

ТВЕРДИЙ СТАН РЕЧОВИНИ. КРИСТАЛІЧНІ ТА АМОРФНІ ТІЛА

1. Особливості кристалічної будови

Механічно тверді тіла поділяються на кристалічні та аморфні.

До справжніх твердих тіл належать лише тіла з кристалічною будовою, яка визначається правильним, впорядкованим розташуванням частинок (молекул, або атомів), просторовою повторюваністю та симетрією.

Кристалічні тіла можуть складатися з одного, або багатьох кристалів, тобто бути *монокристалами* та *полікристалами*.

Одиничний кристал (*монокристал*) є тілом обмеженим правильними многокутниками з кутами постійної величини.

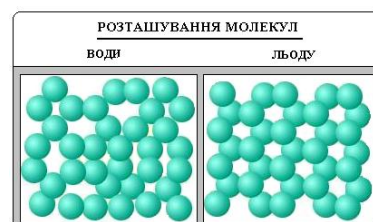
Полікристалічні тіла складаються з багатьох хаотично орієнтованих маленьких кристаликів, які називаються *кристалітами*.

Монокристали (особливо великі) рідко зустрічаються в природі. Монокристали характеризуються залежністю фізичних властивостей (механічних, теплових, оптичних і т. п.) від напрямку – *анізотропністю* (від грецьк. :ά, «а» – не, ίσος, «ісос», («ісос»)- рівний, τρόπος, «тропос» – напрям).

Полікристалічні тіла виявляють однаковість властивостей у всіх напрямках – *ізотропність*, в зв'язку з хаотичною орієнтацією окремих кристаликів.

Аморфні тіла, хоча і нагадують тверді тим, що зберігають свою форму (є механічно твердими), проте не мають впорядкованого розташування частинок, і практично являють собою дуже в'язкі рідини. Прикладом таких тіл є смоли, скло, пластмаси. Плинність таких тіл під дією сили тяжіння виявляється при підвищенні температури та за достатньо великий проміжок часу. Ці тіла не плавляться, а поступово розм'якшуються, маючи в різних точках об'єму різну температуру. Перехід аморфного тіла в механічно рідкий стан займає значний інтервал температур. На противагу аморфним, *кристалічні тіла мають сталу температуру плавлення*.

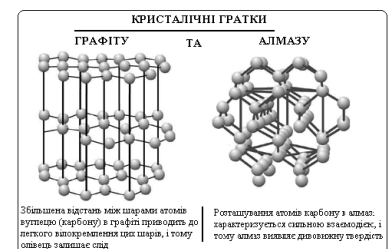
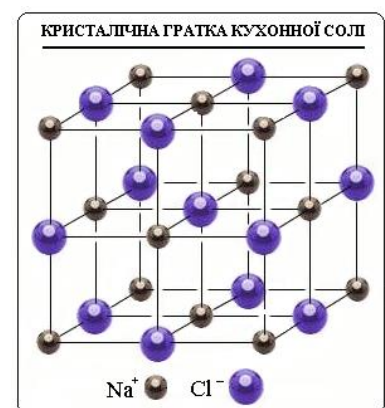
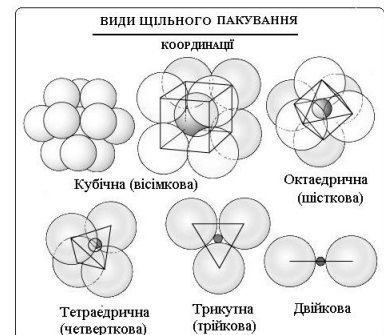
Ізотропність властивостей аморфних тіл пояснюється хаотичністю розташування частинок, при якій лише окремі групи їх можуть утворювати впорядковані об'єднання.



2. Розташування частинок в кристалі

Розташування частинок в кристалі характеризується щільним пакуванням з впорядкованістю. Картина розташування частинок для кожного виду кристалів – своя і подається у вигляді *кристалічної ґратки*, в якій лінії, що зображують зв'язки між частинками, з'єднують центри куль, що зображують частинки. У вузлах кристалічної ґратки можуть знаходитися не тільки центри атомів чи молекул, а, нерідко, і додатно, чи від'ємно заряджені частинки – іони. Позитивні іони утворюються при втраті атомом чи молекулою своїх електронів, негативні в результаті приєднання сторонніх.

Прикладом такого іонного кристалу є кристал солі, у вузлах ґратки якого чергуються позитивні іони натрію та негативні хлору. В ґратці можна виділити найменший структурний елемент, який називається *елементарною коміркою*. Вся кристалічна ґратка може бути побудована шляхом *паралельного переносу (трансляції)* елементарної комірки в певних напрямках. Російський вчений Федоров встановив, що може існувати 230 різних просторових кристалічних структур, більшість з яких виявлено в природі, чи створено штучно. Деякі з них не реалізуються. Кристалічні ґратки металів часто мають форму гранецентрованого куба (мідь, золото), об'ємноцентрованого куба (залізо), шестигранної призми (цинк, магній).



3. Взаємодія частинок в кристалі

Стан частинок у твердому тілі визначається *дальнім порядком*, при якому кожна частинка взаємодії не лише з оточуючими, а й віддаленими. Сили взаємодії спроможні утримувати частинку в певному положенні, в зв'язку з чим тверді тіла зберігають не тільки свій об'єм, а й форму.

Останнє зовсім не означає, що частинки твердого тіла не рухаються. Основним видом руху частинок в твердому стані є хаотичні коливання навколо положення рівноваги в різних напрямках. Надзвичайно рідкими є хаотичного напрямку перескоки між рівноважними положеннями. Про існування таких перескоків свідчить дифузія. Про рідкість таких перескоків свідчить необхідність значного часу для її здійснення.

4. Рідкі кристали

Довгий час вважалося, що газоподібний, рідкий та твердий стани є основними станами речовини в оточуючій природі. Однак виявилось, що не менш поширеним і важливим є четвертий стан речовини рідкокристалічний. Речовина в такому стані має механічні властивості звичайної рідини, зокрема плинність, але виявляє анізотропію деяких властивостей, подібну до кристалів. Рідкокристалічний стан є характерним для багатьох складних органічних речовин з великими молекулами.

Особливий агрегатний стан виникає завдяки тому, що в рідинах, при близькому розташуванні молекул, важливу роль починають відігравати їх форма та розміри. При певних умовах, утворюються частинні об'єми з впорядкованим розташування молекул, характерним для дальнього порядку. Рідкокристалічна фаза зникає при збільшенні температури до деякого значення, після якого переходить в звичайну рідину.

Першим виявив рідкокристалічний стан у 1888 р. австрійський ботанік Фрідріх Рейнітцер (Friedrich Reinitzer), при дослідженні синтезованого ним холестерилбензолату. Він помітив, що оптичні властивості цієї речовини змінюються при зміні температури. При нагріванні до 145°C з кристалічного стану утворюється мутна рідина, що сильно розсіює світло, при температурі 179°C рідина стає прозорою. В мутному стані речовина має здатність розділяти промінь на дві частини (подвійне променезаломлення), що є характерним для кристалів, а у рідинах не повинно виявлятися.

До своїх досліджень Рейнітцер залучив відомого німецького фізика- спектроскопіста Отто Лемана (Otto Lehmann), який і назвав такий стан рідкокристалічним.

Впорядкованість в розташуванні молекул може полягати в переважній орієнтації довгих осей молекул. Напрямок такої переважної орієнтації молекул характеризується вектором одиничної довжини \vec{L} , який називається **директором**. Ступінь орієнтованості характеризується параметром впорядкованості

$$S = \frac{3}{2} \left(\overline{\cos^2\theta} - \frac{1}{3} \right),$$

де θ – кут між напрямком директора і миттєвим напрямком осі молекули, $\overline{\cos^2\theta}$ – середнє значення по часу квадрата косинуса кута.

Структурна впорядкованість характерна зокрема для речовин з видовженими та дископодібними молекулами. Існують також інші різновиди рідких кристалів, які відіграють важливу роль в клітинах організмів.

В залежності від характеру впорядкованості серед рідких кристалів (РК) виділяють *сметичні*, *нематичні*, та *холестеричні*.

Сметичні РК (сметики) найбільш впорядковані. Вони відрізняються не тільки наявністю напрямку середньої орієнтації молекул, а і поділом на молекулярні площини. Назва походить від грецького слова σμῆγμα («сметга») – мило, масляниста рідина.

Нематичні РК (нематики) мають однорідну



орієнтаційну впорядкованість по всьому об'єму, але хаотичне розташування центрів молекул. Нематики складаються з довгих молекул. Взаємна паралельність в середньому осей молекул поєднується зі взаємним зміщенням по осі директора на різні відстані. При спостереженні нематика через мікроскоп вирізняється сукупність ліній, які перетинаються – ниток. Ці нитки є границями розділу структурних областей. Від грецького слова νῆμα, νῆματος – «нема», «нематос» – нитка походить назва кристалів. Саме ці кристали використовуються у рідкокристалічних панелях моніторів.

Холестеричні РК (холестерики) влаштовані більш складно, ніж попередні типи. В часткових, малих об'ємах холестерик має структуру, яка нагадує нематик розбитий на шар. Це означає, що в таких шарах впорядкованість характеризується директором і параметром порядку. Відмінність полягає в тому, що існує напрямок, який називається холестеричною віссю, вздовж якого гвинтоподібно змінюється орієнтація директора для молекул кожного послідовного шару. Кут повороту директора φ розподіляється по довжині холестеричної осі z за формулою

$$\varphi = \frac{2\pi}{p} z,$$

де p є кроком холестеричної спіралі.

В зв'язку з описаним, холестерики іноді образно називають «скрученими нематиками». Межа між холестериками та нематиками є досить умовною. Холестеричну структуру можна отримати можна отримати додаванням до нематичної речовини добавок зі хіральними (оптично активними) молекулами, які містять асиметрично розташований атом вуглецю.

Специфічна структура рідких кристалів визначає залежність їх властивостей (теплових, електричних, оптичних та ін.) від напрямку – **анізотропію**.

Зокрема властивість РК пропускати світло з коливаннями напруженості електричного поля лише в певній площині, пов'язаній з напрямком директора (таке світло називається плоскополяризованим), застосовується в різноманітних конструкціях для відображення відеоінформації. Для використання властивостей РК слід створити умови стабілізації та однорідності їх стану.

Така однорідність структури нематика досягається поміщенням його між двома пластинами, розділеними щілиною не ширшою 10 – 100 мкм. Пластини, які обмежують нематик, можна виготовити з прозорого матеріалу: скла, полімеру, електропровідного прозорого з'єднання оксиду олова і т. п. Для завдання потрібної орієнтації директора, на поверхню пластин наносяться найтонші боріздки одного напрямку. Витягнуті молекули прилеглого до пластини шару орієнтуються вздовж нанесеного рельєфу. Міжмолекулярні сили змушують решту молекул до подібної орієнтації. Для використання кристалу важливим є те, що під дією електричного поля при досягненні критичного значення напруженості відбувається зміну напрямку директора. Такий процес називається переходом Фредерікса. Для реалізації такого переходу достатньо напруги порядку 1 В і потужності біля мікровата. Таку напругу можна подавати безпосередньо через інтегральну схему без попереднього підсилення. Під дією керуючої напруги комірка з РК, в сукупності з кольоровими фільтрами, може служити затвором для світла, пропускаючи світло з потрібними характеристиками. Вказані особливості є важливими для використання рідких кристалів у пристроях для відображення

відеоінформації (індикатори, табло, панелі моніторів та телевізорів).

Поведінка холестерика в електричному полі є більш складною. Зокрема поле, перпендикулярне до холестеричної осі, приводить до при водить до збільшення кроку спіралі. При цьому кут повороту директора втрачає лінійну залежність від координати по осі, а при досягненні критичної величини поля холестерична спіраль повністю розкручується. Залежність кроку від температури дозволяє використовувати плівки таких речовин спостереження розподілу температури по поверхні різних тіл, при медичній діагностиці, візуалізації теплового випромінювання.

Найбільше практичне значення має так званий твіст-ефект, який є переходом Фредерікса в спіральній (твіст) структурі. Рідкокристалічна нематична твіст-комірка була винайдена Шнадтом і Гельфрічем у 1970 р.

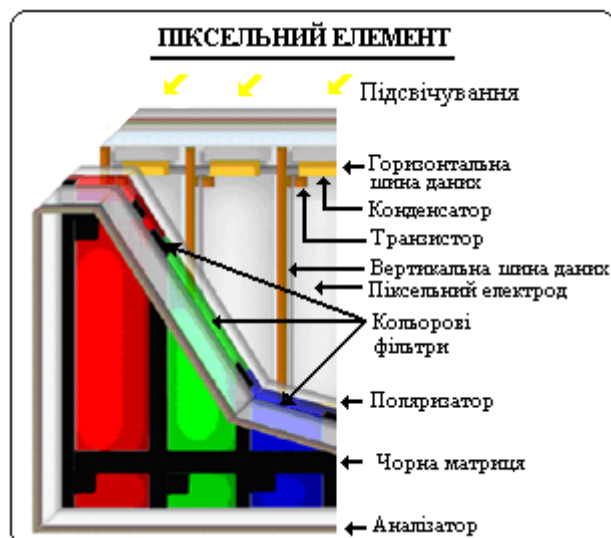
Рідкокристалічна панель для відтворення відеозображення

Екрани LCD-моніторів (Liquid Crystal Display) зроблені з рідкого ціанофенілу.

Зображення на екрані панелі має мозаїчний характер і формується шаром великої кількості практично нерозрізняваних оком рідкокристалічних комірок, які освітлюються лампами підсвічування розташованими в задній частині панелі. Світло від ламп підсвічування попередньо проходить через **поляризатор**, який пропускає лише складову світла з коливаннями електричного поля в одній площині, тобто плоско (планарно) поляризоване. Кристал пропускає лише світло з певною орієнтацією площини поляризації. Площина пропускання повертається електричним полем, яке виникає в результаті прикладання напруги до комірки. Якщо площина поляризації світла перпендикулярна площині пропускання, то світло не проходить. Напруга на комірки подається вертикальними (date line) і горизонтальними (gate line) шинами даних, які являють собою металеві напівпрозорі провідні нитки, що нагадують павутину і наносяться на скляну підкладку з боку ламп підсвічування. Застосовується змінна напруга, оскільки постійна викликає взаємодію іонів робочої речовини з матеріалом контактних електродів та порушує задану впорядкованість у розташуванні молекул, що приводить до деградації комірки. Сучасні технології дозволяють виготовляти точкові електроди розміром біля 0,3 мкм.

У випадку **пасивної матриці** різні електроди отримують заряд циклічним методом при построчному оновленні дисплея. Для висвічування екрану сигнальна напруга послідовно пробігає всі строчки, а комірки згасають самостійно. В **активній матриці** до кожного електрода додана схема з тонкоплівочним транзистором та конденсатором. Транзистор грає роль перемикача, а конденсатор зберігає заряд та напругу на протязі часу достатнього для утримання стану комірки з певними світловими властивостями до надходження нового сигналу

Елемент зображення (піксел) складається з трьох комірок (субпікселів), які під дією сигнальної напруги висвічуються трьома базовими кольорами (червоним R, зеленим G, та синім B) керованої інтенсивності. Всі



кольори утворюються змішуванням комбінації трьох базових.

Світло комірки кожного типу набуває забарвлення в результаті проходження трьох кольорових фільтрів інтегрованих у внутрішню поверхню скла панелі за шаром комірок, завдяки тому, що кожен фільтр пропускає світло від комірок тільки свого типу.

Комбінаціями з 256 різних значень відтінку кожного субпіксела можна отримати до 16,77 млн. кольорів піксела.

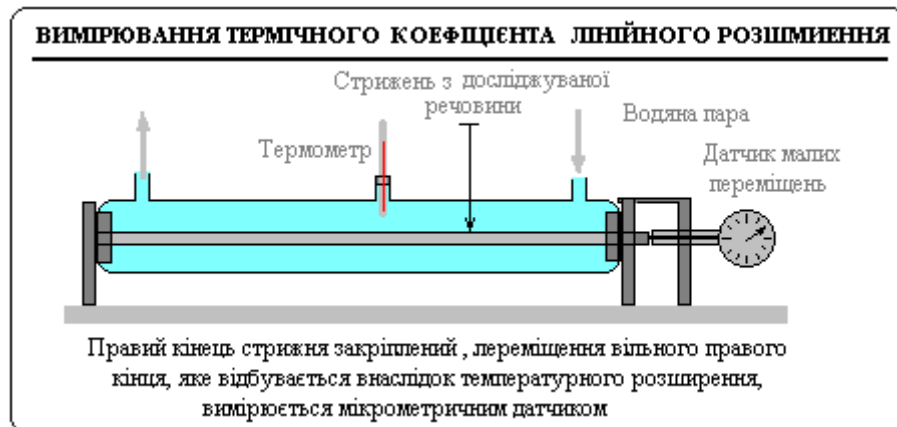
Розмір піксела 18 дюймового монітора 0,28 мм. Для маскування елементів тонкоплівкових транзисторних схем, шин даних нанесених на прозорій стінці, а також границь комірок, де порушується орієнтація молекул, застосовуються так звана чорна матриця (black matrix) у вигляді сітки, нитки якої закривають всі елементи, які не входять до складу відтворюваної картини. Матеріалом для цієї матриці служить хром, або чорні смоли.

Важливу роль у формуванні зображення має другий поляризатор, якого називають аналізатором, і який встановлений перед виходом світла на екран. Напрямок його площини поляризації зміщений відносно першого на 90° . Аналізатор не пропускає світло, що не приймає участі у формуванні зображення.

Тонкоплівочні, майже повністю прозорі напівпровідникові елементи, мають товщину 0,1 – 0,01 мкм (технологія Thin Film Transistor – TFT). В перших дисплеях, які з'явилися у 1972 р. використовувався селенід кадмію, який з часом був замінений на аморфний кремній (a-Si), а у матрицях з високою роздільністю використовується полікристалічний кремній. Монітор, з роздільною здатністю 800 x 600 пікселів в режимі SVGA має 1 440 000 транзисторів

5. Температурне розширення тіл

Рівномірність емпіричної температурної шкали можлива лише за умови того, що при зміні температури, відносна зміна об'єму тіла (зміна одиниці початкового об'єму) $\frac{V-V_0}{V_0}$



прямопропорційна зміні температури $t^0 - t_0^0 = \Delta t^0$, тобто

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha_v \cdot \Delta t^0.$$

де α_v (альфа з індексом v) – називається температурним (термічним) коефіцієнтом об'ємного розширення, і, як це видно з попередньої формули, вимірюється в $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ (в СІ – $\frac{1}{\text{K}}$).

Закон температурного розширення може бути сформульований і так.

Відносна зміна об'єму тіла, розділена на зміну температури, для речовини тіла є величиною сталою, яка називається температурним(термічним) коефіцієнтом об'ємного розширення.

$$\frac{\Delta V}{V_0 \Delta t^0} = \alpha_v.$$

З попереднього можна виразити кінцевий об'єм.

$$V = V_0 (1 + \alpha_v \Delta t^0).$$

У випадку твердих тіл, наведені міркування справедливі також і для випадків площинного та лінійного розширення.

Якщо температурний (термічний) коефіцієнт площинного розширення позначити буквою α_s , а лінійного α_l , то відповідні формули запишуться.

$$S = S_0 (1 + \alpha_s \Delta t^0),$$

$$l = l_0 (1 + \alpha_l \Delta t^0).$$

При розгляді таблиці термічних коефіцієнтів лінійного розширення для твердих тіл, можна помітити, що вони лежать в межах мільйонних та стотисячних частин.

Речовина, матеріал	Температурний коефіцієнт лінійного	Речовина, матеріал	Температурний коефіцієнт лінійного

	розширення $\alpha_l \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$		розширення $\alpha_l \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Алюміній	2,4	Бетон	10 – 14
Бронза	13 - 21	Цегла	3-9
Мідь	17	Граніт	8
Нікель, ніхром	14	Деревина (вздовж волокон)	4,9
Олово	26	Деревина (впоперек волокон)	34 – 60
Платина	9,1	Скло лабораторне	3- 9

Легко впевнитись в тому, що коефіцієнт площинного розширення (α_s) вдвічі, а об'ємного (α_v) втричі більший за лінійного (α_l).

Для розширення куба з ребром l ,

$$V = l^3 = l_0^3(1 + \alpha_l \Delta t^0)^3 = l_0^3(1 + 3\alpha_l^2 \Delta t^{0^2} + 3\alpha_l \cdot \Delta t^0 + \alpha_l^3 \Delta t^{0^3}).$$

Знехтувавши дуже малими другим та четвертим доданком, які містять вищі степені малої величини – коефіцієнта лінійного розширення, отримаємо

$$V = l_0^3 (1 + 3 \alpha_l \Delta t^0) = V_0(1 + 3 \alpha_l \Delta t^0) = V_0(1 + \alpha_v \Delta t^0), \text{ тобто } 3 \alpha_l = \alpha_v.$$

Аналогічні міркування можна провести і для випадку розширення площі.

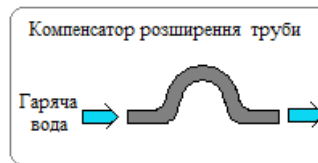
Точні вимірювання показують, що закон температурного розширення є наближеним. Про наближеність наведених співвідношень свідчить і те, що з них випливає існування від'ємної температури, при якій розміри тіла набувають нульового, і навіть від'ємного значення. Проте, в більшості практичних застосувань точність обчислень є достатньою, і наведена таблиця коефіцієнтів, дозволяє впевнено проводити інженерні розрахунки.

Таблиця термічних коефіцієнтів об'ємного розширення для рідин має такий вигляд

Рідина	Температурний коефіцієнт об'ємного розширення $\alpha_v \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Рідина	Температурний коефіцієнт об'ємного розширення $\alpha_v \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Бензин	1240	Гліцерин	505
Вода	200	Гас	960
Вода (10 – 20 °С)	150	Нафта	900
Вода (20 – 40 °С)	302	Спирт	1080
Ртуть	181	Ефір	1600

6. Врахування теплового розширення в техніці

Явище зміни розмірів тіл при зміні температури систематично враховується в побуті і техніці. При з'єднанні деталей з металів, які мають різний коефіцієнт теплового розширення, слід враховувати можливі спотворення форми при зміні температурних умов. Залізобетонні конструкції не руйнуються при коливаннях температури завдяки однаковим температурним коефіцієнтам заліза і бетону. Якщо не забезпечити провисання дротяних кріплень влітку, то в зимовий період такі дроти розірвуться при зимовому охолодженні, внаслідок стиснення. На залізничному транспорті можливе теплове розширення рейок компенсується зазором у їх з'єднанні. Теплове розширення враховується при конструкції дахів. Бляшане покриття здійснюється невеликими листами, взаємний зсув яких не є критичним. Один з кінців металевого мосту не закріплюється. Труби центрального опалення не можуть бути щільно затисненими і вкладаються у жолоби.



7. Особливості теплового розширення води

Об'єм води, що утворюється при таненні льоду, становить 10/11 об'єму льоду при температурі 0°C. Якщо воду нагрівати з цієї температури до 4°C, її об'єм буде зменшуватись, а при подальшому збільшенні температури об'єм води зростатиме, але нерівномірно. Такі, особливі властивості води сприяють життєздатності рослинного і тваринного життя у водоймах. Лід, маючи найменшу густину, знаходиться на поверхні водойми, а тваринний та рослинний світ під льодом не вимерзає, оскільки температура на дні не зменшується нижче 4°C, в зв'язку з низькою теплопровідністю льоду. Збільшення об'єму води при її замерзанні слід враховувати при налагодженні водопостачання. При замерзанні води, водопровідні труби розриваються. Така ж доля чекає закриту посудину з рідиною в холодильнику.

Зауваження

1⁰. За величиною термічних коефіцієнтів розширення твердих тіл можна зробити висновок, що при розрахунку розширення, в якості початкового виміру, навіть не обов'язково брати його значення при нульовій температурі. Це означає, що можна користуватися формулами:

$$l_2 = l_1 (1 + \alpha_l (t_2^0 - t_1^0)); V_2 = V_1 (1 + \alpha_l (t_2^0 - t_1^0)),$$

де l_1 та V_1 – розмір та об'єм при температурі t_1^0 ; l_2 розмір та об'єм при температурі t_2^0 .

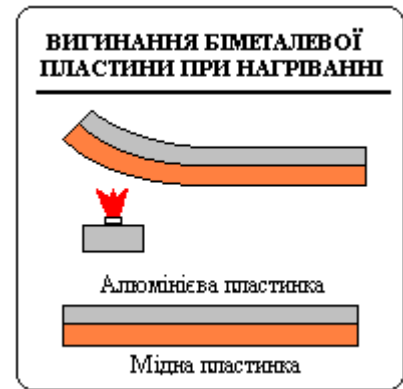
2⁰. При розгляді речовин в посудині слід враховувати, що при тепловому розширенні, об'єм посудини змінюється так, як суцільного тіла з матеріалу посудини.

3⁰. Слід враховувати аномалію теплового розширення води, яка найбільшої густини набуває при 4°C.

8. Застосування температурного розширення.

Різні коефіцієнти теплового розширення двох металів дозволяють сконструювати біметалеву пластину, яка при нагріванні вигинається.

Біметалева пластина може бути використана для вимірювання, та автоматичного регулювання температури.



9. Пояснення теплового розширення на основі уявлень про енергію взаємодії молекул.

Підвищення температури пов'язане зі збільшенням середньої кінетичної енергії руху молекул

$$\Delta \bar{\epsilon}_k = i \frac{k_B T}{2},$$

де i – число ступенів вільності.

Повна енергія молекули

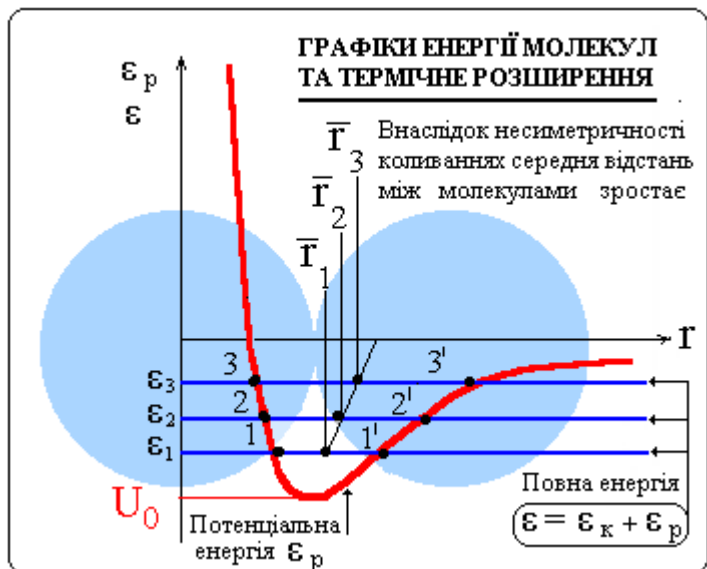
$$\epsilon = \epsilon_k + \epsilon_p$$

В рідкому та твердому стані $|\epsilon_p| > |\epsilon_k|$,

і так як $\epsilon_p < 0$, то в цих станах $\epsilon < 0$.

Графіки потенціальної та повної енергії в цих станах матимуть вигляд показаний на малюнку.

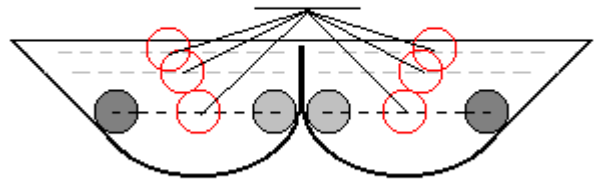
При теплових коливаннях відносно положення рівноваги, відстань між молекулами і потенціальна енергія їх змінюється, в залежності від величини кінетичної енергії залежної від



температури. Межі зміни зображені ділянками графіка потенціальної енергії парної взаємодії: 1 – 1', 2 – 2' і т. д. Точки перетину графіків потенціальної та повної енергії означають співпадіння цих енергій і відповідають відстаням, на яких кінетична енергія молекули рівна нулю. Ці точки є точками зупинки і повороту, між якими молекула здійснює коливання. При збільшенні температури середня кінетична енергія молекули збільшиться, і відстань між точками повороту теж збільшиться. При цьому, внаслідок несиметричності графіка потенціальної енергії, середнє положення молекули зміститься в бік більших відстаней, тобто відстані між молекулами зростуть, що і означатиме температурне розширення тіла. Таким чином теплове розширення пояснюється асиметрією коливань молекул, які при збільшенні

ВЗАЄМОВІДДАЛЕННЯ КУЛЬОК, ЯКІ КОЛИВАЮТЬСЯ В НЕСИМЕТРИЧНИХ ЧАШКАХ

Середнє положення кульки, що коливається в чашці



При коливаннях середня відстань між кульками зростає

амплітуди коливань більш розходяться, ніж наближаються. В деякому інтервалі температур, що ілюструється графіком, існує пряма пропорційність між зміною енергії (за рахунок кінетичної $\Delta\epsilon_k$) та зміною відстані між молекулами Δr .

$$\Delta r = b\Delta\epsilon_k = bk_B \frac{\Delta T}{2},$$

так як

$$\Delta r = \frac{\Delta l}{l_0 \sqrt[3]{n}}, \text{ де } \sqrt[3]{n} = \frac{N_l}{l_0} = n_1 - \text{лінійна концентрація молекул, а}$$

то

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{i}{2} bk_B \sqrt[3]{n} \Delta T = \beta \Delta T = \beta \Delta t^0.$$

На основі останнього можна сформулювати наближений закон температурного розширення, за яким при зміні температури тіла з 0°C відносна зміна його лінійних розмірів поділена на зміну температури для даної речовини є величиною сталою, яка називається коефіцієнтом лінійного температурного розширення речовини (β).

$$\frac{l - l_0}{l_0 t^0} = \beta$$

10. Механічні властивості твердих тіл

1^o. Види деформації

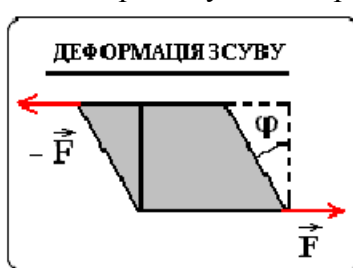
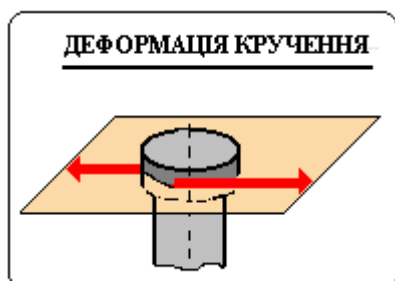
Основними видами деформації є розтяг - стиск та зсув.

Як відмічалось, деформація розтягу - стиску виникає під дією протилежних сил, що діють вздовж однієї прямої.

Деформація зсуву характеризується зміною кутів елементарних паралелепіпедів без зміни розмірів їх граней під дією протилежних паралельних сил.

Деформація згину характеризується викривленням осі, чи серединної поверхні тіла, і зводиться

до розтягу шарів



матеріалу, які лежать в бік опуклості від серединної (нейтральної) частини тіла та стиску інших шарів.

Деформація кручення характеризується взаємним поворотом площин, перпендикулярних до осі повороту, під дією протилежних сил, паралельних цим площинам і зводиться до деформації зсуву шарів перпендикулярних осі повороту.

Отже, всі види деформацій зводяться до двох **основних деформацій** – стиску-розтягу та зсуву. Ці деформації також називають **елементарними**.

2⁰. Закон Гука для пружних властивостей тіл при деформаціях розтягу-стиску

Вище розглядався закон Гука для пружних властивостей тіл при деформаціях розтягу-стиску. Однак такий закон характеризує пружність конкретного тіла, не містить достатньої інформації про пружні властивості матеріалу, з якого виготовлено тіло. Таку інформацію дає закон Гука для пружних властивостей матеріалів, який стверджує, що відношення пружної напруги до модуля відносного деформаційного зміщення для даного матеріалу є величиною сталою, яка називається модулем пружності (модулем Юнга)

$$\frac{\sigma}{|\varepsilon|} = E.$$

Тут σ є відношенням сили пружності до площі нормальної поверхні, по якій розподіляється сила і називається силовою напругою.

$$\sigma = \frac{F_s}{S_n},$$

$$[\sigma] = \text{Па}.$$

Безрозмірна величина ε є відношенням зміни довжини тіла до її початкового значення і називається відносним деформаційним зміщенням

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Наслідком цього закону є закон Гука для пружних властивостей тіла, так як

$$\frac{F_s}{|\Delta l|} = E \frac{S_n}{l_0} = k.$$

Модуль Юнга деяких матеріалів			
Матеріал	Модуль Юнга E	Матеріал	Модуль Юнга E

	ГПа		ГПа
Ірідій	520	Кварц	73
Сталь	200-210	Свинець	16
Мідь	130	Лід	3

В зв'язку зі збереженням об'єму твердого тіла деформація стиску-розтягу в деякому напрямку завжди супроводжується такою ж деформацією в поперечному напрямку з протилежним знаком відносного деформаційного зміщення.

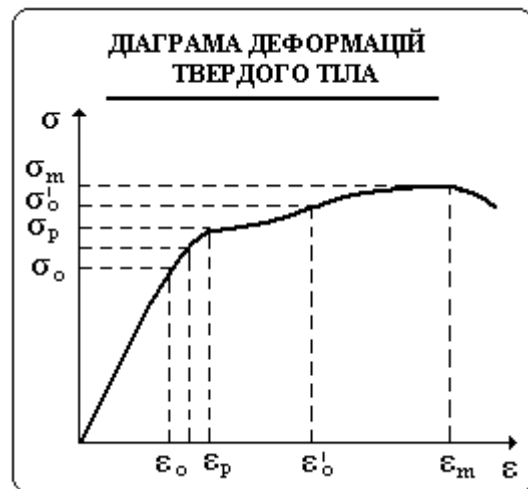
Відношення відносного поперечного стиску зразка до його відносного видовження є константою, яка характеризує даний матеріал і називається коефіцієнтом Пуассона.

$$\mu_p = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$$

Дослідження показують, що коефіцієнт Пуассона не може перевищувати 0,5. Для більшості матеріалів його значення лежить в межах 0, 25 до 0,5. Значення $\mu_p = 0$ досягається у пористих тіл (наприклад, у коркових), які при розтягу практично не змінюють своїх поперечних розмірів.

Однак, описані закономірності характерні для ізотропних, полікристалічних тіл. Деформація монокристала суттєво залежить від напрямку прикладання деформуючих сил відносно кристалографічних осей.

Можна побудувати діаграму деформацій твердого тіла, яка виражає залежність між



лише

відносним деформаційним зміщенням та пружною напругою на основі дослідних вимірювань.

Діаграма показує, що при невеликих деформаціях спостерігається наближена лінійна залежність вказаних величин – пряма пропорційність. **Область прямої пропорційності** закінчується напругою σ_0 , яка називається **границею пропорційності**. При подальшому збільшенні напруги, деформація зростає швидше напруги, а, починаючи з напруги σ_p – **границі плинності**, напруга не збільшується, а деформація зростає. Ця ділянка називається **областю плинності, або пластичної деформації**. Далі, починаючи з напруги σ_0' , спостерігається зростання деформації при зростанні напруги до моменту досягнення деякого максимуму, який характеризується напругою σ_m – **границі міцності**. Подальше зростання напруги приводить до руйнування досліджуваного зразка, оскільки деформація зростає навіть при зменшенні напруги.

3⁰. Деформація зсуву

Деформація зсуву викликається дотичним до поверхні зсуву силами. При цьому змінюється не об'єм, а форма тіла. При дотичній нарузі $\tau = \frac{F_t}{S}$, відносно деформаційне зміщення γ буде вимірюватися відношенням величини зсуву виділеного кубічного об'єму до ребра куба, тобто тангенсом кута зсуву, який малих деформація буде наближено рівний куту.

$$\gamma = \frac{\Delta l_t}{l} = \text{tg} \varphi \approx \varphi.$$



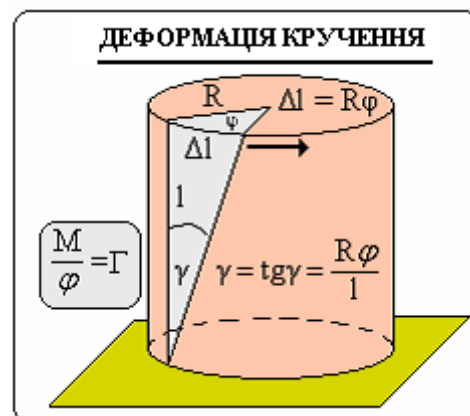
при

Встановлено, що для пружний деформації зсуву, відношення відносного деформаційного зміщення до дотичної нарузи є величиною сталою названою модулем зсуву G.

$$\frac{\gamma}{\tau} = G.$$

4⁰. Деформація кручення

Деформацією зсуву, але неоднорідною, є *деформація кручення*. Таку деформацію можна спостерігати, якщо закріпити один кінець стрижня, а другий кінець закручувати. При цьому перерізи стрижня будуть повертатися на різні кути відносно закріпленої основи. В результаті бічна довжиною l, паралельна осі кручення, повернеться γ і перетвориться в похилу. Цей кут можна знайти його тангенсом, якщо врахувати, що радіус проведений до цієї лінії на крайній незакріпленій площині повернеться на кут φ . Тож кінець лінії опише дугу довжиною $\Delta l = R\varphi$.



різні

лінія
на кут
за

$$\gamma = \text{tg} \gamma = \frac{R\varphi}{l}.$$

Для цієї деформації закон Гука стверджує, що відношення закручуючого моменту до кута закручення для даного тіла є величиною сталою, яка називається модулем кручення

$$\frac{M}{\varphi} = \Gamma.$$

Доповнення

Пояснення закону Гука для деформацій розтягу-стиску на основі уявлень про структуру речовини

Можна пояснити закон Гука для пружного розтягу-стиску на основі уявлень про структуру речовини, врахувавши, що сила пружності $F_{пр}$ є сумою сил взаємодії частинок f по площі поперечного перерізу S_n .

Також слід врахувати, що при достатньо малому зміщенні частинки від рівноважного положення, залежність діючої на неї сили від відстані можна вважати лінійною. Іншими словами, дільницю графіка сили, в достатньо малому околі рівноважної точки, наближено можна вважати прямолінійною.

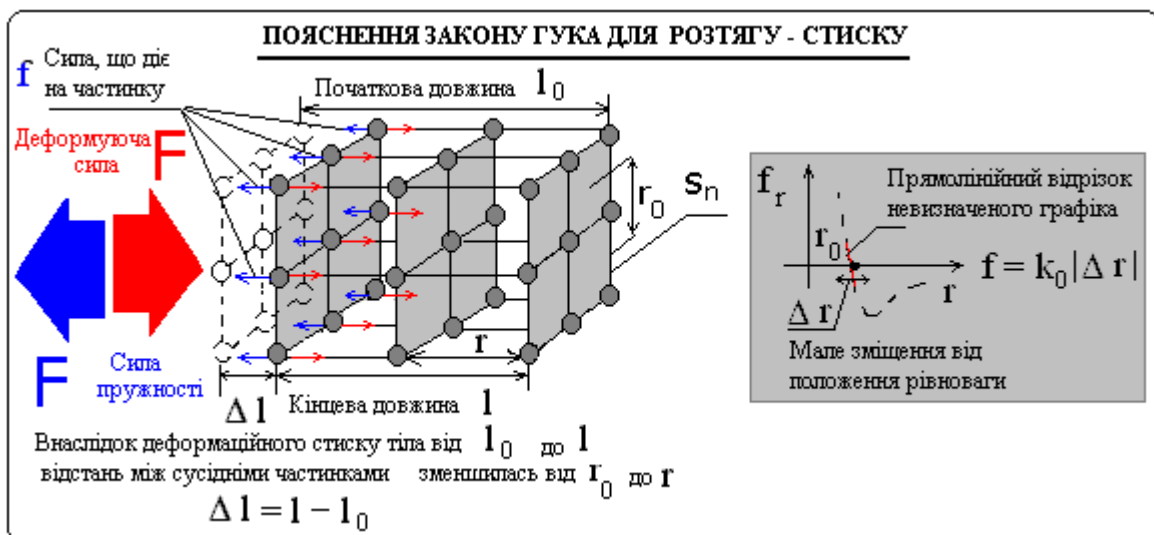
Тангенс кута нахилу графіка в точці, що відповідає положенню рівноваги є для даної речовини (матеріалу) характеристичною константою.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{f}{|\Delta r|} = k_0.$$

Оскільки деформаційне зміщення тіла рівне сумі зміщень всіх N_1 частинок по довжині, то

$$|\Delta r| = \frac{|\Delta l|}{N_1}.$$

З врахуванням лінійної концентрації частинок $n_1 = \frac{N_1}{l_0}$.



$$|\Delta r| = \frac{|\Delta l|}{n_1 l_0}.$$

Відношення зміни довжини тіла до її початкового значення називається відносним деформаційним зміщенням ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

З цим

$$|\Delta r| = \frac{|\varepsilon|}{n_1}$$

Сила f , діюча на частинку, рівна загальній силі пружності $F_{\text{пр}}$, що виникає на нормальній поверхні площею S_n , розділеній на число частинок, що створюють цю силу

$$f = \frac{F_{\text{пр}}}{N_S}$$

А з врахуванням поверхневої концентрації частинок $n_S = \frac{N_S}{S_n}$,

$$f = \frac{F_{\text{пр}}}{n_S S_n}$$

Відношення сили пружності до нормальної поверхні, по якій розподіляється сила, називається **силовою (пружною) напругою** σ , і вимірюється в Паскалях (Па)

$$\sigma = \frac{F_{\text{пр}}}{S_n}$$

З врахуванням останнього

$$f = \frac{\sigma}{n_S}$$

Зауважимо, що об'ємна концентрація є кубом лінійної, а поверхнева – квадратом, тому після підстановки значень в початкову формулу для k_0 , матимемо

$$\frac{\sigma}{|\varepsilon| \sqrt[3]{n}} = k_0$$

або

$$\frac{\sigma}{|\varepsilon|} = k_0 \sqrt[3]{n}$$

Маємо *запис закону Гука для пружних властивостей матеріалу при деформаціях розтягу – стиску.*

Відношення пружної напруги до модуля відносного деформаційного зміщення для даного матеріалу є величиною сталою, яка називається модулем пружності (модулем Юнга)

$$\frac{\sigma}{|\varepsilon|} = E$$

10. Теплоємність твердих тіл

У випадку, коли кристалічна ґратка утворена іонами, або атомами одного виду, кількість переданої теплоти, у відповідності до теореми про рівнорозподілу енергії

$$Q = \Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T$$

Слід врахувати, що кожна частинка кристалічної ґратки має по три ступені вільності

поступального і коливального руху ($i = 6$), тому

$$Q = 3\nu R \Delta T.$$

Оскільки зміною об'єму твердих тіл при нагріванні можна знехтувати, то молярна теплоємність при сталому тискові та об'єму практично не відрізняються і можна говорити просто про молярну теплоємність

$$c_M \approx c_{MP} \approx c_{MV} \approx 3R.$$

Ця неквантова теорія теплоємності приводить до емпіричного **закону Дюлонга і Пті** (1819 р.), за яким атомна теплоємність всіх хімічно простих кристалічних тіл становить приблизно $3R$.

Цей закон є наближеним, оскільки не відображає зменшення теплоємності при зменшенні температури. Крім того існують речовини, теплоємність яких суттєво відрізняється від вищеназваної. Так алмаз при кімнатній температурі має теплоємність біля $0,7 R$ і досягає $3R$ лише при температурах близьких до $1000 K$.