтез каучука (1932 р.)

1.1. Аморфна і кристалічна будови твердої речовини. Анізотропія і поліморфізм.

Залежно від швидкості охолодження речовини з рідкого стану речовини можуть переходити в аморфний чи кристалічний. Аморфні тіла на відміну від кристалічних не володіють визначеною температурою плавлення, вони *ізотропні*, тобто їх властивості однакові у всіх напрямках. Кристалічні тіла *анізотропні*: вони по-різному проводять теплоту і струм, від напрямку залежать механічні, оптичні та інші властивості. У кристалічних тіл структурні елементи розміщуються в просторі в певному порядку, який періодично повторюється, утворюючи кристалічну ґратку.

Залежно від природи сил, які діють між структурними частинками, кристали поділяються на чотири основні типи: *ковалентні, іонні, металічні, молекулярні*.

Якщо тверде тіло складається з великої кількості маленьких кристаликів, то воно є *полікристалічним*. Полікристалічні тіла є ізотропні, оскільки монокристалики розміщені неупорядковано.

Аморфні тіла при низьких температурах подібні за властивостями до твердих тіл, а при зростанні температури поступово розм'якшуються і

подібні до рідин.

Явище, коли одна речовина може мати декілька кристалічних структур, називається *поліморфізмом* або *алотропією*. Перехід з однієї алотропної модифікації в іншу відбувається зі зміною температури чи тиску. Поліморфізм поширений серед багатьох металів та сплавів і впливає на їх поведінку при нагріванні чи охолодженні, при хімічній обробці, при експлуатації, коли температура коливається в широкому діапазоні.

1.2. Кристалічна ґратка

Кристалічна ґратка - геометрично правильне розміщення атомів (йонів, молекул), властиве речовині, що перебуває в кристалічному стані. Просторові фігури (наприклад, паралелепіпеди) у вершинах яких розміщені атоми, називаються комірками кристалічної ґратки.

Ідеальний кристал характеризується *трансляційною симетрією*. Тобто, існують такі вектори, при зсуві на який кожен атом кристалу займе положення іншого такого ж атома. Вочевидь, що зсув на вектор na , де n — ціле число, тобто n -кратне повторення зсуву, матиме ті ж наслідки.

Тривимірність кристалу означає, що існують три лінійно незалежні вектори, які мають таку властивість. Можна вибрати три найменші вектори a_1, a_2, a_3 так, щоб будь-який вектор трансляції a можна було задати у вигляді

$$a = n_1 a_1 + n_2 a_2 + n_3 a_3,$$

де n_1, n_2, n_3 - цілі числа. Ці вектори називаються *базисними векторами* кристалічної ґратки. Вони визначають паралелепіпед, який називається *примітивною коміркою*.

Найменша комірка, яка зберігає усі елементи симетрії кристалу, називається *елементарною коміркою*.

Навіть у випадку кристалу із одним сортом атомів елементарна комірка містить кілька атомів. Наприклад, кристал заліза має кубічну об'ємноцентровану ґратку із 2 атомами в елементарній комірці. При високих температурах залізо переходить у фазу з гранецентрованою кубічною ґраткою із 4 атомами в елементарній комірці.

ґратка Браве або *трансляційна ґратка* - сукупність еквівалентних вузлів кристалічної ґратки, які можуть бути суміщені один із іншим лише при паралельному переносі (трансляції). Відкрита Огюстом Браве в 1850 році.

ґратка Браве - це паралелепіпед, утворений трансляцією будь-якого з вузлів кристалічної ґратки в трьох напрямках. Ці напрямки зазвичай вибираються перпендикулярними до осей симетрії або до площин симетрії.

Існує *14 типів ґраток Браве*, кожна з яких відноситься до певної сингонії.

- *Моноклінна сингонія* має дві ґратки Браве: моноклінну просту і моноклінну центровану.
- *Ромбічна сингонія* має чотири ґратки Браве: ромбічну просту, ромбічну з центрованою основою, ромбічну об'ємноцентровану і ромбічну гранецентровану.

- *Тетрагональна сингонія* має дві ґратки Браве: тетрагональну просту і тетрагональну об'ємноцентровану.
- *Кубічна сингонія* має три ґратки Браве: кубічну просту, кубічну гранецентровану і кубічну об'ємноцентровану.

Таблиця 1.1

Типи просторових ґраток

Кристалічні системи (сингонія)	14 ґраток Браве			
	примітивна	базоцентрована	об'ємноцентрована	гранецентрована
триклінна				
моноклінна	$\beta \neq 90^\circ$ $a \neq c$ 	$\beta \neq 90^\circ$ $a \neq c$ 		
ромбічна	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$ 	$a \neq b \neq c$
гексагональна				
тригональна	$\alpha \neq 90^\circ$ 			
тетрагональна	$a \neq c$ 		$a \neq c$ 	
кубічна				

Всі інші сингонії мають лише одну ґратку Браве, назва якої збігається з назвою сингонії.

1.3. Дефекти кристалів

Розташування структурних елементів у кристалічних ґратках рідко відповідає класичній картині, яка характеризується періодичним розташуванням у ґратці атомів або йонів (так звані ідеальні кристали). На противагу ідеальним кристалом, для яких характерне правильне розташування і періодичність атомів або йонів, реальні кристали відрізняються рядом відхилень — дефектів кристалічної ґратки

Класифікацію дефектів, зазвичай, здійснюють за чисто геометричними ознаками, а саме за кількістю вимірів, в яких порушення структури кристала простягаються на відстані, що перевищують характерний параметр ґратки. Виділяють чотири класи дефектів.

1. Точкові (нульмірні) дефекти. Саме їх назва свідчить про те, що порушення структури локалізовані в окремих точках кристала. Розміри зазначених дефектів у всіх трьох вимірах не перевищують одної або декількох міжатомних відстаней. До точкових дефектів відносять вакансії (вакантні вузли кристалічної ґратки), атоми в міжвузлях, атоми домішок в вузлах або міжвузлях, а також поєднання домішка - вакансія, домішка - домішка, подвійні і потрійні вакансії. Точкові дефекти можуть з'явитися в твердих тілах внаслідок нагрівання (теплові дефекти), опромінення швидкими частинками (радіаційні дефекти), відхилення складу хімічних сполук від стехіометрії (стехіометричні дефекти), пластичної деформації.

2. Лінійні (одномірні) дефекти характеризуються тим, що порушення періодичності простягаються в одному вимірі на відстані, що значно перевищують параметр ґратки, тоді як в двох інших вимірах вони не перевищують декількох параметрів. Лінійними дефектами є дислокації, мікротріщини. Дислокації виникають в результаті пластичної деформації кристала в процесі росту або при наступних обробках. Можливо також утворення нестійких лінійних дефектів з ланцюжків точкових дефектів.

3. Поверхневі (двомірні) дефекти в двох вимірах мають розміри, що значно перевищують параметр ґратки, а в третьому - кілька параметрів. Двомірні дефекти можуть бути наслідком наявності домішок в розплаві. Межі зерен і двійників, дефекти упаковки, міжфазні границі, стінки доменів, а також поверхня кристала є двомірними дефектами.

4. Об'ємні (тривимірні) дефекти - це мікропорожнини і включення другої фази. Вони виникають зазвичай при вирощуванні кристалів або в результаті деяких впливів на кристал. Так, наприклад, наявність великої кількості домішок в розплаві, з якого ведеться кристалізація, може привести до випадання великих частинок другої фази.

1.3.1. Точкові дефекти в кристалах

Найбільш поширеними точковими дефектами є енергетичні дефекти - фонони - тимчасові спотворення регулярності ґратки кристала, викликані тепловим рухом. До енергетичних дефектів кристалів відносяться також тимчасові недосконалості ґратки (порушення стану), що викликаються дією різних випромінювань: світла, рентгенівського або γ -випромінювання, α -випромінювання, потоку нейтронів.

До електронних дефектів відносяться надлишкові електрони, недостача електронів (незаповнені валентні зв'язки в кристалі - дірки) і екситони. Останні являють собою парні дефекти, що складаються з електрона і дірки, які пов'язані кулонівськими силами.

До атомних дефектів відносяться домішки, дефекти Френкеля і дефекти Шоткі.

Домішки є в кристалічній ґратці завжди, оскільки сучасні методи очищення кристалів не дозволяють отримувати кристали з вмістом домішкових атомів менше 10^{11} см^{-3} .

Якщо атом домішки заміщає атом основної речовини в вузлі ґратки, він називається домішкою заміщення. Якщо домішковий атом розміщується в міжвузлі, його називають домішкою включення.

Навіть при незначній відносній концентрації точкових дефектів зміна фізичних властивостей кристала, викликана ними, можуть бути величезна. Атомні дефекти можуть впливати на механічні, електричні, магнітні та оптичні властивості кристалів. Наприклад, тисячні частки відсотка деяких домішок в чистих напівпровідникових кристалах змінюють електричний опір останніх в 10^5 - 10^6 разів.

Точкові дефекти у вигляді сукупності атомів в міжвузлях і вакансій називають *дефектами за Френкелем*.

Парні дефекти Френкеля виникають легше в кристалах, що містять великі міжатомні проміжки, ніж в щільноупакованих. В останніх для міжвузлових атомів немає місця. Прикладом кристалів першого типу є кристали зі структурою алмазу і кам'яної солі, а кристалів другого типу - метали з щільною упаковкою. Так, наприклад, в звичайних умовах міжвузлові атоми в гранецентрованих металах малоімовірні.

Крім парних дефектів за Френкелем, в кристалах наявні і поодинокі точкові дефекти - вакансії, вперше розглянуті В. Шотткі. Дефекти за Шотткі зазвичай зустрічаються в кристалах з щільною упаковкою атомів, де утворення міжвузлових атомів утруднене і енергетично не вигідне. В такому кристалі деякі атоми з приповерхневого шару в результаті теплового руху можуть вийти з кристала на поверхню. Новоутворена вакансія мігрує потім в об'єм кристала. Утворення дефектів за Шотткі зменшує щільність кристала через збільшення його об'єму при постійній масі. При утворенні дефектів за Френкелем щільність залишається незмінною, так як об'єм кристала не змінюється.

Точкові дефекти типу вакансій є в кожному кристалі, як би ретельно він не вирощувався. Більш того, в реальному кристалі вакансії постійно зароджуються і зникають під дією теплових флуктуацій.

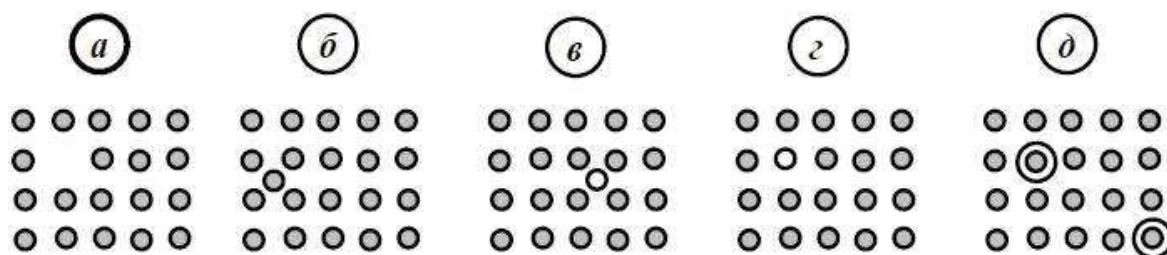


Рис.1.1. Дефекти кристалічної ґратки: а — незаповнений вузол (вакансія); б — власний атом в міжвузлі; в — чужорідний атом між вузлами; г — чужорідний атом у вузлі; д — йон з аномальним зарядом.

1.3.2. Дислокації

До лінійних дефектів кристалічної ґратки відносяться дислокації. Найпростішими видами дислокацій є крайова і гвинтова дислокації (рис.1.2).

Будову ідеального кристала зображено у вигляді сукупності паралельних одна одній атомних площин. Якщо одна з цих площин обривається всередині кристала (рис.1.2 б), то місце обриву її утворює крайову дислокацію. У випадку гвинтової дислокації (рис. 1.2 в) немає обриву всередині кристала атомної площини, але самі атомні площини являють собою систему, подібну гвинтовим сходам - це одна атомна площина, закручена по гвинтовій лінії. Якщо обходити по цій площині навколо осі гвинтової дислокації, то з кожним оборотом будемо підніматися або опускатися на один крок гвинта, рівний міжплощинній відстані.

Будь-яка конкретна дислокація може бути представлена як поєднання крайової і гвинтової дислокацій.

Ширина дислокації складає всього кілька періодів ґратки, а її довжина сягає багатьох тисяч періодів. На відміну від вакансій, ймовірність виникнення дислокацій за рахунок флуктуації теплового руху незначна.

У недеформованих металевих кристалах на площу в 1 см^2 припадає $10^6 - 10^8$ дислокацій, при пластичній деформації кількість дислокацій зростає в тисячі, а іноді і в мільйони разів.

Найважливішою властивістю дислокацій є їх легка рухливість і активна взаємодія між собою і з будь-якими іншими дефектами ґратки. Для того, щоб викликати рух дислокації, досить створити в кристалі напругу зсуву близько 10 Н / мм^2 . Дислокація тоді буде переміщатися в кристалі, поки не зустрине якоїсь перешкоди, якою може бути межа зерна, інша дислокація, атом включення і т.д. При зустрічі з перешкодою дислокація викривляється, огинає перешкоду, утворюючи розширену дислокаційну петлю, яка потім відшнуровується і утворює окрему дислокаційну петлю. Причому в області

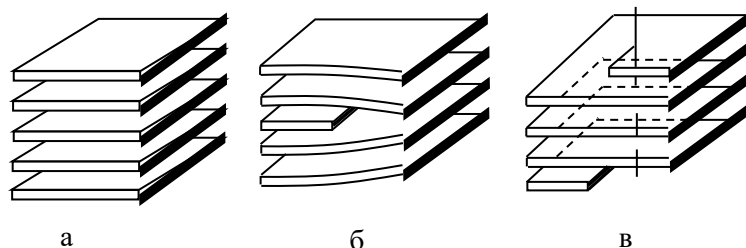


Рис. 1.2. Найпростіші види дислокацій: а – ідеальній кристал; б – крайова дислокація; в – гвинтова дислокація.

відокремленої петлі, що розширюється, залишається відрізок лінійної дислокації (між двома перешкодами), який під впливом зовнішньої напруги знову буде згинатися, і весь процес повториться знову. Таким чином, при взаємодії рухомих дислокацій з перешкодами відбувається зростання числа дислокацій.

1.3.3. Границі зерен

Полікристали складаються з великого числа дрібних монокристалічних зерен, розділених деякими зонами переходу, які отримали назву границь зерен.

Границя зерна являє собою поверхню між двома монокристалами різної орієнтації, що примикають один до одного таким чином, що відсутнє порушення суцільності речовини.

Довгий час вважалося, що це аморфний шар товщиною в кілька десятків нанометрів. Однак встановлено, що ширина області «поганого» матеріалу на межі між зернами не перевищує однієї - двох міжатомних відстаней.

Границі з розорієнтаціями сусідніх зерен менше 10^0 відносяться до малокутових, а з більшою - до висококутових.

Малокутові границі виникають при зростанні кристалів з розплаву і при пластичній деформації. Малокутова границя притягує до себе точкові дефекти, в тому числі і домішкові атоми, внаслідок пружної взаємодії з ними дислокацій, що складають границю. Домішкові атоми гальмують міграцію малокутових границь, стабілізуючи субструктуру.

Границі зерен, що виростили з різних центрів при кристалізації і фазових перетвореннях в твердому стані, найчастіше бувають висококутові.

Границі зерен істотно впливають на багато властивостей кристалів, зокрема на електропровідність, поглинання ультразвуку, оптичні властивості і т.д. Наявність границь зумовлює те, що в полікристалах коефіцієнт дифузії домішок значно більший, ніж в монокристалах.

1.3.4. Вплив дефектів на властивості кристалів

Дефекти у кристалах істотно впливають на їх фізичні, механічні, електричні, магнітні, фотоелектричні та інші властивості. Так, точкові дефекти, які в напівпровідниках можуть бути донорами або акцепторами і генерувати носії струму (електрони і дірки), зумовлюють домішкову електропровідність. В йонних кристалах внаслідок взаємодії точкових

дефектів з електронами й дірками утворюються так звані центри забарвлення. До них належать F- і V-центри, які поглинають світло відповідно у видимій та ультрафіолетовій ділянці спектра. Перший утворюється вакантним вузлом негативного йона, який захопив електрон, другий — вакантним вузлом позитивного йона, який захопив дірку. Процеси взаємної дифузії твердих тіл, хімічні реакції у твердому стані пов'язані з природою та рухом дефектів у кристалах. Дефекти, особливо лінійні та поверхневі, істотно впливають на пластичність, в'язкість, пружність та міцність кристалів.

Розділ 2. Методи дослідження властивостей матеріалів.

2.1. Загальна характеристика методів аналізу матеріалів.

До сучасних конструкційних матеріалів ставляться певні вимоги щодо їх властивостей. Достатньо повну та надійну інформацію про властивості металів та полімерів, про зміну їхніх властивостей внаслідок зміни хімічного складу, структури та обробки дає матеріалознавство, використовуючи різноманітні методи досліджень. Усі відомі методи досліджень можна поділити на дві групи:

- методи прямого дослідження властивостей матеріалів;
- методи посередніх або непрямих досліджень.

До першої групи методів дослідження відносять велику кількість металів, з допомогою яких можна безпосередньо спостерігати структуру матеріалів, визначати їхні механічні властивості, окремі фізичні (теплове розширення, густина, інші) та хімічні властивості (стійкість проти корозії, електрохімічні потенціали тощо).

Методи дослідження другої групи ґрунтуються на існуванні зв'язку між внутрішньою будовою матеріалів та їх фізико-хімічними та технологічними властивостями. Вони дозволяють посередньо, але досить надійно судити про перетворення, які відбуваються в досліджуваному матеріалі при його обробці способом дослідження та аналізу електроопору, намагніченості, коефіцієнта теплового розширення, інше.

Проте такий поділ методів дослідження досить умовний. Так, мікроаналіз можна віднести до методів прямого дослідження, але в той же час і до посередніх, оскільки з допомогою вивчення внутрішньої будови можна вказати, в якому напрямку змінюються механічні, фізичні або хімічні властивості при тих чи інших змінах у структурі матеріалу, прогнозувати експлуатаційні характеристики деталей, виготовлених з таких матеріалів. Наприклад, утворення значної кількості масивних частинок карбідів у сталях, що добре спостерігається під мікроскопом, понижує в'язкість сталі, підвищує її крихкість; одержання у сталях більш дрібного зерна у внутрішній будові дає змогу значно підвищити опір крихкого руйнування.

У той же час фізичні й хімічні методи досліджень дають можливість судити про структурні перетворення, які відбуваються в металах та їхніх сплавах і суттєво доповнюють дані структурних досліджень.

Визначаючи фізико-хімічні властивості матеріалів, необхідні для певних умов використання, слід пам'ятати, що для надійної експлуатації цих матеріалів у вузлах механізмів та машин необхідно враховувати особливості способів їхнього одержання та обробки. Отже, визначення технологічних властивостей конструкційних матеріалів повинно бути теж у комплексі методів дослідження властивостей.

2.2. Макроаналіз

Макроаналіз, або макроструктурний аналіз, полягає у вивченні будови металу неозброєним оком або при незначних збільшеннях (до $\times 30$). Таке збільшення, наприклад з допомогою звичайної лупи, дає змогу одночасово спостерігати значну поверхню заготовки й судити про якість металу, визначати умови обробки, які впливають на суцільність металу, особливості його будови, тверднення тощо.

Макроаналізом можна досліджувати не лише поверхню зразка, але і його злам, який може бути досить різним за формою, видом та здатністю до відбивання світла. Тому аналіз зламу встановлює як особливості будови, так і причини крихкого чи в'язкого руйнування зразка, способи його виробництва, види термічної обробки, інше. Саме аналіз зламу зразка найповніше характеризує поведінку металу при його руйнуванні. За цією ознакою розрізняють такі види зламів:

а) *зернистий, або кристалічний*, який спостерігається при крихкому руйнуванні сталей з заниженою в'язкістю (рис. 2.1, а);

б) *матовий, або волокнистий*, характерний для в'язкого руйнування, якому передувала значна пластична деформація (рис. 2.1, б - зерна в цьому випадку не видно);

в) *змішаний*, тобто в будові на одних ділянках добре видно зерно кристалів, на інших - злам волокнистий (рис. 2.1, в);

г) *із флокенами*, які на зламі мають вигляд специфічних білих плям та утворюються при твердненні сталей із значною кількістю розчиненого водню (рис. 2.1, г).

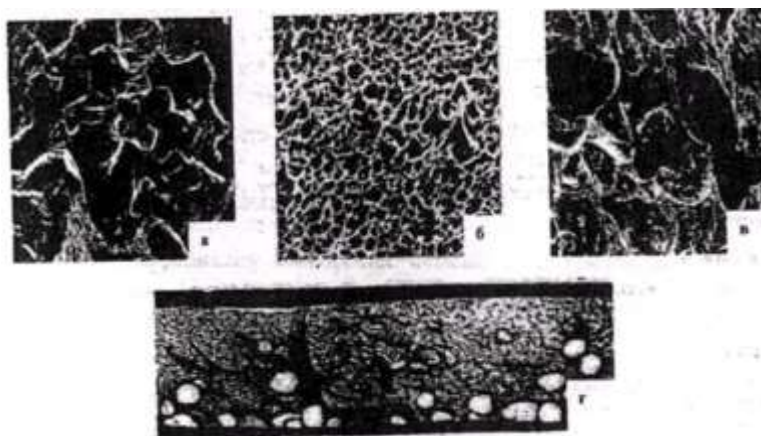


Рис. 2.1. Різні види зламів металів : зернистий (а), матовий (б), змішаний (в), з флокенами (г)

Окрім цього, макроаналіз зламу виявляє глибину закаленого чи цементованого шару, міжкристалітні прошарки, тріщини.

Структуру та дефекти макроструктури можна виявляти й після попереднього травлення хімічними реактивами поверхні спеціально вирізаних із заготовок *темплетів*. Темплети вирізають у напрямку, перпендикулярному до поздовжньої вісі злитків, виливок, кованих та катаних заготовок.

Для виявлення особливостей і дефектів макроструктури різних марок сталі й сплавів розроблена значна кількість реактивів. Так, відомо, що найбільш ефективним травником для макроаналізу більшості марок сталей є 50%-й розчин соляної кислоти при 60-80 °С. Темплети травлять 5-45 хв. до чіткого виявлення макроструктури, старанно промивають та висушують. Для дослідження макроструктури стійких до корозії, термостійких та інших аустенітних сталей найчастіше використовують травники, наведені в табл.2.1

Таблиця 2.1.

Травники для макроаналізу сталей

Реактив 1

Соляна кислота(концентрована)	50 мл
Азотна кислота(концентрована)	5 мл
Вода	50 мл

Реактив 2

Азотна кислота (густина 1,4 г/см ³)	1
Соляна кислота (густина 1,19 г/см ³)	1
Вода	

Реактив 3

Соляна кислота(концентрована)	1 л
Азотна кислота(концентрована)	1 л
Вода	1 л
Хромпик (K ₂ Cr ₂ O ₇)	110-115 г

Реактив 4

Соляна кислота (густина 1,17 г/см ³)	500 мл
Сірчана кислота (густина 1.18 г/см ³)	35 мл
Мідний купорос	150 г

Реактив 5

Соляна кислота (густина 1,17 г/см ³)	1 мл
Спирт етиловий	100 мл
Хлорна мідь (CuCl ₂ ·H ₂ O)	2 г

Розчин 4 використовують також для вивчення макроструктури феритних сталей.

Макроаналіз широко використовується для виявлення неоднорідності хімічного складу металу - *ліквації*. Макроаналіз дає повну картину розташування таких шкідливих домішок у сталі, як сірка та фосфор, хоча не дозволяє провести їх кількісну оцінку. Так, для виявлення ліквації сірки на добре відполіровану поверхню темплета поміщають фотографічний

бромсрібний папір, попередньо вимочений у 5%-му розчині H_2SO_4 . Після витримки 10-30 хв. фотопапір промивається водою, фіксується в розчині гіпосульфїту, ще раз промивається та висушується. Ділянки металу, що мали підвищений вміст сірки, матимуть темніше забарвлення. Для виявлення розміщення волокон у заготовці, які можуть повторювати її конфігурацію (рис. 2.2,а), але можуть бути й перерізними при виготовленні деталі (рис. 2.2,б), використовують реактив 1 при температурі близько 90 °С.

Для виявлення цементованого шару металу застосовують реактив 5, у якому цементований шар покривається тонким нальотом міді червоного кольору. Виявити глибину поверхневого шару, підданого цементації, чи вивчити однорідність сталі після загартування можна, протравивши темплет у 50%-му розчині соляної кислоти, внаслідок чого загартований шар матиме більш темне зафарбування.

Для макроаналізу кольорових металів та сплавів використовують травники, подані в табл. 2.2.

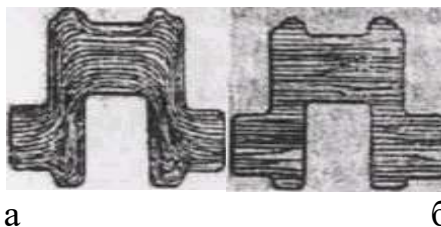


Рис. 2.2. Макроструктура деталі, виготовленої куванням (а) та вирізаної (б).

Таблиця 2.2.

Травники для макроаналізу кольорових металів

Мідні сплави

- 1) 10-20% водний розчин персульфату амонію;
- 2) 10% розчин перекису водню в насиченому водному розчині аміаку;
- 3) розчин хлорного заліза (10 г) та соляної кислоти (30 мл) у воді (120 мл).

Алюмінієво-мідні сплави

10-15% водний розчин їдкого натрію (при цьому утворюється плівка, яку після промивання у воді слід розчинити у 50%-му розчині азотної кислоти з наступною промивкою водою).

Дюралюміні

Соляна кислота - 40 мл, азотна кислота - 40 мл. плавикова кислота - 10 мл, вода - 150 мл (реактив діє дуже швидко, після травлення обов'язкове промивання проточною водою та висушування).

Нікелеві сплави

Хлорне залізо - 10 г, соляна кислота-30 мл, вода-120 мл.

2.3. Мікроаналіз оптичний, електронна мікроскопія, рентгеноспектральний аналіз

Мікроаналіз — це дослідження мікроструктури металів і сплавів при збільшеннях $\times 50-200\ 000$. Для цих досліджень використовуються як оптичні мікроскопи, з допомогою яких досліджують нетравлені зразки при збільшеннях $\times 50-200$ і травлені - при збільшеннях $\times 250-1000$, так і електронні

мікроскопи, котрі забезпечують значні збільшення (до 200 000^x) при високій роздільній здатності. Дослідження структури металів методом оптичної мікроскопії запровадив П.П. Аносов 1831 року, після чого цей метод набув широкого використання для вивчення будови металів і для технічного контролю їхньої якості в промисловості.

Об'єктом дослідження слугують шліфи, які готують спеціальним чином із виробів, про які необхідно мати інформацію.

2.3.1. Підготовка зразків для мікроаналізу.

Для приготування шліфів обов'язково застосовують:

- абразивне шліфування із застосуванням абразивних матеріалів зерен різних розмірів;
- полірування, як правило, механічне та електролітичне.

Абразивне шліфування проводять як вручну, так із застосуванням спеціальних шліфувальних верстатів, використовуючи різні абразивні матеріали: шліфувальні камені, бруски, шліфувальний папір. Механічне полірування теж може бути ручним та автоматизованим, а для його виконання використовують м'які тканини (сукно, фетр, шовк та інші), зволожені поліровочними сумішами абразивних матеріалів (оксиди хрому, алюмінію, магнію) з водою. Електролітичне полірування забезпечує гладеньку та блискучу поверхню шліфів у випадку анодного розчинення виступів мікрорельєфу зразка. Для цього відшліфований зразок вмикають у коло постійного струму анодом (подають «+» потенціал) та занурюють в електролізну ванну, заповнену електролітом. Катодом слугує мідна, свинцева пластина або із сталі, стійкої до корозії. Для кожної пари метал-електроліт підбираються оптимальні режими обробки: температура, густина струму, час, склад електроліту.

Для мікроструктури металів і сплавів характерна величина зерна та його розташування, форма, розмір і кількість різних фаз. Від цих факторів залежать їхні фізико-механічні властивості. Досліджують мікроструктуру матеріалів після хімічного травлення поверхні шліфів з використанням різних реактивів при заданій температурі та протягом певного часу.

Склади деяких травників та їхнє застосування наведені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Травники для мікроаналізу

Склад травника	Застосування і спосіб травлення
Для виявлення мікроструктури сталі	
1. Азотна кислота HNO_3 - 1,5см ³ ; етиловий $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ або метиловий спирт CH_3OH – 100 см ³ .	Для травлення всіх залізовуглецевих сплавів, які різну обробку, добре виявляє перліт. Час травлення від декількох секунд до 1 хв і більше. Для прискорення травлення спирт замінюють дистильованою водою, для уповільнення – гліцерином.

2. Азотна кислота HNO_3 - 4 см; аміловий спирт – $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$ – 100 см ³ .	Для травлення сталей після термічної обробки, аустеніт зафарбовується у жовтуватий колір, сорбіт і троостит в коричневий.
3. Пікринова кислота $\text{CH}(\text{NO})\text{OH}$ - 4 г; етиловий або метиловий спирт - 100 см ³ .	Добре виявляє межі феритних зерен або аустеніту в загартованій сталі. Час травлення від декількох секунд до кількох хвилин (підбирається експериментально). Плівку, яка утворюється на поверхні шліфа, знімають поліруванням.
Для виявлення мікроструктури чавунів	
2-2.5%-й розчин азотної кислоти HNO_3 в аліловому спирті.	Виявляє структуру кремнистого та сірого чавунів. Час травлення близько 1 хв.
2-2.5%-й водний розчин пікринової кислоти (98 частин) та азотна кислота (2 частини).	Застосовується для виявлення перліту. Час травлення від 5 с і більше.
Для виявлення мікроструктури міді та її сплавів	
25%-й аміак - 1 частина, 3%-й перекис водню - 1 частина.	Найефективніше втирати ватним тампоном протягом 5-15 с, а утворену плівку розчинити слабким розчином хлорного заліза.
Хлорне залізо - 5г, соляна кислота - 15 см ³ , вода-50 (100) см ³ .	Занурити в реактив та періодично протирати тампоном.
Для виявлення мікроструктури алюмінію та його сплавів	
5-20%-й розчин NaOH у воді чи метиловому спирті.	Добре виявляє межі зерен, присутні фази зафарбовує у різні кольори. Час травлення 0,5-1 хв. Температура 20-70 °С.

2.3.1. Застосування оптичних мікроскопів для вивчення мікроструктури конструкційних матеріалів.

Найбільш поширені оптичні мікроскопи для металографічних досліджень — це МІМ—7, МІМ—8, ММІ—2, ММР—2, МБС, «Неофот—2» та інші, з допомогою яких можна одержувати збільшення від 10^x до 1440^x . Такі збільшення дають змогу спостерігати елементи структури розміром не менше 0,2 мкм, що в більшості випадків достатньо для визначення розмірів багатьох фаз, котрі присутні у сплавах. Вибір збільшення мікроскопа підбирається, виходячи з конкретних потреб дослідження. Як правило, мікроаналіз проводять спочатку при незначних збільшеннях, а потім залежно від розмірів структурних фаз величину збільшення можна регулювати.

Значних збільшень з допомогою оптичних мікроскопів можна досягти, використовуючи світло малої довжини хвилі (< 390 нм), тобто

використовуючи спеціальні лампи освітлення або світлофільтри.

В металургії часто використовують оптичні мікроскопи спеціального призначення: *поляризаційні мікроскопи*, що дозволяють розглядати об'єкти в поляризованому світлі; *люмінесцентні* — для дослідження об'єктів, що мають здатність до люмінесценції; *інтерференційні*, які використовують методи, що ґрунтуються на інтерференції світла, та інші.

2.3.2. Електронна мікроскопія.

Для вивчення деталей структури сплавів та дефектів їхньої структури при значних збільшеннях застосовують електронні мікроскопи. Використання електронних променів, які володіють малою довжиною хвилі, дозволяє значно поліпшити роздільну здатність, збільшити глибину різкості.

Електронний мікроскоп складається із джерела електронів, у якому відбувається емісія електронів та надається їм висока швидкість за рахунок прикладання різниці потенціалів. Залежно від системи формування електронного пучка мікроскопи можуть бути магнітними, електростатичними чи змішаними (електромагнітними). Проекційна та об'єктивна лінзи електронного мікроскопа відіграють таку ж роль, як об'єктив та окуляр в оптичному. Фокусувальна дія лінз в електронному мікроскопі створюється внаслідок взаємодії електронів з магнітним полем. Це дає можливість зменшувати фокусну відстань, при цьому зростає збільшення, зменшуються спотворення. Потім пучок електронів попадає на об'єкт дослідження.

Залежно від метода дослідження розрізняють такі конструкції мікроскопів;

а) *просвічуючі*, в яких потік електронів проходить через зразок, а зображення є результатом різною розсіяння електронів на об'єкті;

б) *відбивні*, у яких зображення утворюються електронами, відбитими від поверхні зразка;

в) *емісійні*, в яких зображення утворюється від поверхні, що світиться під дією електронів;

г) *растрові*, де зображення створюється за рахунок вторинної емісії електронів, що випромінюються поверхнею, на яку палає потік первинних електронів.

З допомогою електронних мікроскопів можна спостерігати дефекти кристалічної ґратки, бачити окремі атоми. З їхньою допомогою одержана значна кількість даних, які поглиблюють та розширюють відомості про особливості тонкої структури матеріалів. Цим методом одержані унікальні дані про структуру сплавів, що старіють, про дисперсні структури ізотермічного перетворення переохолодженого аустеніту, інше.

2.3.4. Метод мікрорентгеноспектрального аналізу.

Властивості різних матеріалів залежать не тільки від структури, але й від однорідності хімічного складу. Для проведення хімічного аналізу елементів від бору до урану, окрім кисню та фтору, застосовують

мікроаналізатори типу MAP-2. «Sameba» та інші, основний принцип роботи яких полягає в тому, що потік електронів, створений електронною «гарматою», після взаємодії з досліджуваною поверхнею, викликає характеристичне рентгенівське випромінювання. Вимірюючи інтенсивність цього випромінювання, його довжину хвилі та порівнюючи його з еталоном, розраховують концентрацію того чи іншого елемента в досліджуваному зразку. Сучасні установки такого типу оснащені ЕОМ й автоматично видають цифрову інформацію на монітор чи записують у певні файли.

Розділ 3. ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

3.1. Критерії вибору матеріалу

Властивість - це кількісна або якісна характеристика матеріалу, що визначає його подібність або відмінність з іншими матеріалами.

Виділяють три основні групи властивостей: *експлуатаційні, технологічні і вартісні*, які лежать в основі вибору матеріалу, визначають технічну і економічну доцільність його застосування. Основне значення мають експлуатаційні властивості.

Експлуатаційними називають властивості матеріалу, які визначають працездатність деталей машин, приладів або інструментів, їх силові, швидкісні, вартісні і інші техніко-експлуатаційні показники.

Працездатність переважної більшості деталей машин і виробів забезпечує рівень механічних властивостей. *Механічні властивості* характеризують поведінку матеріалу під дією зовнішнього навантаження. Оскільки умови навантаження деталей машин надзвичайно різноманітні, то механічні властивості включають велику групу показників.

Працездатність окремої групи деталей машин залежить не тільки від механічних властивостей, але і від опору дії хімічно активного робочого середовища. Якщо така дія стає значною, то визначальними стають *фізико-хімічні властивості* матеріалу - *жаростійкість і корозійна стійкість*.

Жаростійкість характеризує здатність матеріалу протистояти хімічній корозії, що розвивається в атмосфері сухих газів при підвищеній і високій температурі. У металів нагрівання супроводжується утворенням на поверхні оксидного шару (окалини). Кількісними показниками жаростійкості є:

- *швидкість окиснення*, що оцінює інтенсивність зміни маси металу (у $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) або швидкість росту товщини оксидної плівки на його поверхні (у $\text{мкм}/\text{год}$);
- *допустима робоча температура металу*, при якій швидкість його окиснення не перевищує заданого значення.

Корозійна стійкість - це здатність металу протистояти електрохімічній корозії, яка розвивається за наявності рідкого середовища на поверхні металу і її електрохімічної неоднорідності. Кількісними показниками корозійної стійкості є:

- *швидкість електрохімічної корозії*, що оцінює інтенсивність зміни маси металу (у $\text{г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$) або лінійних розмірів зразка (у $\text{мкм}/\text{год}$);

- *ступінь зміни механічних властивостей* під впливом пошкодження поверхні.

Для деяких деталей машин і виробів важливе значення мають *фізичні властивості*, що характеризують поведінку матеріалів в магнітних, електричних і теплових полях, а також під впливом потоків високої енергії або радіації. Їх прийнято поділяти на магнітні, електричні, теплофізичні і радіаційні.

Серед *технологічних властивостей* головне місце займає *технологічність* матеріалу - його придатність для виготовлення деталей машин, приладів і інструментів необхідної якості при мінімальних трудових витратах. Вона оцінюється оброблюваною різанням, тиском, зварюваністю, здатністю до литва, а також схильністю до деформації і викривлення при термічній обробці. Технологічність матеріалу має важливе значення, оскільки від неї залежать продуктивність і якість виготовлення деталей.

Нарешті, до останньої групи основних властивостей відноситься *вартість матеріалу*, яка оцінює економічність його використання. Її кількісним показником є оптова ціна - вартість одиниці маси матеріалу у вигляді заготовок, прокату, злитків, порошку, за якою завод-виготівник реалізує свою продукцію машинобудівним підприємствам.

3.2. Механічні властивості матеріалів

Механічні властивості характеризують опір матеріалу деформації, руйнуванню або особливість його поведінки в процесі руйнування. Ця група властивостей включає показники міцності, жорсткості (пружності), пластичності, твердості і в'язкості. Основну групу таких показників складають стандартні характеристики механічних властивостей, які визначають в лабораторних умовах на зразках стандартних розмірів. Отримані при таких випробуваннях показники механічних властивостей оцінюють поведінку матеріалів під зовнішнім навантаженням без урахування конструкції деталі і умов їх експлуатації. Додатково визначають показники конструкційної міцності і оцінюють працездатність матеріалу в умови експлуатації.

3.2.1. Механічні властивості, що визначаються при статичних навантаженнях

Статичні випробування передбачають повільне і плавне наростання навантаження, що додається до випробовуваного зразка. За способом прикладення навантажень розрізняють статичні випробування на розтягування стиснення, вигин, кручення, зрушення або зріз. Найбільш поширені випробування на розтяг (ГОСТ 1497 - 84), які дають можливість визначити декілька важливих показників механічних властивостей.

Випробування на розтяг

Результати випробувань на розтягування зразків з площею поперечного перерізу F_{0i} робочою довжиною l_0 розташовують в координатах навантаження - видовження зразка Δl (рис. 3.2). На діаграмі виділяють три ділянки: *пружної деформації* до навантаження $P_{пр}$; *рівномірної пластичної*

деформації від $R_{пр}$ до R_{max} і зосередженої пластичної деформації від R_{max} до R_k . Прямолінійна ділянка зберігається до навантаження, що відповідає межі пропорційності $R_{пц}$. Тангенс кута нахилу прямолінійної ділянки характеризує модуль пружності першого роду E .

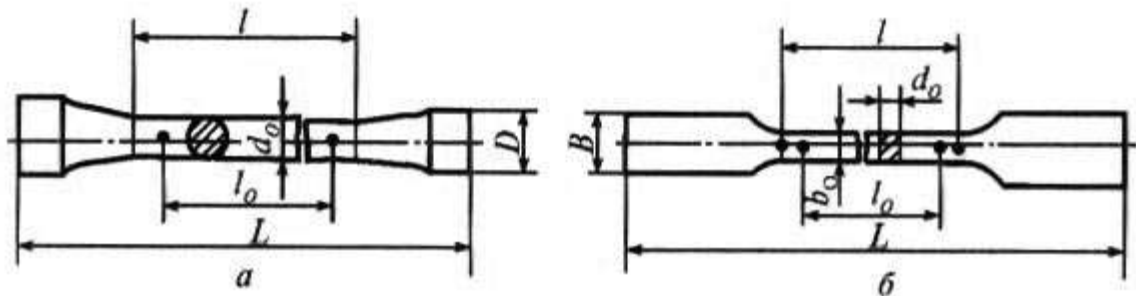


Рис. 3.1. Загальний вигляд стандартних зразків для випробувань на розтяг: а - циліндричний зразок; б — плоский зразок.

На невеликій ділянці від $R_{пц}$ до $R_{пр}$ порушується лінійна залежність між R і Δl із-за пружної недосконалості матеріалу, пов'язаної з дефектами ґратки.

Пластична деформація вище $R_{пр}$ йде при зростаючому навантаженні, оскільки метал в процесі деформації зміцнюється. Зміцнення металу при деформації називається *наклепом*. Наклеп металу збільшується до моменту розриву зразка, хоча розтягуюче навантаження при цьому зменшується від R_{max} до R_k (рис. 3.2, а). Це пояснюється появою в зразку місцевого потоншення - *шийки*, в якій в основному зосереджується пластична деформація. Не дивлячись на зменшення навантаження, розтягуюча напруга в шийці підвищується доти, доки зразок не розірветься. Про це свідчить діаграма напруга - деформація (рис. 3.2, б).

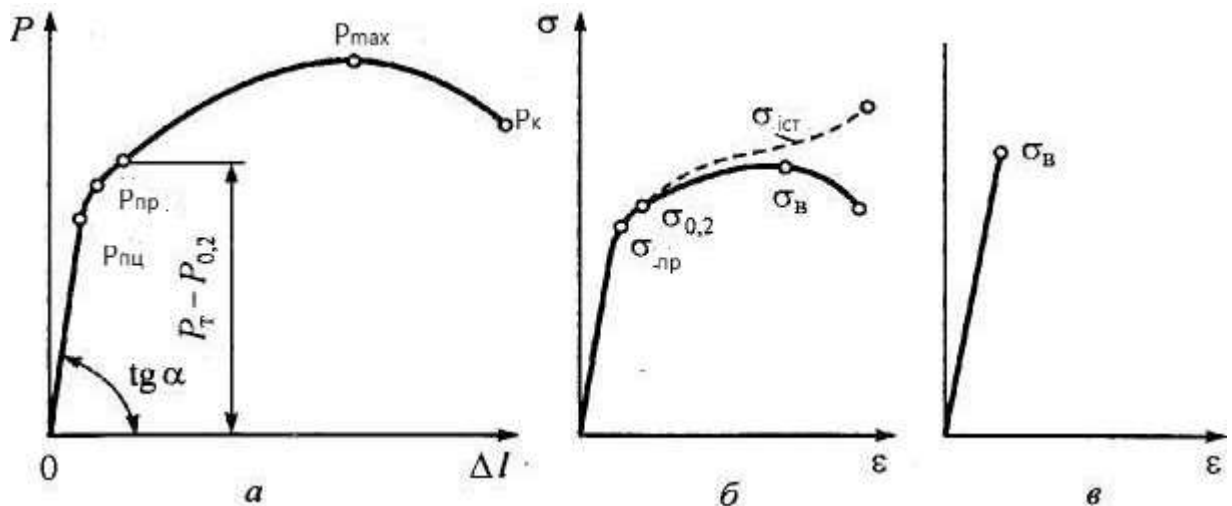


Рис. 3.2. Діаграма розтягу пластичного металу (а) і діаграми умовної напруги пластичного (б) і крихкого (в) металів.

Діаграма дійсної напруги (штрихова лінія) подана для порівняння.

При розтязі зразок подовжується, а його поперечний переріз безперервно зменшується. Дійсна напруга визначається діленням діючого навантаження на площу, яку зразок має у момент вимірювання. Дійсну

напругу зазвичай не визначають, а користуються умовною напругою, вважаючи, що поперечний переріз F_0 зразка залишається незмінним. Напруга $\sigma_{пр}$, σ_T і σ_B - стандартні характеристики міцності. Кожна отримується діленням відповідного навантаження $P_{пр}$, P_T і P_{max} на початкову площу поперечного перерізу F_0 .

Межею пружності $\sigma_{пр}$ називають напругу, при якій пластична деформація досягає заданого значення, встановленого умовами. Зазвичай використовують значення залишкової деформації 0,005; 0,02 і 0,05%. Відповідні межі пружності позначають $\sigma_{0,005}$, $\sigma_{0,02}$, $\sigma_{0,05}$. Межа пружності - важлива характеристика пружинних матеріалів, які використовують для пружних елементів приладів і машин.

Умовна межа текучості - це напруга, якій відповідає пластична деформація 0,2%, її позначають $\sigma_{0,2}$. *Фізичну межу текучості* σ_T визначають за діаграмою розтягу, коли на ній є ділянка текучості. Проте при випробуваннях на розтяг у більшості сплавів ділянки текучості на діаграмах немає. Вибрана пластична деформація 0,2% достатньо точно характеризує перехід від пружних деформацій до пластичних, а напругу $\sigma_{0,2}$ нескладно визначити при випробуваннях незалежно від того, є чи ні ділянка текучості на діаграмі розтягування.

Тимчасовий опір характеризує максимальну несучу здатність матеріалу, його міцність, що передуює руйнуванню

$$\sigma_B = P_{max}/F_0$$

Пластичність характеризується *відносним видовженням* δ і *відносним звуженням* ψ :

$$\delta = \frac{l_k - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad \psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%$$

де l_k - кінцева довжина зразка; l_0 і F_0 - початкова довжина і площа поперечного перерізу зразка; F_k - площа поперечного перерізу в місці розриву.

Допустиму напругу, яку використовують в розрахунках, вибирають менше $\sigma_{0,2}$ (зазвичай в 1,5 раза) або менше σ_B (в 2,4 раза).

Для малопластичних матеріалів випробування на розтяг викликають значні утруднення. Незначні перекося при установці зразка вносять істотну похибку до визначення руйнуючого навантаження. Такі матеріали, як правило, піддають випробуванню на вигин.

Випробування на вигин

При випробуванні на вигин в зразку виникає як розтягуюча, так і стискуюча напруга. З цієї причини вигин - м'якший спосіб навантаження, чим розтягування. На вигин випробовують малопластичні матеріали: чавуни, інструментальні сталі, сталі після поверхневого зміцнення, кераміку. Випробування проводять на зразках великої довжини ($l:h > 10$) циліндричної або прямокутної форми, які встановлюють на дві опори (рис. 3.3). Використовують дві схеми навантаження: *зосередженою силою* (цей спосіб застосовують частіше) і двома симетричними силами (*випробування на*

чистий вигин). Визначуваними характеристиками служать межа міцності і стріла прогинання.

Межу міцності при вигин обчислюють за формулою

$$\sigma = \frac{M}{W},$$

де M - найбільший вигинаючий момент; W - момент опору перерізу, для зразків круглого перерізу $W = \frac{7\pi d^3}{32}$ (де d - діаметр зразка), а для зразків прямокутного перерізу $W = \frac{bh^2}{6}$ (де b і h - ширина і висота).

Для пластичних матеріалів випробування на вигин не застосовують, оскільки зразки згинаються без руйнування до зіткнення обох кінців.

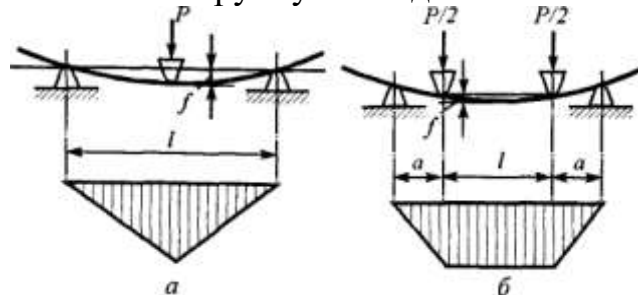


Рис. 3.3. Схема випробувань на зосереджений (а) і чистий (б) вигин зразка).

Випробування на твердість

Під твердістю розуміється здатність матеріалу чинити опір впровадженню в його поверхню твердого тіла - *індентора*. Як індентор використовують загартовану сталеву кульку або алмазний наконечник у вигляді конуса або піраміди. При втискуванні поверхневі шари матеріалу зазнають значної пластичної деформації. Після зняття навантаження на поверхні залишається відбиток. Така пластична деформація протікає в невеликому об'ємі і викликана дією значної дотичної напруги, оскільки поблизу наконечника виникає складний напружений стан, близький до всестороннього стиснення. З цієї причини пластичної деформації зазнають не тільки пластичні, але крихкі матеріали. Отже, твердість характеризує опір матеріалу пластичній деформації. Такий же опір оцінює і межу міцності, при визначенні якої виникає зосереджена деформація в області шийки. Тому для цілого ряду матеріалів чисельні значення твердості і тимчасового опору пропорційні. Відмічена особливість, а також простота вимірювання роблять випробування на твердість одним з найбільш поширених видів механічних випробувань. На практиці широко застосовують чотири методи вимірювання твердості.

Твердість за Брінеллем. При цьому стандартному (ГОСТ 9012-59) методі вимірювання твердості в поверхню зразка вдавлюють загартовану сталеву кульку діаметром 10; 5 або 2,5 мм при дії навантаження від 5000 Н до 30000 Н. Після зняття навантаження на поверхні утворюється відбиток у вигляді сферичної лунки діаметром d (рис. 3.4, а). Діаметр лунки вимірюють лупою, на окулярі якої нанесена шкала з діленнями. Число твердості за Брінеллем $HВ$ визначають шляхом ділення навантаження P на площу

поверхні сферичного відбитку:

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

де D - діаметр вдавлюваної кульки, мм.

Число твердості за Брінеллем за ГОСТ 9012 - 59 записують без одиниць вимірювання.

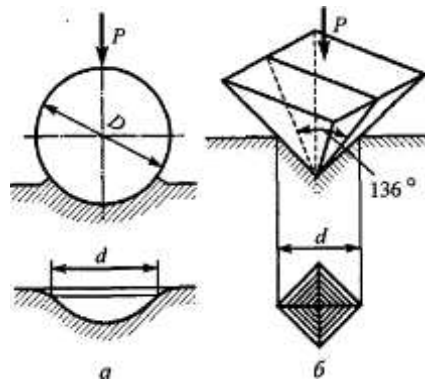


Рис.3.4. Схеми визначення твердості за Брінеллем (а) і Віккерсом (б)

На практиці при вимірюванні твердості розрахунок за вказаною вище формулою не проводять, а використовують наперед складені таблиці, вказуючі значення HB залежно від діаметру відбитка і вибраного навантаження. Чим менший діаметр відбитка, тим вища твердість.

Спосіб вимірювання за Брінеллем не є універсальним. Його використовують для матеріалів малої і середньої твердості: сталей з твердістю < 450 HB, кольорових металів з твердістю < 200 HB і т.п. Для них встановлений кореляційний зв'язок між тимчасовим опором (у МПа) і числом твердості HB: $\sigma_B \approx 3,4$ HB - для гарячекатаних вуглецевих сталей, $\sigma_B \approx 4,5$ HB - для мідних сплавів, $\sigma_B \approx 3,5$ HB - для алюмінієвих сплавів.

Твердість за Віккерсом. При стандартному методі вимірювання твердості за Віккерсом (ГОСТ 2999 - 75) в поверхню зразка вдавлюють чотиригранну алмазну піраміду з кутом при вершині 136° . Отримується квадратний відбиток (рис. 3.4, б), діагональ якого вимірюють після зняття навантаження. Число твердості обчислюють за рівнянням:

$$HV = \frac{2P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,854 \cdot \frac{P}{d^2} \quad (\text{кгс/мм}^2)$$

де P в Н, d в мм. На практиці число твердості визначають за спеціальними таблицями за значенням діагоналі відбитку при вибраному навантаженні.

Метод Віккерса застосовують в основному для матеріалів, що мають високу твердість, а також для випробування на твердість деталей малих перерізів або тонких поверхневих шарів. Як правило, використовують невеликі навантаження: 10, 30, 50, 100, 200, 500 Н. Чим тонший переріз деталі або досліджуваний шар, тим менше вибирають навантаження.

Числа твердості за Віккерсом і Брінеллем для матеріалів, що мають твердість до 450 НВ, практично співпадають.

Твердість за Роквеллом. Цей метод вимірювання твердості (ГОСТ 9013-59) найбільше універсальний і найменше трудомісткий. Тут не потрібно вимірювати розміри відбитку, оскільки число твердості відлічують безпосередньо за шкалою твердоміра. Число твердості залежить від глибини втискування алмазного конуса з кутом при вершині 120° або сталевий кульки діаметром 1,588 мм. Навантаження вибирають залежно від матеріалу наконечника. Для різних комбінацій навантажень і наконечників прилад Роквелла має три вимірювальні шкали: А, В, С. Твердість за Роквеллом позначають цифрами, що визначають рівень твердості, і літерами HR з вказівкою шкали твердості, наприклад: 70 HRA, 58 HRC, 50 HRB.

Шкала А (наконечник - алмазний конус, загальне навантаження 600 Н). Цю шкалу застосовують для особливо твердих матеріалів, для тонких листових матеріалів або тонких (0,5 - 1,0 мм) шарів. Виміряну твердість позначають HRA. Межі вимірювання твердості за цією шкалою 70 - 85.

Шкала В (наконечник - сталевий кулька, загальне навантаження 1000 Н). За цією шкалою визначають твердість порівняно м'яких матеріалів (< 400 НВ). Межі вимірювання твердості за шкалою В 25 - 100.

Числа твердості за Роквеллом не мають точних співвідношень з числами твердості за Брінеллем і Віккерсом.

Шкала С (наконечник - алмазний конус, загальне навантаження 1500 Н). Цю шкалу використовують для твердих матеріалів (> 450 НВ), наприклад загартованих сталей. Виміряну твердість позначають HRC. Межі вимірювання твердості за цією шкалою 20 - 67.

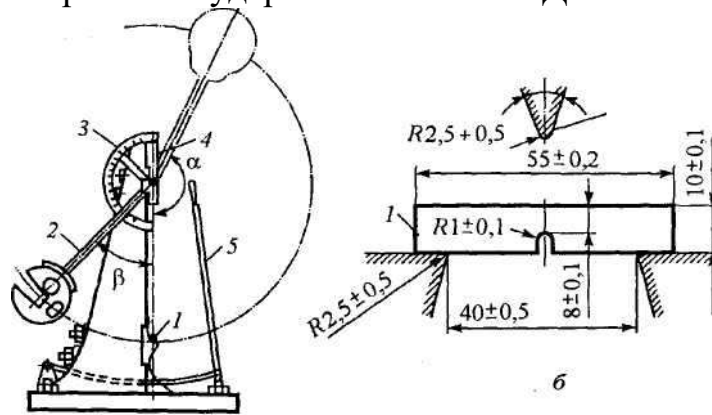
Мікротвердість. Метод стандартизований (ГОСТ 9450-76). Мікротвердість визначають втискуванням в поверхню зразка алмазної піраміди при невеликих навантаженнях (0,05 - 5 Н) і вимірюванням діагонали відбитку. Число твердості Н визначають за тією ж формулою, що і числа твердості за Віккерсом. Методом визначення мікротвердості оцінюють твердість окремих зерен, структурних складових, тонких шарів або тонких деталей.

3.2.2. Механічні властивості, що визначаються при динамічних навантаженнях

При роботі деталей машин можливі динамічні навантаження, при яких багато металів проявляють схильність до руйнування. Небезпеку руйнування підсилюють надрізи - концентратори напруги. Для оцінки схильності металу до руйнування під впливом цих чинників проводять динамічні випробування на ударний вигин на маятникових копрах (рис. 3.5). Стандартний зразок встановлюють на дві опори і посередині завдають удару, що приводить до руйнування зразка. За шкалою маятникового копра визначають роботу К, витрачену на руйнування, і розраховують основну характеристику, що отримується в результаті цих випробувань - ударну в'язкість:

$$KC = K/S',$$

де S'_0 - площа поперечного перерізу зразка в місці надрізу.
 Одиниця вимірювання ударної в'язкості - МДж/м².



Мал. 3.5. Схема маятнікового копра (а) і випробування під удар (б):
 1 - зразок; 2 - маятник; 3 - шкала; 4 - стрілки шкали; 5 - гальмо

Відповідно до ГОСТ 9454-78 передбачені випробування зразків з концентратором напруг трьох видів: U-подібним (радіус надрізу $r=1$ мм); V-подібним ($r = 0,25$ мм) і Т-подібним (тріщина втоми, створена в основі надрізу). Відповідно ударну в'язкість позначають KCU , KCV , KCT .

Основним критерієм ударної в'язкості є KCU . Вона складається з двох складових:

$$KCU = KC_3 + KC_p,$$

де KC_3 - робота зародження тріщини; $KC_p \approx KCT$ - робота розповсюдження тріщини. Чим гостріший надріз, тим менше KC_3 . Критерій KCT є критерієм тріщиностійкості, що характеризує опір матеріалу поширенню тріщини.

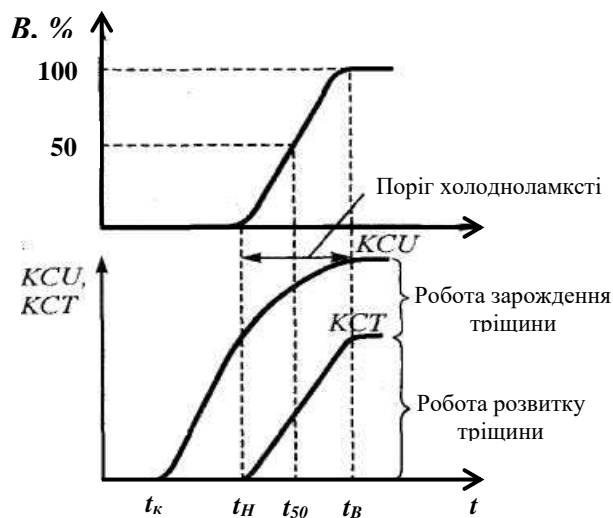


Рис. 3.6. Вплив температури випробування на відсоток в'язкої складової в зламі (В) і ударну в'язкість матеріалу KCU , KCT

Ударна в'язкість зі всіх характеристик механічних властивостей найбільш чутлива до зниження температури. Тому випробування на ударну в'язкість при знижених температурах використовують для визначення порогу холодноламкості - температури або інтервалу температур, в якому

відбувається зниження ударної в'язкості. *Холодноламкість* -властивість металевого матеріалу втрачати в'язкість, крихко руйнуватися при пониженні температури. Холодноламкість виявляється у заліза, сталі, металів і сплавів, що мають ОЦК або ГК гратку. Вона відсутня у металів з ГЦК гратками.

На перехід від в'язкого руйнування до крихкого вказують зміни будови зламу і різке зниження ударної в'язкості (рис. 3.6) в інтервалі температур ($t_B - t_K$) (граничні значення температур в'язкого і крихкого руйнування). Будава зламу змінюється від волокнистого матового при в'язкому руйнуванні ($t > t_B$) до кристалічного блискучого при крихкому руйнуванні ($t < t_K$). Поріг холодноламкості позначають інтервалом температур ($t_B - t_H$), або однією температурою t_{50} , при якій в зламі зразка є 50% волокнистої складової і *КСТ* знижується наполовину.

3.2.3. Механічні властивості, що визначаються при змінних (циклічних) навантаженнях

Багато деталей машин (вали, шатуни, зубчаті колеса) зазнають під час роботи циклічних навантажень, що повторюються.

Цикл напруги - сукупність зміни напруги між двома його граничними значеннями σ_{\max} і σ_{\min} протягом періоду T . При експериментальному дослідженні опору втомі матеріалу за основний приймається синусоїдальний цикл зміни напруги (рис. 3.7). Він характеризується коефіцієнтом асиметрії циклу $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$; амплітудою напруги $\sigma_a = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) / 2$; середньою напругою циклу $\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2$.

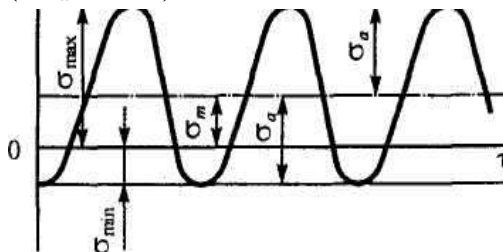


Рис.3.7. Синусоїдальний цикл зміни напруги

Розрізняють симетричні цикли ($R = -1$) і асиметричні (R змінюється в широких межах). Різні види циклів характеризують різні режими роботи деталей машин.

Процеси поступового накопичення пошкоджень в матеріалі під впливом циклічних навантажень, що приводять до зміни його властивостей, утворення тріщин, їх розвитку і руйнування, називають *втомою*, властивість протистояти втомі — *витривалістю* (ГОСТ 23207- 78).

Руйнування від втоми в порівнянні з руйнуванням від статичного навантаження має ряд особливостей.

1. Воно відбувається при напрузі, меншій, ніж при статичному навантаженні (менших межі текучості або тимчасового опору).
2. Руйнування починається на поверхні (або поблизу від неї) локально, в

місцях концентрації напруги (деформації). Локальну концентрацію напруги створюють пошкодження поверхні в результаті циклічного навантаження або надрізи у вигляді слідів обробки, дії середовища.

3. Руйнування протікає в кілька стадій, що характеризують процеси накопичення пошкоджень в матеріалі, утворення тріщин втоми, поступовий розвиток і злиття деяких з них в одну магістральну тріщину і швидке остаточне руйнування.
4. Руйнування має характерну будова зламу, що відображає послідовність процесів втоми. Злам складається з *осередку руйнування* (місця утворення мікротріщин) і двох зон – *втоми* і *долому* (рис. 3.8). Осередок руйнування примикає до поверхні і має невеликі розміри і гладку поверхню. Зону втоми формує послідовний розвиток тріщини втоми. У цій зоні видно характерні борозенки, які мають конфігурацію кілець, що свідчить про стрибкоподібне просування тріщини втоми. Зона втоми розвивається доти, доки в робочому перерізі, що зменшується, напруги зростуть настільки, що викличуть його миттєве руйнування. Цю останню стадію руйнування характеризує зона долома.

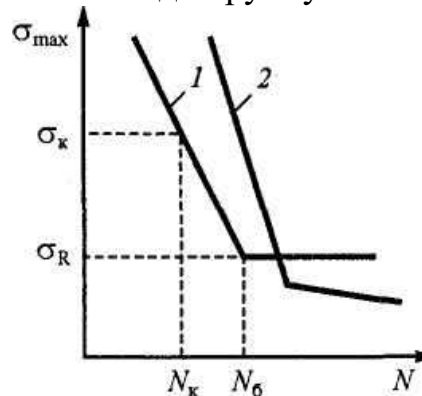


Рис.3.8. Криві втоми

Про здатність матеріалу працювати в умовах циклічного навантаження судять за результатами *випробувань зразків на втоми* (ГОСТ 25.502-79). Їх проводять на спеціальних машинах, що створюють в зразках багатократне навантаження (розтягування-стиснення, вигин, кручення). Зразки (не менше 15 шт.) випробовують послідовно на різних рівнях напруги, визначаючи число циклів до руйнування. Результати випробувань зображають у вигляді кривої втоми, яка в координатах: максимальна напруга циклу σ_{\max} (або σ_a) - число циклів навантажень N складається з ділянок прямих ліній (рис. 3.8). Горизонтальну ділянку визначає напруга, яка не викликає втомного руйнування після необмежено великого або заданого (базового N_σ) числа циклів. Ця напруга являє *фізичну межу витривалості* σ_R (R - коефіцієнт асиметрії циклу), при симетричному циклі σ_{-1} . Похилу ділянку кривої втоми характеризує *обмежена межа витривалості*, рівна напрузі σ_K , яку може витримати матеріал протягом певного числа циклів (N_K).

Криві з горизонтальною ділянкою типові для сталей при невисоких температурах випробувань (крива 1). *Криві без горизонтальної ділянки* (крива 2 на рис. 3.8) характерні для кольорових металів, а також для всіх

матеріалів, що працюють при високих температурах або в корозійному середовищі. Такі матеріали мають тільки обмежену межу витривалості.

Криві втоми дозволяють визначити наступні критерії витривалості:

1) *циклічну міцність* - фізичну чи обмежену межу витривалості. Вона характеризує несучу здатність матеріалу, тобто ту найбільшу напругу, яку він здатний витримати за певний час роботи;

2) *циклічну довговічність* - число циклів (чи експлуатаційних годин), які витримує матеріал до утворення втомної тріщини певної протяжності або до втомного руйнування при заданій напрузі.

Криві витривалості в області обмеженої довговічності визначають на основі статистичної обробки результатів випробувань. Це пов'язано із значним розкидом довговічності із-за її високої чутливості до стану поверхні зразків.

Окрім визначення розглянутих вище критеріїв багатоциклової витривалості, для деяких спеціальних випадків застосовують випробування на *малоциклову втому*. Їх проводять при високій напрузі (вище $\sigma_{0,2}$) і малій частоті навантаження (звичайно не більше 5 Гц). Ці випробування імітують умови роботи конструкцій (наприклад, літакових), які сприймають не постійні, але значні циклічні навантаження. База таких випробувань не перевищує $5 \cdot 10^4$ циклів, тому малоциклову втому матеріалу характеризує ліва верхня гілка кривої втоми (див. рис. 3.8).

Додаткові критерії витривалості. З них найбільш важливе значення має *живучість*, яка визначається швидкістю росту тріщини втоми (ШРТВ). Живучість характеризує здатність матеріалу працювати в пошкодженому стані після утворення тріщини. При високій живучості можна своєчасно шляхом дефектоскопії виявити тріщину, замінити деталь і забезпечити безаварійну роботу конструкції.

Довговічність полімерів

Полімери при тривалій дії навантаження руйнуються при напрузі, значно меншій, ніж межа міцності при поступовому навантаженні матеріалу. Це означає, що опір розриву залежить від тривалості дії навантаження. Часова залежність міцності - *статична втома матеріалу*. Основна характеристика - *довговічність* τ - час від моменту прикладання навантаження до моменту розриву матеріалу. Залежність довговічності полімерів від руйнуючої напруги може бути описана рівнянням:

$$\tau = A \cdot e^{-a\sigma}$$

Лінійний графік цього зображено на рис.3.9

Чим нижче температура, тим більше тангенс кута нахилу прямої. На підставі експериментальних даних для багатьох матеріалів Журков вивів рівняння (рівняння Журкова), що зв'язує руйнуючу напругу, довговічність полімеру, що знаходиться під навантаженням, і абсолютну температуру T:

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right)$$

де U_0 , γ , τ_0 , - параметри, що визначають властивості міцності полімерного матеріалу:

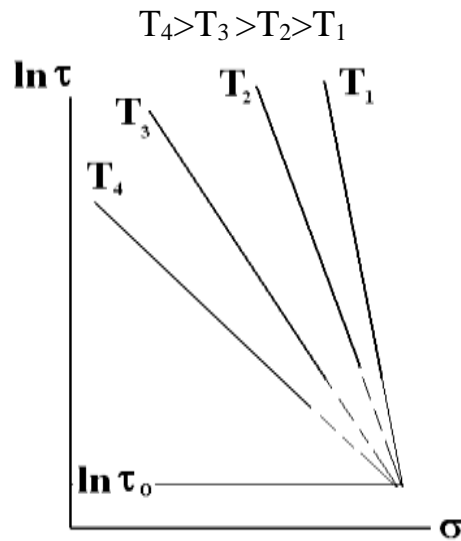


Рис. 3.9. Залежність довговічності полімерів від руйнуючої напруги.

Довговічність однаковим чином залежить від температури T і прикладеної напруги σ . *Флуктуації* теплової (внутрішньої) енергії концентрують надлишок енергії на деяких зв'язках молекули і вони руйнуються. *Прикладена напруга* направляє флуктуації енергії і знижує енергію активації розриву зв'язку ΔU . Добуток $\sigma\gamma$ - величина енергії, на яку знижується потенціальний бар'єр розриву зв'язку під дією напруги σ .

Структурний коефіцієнт γ визначає ефективність дії напруги. Чим більше мікронеоднорідностей в полімері, що відіграють роль концентраторів напруги, тим більше γ , тим ефективніше напруга. U_0 - енергія активації руйнування ненапруженого полімеру. Вона повинна бути близька до $E_{акт}$ - термодеструкції полімеру.

Таблиця 3.1

Енергія активації руйнування ненапруженого полімеру та термодеструкції полімеру.

Полімер	U_0 , кДж/моль	$E_{акт}$ термодеструкції, кДж/моль
Поліетилен	104	88 – 104
Триацетат целюлози	205	188
Полікапроамід	188	180
Нітрат целюлози	159	159
Поліметилметакрилат	130	125

3.3. Фізичні властивості матеріалів

Найбільш важливими фізичними властивостями, значення яких враховують при практичному використанні матеріалів, є теплоємність,

теплопровідність, теплове розширення, електропровідність. За особливі магнітні властивості заліза, нікелю, кобальту і їх сплавів, а також феритів, їх виділили в окрему групу матеріалів - ферро- і феррімагнетики.

Фізичні властивості визначаються типом міжатомних і міжмолекулярних зв'язків, хімічним складом матеріалів, температурою і тиском. Для більшості процесів обробки матеріалів тиску не перевищують 500 МПа. Такий тиск практично не впливає на значення фізичних властивостей. Розрізняють залежні і незалежні від структури матеріалу фізичні властивості. Значення останніх визначаються тільки хімічним складом матеріалу і температурою.

При нагріванні фізичні властивості змінюються нелінійно. Приблизно вони характеризуються відповідними температурними коефіцієнтами. Наприклад, питомий електричний опір r при нагріванні на ΔT визначається залежністю

$$\rho_T = \rho_0 (1 + \beta \Delta T),$$

де ρ_0, ρ_T - питомий електроопір на нижній і верхній межі інтервалу температур ΔT ; β - температурний коефіцієнт. Оскільки значення температурних коефіцієнтів малі, то аналогічні лінійні залежності властивостей від температури застосовні в широких інтервалах температур з достатньою для практичних цілей точністю.

Густина істотно залежить від типу міжатомного зв'язку. Максимальну густину мають матеріали з ненаправленими металевими або іонними зв'язками. Направлений ковалентний зв'язок зумовлює менш щільне розташування атомів.

У металів густина змінюється від 22,5 г/см³ у осмію до 0,534 г/см³ у літію. Легування сплаву важкими елементами, ніж основа збільшує, а більш легкими - зменшує його густину. Пористість зменшує густину. Для порошкових сплавів і інших пористих матеріалів вона є одним з критеріїв якості. Пористість оцінюють за фактичною густиною матеріалу і визначають методом гідростатичного зважування або іншими способами.

Зменшення витрати конструкційних матеріалів і зниження маси металоконструкцій і машин є тенденцією сучасного машинобудування. Чим менша щільність матеріалів, тим нижчі динамічні навантаження на деталі і менші витрати енергії на експлуатацію машини.

Для матеріалів введено поняття питомої міцності $\sigma_B/\gamma \cdot g$ та питомої жорсткості $E/\gamma \cdot g$. За цими характеристиками перше місце займають композиційні матеріали, а сплави алюмінію (дуралюміні) не поступаються міцнішим легованим конструкційним сталям.

При нагріванні густина матеріалів зменшується внаслідок теплового розширення.

Теплове розширення - це зміна об'єму (лінійних розмірів тіла) при підвищенні температури при постійному тиску. У основі теплового розширення лежить несиметричність теплових коливань атомів, тому при підвищенні температури збільшуються середні міжатомні відстані.

Для практичних цілей користуються середніми значеннями коефіцієнтів об'ємного і лінійного розширення:

$$\alpha_v = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad \alpha_l = \frac{1}{l} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T},$$

де V , l - об'єм і довжина зразка відповідно; ΔV , Δl - зміна об'єму і довжини при підвищенні температури на ΔT . У загальному випадку

$$\beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3,$$

де α_1 , α_2 и α_3 - відповідно коефіцієнти лінійного розширення за трьома осями симетрії кристала (табл. 3.2).

Таблиця 3.2.

Значення коефіцієнта лінійного розширення $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$

Матеріали	α_1	α_2	α_3
Be	8,6	11,7	11,7
Графіт	17,2	-1,5	-1,5
Co	16,1	12,6	12,6
Mg	26,4	25,6	25,6
SiO ₂	8,0	14,4	14,4
SiC	12,2	20,9	20,9
Sb	16	7	7
Zr	4,0	13,0	13,0

Для кристалів кубічної системи, а також для скла і інших ізотропних матеріалів з аморфною структурою $\beta = 3\alpha$. У кристалах з низькою симетрією окремі доданки коефіцієнта об'ємного розширення можуть приймати негативні значення. При поляризації атомів і появі далекодіючих складових міжатомної взаємодії коефіцієнт β стає негативним. Наприклад, германій при нагріванні від 15 до 40 К не розширюється, а стискається. Серед полімерів найбільше теплове розширення мають неполярні полімери, у яких сили Ван-дер-Ваальса малі.

Створення текстур в металевих сплавах, орієнтація макромолекул в полімерах відбиваються на значеннях коефіцієнта лінійного розширення: вони істотно розрізняються у напрямі переважної орієнтації і в поперечному напрямі.

Теплове розширення полімерів зменшується при посиленні міжмолекулярного притягання завдяки взаємодії диполів, наявності водневих і хімічних зв'язків між молекулами.

Теплове розширення стекол у міру підвищення вмісту оксидів лужних металів Me₂O зростає від $\alpha = 0,56 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ у кварцового скла до $\alpha < 6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ у так званих твердих стекол і $\alpha > 6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ у так званих м'яких стекол, до яких відноситься велика частина промислових стекол ($\alpha = (6 \dots 9) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$).

Відмінність значень коефіцієнта теплового розширення двох матеріалів, що з'єднуються, є причиною появи значної термічної напруги. Узгодження значень α при з'єднанні стекол з металами необхідне при впаюванні металевих провідників в стекла.

Теплове розширення враховують при розрахунку пресових посадок,

зварюванні і паянні різнорідних матеріалів, виготовленні апаратури з двошарових сталей і її експлуатації, при виборі клеїв і експлуатації машин і приладів в температурних полях, що змінюються. У більшості матеріалів при підвищенні температури коефіцієнти теплового розширення збільшуються. При частих коливаннях температур у виробках і деталях створюються неоднорідні температурні поля і виникає напруга. Робота матеріалу при підвищених температурах і змінній нарузі супроводжується появою тріщин і руйнуванням навіть, якщо ці матеріали є високопластичними. Найбільш стійкі до термічної втоми і руйнування при термічних ударах матеріали, в яких мале теплове розширення поєднується з високою теплопровідністю.

Теплопровідністю називається перенесення енергії у формі теплоти в твердих тілах, рідинах і газах при макроскопічній нерухомості середовища. Основним законом передачі тепла в нерухомому середовищі (молекулярною теплопровідністю або кондукцією) є закон Фур'є:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T = -\lambda \frac{dT}{dx},$$

де q - густина теплового потоку, Дж/м²·с; λ - теплопровідність, Вт/(м·К).

Теплопровідність залежить від типу міжатомного зв'язку, температури, хімічного складу і структури матеріалу.

Теплова енергія в твердих тілах переноситься електронами і фононами:

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_\phi.$$

Таблиця 3.3.

Теплопровідність кварцового скла, кварцу, полікристалічних і рідких металів

Матеріал	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$
Кварцове скло	-200	0,93
	-100	1,56
	0	1,90
	100	2,08
Кварц*	-200	39,8/100,3
	-100	17,3/34,5
	0	10,4/19,0
	100	6,9/12,1
Алюміній**	~ 650	85/225
Свинець**	-327	15/31
Цинк**	~ 419	60/93

*У чисельнику - в перпендикулярному, а в знаменнику - в паралельному осі напрямку.

** У чисельнику - в розплавленому, а в знаменнику - в полікристалічному стані.

Механізм передачі енергії в першу чергу визначається типом зв'язку: у металах енергію переносять електрони; у матеріалах з ковалентним або іонним типом зв'язку - фонони. Найбільшу теплопровідність має алмаз. У напівпровідниках при незначній концентрації носіїв заряду теплопровідність здійснюється в основному фононами. Чим досконаліші кристали, тим вища їх теплопровідність. Монокристали краще проводять теплову енергію, чим полікристали, оскільки межі зерен і інші дефекти кристалічної структури

розсіюють фонони і збільшують електроопір.

Кристалічна ґратка створює періодичний енергетичний простір, в якому передача енергії електронами або фононами полегшена в порівнянні з аморфним станом (табл. 3.3).

Чим більше домішок містить метал, дрібніше зерно і більше спотворена кристалічна ґратка, тим менша теплопровідність. Легування вносить спотворення в кристалічні ґратки твердих розчинів і знижує теплопровідність в порівнянні з чистим металом - основою сплаву. Структурні складові, що представляють дисперсні суміші кількох фаз (евтектики, евтектоїди), знижують теплопровідність. Структури з рівномірним розподілом частинок фаз мають меншу теплопровідність, ніж основа сплаву. Граничним видом подібної структури є пористий матеріал. В порівнянні з твердими тілами газу є теплоізоляторами.

Таблиця 3.4.

Фізичні властивості матеріалів з металевим, ковалентним і йонним міжатомним зв'язком

Матеріал	γ , г/см ³	$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	λ , Вт/(м·К)
<i>Металевий зв'язок</i>			
Cu	8,93	16,7	399
Be	1,84	12,8	205
Mg	1,71	25,9	156
Al	2,7	24	236
Ti	4,5	7,5	22
Zr	6,44	6,3	21,4
Fe	7,87	12,1	80
Ni	8,7	14,0	91
<i>Ковалентний зв'язок</i>			
Алмаз	3,52	1,2	1350
Графіт	2,25	8,1	100
SiC	3,22	4,3	100
Si ₃ N ₄	3,19	2,75	17,1
Полівінілхлорид	1,38-1,43	40	0,16
Поліетилен	0,92-0,96	230	0,4
Полістирол	1,05	60	0,16
Полікарбонат	1,2	60-70	0,24
Фторопласт-4	2,14- 2,25	-	0,24
BN	2,29	7,5	15,1
AlN	3,05	4,03	150
<i>Йонний зв'язок</i>			
BeO	2,7-2,86	10,6	152,4
MgO	3,3-3,5	15,6	58,6
Al ₂ O ₃	3,7-3,8	8,4	28,9
SiO ₂	2,3-2,6	0,5	12,6
TiO ₂	4,0-5,1	7,1	34,7
ZrO ₂	5,2-5,35	7,6	1,6

Теплопровідність пористих керамічних і металевих матеріалів незалежно від типу міжатомного зв'язку можна оцінити за формулою

$$\lambda_{\text{пор}} \cong \lambda(1 - p),$$

де λ - теплопровідність непористого матеріалу, Вт/(м·К); p - частка пор в об'ємі пористого матеріалу - пористість.

Графіт має високу теплопровідність. При передачі теплоти паралельно шарам атомів вуглецю базисної площини теплопровідність графіту перевищує теплопровідність міді більш ніж в 2 рази (табл. 3.4).

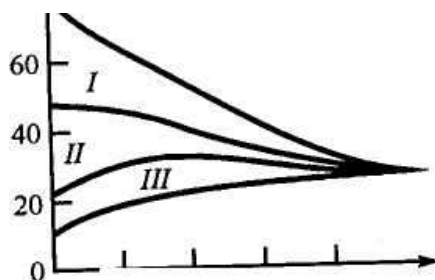


Рис.3.10. Залежність теплопровідності нелегованих (I), низьколегованих (II) і високолегованих (III) сталей від температури

Розгалужені пластини графіту в сірому чавуні мають структуру монокристала, і тому він має високу теплопровідність (50-70 Вт/(м·К)). Високоміцний чавун з кулястим графітом при тій же об'ємній частці графіту має теплопровідність 25...40 Вт/м·К, що майже удвічі менше в порівнянні з сірим чавуном.

При нагріванні теплопровідності сталей різних класів зближуються (Рис. 3.10).

Скло має низьку теплопровідність. Полімерні матеріали погано проводять теплоту, теплопровідність більшості термопластів не перевищує 1,5 Вт/(м·К).

Теплоємність - це здатність речовини поглинати теплоту при нагріванні. Її характеристикою є питома теплоємність - кількість енергії, що поглинається одиницею маси при нагріванні на один градус.

У металевих сплавах питома теплоємність знаходиться в межах 100...2000 Дж/(кг·К). Тугоплавкі метали характеризуються низькими значеннями (134 Дж/(кг·К) у W і 254 Дж/(кг·К) у Мо, а легкі метали, навпаки, високими значеннями теплоємності (896, 1017 і 1750 Дж/(кг·К), у Al, Mg і Be відповідно). У більшості металів теплоємність складає 300-400 Дж/(кг·К). Теплоємність металевих матеріалів росте з підвищенням температури. Полімерні матеріали, як правило, мають питому теплоємність 1000 Дж/(кг·К) і більше.

Електричні властивості матеріалів характеризуються наявністю носіїв зарядів - електронів або іонів - і здатністю їх переміщатися під дією електричного поля.

Високі енергії ковалентного і йонного зв'язку надають матеріалам з цими типами зв'язку властивості діелектрика. Їх слабка електрична

провідність обумовлена впливом домішок, причому під впливом вологи, що створює з домішками провідні розчини, електропровідність таких матеріалів зростає.

Матеріали з різними типами зв'язку мають різні *температурні коефіцієнти електроопору*: у металів він позитивний, у матеріалів з ковалентним і йонним типом зв'язку - негативний. При нагріванні металів концентрація носіїв зарядів - електронів не збільшується, а опір їх руху зростає із-за збільшена амплітуд коливань атомів. У матеріалах з ковалентним або йонним зв'язком при нагріванні концентрація носіїв зарядів підвищується настільки, що нейтралізується вплив перешкод від збільшення коливань атомів. Питомий електроопір таких матеріалів при нагріванні понижуються. Починаючи з $T_{пл}$ концентрація носіїв заряду стає великою, а самі матеріали робляться провідними.

3.4. Хімічні властивості матеріалів

Для характеристики хімічних властивостей металів та їхніх сплавів залежно від складу, структури та обробки визначають насамперед їхню стійкість проти загальної корозії, міжкристалітної корозії та корозійного розтріскування.

При дослідженнях *на загальну корозію* використовують декілька **методів**:

- у рідині при повному зануренні зразка;
- багаторазове занурення в рідину протягом певного часу;
- у киплячому соляному розчині;
- у навколишній атмосфері;
- у парах рідини.

При кожному з досліджень зразки підбираються із значним відношенням площі поверхні до об'єму, а корозійні середовища вибирають, виходячи із бажаного використання майбутньої деталі.

Одержані результати оцінюють кількісно, обчислюючи величину проникнення корозії:

$$П = \frac{v}{\rho} \text{ мм/рік,}$$

де ρ — густина металу, v — швидкість корозії, яку визначають за втратою маси зразка. Корозійну стійкість оцінюють за шкалою у балах (табл. 3.5). Меншим балом характеризуються більш стійкі метали й сплави.

Дослідження **на міжкристалітну корозію** проводять для сталей, стійких проти іржі з аустенітною структурою, які використовуються в агресивних кислотних середовищах. За цих умов експлуатації може проходити корозія вздовж границь зерен у глибину металу.

Для вивчення міжкристалітної корозії можна використати різні хімічні реактиви. Наприклад:

Реактив 1: сірчана кислота H_2SO_4 з доданням 10—20% сірчаноокислої міді $CuSO_4$ — розчин майже не діє на загартовані аустенітні сталі, але

викликає сильну міжкристалітну корозію не стійких до іржі сталей.

Реактив 2: кипляча концентрована азотна кислота HNO_3 — для сталей не стійких до іржі є більш інтенсивним корозійним середовищем.

Ступінь розвитку міжкристалітної корозії оцінюють *якісно* з допомогою мікроскопа, дослідженням на звук, на згин тощо, а також *кількісно* — за втратою маси, зміною електроопору, інше.

Таблиця 3.5.

Міра стійкості	Глибина проникнення корозії, мм/р.	Бал	Міра стійкості	Глибина проникнення корозії, мм/р	Бал
Цілком стійкі	$\text{П} < 0,0001$	1	Занижено стійкі	$0,1 < \text{П} < 0,5$	6
Дуже стійкі	$0,0001 < \text{П} < 0,005$	2		$0,5 < \text{П} < 1,0$	7
Стійкі	$0,005 < \text{П} < 0,001$	3	Малостійкі	$1,0 < \text{П} < 5,0$	8
	$0,001 < \text{П} < 0,05$	4		$5,0 < \text{П} < 10,0$	9
	$0,05 < \text{П} < 0,1$	5	Нестійкі	$\text{П} > 10,0$	10

Дослідження на *корозійне розтріскування* проводять при одночасній дії статичних напруг та електрохімічного процесу. Внаслідок цього на поверхні металу виникають міжкристалітні тріщини. Стійкість металів до корозійного розтріскування оцінюють величиною, оберненою до часу початку розтріскування; процентом зразків, які розтріскались під час випробувань; відносною зміною межі міцності металу за певний час витримки в корозійному середовищі.

Рекомендована література

1. Лахтин Ю.М. Материаловедение / Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
2. Травин О.В. Материаловедение / О.В. Травин, Н.Т. Травина. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
3. Солнцев Ю.П. Материаловедение и технология конструкционных материалов / Ю.П. Солнцев, В.А. Веселов, В.П. Демьянцевич. – М.: – МИСиС, 1996. – 576 с.
4. Брацыхин В.А. Переработка пластических масс в изделия / В.А. Брацыхин, С.С. Миндлин, К.Н. Стрельцов. – М.: – Л.: Химия, 1966. – 399 с.
5. Торнер Р.В. Основные процессы переработки полимеров. – М.: Химия, 1978. – 296 с.
6. Мозберг Р.К. Материаловедение. – Таллин: Валгус, 1976. – 554 с.
7. Гуль В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль, В.Н. Кулезнев. – М.: Высшая школа, 1976. – 313 с.
8. Миндлин С.С. Технология производства полимеров и пластических масс на их основе. – Л.: Химия, 1979. – 353 с.
9. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, Н.И. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергия, 1981. – 304 с.
10. Коррозионная стойкость оборудования химических производств: Способы защиты оборудования от коррозии: Справ. изд. / Под ред. Б.В. Строкана, А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1987. – 280 с.

Зміст

	Пояснювальна записка	3
1.	Вступ. Будова речовин.	6
1.1.	Аморфна і кристалічна будова твердої речовини. Анізотропія і поліморфізм.	6
1.2.	Кристалічна ґратка	7
1.3.	Дефекти кристалів	9
	1.3.1.Точкові дефекти в кристалах	10
	1.3.2. Дислокації	11
	1.3.3.Границі зерен	12
	1.3.4. Вплив дефектів на властивості кристалів	12
2.	Методи дослідження властивостей матеріалів	13
2.1.	Загальна характеристика методів аналізу матеріалів	13
2.2.	Макроаналіз	14
2.3.	Мікроаналіз оптичний, електронна мікроскопія, рентгеноспектральний аналіз	16
	2.3.1. Підготовка зразків до мікроаналізу	17
	2.3.2. Застосування оптичних мікроскопів для вивчення структури конструкційних матеріалів	18
	2.3.3. Електронна мікроскопія	19
	2.3.4. Метод мікрорентгеноспектрального аналізу	19
3.	Властивості матеріалів	20
3.1	Критерії вибору матеріалів	20
3.2	Механічні властивості матеріалів	21
	3.2.1. Механічні властивості, що визначаються при статичних навантаженнях	20
	3.2.2. Механічні властивості, що визначаються при динамічних навантаженнях	26
	3.2.3. Механічні властивості, що визначаються при динамічних навантаженнях	28
3.3.	Фізичні властивості матеріалів	31
3.4.	Хімічні властивості матеріалів	37
	Рекомендована література	39

Для нотаток

Для нотаток

Для нотаток

Навчально-методичне видання

Автори: **Юрченко** Оксана Миколаївна
Кормош Жолт Олександрович
Парасюк Олег Васильович

Основи матеріалознавства
Частина 1. Властивості матеріалів та методи їх дослідження

*Конспект лекцій
для студентів хімічного факультету*

Друкується в авторській редакції