

# Сили в природі

## Взаємодія тіл

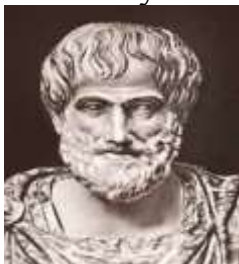
Із взаємодією тіл ми зустрічаємось на кожному кроці. Наприклад, хокейна шайба, що лежала на льоду, після удару клюшкою змінює свою швидкість. Спортсмен розтягує тятиву спортивного лука. У цьому випадку взаємодія руки й тятиви призводить до зміни форми тятиви, тобто її розмірів. Вантаж, підвішений до пружини, розтягує її, тобто тут також взаємодія тіл викликає деформацію. Отже,



- у результаті дії на тіло його швидкість може змінюватися, а в результаті взаємодії тіла можуть деформуватися.

Тривалий час вважали, що якщо на тіло не діють інші тіла, воно може перебувати тільки в спокої.

Давньогрецький учений Арістотель стверджував: щоб тіло рухалося, його необхідно увесь час «рухати», причому чим більше швидкість тіла, тим більше зусиль треба для цього докладати.



Цей вплив одного тіла на інше він називав силою. За Арістотелем, *сила — причина руху*.

У другій половині XVII століття англійський учений Ісаак Ньютон здогадався, що причиною зміни швидкості тіл при падінні є *притягання їх Землею*. Воно *діє на відстані*: Земля притягує тіла, які не тільки перебувають поблизу її поверхні, притягання Землі поширюється набагато далі! Саме воно, подібно до туго натягнутого каната, утримує Місяць на його круговій орбіті навколо Землі. Якби це притягання зникло, Місяць полетів би у космічний простір, немов камінь, що зірвався з натягнутої мотузки, на якій його розкручували. Отже,

- зміна швидкості тіла або його деформація можуть служити мірою дії на це тіло інших тіл.

## Закон інерції

Тривалий час панувала думка, що якщо на тіло не діють інші тіла, воно може перебувати лише в спокої.



Галілей першим із учених перейшов від спостережень до дослідів. Він помітив: коли куля котиться по похилій площині вниз, її швидкість збільшується. А коли куля котиться нагору, її швидкість зменшується. Галілей припустив: якщо куля котитиметься по горизонтальній площині, її швидкість повинна залишатися постійною. Поставивши нові досліди, учений виявив, що під час руху по горизонтальній площині куля все-таки зупиняється.

Галілей зрозумів, що причина сповільнення руху — тертя між кулею й площиною. Він зробив висновок: якби площина була ідеально рівною й строго горизонтальною, куля котилася б по ній вічно. Це означало, що здатність до «збереження руху» властива самому тілу, а вплив інших тіл виявляється в тому, що швидкість даного тіла змінюється.

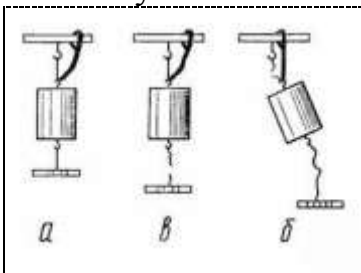
Так Галілей відкрив перший закон механіки, що називають законом інерції:

- *якщо на тіло не діють інші тіла, воно рухається з постійною за модулем і напрямком швидкістю або зберігає стан спокою.*

Здатність тіла зберігати свою швидкість незмінною, якщо на нього не діють інші тіла, називають *явищем інерції*.

### **Маса тіла**

За тієї самої дії швидкості різних тіл змінюються по-різному. Наприклад, той самий поштовх надає порожньому візку, що стоїть на столі, більшу швидкість, ніж навантаженому візку. Властивість тіла, що визначає, яку силу треба прикласти до тіла, щоб змінити його швидкість на певну величину за певний час, називають *інертністю*.



Про тіло, що при взаємодії менше змінює свою швидкість, говорять, що воно більше інертне, ніж друге із двох взаємодіючих тіл. Менш інертне те тіло, яке за час взаємодії більше змінює свою швидкість.

Але будь-якому тілу для зміни швидкості потрібний певний час. Ні в якого тіла, за жодної взаємодії швидкість не може змінитися миттєво.

- **Інертність** — властивість, що полягає в тому, що для зміни швидкості тіла на задану величину необхідно, щоб дія на нього іншого тіла тривала певний час. Властивість тіла — інертність — характеризується фізичною величиною: масою.

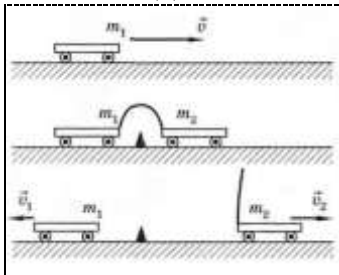
- *Мірою інертності тіла є маса тіла.* Масу позначають звичайно буквою  $m$ .

Одиницею маси в СІ є 1 кілограм (кг). Це маса еталона (зразка), яким служить зроблений зі спеціального сплаву циліндр, що зберігається в Міжнародному бюро мір і ваг у Франції. Приблизно можна вважати, що 1 кг дорівнює масі 1 л прісної води.

Використовують і похідні одиниці маси: 1 грам (г), що дорівнює 0,001 кг, а також 1 тону (т), що дорівнює 1000 кг.

Маси двох тіл можна порівняти, якщо виміряти, як змінюються їхні швидкості при взаємодії.

Візьмімо два візки масами  $m_1$  й  $m_2$ .



На одному з них закріпимо пружину, зігнемо й зафіксуємо ниткою. Якщо нитку перепалити, то під дією пружини бруски набувають швидкості  $v_1$  й  $v_2$ . За відношенням швидкостей візків можна порівняти й відношення їхніх мас:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Таким чином, відношення мас тіл обернено пропорційно відношенню їхніх швидкостей. А якщо маси тіл можна порівнювати, то їх можна й вимірювати.

### Взаємодії та сили

Отже, ми з'ясували, що зміна швидкості тіла завжди зумовлюється дією на нього іншого тіла, того, з яким воно взаємодіє.



Коли хлопчик несе книги, він із силою підтримує їх. Гамак, що розтягся під вагою ведмедя, із силою тягне за стовбур дерева, згинаючи його. У цих прикладах «із силою» є спільне: дія одного тіла на інше. Руки діють на книги, а гамак — на стовбур. Тому можна сказати, що сила — це термін, який служить для короткого позначення дії одного тіла на інше.

Сила може бути більшою або меншою. Наприклад, сила дії ведмедя на гамак більше, ніж метелика. Отже, термін «сила» має й друге значення: сила — це фізична величина, що кількісно характеризує дію одного тіла на інше.

Одне на одного діють не тільки дотичні тіла. Наприклад, Земля притягає літаючих птахів, не доторкаючись до них.

Тоді постає питання: як дізнатися, що на тіло діє сила? Для цього служать ознаки дії сили: зміна швидкості або напрямки руху тіла, зміна форми або розмірів тіла. Наприклад, припинивши змахувати крильми, птах буде летіти не тільки вперед, але й униз. Тобто тіло птаха змінить напрямок руху. Під час падіння птаха швидкість руху його тіла також не буде залишатися постійною: вона буде збільшуватися.



У фізиці часто не вказують, яке тіло і як діє на дане тіло, а говорять, що на тіло діє сила або до тіла прикладена сила. Під дією сили може змінюватися швидкість не тільки всього тіла в цілому, але й окремих його частин.

• **Сила** — векторна величина, що є мірою взаємодії тіл.

Під дією сили тіло змінює свою швидкість. Але чим більше маса тіла, тим повільніше змінюється його швидкість під дією певної сили. На підставі цього можна ввести одиницю сили.

За одиницю сили приймають 1 ньютон (1 Н).

• 1 Н — це сила, що діє на тіло масою 1 кг, змінюючи його швидкість щосекунди на 1 м/с.

Кожна сила характеризується:

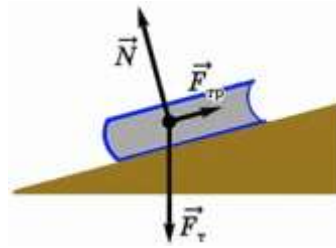
- 1) значенням;
- 2) напрямком у просторі;
- 3) точкою прикладання.

## 2. Приклади дії сил

• У механіці вивчають взаємодії, обумовлені силами пружності, тяжіння й тертя.

На кресленнях сили, як й інші векторні величини, позначають стрілками. Початок стрілки збігається із точкою прикладання сили, напрямок стрілки вказує на напрямок сили, а довжина стрілки пропорційна модулю сили.

Наприклад, на рисунку зображена сила  $\vec{F}_1$ , з якою м'яч тисне на долоню, і сила  $\vec{F}_2$ , з якою долоня тисне на м'яч.



Якщо книга лежить на похилій площині, на книгу діють три сили: сила ваги  $\vec{F}_T$ , сила нормальної реакції  $\vec{N}$  й сила тертя  $\vec{F}_{\text{тер}}$ , спрямована уздовж похилої площини догори.

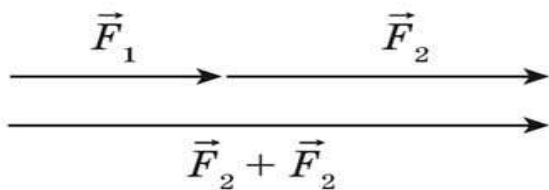
Зверніть увагу: сила пружності спрямована перпендикулярно до поверхні стола. Тому її називають звичайно силою нормальної реакції, тому що перпендикуляр називають також нормаллю.

### Додавання сил

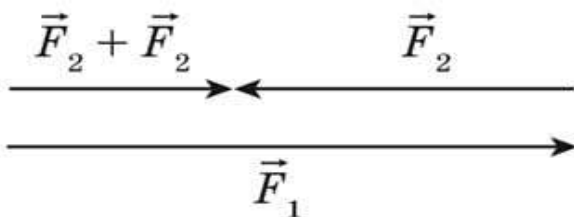
Досліди показують, що в тих випадках, коли розмірами тіла можна знехтувати, дію на тіло декількох сил можна замінити дією однієї сили, яку називають **рівнодійною** цих сил.

Знаходження рівнодійної декількох сил називають складанням цих сил. Оскільки сили є векторними величинами, їх складають за правилом складання векторів. Розглянемо спочатку складання двох сил, що діють уздовж однієї прямої.

Якщо дві сили спрямовані однаково, їх рівнодійна спрямована так само, а модуль рівнодійної дорівнює сумі модулів сил-доданків.



Якщо дві не рівні за модулем сили спрямовані протилежно, їх рівнодійна спрямована як більша із цих сил, а модуль рівнодійної дорівнює різниці модулів сил-доданків.



Якщо рівнодійна всіх сил, що діють на тіло, дорівнює нулю, говорять, що ці сили врівноважують (компенсують) одна одну. Урівноважувати одна одну можуть також сили, що діють на тіло, яке рухається. У такому випадку швидкість цього тіла залишається незмінною (за модулем і за напрямком).



## Сили пружності

Під дією сили змінюється швидкість руху тіла. При контакті взаємодіючих тіл починають рухатися окремі частини тіла, внаслідок чого обидва тіла деформуються.

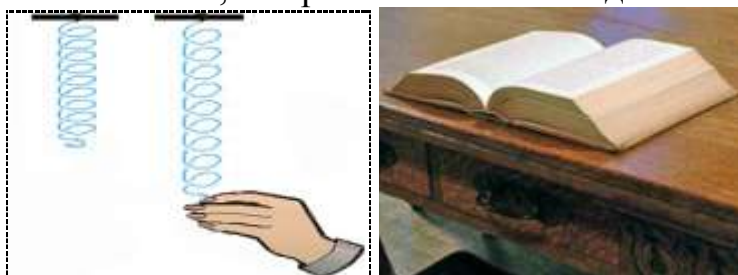
- **Деформація** — це зміна форми або розмірів тіла.

Деформація тіла називається **пружною**, якщо після зняття навантаження повністю відновлюються розміри й форма тіла.

Деформація тіла називається **пластичною**, якщо після зняття навантаження розміри й форма тіла не відновлюються.

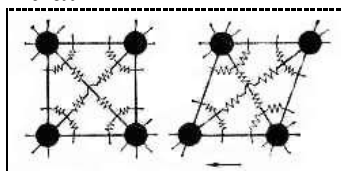


Іноді деформацію тіла легко помітити, наприклад, при розтяганні або стиску пружини. Але часто деформація не помітна для наших очей, наприклад, ми не помічаємо, як прогинається стіл під книгою.



- **Сили пружності виникають при деформації тіла, тобто при зміні його форми.**

Причиною виникнення сил пружності у тілі є взаємодія його молекул, які розташовані на певній відстані одна від одної. Молекули тіла однозначно відштовхуються і притягаються одна до одної. У недеформованому тілі молекули перебувають саме на такій відстані, за якої сили притягання й відштовхування врівноважуються. Коли ми розтягуємо або стискаємо тіло, відстані між молекулами змінюються, тому починають переважати або сили притягання, або сили відштовхування. У результаті й виникає сила пружності, що завжди спрямована так, аби зменшити величину деформації тіла.

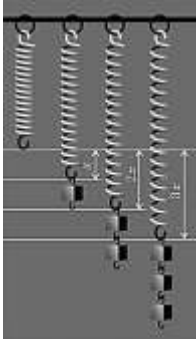


## Закон Гука

Із практики відомо, що чим більшу деформацію ми бажаємо створити, тим більше навантаження потрібно прикласти до тіла, що деформується. Отже, за величиною деформації можна судити про величину прикладеної сили.

Знайдемо на досліді співвідношення між деформацією тіла й силою пружності. Підвісимо до пружини спочатку один важок й виміряємо

видовження пружини. Додамо ще один важок — тоді сила пружності збільшиться вдвічі: адже тепер вона врівноважує силу ваги, що діє на два важки. Ми побачимо, що видовження пружини теж стало вдвічі більшим.



Співвідношення між силою пружності й видовженням пружини вперше було встановлено дослідним шляхом англійським фізиком Робертом Гуком. Тому його називають законом Гука:

- *модуль сили пружності  $F_{пр}$  прямо пропорційний видовженню тіла  $x$*   
:  $F_{пр} = kx$ .

Коефіцієнт пропорційності  $k$  називають жорсткістю тіла. Він чисельно дорівнює силі, яку необхідно прикласти для того, щоб розтягти тіло на одиницю довжини. Одиницею виміру жорсткості в СІ є Н/м.

### **Вимірювання сил за допомогою сили пружності**

Отже, за величиною деформації тіла можна судити про величину сили пружності. Тому силу пружності часто використовують для вимірювання сил. Прилад для вимірювання сили називають **динамометром**. При градуюванні (нанесенні шкали) пружинного динамометра використовується закон Гука.

За допомогою динамометра можна порівнювати сили за модулем, а також визначати напрямок дії сили.



### **Падіння тіл**

Спостерігаючи падіння тіл, можна помітити, що «важкі» тіла падають звичайно швидше, ніж «легкі». Наприклад, монета падає набагато швидше, ніж паперовий кружок. Ще в давнину Арістотель стверджував, що легкі тіла мають властивість падати повільніше, ніж важкі. Це переконання вважалось правильним понад дві тисячі років, поки його не спростував італійський учений Галілей, що перейшов від спостережень до дослідів.

Якщо Арістотель має рацію, то тіла рівної маси повинні падати однаково. Перевіримо на досліді: чи так це?



Відпустимо з однієї й тієї ж висоти аркуш паперу й зроблену з такого ж аркуша паперову грудку. Аркуш падає набагато повільніше від грудки, хоча їхні маси однакові.

Виходить, тіла рівної маси не обов'язково падають однакою — дослід спростовує це положення Аристотеля, а це значить, що воно неправильне.

Галілей припустив, що в ідеальній ситуації — якби опору повітря не було зовсім — всі тіла падали б однакою. Щоб перевірити своє припущення, Галілей кинув з Пізанської вежі одночасно кулю й гарматне ядро. Хоча їхні маси відрізняються в багато разів, куля та ядро впали практично одночасно, підтвердивши припущення Галілея.



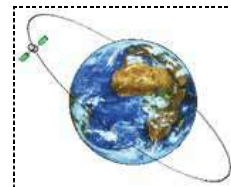
Падіння тіл за відсутності опору повітря називають вільним падінням. Отже,

- *при вільному падінні усі тіла падають однакою.*

Виміри показали, що при вільному падінні швидкість тіла щосекунди збільшується на  $9,8\text{ м/с}$ .

### Сила тяжіння

Камінь падає на Землю тому, що його притягує Земля. Камінь теж притягує Землю. Сили взаємодії між каменем і Землею — це сили всесвітнього тяжіння.



Вивчивши відомі на той час дані про рух небесних тіл, Ньютон дійшов висновку, що сила притягання двох тіл пропорційна масам цих тіл й обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

Сила тяжіння визначається як сила, з якою тіло притягується до Землі в даному місці. Ознакою дії сили завжди є зміна швидкості руху тіла. Для підтвердження цього можна запропонувати учням візуально порівняти швидкість падаючого тіла на початку й наприкінці падіння.

- *Силу, з якою Земля притягує до себе тіло, називають **силою тяжіння**.*



Виходячи з того, що під час вільного падіння швидкість будьякого тіла збільшувалася щосекунди на 9,8 м/с, Ньютон довів, що сила тяжіння прямо пропорційна масі тіла, а коефіцієнт пропорційності — 9,8 Н/кг. Цей коефіцієнт називають **прискоренням вільного падіння**.

Тому модуль сили тяжіння можна виразити через масу тіла  $m$  й прискорення вільного падіння  $g$  так:

$$F_T = gm.$$

### Вага тіла

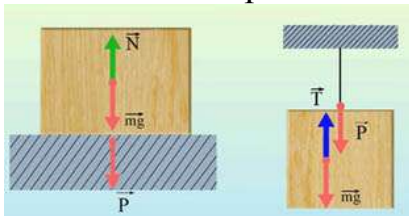
Покладіть на долоню яблуко. Ви відчуєте, що яблуко тисне на долоню з певною силою, спрямованою вниз. Як ми вже знаємо, ця сила обумовлена притяганням яблука до Землі.



Отже, всі тіла внаслідок притягання до Землі або тиснуть на опору, або розтягують підвіс. Для характеристики такої дії у фізиці вводять фізичну величину — вагу тіла.

- Силу, з якою тіло внаслідок притягання його Землею тисне на опору або розтягує підвіс, називають **вагою тіла**.

Сила тяжіння визначається як сила, з якою тіло притягується до Землі, а вага — як сила, з якою тіло під дією сили тяжіння діє на опору або розтягує підвіс. Ці сили діють на різні тіла: сила тяжіння — на саме тіло, а вага — на підставку або підвіс. Якщо тіло нерухоме або рухається рівномірно, то сила тяжіння й вага рівні за модулем.



Вагу тіла позначають буквою  $P$ . Розрахунки показують, що

- вага тіла у стані спокою дорівнює силі тяжіння, що діє на це тіло:

$$P = mg.$$

Якщо на столі нерухомо лежить книга масою 500 г, то на цю книгу діє сила тяжіння 5 Н, але й вага цієї книги також дорівнює 5 Н. Однак це не означає, що вага й сила тяжіння — та сама сила. Ці сили істотно відрізняються одна від одної.

По-перше, ці сили прикладені до різних тіл: сила тяжіння прикладена до тіла, а вага тіла — до опори або підвісу. По-друге, ці сили мають різну фізичну природу: сила тяжіння — це прояв сил всесвітнього тяжіння, що діють на відстані, а вага — зазвичай сила пружності, що діє при безпосередньому контакті.

І, нарешті, сила тяжіння діє на тіло, що перебуває поблизу Землі, завжди, а вага тіла може при цьому дорівнювати нулю.

### **Невагомість**

З телевізійних передач і кінофільмів ми знаємо, що на орбітальній космічній станції, що рухається навколо Землі, тіла перебувають у стані, який називається невагомістю.



Космонавт, як і всі інші тіла, може вільно ширяти на космічній станції. У цьому випадку він не тисне на опору і його вага дорівнює нулю.

- *Стан, за якого вага тіла дорівнює нулю, називають **невагомістю**.*

Характерною властивістю стану невагомості є відсутність «внутрішніх напружень» у тілі, наприклад відсутність тиску одних органів на інші в тілі людини.

Для людини невагомість, як правило, супроводжується розладом вестибулярного апарата, нервовими розладами, нудотою. Космонавти на орбіті перебувають у стані невагомості тривалий час. Щоб витримати цей стан, вони проходять спеціальну тривалу підготовку.

Якщо ви хочете відчувати на собі короткотривалий стан невагомості, для цього необов'язково записуватися в космонавти — достатньо просто підстрибнути. У тривалому стані невагомості перебувають космонавти в космічному кораблі, коли його двигуни *вимкнені*. При цьому космонавти разом з космічним кораблем рухаються під дією тільки сил тяжіння (з боку Землі, Місяця або яких-небудь інших космічних тіл).

### **Сила тертя ковзання**

З тертям ми зіштовхуємося на кожному кроці. Вірніше було б сказати, що без тертя ми й кроку ступити не можемо. Тертя може бути корисним і шкідливим, цю аксіому людина опанувала ще на зорі цивілізації. Адже два найголовніших винаходи — колесо й добування вогню — пов'язані саме із прагненням зменшити й збільшити ефекти тертя.



Рух тіла в реальних умовах не може тривати нескінченно довго. Якщо штовхнути брусок, що лежить на столі, він набуде певної швидкості, але під час руху бруска його швидкість буде зменшуватися. Яка ж «невидима» сила гальмує брусок? Це — сила тертя ковзання. Вона діє з боку стола й спрямована протилежно до руху бруска. Така сама за модулем, але

протилежно спрямована сила — теж сила тертя ковзання — діє на стіл з боку бруска.

- **Сила тертя ковзання** — це сила, що виникає при ковзанні одного тіла по поверхні іншого тіла.

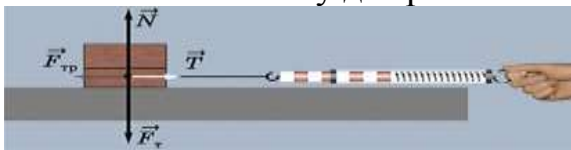
Сила тертя ковзання завжди спрямована проти напрямку руху тіла, до якого вона прикладена. Необхідно відзначити, що при ковзанні одного тіла по поверхні іншого завжди виникає пара сил: одна сила прикладена до ковзного тіла й спрямована проти його швидкості, інша — прикладена до поверхні, по якій тіло ковзає, і спрямована проти першої сили ковзання.

Від чого ж залежить сила тертя ковзання?

Будемо за допомогою динамометра тягти брусок уздовж поверхні стола так, щоб брусок рухався з постійною швидкістю. Сили, що діють при цьому на брусок, врівноважують одна одну — вони зображені на рисунку. Сила пружності з боку пружини  $\vec{T}$  врівноважує силу тертя ковзання  $\vec{F}_{\text{тер}}$ , тому за показниками динамометра можна визначити модуль сили тертя.



Поклавши на брусок другий такий самий брусок, ми подвоїмо силу ваги (і силу нормального тиску). При цьому ми помітимо, що й сила тертя ковзання збільшилася також у два рази.



Це наводить на думку, що

- модуль сили тертя ковзання  $F_{\text{тер}}$  пропорційний модулю сили нормального тиску  $N$ .

$$F_{\text{тер}} = \mu N$$

Коефіцієнт пропорційності  $\mu$  називається **коефіцієнтом тертя ковзання**. Він визначається матеріалом дотичних поверхонь та якістю їх обробки.

Коефіцієнт тертя визначається експериментально. Наприклад,

Матеріали	Коефіцієнт тертя
Сталь по льоду	0,02
Сталь по сталі	0,20
Дерево по дереву	0,25
Шкіра по чавуну	0,56
Гума по бетону	0,75

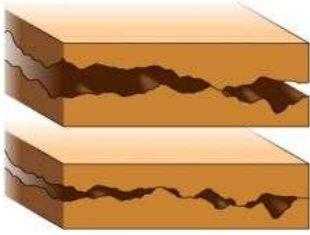
Відносно великий коефіцієнт тертя між гумою й бетоном сприяє безпечному руху автомобілів. Восени, коли мокре листя покриває дорогу і коефіцієнт тертя між колесами та дорогою значно зменшується, рух стає досить небезпечним.



## Природа сили тертя

Сила тертя спокою виникає з двох причин.

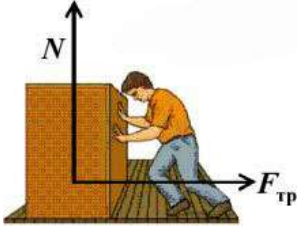
а) На шорсткуватих поверхнях існують нерівності. При спробі зрушити одне тіло відносно іншого ці нерівності зачіпаються одна за одну, у результаті чого виникають сили, подібні до сил пружності.



б) Якщо обидві поверхні ретельно відшліфовані, при зіткненні поверхонь виникають сили міжмолекулярного притягання. Це може призвести навіть до прилипання поверхонь.

## Сила тертя спокою

Кожний знає, як важко зрушити з місця важку шафу. Яка ж сила врівноважує силу, що прикладається до шафи?



Це — сила тертя спокою. Вона виникає при спробі зрушити одне з дотичних тіл щодо іншого й тому перешкоджає руху тіл одне щодо одного.

Якщо збільшувати прикладену до шафи силу, ми все-таки зрушимо шафу. Виходить, сила тертя спокою не може перевищувати деяку «граничну» величину, що називається максимальною силою тертя спокою. Досвід показує, що максимальна сила тертя спокою трохи більше сили тертя ковзання, однак у багатьох задачах для спрощення ці сили вважають рівними.



Сила тертя спокою може набувати значень від нуля до  $F_{\text{тер.спок. max}}$ . Незважаючи на свою назву, сила тертя спокою часто приводить тіла в рух.

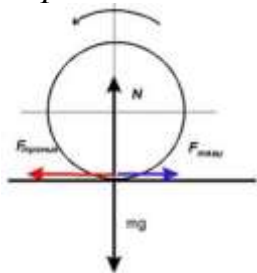
Наприклад, без цієї сили ми й кроку не могли б ступити: роблячи крок, ми відштовхуємося від дороги саме за допомогою сили тертя спокою. Сила тертя спокою розганяє й автомобілі: з її допомогою колеса, що обертаються, відштовхуються від дороги. Якщо по натягнутій струні скрипки провести



смичком, то за рахунок сили тертя спокою струна буде смикатися ривками, почне коливатися й зазвучить.

### Сила тертя кочення

Візьмімо яку-небудь кулю, кругляш або просто круглий олівець. Ці предмети рухаються від поштовху, звичайно, набагато легше, тому що вони вже не ковзають по поверхні стола, а котяться по ньому. І в цьому випадку, звичайно, теж виникає тертя. Але це вже інше тертя, і має воно іншу назву: *тертя кочення*.



Імовірно, тут і доводити не треба, що за тих самих умов тертя кочення завжди буде менше тертя ковзання.

Звичайне тертя кочення тим менше, чим твердіші поверхні дотичних тіл: тому, наприклад, сталева кулька довго котиться по склу. Ось чому рейки й колеса вагонів роблять зі сталі, а шоссе роблять із твердим покриттям.



### Способи зменшення й збільшення сили тертя

Що ж таке тертя? Чи не правда, це слово викликає уявлення чогось неприємного, несимпатичного; чогось такого, що невідомо звідки береться й для того тільки й існує, щоб ми його усували, долали?.. Коротше кажучи, викликає уявлення чогось надзвичайно зайвого. В інтересах істини нам необхідно якомога скоріше позбутися цих помилкових уявлень. Оскільки тертя насправді існує не тільки для того, щоб додавати нам турбот і роботи; воно так само рятує нас від чималих турбот і часто полегшує нашу працю. Давайте уявімо собі, що тертя більше немає. Що тоді б відбулося? Та ми б не змогли з вами і кроку ступити, наші ноги всюди б так і роз'їжджалися, причому куди більше, ніж на гладкому льоді; а поїзд стояв би на колії — машина працювала б, а він не рухався б з місця; книга не змогла б утриматися на столі, та й стіл теж їздив би по підлозі — дивись, а він вже десь у куті. Ручка вислизала б у нас із рук, чашка із чаєм — теж, цвяхи повилізли б зі стін, а гвинти — з гайок. Ми б не зуміли спорудити жодної будівлі, і вітер так і гуляв би повсюди, як у чистому полі.



