

## § 27. СИЛА ТЕРТЯ

Французький фізик Амонтон Гільйом (1663–1705), розмірковуючи про роль тертя, писав: «Усім нам траплялося виходити в ожеледицю: скільки зусиль потрібно, щоб утриматися від падіння, скільки смішних рухів доводиться робити, щоб устояти на ногах... Уявімо, що тертя зникло зовсім. Тоді ніякі тіла, чи то завбільшки з кам'яну брилу, чи то малі, як піщинки, ніколи не втримаються одне на одному. Якби не було тертя, Земля являла б собою кулю без нерівностей, подібну до рідкої краплі». Згадаємо, що таке сила тертя, яку природу вона має, які існують види тертя.

### 1 Які існують види тертя

У ході будь-якого руху тіло обов'язково контактує з мікро- або макротілами навколо (поверхнею іншого тіла, частинками рідини або газу, всередині яких тіло рухається, тощо). Під час такого контакту виникають сили, що сповільнюють рух тіла, — ці сили називають *силами тертя*.



**Рис. 27.1.** Відносно поверхні снігу та навколишнього повітря лижник рухається вправо, тому на нього діють сила тертя  $\vec{F}_{\text{тертя}1}$  та сила опору  $\vec{F}_{\text{оп}}$ , напрямлені вліво. Сніг відносно лижника рухається вліво, з боку лижника на сніг діє сила тертя  $\vec{F}_{\text{тертя}2}$ , напрямлена вправо

**Сила тертя  $\vec{F}_{\text{тертя}}$**  — це сила, яка виникає під час руху або спроби руху одного тіла по поверхні іншого чи під час руху тіла всередині рідкого або газоподібного середовища.

*Сила тертя завжди напрямлена вздовж поверхні дотичних тіл протилежно швидкості їхнього відносного переміщення (рис. 27.1).*

Тертя між поверхнею твердого тіла та навколишнім рідким або газоподібним середовищем, у якому це тіло рухається, називають *опором середовища* або *рідким (в'язким) тертям*. Тертя між поверхнями двох дотичних твердих тіл називають *сухим тертям*. Розрізняють три види сухого тертя: *тертя спокою, тертя ковзання, тертя кочення*.

### У чому причини виникнення сухого тертя

Якщо взяти лупу із сильним збільшенням і розглянути дотичні поверхні двох тіл, побачимо величезну кількість дрібних нерівностей (зазублин, шерехатостей). Коли одне тіло ковзає або намагається ковзати по поверхні другого, нерівності чіпляються одна за одну й деформуються. Виникають сили пружності, направлені в бік, протилежний деформації. Зрозуміло, що одна нерівність не дасть помітної сили, яка перешкоджатиме руху тіла, однак таких нерівностей безліч, тому сума всіх сил пружності створює помітну силу тертя, направлену проти руху або спроби руху тіла (рис. 27.2). Це — одна з причин виникнення сили тертя.

Є й інша причина. У деяких місцях виступи тіл щільно притиснуті один до одного — відстань між ними настільки мала, що діють сили міжмолекулярного притягання, у результаті чого деякі нерівності виявляються ніби «склеєними». Зрозуміло, що таке «склеювання» відбувається в ході всього руху й перешкоджає йому.

І сила пружності, і сила міжмолекулярного притягання мають електромагнітне походження, тож природа сили тертя електромагнітна.



Рис. 27.2. Під час руху або спроби руху одного тіла по поверхні іншого нерівності на поверхнях тіл деформуються; сума сил пружності, які виникають при цьому, створює силу тертя:  $\vec{F}_{\text{тертя}} = \sum \vec{F}_{\text{пруж}}$

### Чому силу тертя спокою називають рушійною силою

Сила тертя спокою  $\vec{F}_{\text{тертя сп}}$  — це сила, яка з'являється між дотичними поверхнями тіл і перешкоджає виникненню руху одного тіла по поверхні іншого.

Якщо ви спробуєте зрушити з місця важку книгу, ледь штовхаючи її пальцем, то книга не зрушиться, бо виникне сила тертя спокою, яка зрівноважить прикладену вами силу. Чим більшу силу ви будете прикладати, тим більшою буде сила тертя спокою. Сила тертя спокою завжди дорівнює за модулем і протилежна за напрямком зовнішній силі, яка діє вздовж поверхні зіткнення тіл й намагається зрушити тіло з місця (рис. 27.3):

$$\vec{F}_{\text{тертя сп}} = -\vec{F}_{\text{зовн}}$$

Очевидно, що чим сильніше притиснуті одна до одної поверхні дотичних тіл, тим сильніше чіпляються їхні нерівності. Саме тому зрушити з місця важкий предмет набагато складніше, ніж легкий.

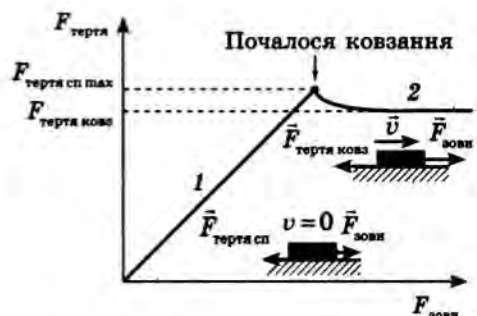


Рис. 27.3. Сила тертя спокою  $\vec{F}_{\text{тертя сп}}$  завжди дорівнює за модулем прикладеній (зовнішній) силі  $\vec{F}_{\text{зовн}}$ . Коли сила тертя спокою сягає максимального значення  $\vec{F}_{\text{тертя сп max}}$ , тіло зрушує з місця (починає ковзання)





**Рис. 27.4.** Шини автомобіля (а) і ступні людини (б) у момент дотику з поверхнею дороги намагаються по суті здійснити рух назад. У результаті виникає сила тертя спокою, напрямлена вперед — рушійна сила

Дія сили тертя спокою є дуже «корисною»: завдяки їй ручки й олівці залишають слід на папері, речі не вислизують із рук, не розв'язуються вузли; ця сила утримує піщини в купі піску, важкі камені на схилі гори, коріння рослин у ґрунті. Саме сила тертя спокою є тією *рушійною силою*, завдяки якій пересуваються люди, тварини, транспорт (рис. 27.4).

#### 4 Від яких чинників залежить сила тертя ковзання

Після того як зовнішня сила, що діє на тіло, зрівнюється з максимальною силою тертя спокою, тіло починає ковзання, — у цьому випадку говорять про *силу тертя ковзання*.

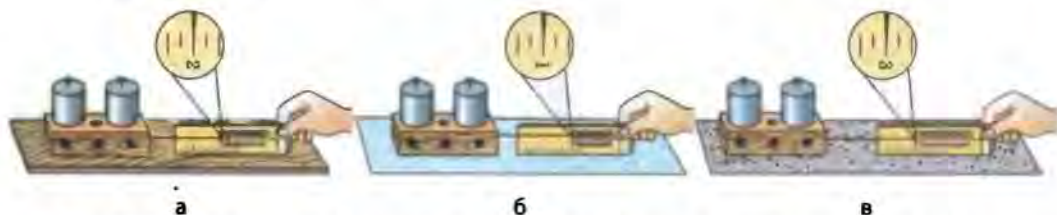
**Сила тертя ковзання**  $\vec{F}_{\text{тертя ковз}}$  — це сила, яка виникає під час відносного руху (ковзання) одного тіла по поверхні іншого.

*Сила тертя ковзання завжди напрямлена вздовж поверхні дотику тіл у бік, протилежний напрямку відносної швидкості руху тіл* (див. рис. 27.1, 27.3).

Експериментально встановлено, що *сила тертя ковзання залежить від властивостей дотичних поверхонь тіл* (рис. 27.5) і *прямо пропорційна силі нормальної реакції опори  $\vec{N}$*  (рис. 27.6). Цю залежність можна записати у вигляді:

$$F_{\text{тертя ковз}} = \mu N,$$

де  $\mu$  — *коефіцієнт тертя ковзання*, який залежить, зокрема, від матеріалів, з яких виготовлені дотичні тіла, і якості обробки їхніх поверхонь\*.



**Рис. 27.5.** Якщо змінюється матеріал дотичних поверхонь, змінюється й сила тертя ковзання. Дерев'яний брусок ковзає: а — по дерев'яній дошці; б — по склу; в — по наждачному паперу

\* Коефіцієнт тертя ковзання залежить також від *відносної швидкості руху дотичних поверхонь*. Однак на малих швидкостях ця залежність є незначною, тому під час розв'язування задач будемо нею нехтувати.

Коефіцієнти тертя ковзання визначають експериментально. Зазвичай таблиці значень коефіцієнтів тертя ковзання містять орієнтовні середні значення для пар матеріалів:

Матеріали	Коефіцієнт тертя ковзання $\mu$
Сталь по льоду	0,02
Сталь по сталі	0,20
Дерево по дереву	0,25
Папір по дереву	0,40
Шкіра по чавуну	0,56
Гума по бетону	0,75

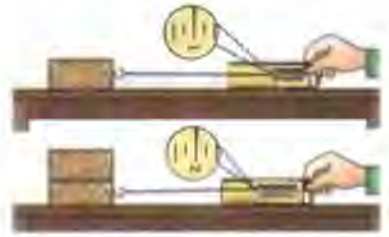


Рис. 27.6. Якщо сила, що притискає брусок до поверхні столу, збільшується вдвічі, то сила тертя ковзання теж збільшується вдвічі

Слід зазначити: 1) сила тертя спокою й сила тертя ковзання не залежать від площі дотичних поверхонь, тому, наприклад, заточування ковзанів не збільшує силу тертя; 2) сила тертя ковзання трохи менша за максимальну силу тертя спокою\* (див. рис. 27.3), тому тіло зрушує з місця ривком, а масивні предмети важче зрушити з місця, ніж потім тягти.

Силу тертя ковзання можна зменшити, змастивши дотичні поверхні. Тверде змащення змінює якість поверхні, а рідке віддаляє дотичні поверхні одну від одної, у результаті чого *сухе тертя* замінюється *рідким*, значно слабшим.

Тертя істотно зменшиться, якщо між дотичними поверхнями розташувати тверді котки. Дослід показує, що за однакових умов сила тертя ковзання в десятки разів більша за силу тертя кочення. Докладніше про силу тертя кочення й рідке тертя пропонуємо вам дізнатися самостійно.

### 5 Учимися розв'язувати задачі

**Задача.** Обчисліть гальмівний шлях і час гальмування автомобіля, якщо він рухався по прямій горизонтальній ділянці дороги й перед початком гальмування мав швидкість 90 км/год. Коефіцієнт тертя ковзання гуми по бетону 0,75.

Дано:

$$v = 90 \text{ км/год} =$$

$$= 25 \text{ м/с}$$

$$\mu = 0,75$$

$$g \approx 10 \text{ м/с}^2$$

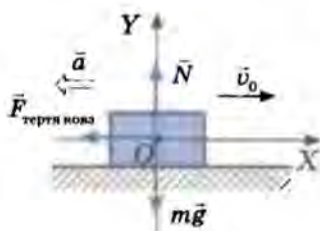
$$s - ?$$

$$t - ?$$

**Аналіз фізичної проблеми.** Щоб визначити гальмівний шлях і час гальмування автомобіля, необхідно знати прискорення його руху. Виконаємо пояснювальний рисунок, на якому зазначимо сили, що діють на автомобіль, напрямки осей координат (СВ пов'яжемо з точкою на поверхні Землі), напрямки швидкості та прискорення (швидкість руху автомобіля зменшується, тому напрямок прискорення протилежний напрямку швидкості).

\* Розв'язуючи задачі, будемо вважати, що  $F_{\text{тертя сп макс}} = F_{\text{тертя ковз}} = \mu N$ .





Пошук математичної моделі, розв'язання.  
Згідно з другим законом Ньютона:

$$m\vec{g} + \vec{F}_{\text{тертя ковз}} + \vec{N} = m\vec{a}.$$

Скориставшись рисунком, знайдемо проекції сил на осі  $OX$  та  $OY$ , нижче запишемо формулу для обчислення сили тертя ковзання:

$$\begin{cases} OX: -F_{\text{тертя ковз}} = -ma \text{ (оскільки } mg_x = 0; N_x = 0), \\ OY: -mg + N = 0 \text{ (оскільки } F_{\text{тертя } y} = 0; a_y = 0), \\ F_{\text{тертя ковз}} = \mu N. \end{cases}$$

Розв'язавши систему рівнянь, знайдемо  $a$ :

$$N = mg \Rightarrow F_{\text{тертя ковз}} = \mu mg \Rightarrow \mu mg = ma \Rightarrow a = \mu g.$$

Для визначення гальмівного шляху та часу руху скористаємося формулами проекцій швидкості та переміщення для рівноприскореного руху:

$$v_x = v_{0x} + a_x t; \quad s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}.$$

Конкретизуємо ці рівняння: оскільки  $v_x = 0$ ;  $v_{0x} = v_0$ ;  $a_x = -a$ ;  $s_x = s$ , маємо:  $0 = v_0 - at$ ;  $s = \frac{v_0^2}{2a}$ . Отже:  $v_0 = at \Rightarrow t = \frac{v_0}{a}$ . З огляду на те що  $a = \mu g$ , остаточно отримуємо:  $s = \frac{v_0^2}{2\mu g}$ ;  $t = \frac{v_0}{\mu g}$ .

Визначимо значення шуканих величин:

$$[s] = \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{м}/\text{с}^2} = \text{м}, \quad \{s\} = \frac{625}{15} \approx 42, \quad s \approx 42 \text{ м};$$

$$[t] = \frac{\text{м}/\text{с}}{\text{м}/\text{с}^2} = \text{с}, \quad \{t\} = \frac{25}{7,5} \approx 3,3, \quad t \approx 3,3 \text{ с}.$$

**Відповідь:** гальмівний шлях  $s \approx 42$  м; час гальмування  $t \approx 3,3$  с.

### Підбиваємо підсумки

Сила тертя — це сила, яка виникає під час руху або спроби руху одного тіла по поверхні іншого чи руху тіла всередині рідкого або газоподібного середовища. Сила тертя завжди напрямлена вздовж поверхонь дотичних тіл протилежно швидкості їхнього відносного переміщення.

Сила тертя спокою — це сила, яка виникає у разі прикладення до тіла зовнішньої сили, що намагається зрушити тіло з місця. Сила тертя спокою завжди дорівнює за модулем і протилежна за напрямком зовнішній силі:  $\vec{F}_{\text{тертя сп}} = -\vec{F}_{\text{зовн}}$ .

Сила тертя ковзання — це сила, яка виникає під час ковзання одного тіла по поверхні іншого. Сила тертя ковзання прямо пропорційна силі нормальної реакції опори:  $F_{\text{тертя ковз}} = \mu N$ , де  $\mu$  — коефіцієнт тертя ковзання, що залежить від матеріалів, з яких виготовлені дотичні тіла, і якості обробки їхніх поверхонь.

**Контрольні запитання**

1. Дайте визначення сили тертя. 2. Які види тертя ви знаєте? 3. За яких умов виникає сухе тертя? рідке тертя? 4. Якими є причини виникнення сухого тертя? Яку природу воно має? 5. Якій силі дорівнює сила тертя спокою? 6. Чому силу тертя спокою називають рушійною силою? 7. Дайте визначення сили тертя ковзання. Як вона напрямлена і за якою формулою її обчислюють? 8. Як можна зменшити силу тертя ковзання?

**Вправа № 23**

1. Чи правильним є твердження, що тертя завжди перешкоджає руху?
2. Чому небезпечно вести автомобіль по мокрій або зледенілій дорозі?
3. Наведіть приклади, коли силу тертя потрібно збільшувати; зменшувати. У які способи це можна зробити?
4. Дерев'яний брусок рівномірно тягнуть по горизонтальній поверхні, прикладаючи силу 1 Н. Визначте коефіцієнт тертя ковзання, якщо маса бруска 200 г.
5. З яким максимальним прискоренням може рухатись автомобіль, якщо максимальний коефіцієнт тертя спокою при взаємодії шин і асфальта дорівнює 0,70?
- 6\*. Лижник масою 60 кг зупинився через 40 с після закінчення спуску. Визначте силу тертя, що діяла на лижника, і коефіцієнт тертя ковзання, якщо швидкість руху лижника наприкінці спуску становила 10 м/с.