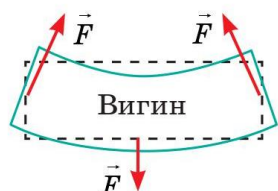
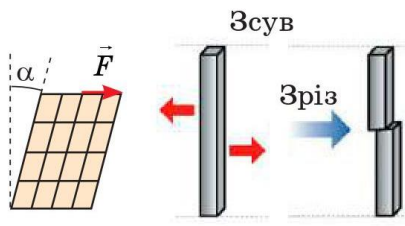
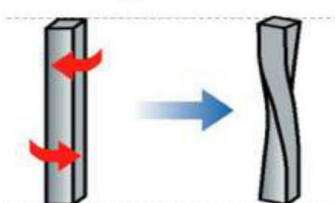


§ 35. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

1 Які існують види деформації

Нагадаємо: **деформація** — це зміна форми та (або) розмірів тіла. Якщо після припинення дії зовнішніх сил тіло повністю відновило свої форму і розміри, то воно зазнало *пружної деформації*; якщо форма і розміри не відновилися, тіло зазнало *пластичної деформації*.

Коли тіло деформується, окремі його частини зміщуються одна відносно одної. За характером зміщення частин розрізняють *деформації розтягнення (стиснення), вигину, зсуву, кручення*:

Види деформацій	
	Сили, прикладені до тіла, намагаються видовжити або укоротити тіло, внаслідок чого відстань між шарами молекул збільшується (<i>деформація розтягнення</i>) або зменшується (<i>деформація стиснення</i>).
	Сили, прикладені до тіла, намагаються викривити (вигнути) тіло. <i>Деформація вигину</i> — це водночас деформація розтягнення і деформація стиснення: опукла частина тіла зазнає деформації розтягнення (відстань між шарами молекул збільшується); увігнута частина — деформації стиснення (відстань між шарами молекул зменшується).
	Сили, прикладені до тіла, напрямлені протилежно одна одній і зсовують шари тіла один відносно одного. <i>Деформації зсуву</i> зазнають, наприклад, цвяхи та болти, які скріплюють частини різних конструкцій; тканина, яку розрізають ножицями. Зсув на великі кути α може призвести до руйнування тіла — <i>зрізу</i>.
	Сили, прикладені до тіла, створюють обертальний момент відносно повздовжньої осі тіла. Зсув шарів молекул відбувається неоднаково — кожний шар повертається на певний кут відносно іншого шару. <i>Деформації кручення</i> зазнають вали всіх машин, гвинти, ключі, викрутки тощо.

? Яких деформацій зазнають тіла на рис. 35.1? Обґрунтуйте свою відповідь.



Рис. 35.1. До запитання в § 35

Чи зміниться міцність



Коли стрижень зазнає деформації вигину, його середня частина (частина біля осі) не зазнає ані розтягнення, ані стиснення. Тобто, якщо її видалити, то міцність конструкції на вигин майже не зміниться.

Тому, наприклад, раму велосипеда, яка переважно зазнає деформації вигину, виготовляють із тонких порожніх металевих трубок, завдяки чому велосипед є досить легким і залишається при цьому міцним.

Про подібну міцність «конструкцій», легкість та економію «матеріалу» подбала й природа — вона наділила людину і тварин трубчастими кістками кінцівок, а злаки — трубчастими стеблами.



2

Що таке механічна напруга

Коли тіло деформується, його стан змінюється: у будь-якому перерізі тіла виникають сили пружності, що перешкоджають руйнуванню; чим більше деформоване тіло, тим більшими є сили пружності. Стан деформованого тіла характеризується *механічною напругою*.

Механічна напруга σ — фізична величина, яка характеризує деформоване тіло і дорівнює відношенню модуля сили пружності $F_{\text{пруж}}$ до площі S поперечного перерізу тіла*:

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$$

Одиниця механічної напруги в СІ — паскаль:

$$[\sigma] = 1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 \quad (1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2).$$

Установлено, що механічна напруга залежить від *відносного видовження* тіла.

Відносне видовження ε тіла — фізична величина, яка дорівнює відношенню видовження Δl до початкової довжини l_0 тіла:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}, \text{ або } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$$

3

Будуємо й аналізуємо діаграму напруг

Залежність механічної напруги від відносного видовження встановлюють експериментально. Зразок витягують за допомогою спеціальної розривної машини, поступово збільшуючи навантаження. У ході дослідження будується *діаграма напруг* — графік залежності механічної напруги від відносного видовження зразка (рис. 35.2). Досліди показують, що за невеликих деформацій (ділянка ОА графіка) виконується **закон Гука**:

У випадку малих пружних деформацій розтягнення і стиснення механічна напруга σ прямо пропорційна відносному видовженню ε :

$$\sigma = E |\varepsilon|^{**}$$

* Далі розглядатимемо тільки тіла, що мають однакову для даного тіла площу поперечного перерізу (шнури, стрижні, троси тощо).

** Відносне видовження ε взято за модулем, оскільки закон Гука справджується як для деформації розтягнення ($\varepsilon > 0$), так і для деформації стиснення ($\varepsilon < 0$).

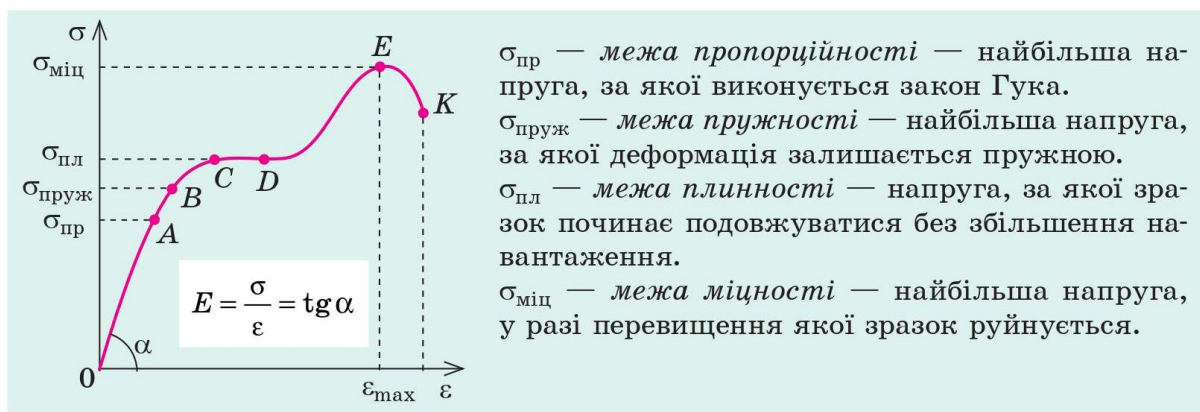


Рис. 35.2. Діаграма напруг: *OAB* — ділянка пружних деформацій; *BC* — ділянка пластичних деформацій; *CD* — ділянка плинності матеріалу; *EK* — руйнування зразка

Коефіцієнт пропорційності E називають *модулем Юнга* або *модулем пружності*. Модуль Юнга характеризує пружні властивості матеріалу, його визначають за діаграмою напруг (див. рис. 35.2) і фіксують у таблицях.

Одиниця модуля Юнга в СІ — **паскаль**:
 $[E] = 1 \text{ Па (Pa)}$.

? Скориставшись означеннями механічної напруги σ і відносного видовження ϵ , приведіть закон Гука, поданий у вигляді $\sigma = E|\epsilon|$, до вигляду $F_{\text{пруж}} = k|\Delta l|$. Доведіть, що жорсткість k стрижня визначається за формулою $k = E \frac{S}{l_0}$.

*Модулі Юнга
для деяких матеріалів*

Матеріал	Модуль Юнга $E, \times 10^9 \text{ Па}$
Алюміній	63–70
Бетон	15–40
Каучук	$7,9 \cdot 10^{-3}$
Мідь (лиття)	82
Срібло	82,7
Скло	49–78
Чавун ковкий	150

Повернемося до рис. 35.2. Як тільки навантаження стане таким, що механічна напруга в зразку сягне *межі пропорційності* $\sigma_{\text{пр}}$, залежність $\sigma(\epsilon)$ стає нелінійною (ділянка *AB* графіка), проте якщо зняти навантаження, то зразок відновить свої форму та розміри, тобто ділянка *OAB* діаграми напруг — це ділянка *пружних деформацій*.

Якщо збільшувати навантаження далі, то після досягнення *межі пружності* $\sigma_{\text{пруж}}$ деформація починає швидко зростати і стає *пластичною* (ділянка *BC*), а після досягнення *межі плинності* $\sigma_{\text{пл}}$ зразок взагалі деякий час подовжується без збільшення навантаження (ділянка *CD*). Якщо навантаження знову збільшити, зразок ще трохи видовжиться (ділянка *DE*), напруга в зразку сягне *межі міцності* $\sigma_{\text{міц}}$, після чого зразок розірветься.

4 Пружність, пластичність, крихкість

Зігнемо сталю лінійку, а потім відпустимо її — лінійка повністю відновить свою форму. Якщо те саме зробити зі свинцевою пластинкою, вона так і залишиться зігнутою. А от якщо спробувати зігнути пластинку зі скла, то скло зламається навіть за незначної деформації. Залежно від «реакції» матеріалу на деформацію розрізняють *пружні, пластичні, крихкі матеріали*.

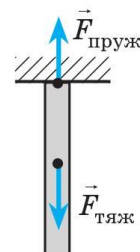
Пружні матеріали	Пластичні матеріали	Крихкі матеріали
Матеріали, які виявляють пружні властивості за порівняно великих деформацій або за досить тривалої дії	Матеріали, в яких пружна деформація переходить у пластичну за незначних деформацій	Матеріали, які руйнуються за дуже малих деформацій і майже не виявляють пластичних властивостей
		

Розподіл матеріалів на пружні, пластичні і крихкі значною мірою є умовним, адже властивості матеріалів суттєво залежать від вологості, температури, швидкості збільшення навантаження тощо. Наприклад, свинець, який є пластичним за нормальних умов, стає пружним за температури $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, пружна гума за низьких температур стає крихкою. Глина є крихкою в сухому стані і пластичною — у вологому. Бітум під час повільного збільшення навантаження виявляє пластичні властивості, а під час швидкого збільшення навантаження стає крихким.

5 Учимся розв'язувати задачі

Задача. Із гелікоптера, який завис на деякій висоті, спускають сталевий трос. Якою може бути найбільша довжина троса, щоб він не обірвався під власною вагою? Межа міцності сталі — 320 МПа .

Аналіз фізичної проблеми. Виконаємо пояснювальний рисунки. Сила пружності в будь-якому перерізі троса зрівноважує силу тяжіння, яка діє на частину троса, розташовану нижче цього перерізу. Очевидно, що за відсутності дефектів трос розірветься в якнайвищому перерізі.



Дано:

$$\sigma_{\max} = 3,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$g = 10 \text{ м/с}^2$$

$$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$$

l — ?

Розв'язання

Трос перебуває у стані спокою, тому

$$F_{\text{тяж}} = F_{\text{пруж}}.$$

$$F_{\text{тяж}} = mg,$$

$$\text{де } m = \rho V, \text{ а } V = Sl,$$

$$\text{тому } F_{\text{тяж}} = \rho S l g.$$

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S} \text{ —}$$

$$\text{за означенням,}$$

$$\text{тому } F_{\text{пруж}} = \sigma S.$$

Отже, маємо: $\rho S l g = \sigma S \Rightarrow l = \frac{\sigma}{\rho g}$. Густина сталі визначимо за таблицею густин.

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

$$[l] = \frac{\text{Па}}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м/с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Н}} = \text{м}; \quad l = \frac{3,2 \cdot 10^8}{7,8 \cdot 10^3 \cdot 10} \approx 4,1 \cdot 10^3 \text{ (м)}.$$

Аналіз результату. Найбільша можлива довжина троса — $4,1\text{ км}$. Оскільки реальні троси мають у десятки разів меншу довжину, то вони ніколи не можуть обірватися під дією власної ваги.

Відповідь: $l = 4,1\text{ км}$.



Підбиваємо підсумки

- Деформація — зміна форми та (або) розмірів тіла. Деформація є пружною, якщо після припинення дії зовнішніх сил тіло відновлює свої форму та розміри; деформація є пластичною, якщо форма та розміри тіла не відновлюються. Розрізняють також деформації стиснення (розтягнення), зсуву, вигину, кручення.

- Фізичну величину, яка характеризує деформоване тіло і дорівнює відношенню модуля сили пружності $F_{\text{пруж}}$ до площі S поперечного перерізу тіла, називають механічною напругою σ : $\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}$.

- Закон Гука: для малих пружних деформацій розтягнення і стиснення механічна напруга прямо пропорційна відносному видовженню ε : $\sigma = E\varepsilon$, де E — модуль Юнга (модуль пружності), який характеризує пружні властивості речовини. Найбільшу напругу, за якої виконується закон Гука, називають межею пропорційності $\sigma_{\text{пр}}$.



Контрольні запитання

- Що таке деформація?
- Назвіть види деформації. За яких умов вони виникають? Наведіть приклади.
- Дайте характеристику механічної напруги як фізичної величини.
- Подайте два формулювання закону Гука. За яких умов виконується цей закон?
- Що характеризує модуль Юнга? Якою є його одиниця в СІ?
- У чому полягає явище плинності матеріалу?
- Що таке межа міцності? Чим пружні матеріали відрізняються від пластичних? від крихких?



Вправа № 35

- Чому труби, з яких виготовляють рангоут парусника, є порожніми?
- Поміркуйте, яких деформацій зазнають такі частини парусника (рис. 1): корпус; щогли; дошки палуби; троси такелажу; якірний ланцюг; канат для швартування; вал брашпиля (коловорот для підйому якоря).
- До гумового шнура завдовжки 10 см і діаметром 2 мм підвісили вантаж масою 31,4 г. Довжина шнура збільшилася на 1 см. Визначте: 1) механічну напругу в шнурі; 2) відносне видовження шнура; 3) модуль Юнга для гуми, з якої виготовлений шнур; 4) найменший діаметр шнура, за якого деформація залишиться пружною (межа пружності для гуми — $5 \cdot 10^6$ Па).
- Визначте силу удару під час штампівки мідної монети радіуса 1 см, якщо межа плинності для міді 70 МПа (рис. 2).
- Яка із поданих на рис. 3 діаграм побудована для пружного матеріалу? пластичного матеріалу? крихкого матеріалу?
- Уявіть, що ви вирішили побудувати будинок. Визначтесь, які матеріали (пружні, пластичні, крихкі, з якою межею міцності та ін.) ви будете використовувати для фундаменту; стін; стелі; підлоги; балок. Обґрунтуйте свою відповідь. Обов'язково скористайтесь додатковими джерелами інформації.



Рис. 1

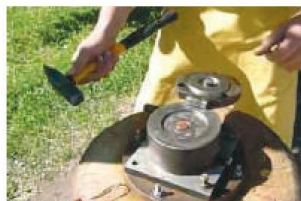


Рис. 2

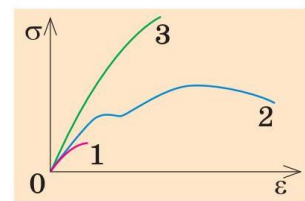


Рис. 3