

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **31** (2003/2004)

Številka 3

Strani 150–153

Janez Strnad:

O TRENJU, II. del

Ključne besede: fizika, mehanika, trenje, tibologija, lepenje, koeficient trenja, koeficient lepenja, adhezija.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/31/1559-Strnad.pdf>

© 2003 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

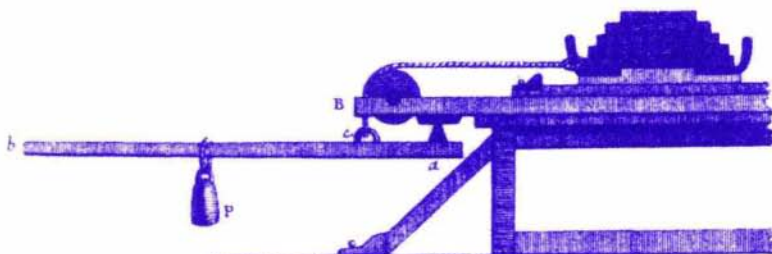
© 2010 DMFA – založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

O TRENJU, II. del

Charles Augustin de Coulomb (1736 do 1806) je leta 1785 začel vrsto poskusov, pri katerih je silo trenja meril s torzijsko tehtnico (slika 1). Ugotovil je:

- Lepenje se razlikuje od trenja.
- V obeh primerih veljata na opazovanem območju prvi Amontonsovi ugotovitvi.
- V obeh primerih je sila trenja odvisna od snovi in od prevleke teles.
- Sila lepenja je odvisna od časa, v katerem se telesi dotikata.
- Sila trenja ni odvisna od hitrosti.
- Vsaj delno sila trenja izvira od privlačne sile med molekulami teles.



Slika 1. Naprave, ki jih je pri poskusih s trenjem uporabljal Coulomb.

Sodelovanje atomov ali molekul klade z atomi oz. z molekulami podlage že dolgo imenujejo *adhezija*, sodelovanje atomov ali molekul v telesu pa *kohezija*. V elementih imamo opraviti z atomi, v spojinah pa z molekulami iz atomov različnih elementov. Dogovorimo pa se, da bomo odslej v tej zvezi omenjali samo atome.

Trditev, da glavni del sile trenja izvira iz hrapavosti, je Coulomb utemeljil s tem, da naj bi adhezija bila odvisna od točk, v katerih se obe telesi stikata, torej od drsne površine. Sila trenja pa je neodvisna od te površine in je zato ne bi mogla povzročati adhezija. Dodal je, da adhezija ni natančno enaka 0, a jo v praksi lahko zanemarimo, če je pravokotna sila dovolj velika in preseže – v naših enotah – nekaj deset newtonov na kvadratni decimeter.

Coulomb si je premikanje zglajenega kosa lesa po enakem kosu predstavljal kot premikanje krtače čez krtačo. Pri tem se ščetine v obeh krtačah prožno deformirajo in je sila potrebna, da bi ločili druge od drugih. Smukec, s katerim namažemo drsno ploskev, povzroči, da se "ščetine" manj dotikajo in se zmanjša sila trenja.

Trditev, da sila trenja in koeficient trenja nista odvisna od hitrosti, je nekoliko omilil. Če je površina mejne ploskve velika, se zdi, da koeficient trenja narašča z naraščajočo hitrostjo, a če je majhna, se zdi da se manjša. V praksi naj bi trenje pogosto obravnavali kot neodvisno od hitrosti. O tem se je prepričal tako, da je klado pospešil s padajočo utežjo. Coulombova trditev je obveljala precej časa. Pozneje je sam večkrat omenil, da v nekaterih primerih, na primer pri drsenju brestovine po brestovini pri majhni pravokotni sili, lesa po kovini, železa po hrastovini, bakra po hrastovini, koeficient trenja narašča sorazmerno z logaritmom hitrosti. Tudi koeficient trenja pri drsenju kovine po lesu, ki je namazan s smukcem, narašča z naraščajočo hitrostjo. Toda pri drsenju kovine po kovini pri veliki pravokotni sili se koeficient trenja zmanjšuje z naraščajočo hitrostjo. Do dokončnega odgovora Coulomb ni prišel, ker najbrž njegova merilna naprava ni omogočala dovolj natančnih merjenj. Ravna podlaga ni bila daljša od 2 m.

Antione Parent (1666 do 1716) je leta 1706 ponovno odkril pomen mejnega kota. Enačbo za mejni kot je zapisal Leonard Euler (1707 do 1783) leta 1748. Euler je trdil, da je po splošnem mnenju sila trenja odvisna samo od bremena in ne od površine. Ugotovil je tudi, da je sila lepenja večja od sile trenja. Koeficient lepenja je povezal z mejnim kotom. Podobno enačbo je napisal za koeficient trenja.

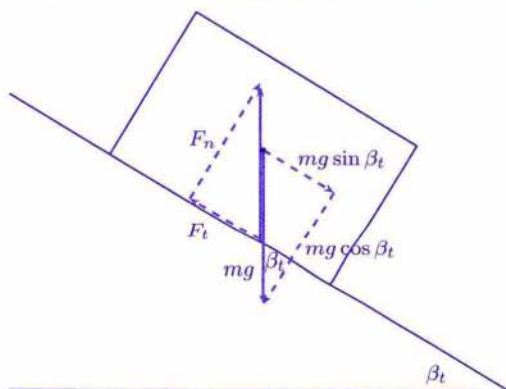
Arthur Morin (1795 do 1880) je leta 1831 začel izvajati poskuse s trenjem, s katerimi je nadaljeval štiri leta. Meril je natančneje kot Coulomb. Uporabil je bremena do 1000 kg in površino drsne ploskve do 30 dm^2 ter dosegel hitrosti do $3,5 \text{ m/s}$. Na ravni podlagi z dolžino do 4 m je uporabil merilnike, ki so samodejno zapisovali silo v odvisnosti od časa. Njegovi poskusi po skrbnosti in natančnosti pri merjenju še danes zbujajo spoštovanje. Vendar tudi Morin ni mogel ugotoviti, da bi bil koeficient trenja odvisen od hitrosti. Pripomnil je, da bi se morala amplituda nihanja zamišljenih ščetin povečati z naraščajočo pravokotno silo in da bi moral tedaj koeficient naraščati z naraščajočo hitrostjo. Vendar kljub prizadevanju, da bi jih meril, ni mogel zaznati teh nihanj. Zato je trdil, da je treba pojasniti trenje kako drugače.

K poznavanju trenja na makroskopski ravni so veliko prispevali francoski raziskovalci, od katerih sta najbolj znana Coulomb in Morin, prvi tudi po elektrostatičnih merjenjih.

Podlaga-klada	k_l -suho	k_l -mazano	k_t -suho	k_t -mazano
kaljeno jeklo-kaljeno jeklo	0,78	0,11	0,42	0,03
nekaljeno jeklo-nekaljeno jeklo	0,74		0,57	0,09
grafit-nekaljeno jeklo	0,21	0,09		
svinec-nekaljeno jeklo	0,95	0,5	0,95	0,30
nekaljeno jeklo-aluminij	0,61		0,47	
teflon-teflon	0,04		0,04	
jeklo-teflon	0,04		0,04	
nikelj-nikelj	1,10		0,53	0,12
nekaljeno jeklo-medenina	0,51		0,44	
lito železo-cink	0,85		0,21	
aluminij-aluminij	1,05		1,4	
steklo-steklo	0,94	0,01	0,40	0,09
nikelj-steklo	0,78		0,56	
steklo-baker	0,68		0,53	
lito železo-lito železo	1,10		0,15	0,07
hrast-hrast (vzporedno)	0,62		0,48	0,16
hrast-hrast (pravokotno)	0,54		0,32	0,07

Tabela 1. Nekaj značilnih podatkov za koeficient lepenja in trenja.

Koeficient trenja najpreprosteje izmerimo s klado, ki se enakomerno giblje po klancu (slika 2). V tem primeru sila trenja ni ne vodoravna ne pravokotna ne navpična sila. Na klado delujeta dve telesi: Zemlja in klanec. Na klancu z nagibom β_t je vzdolžna komponenta sile podlage F_t enako velika kot vzdolžna komponenta teže $mg \sin \beta_t$, pravokotna komponenta sile podlage F_n pa je enako velika kot pravokotna



Slika 2. Klada se enakomerno giblje po klancu z nagibom β_t .

komponenta teže $mg \cos \beta_l$. Pri tem je m masa klade in g težni pospešek. Klada se giblje pospešeno, če je nagib β večji kot β_l .

Koeficient lepenja izmerimo tako, da večamo nagib klanca, na katerem klada spočetka miruje. Pri nagibu β_l klada zdrsne in sila lepenja se izenači z največjo silo trenja. Iz enačb sledi

$$k_t = \tan \beta_t \quad \text{in} \quad k_l = \tan \beta_l.$$

Poleg trenja in lepenja pri drsenju poznamo še trenje in lepenje pri kotaljenju. Pri tem mislimo na valj, ki ga kotalimo po vodoravni podlagi. Koeficient trenja pri kotaljenju je stokrat do tisočkrat manjši kot koeficient trenja pri drsenju in obratno sorameren s polmerom kotalečega se telesa.

Janez Strnad