

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 31 (2003/2004)

Številka 5

Strani 266-271

Janez Strnad:

## O TRENJU III. del

Ključne besede: fizika, mehanika, trenje, tribologija, lepenje, koezija, trenja, koezija, adhezija.

Elektronska verzija:

© 2004 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA Zalo ni tvo

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

## O TRENJU III. del

Nekaterih spoznanj o trenju Coulomb in Morin nista dognala. Morda zato raziskovanje trenja, ki ga v novejšem času imenujejo *tribologija* (tribos, v grščini drgnjenje), ni bilo na najboljšem glasu. Nova spoznanja v prvi polovici 20. stoletja so včasih še bolj zameglila sliko. Najprej je kazalo, da povzročata trenje hrapavost, češ da je koeficient trenja tem večji, čim bolj hrapavi sta klada in podlaga, in tem manjši, čim bolj gladki sta. Pozneje so ugotovili, da velja to samo do neke mere. Pri bolj gladki ploskvi se je koeficient trenja povečal. Po tem je mogoče domnevati, da so za trenje vendarle odgovorni deli obeh površin, na katerih se atomi klade in podlage dotikajo in učinkuje adhezija. Le-to je omenil že Coulomb, ki pa je zatrdil, da z njo lahko pojasni samo manjši del sile trenja. Še leta 1941 je J. J. Bikerman zagotavljal, da z adhezijo ne bi mogli pojasniti, da je koeficient trenja pri drsenju platine po platini, platine po lesu in lesa po lesu enak. Prav tako ne zaznamo adhezije, ko telo dvignemo s podlage. Mejni kot pa naraste od  $6^\circ$  na  $27^\circ$  in koeficient trenja od 0,1 na 0,5, ko postaja mejna ploskev vse bolj gladka. Makroskopski zakoni trenja so sicer široko uporabni, a prevladalo je spoznanje, da jih lahko pojasnimo le mikroskopsko, to je z atomi.

Adhezija je dobivala vse več veljave. Koeficient trenja pri drsenju telesa po grobo zglajenem steklu je manjši kot pri drsenju po vlitem ali optično zbrušnem steklu. Koeficient trenja za sveže pripravljeno podlago je večinoma enak kot za podlago, po kateri je telo že večkrat drselo. Pri zaviranju vztrajnika s telesom v obliki krogle je sila trenja neodvisna od tega, kako zglajena je podlaga. Vendar to ne velja za mehko telo. Pri več kot tisoč poskusih je Bikerman ugotovil, da je bil koeficient trenja za pet različnih kovin enak, ne glede na to, ali je bilo površje zglajeno, grobo zglajeno ali razbrazdano. Trenje je manjše v ležajih, v katerih je ena od površin bolj hrapava od druge. Trenje v mazanih jeklenih krogličnih ležajih ni odvisno od tega, kako gladki sta ploskvi.

Pri adheziji bi pričakovali, da je sila trenja odvisna od *prave stične površine*, to je površine, v kateri so atomi klade v stiku z atomi podlage. Od nje moramo razlikovati *drsno površino* ali *navidezno površino*, na katero smo mislili doslej. Prva je precej manjše od druge. To je uvidel H. Shaw že leta 1886. Pri trenju trdnih teles se stikata klada in podlaga na majhnem številu točk in se pri drsenju premestijo le atomi okoli teh točk. Število teh točk se poveča in stična površina naraste, ko naraste pravokotna sila in se poveča sila trenja. Ta ima potemtakem dva vzroka: deformirajo se deli klade in podlage okoli stičnih točk ter pri gibanju stičnih točk po površju klade in podlage nastanejo brazde.

F. P. Bowden in sodelavci so v letih 1938 in 1939 preprosto merili pravo stično površino tako, da so merili električni upor. Prišli so do zanimivih ugotovitev:

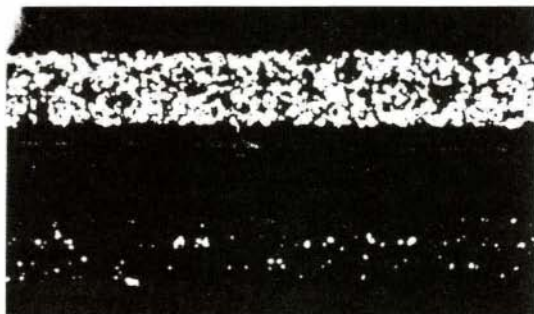
- Prava stična površina je neodvisna od oblike in velikosti navidezne površine, od obdelave in od tega, ali se telo giblje ali miruje.
- Pri kovinah je sila trenja sorazmerna s pravo stično površino, ki je majhen del navidezne površine.
- Sila trenja ni odvisna od pravokotne sile. Zaradi povečane pravokotne sile pa se poveča prava stična površina.

Kovina se v bližini stičnih točk ponavadi plastično deformira. Medtem ko se pri *prožni deformaciji* deli telesa vrnejo v prvotno lego, ko sila preneha, pri *plastični deformaciji* ni tako. Večja pravokotna sila povzroči večjo plastično deformacijo, zaradi katere se poveča prava stična površina. Ta je zelo majhna, tako da se že zaradi zelo majhne pravokotne sile pritalijo deli klade in podlage ob stičnih točkah. Silo trenja povzročata trganje pritaljenih stikov in raze, ki jih izbokline trše kovine zapustijo v mehkejši kovini.

Spoznanji, da je sila trenja sorazmerna s pravokotno silo in neodvisna od navidezne površine, vidimo zdaj v novi luči. Sili, ki sta pravokotni druga na drugo, sta neodvisni, če ju ne poveže kak pojav. Po starem Coulombovem mnenju je to hrapavost klade in podlage, po novem pa pritalitev delov klade in podlage v bližini stičnih točk. Dvakrat večja pravokotna sila povzroči dvakrat več pritalitev in to dvakrat večjo silo trenja.

O tem so se prepričali Bowden in sodelavci. S kladami različnih oblik so ločili učinek pravokotne sile od učinka površine. Poleg tega so merili silo trenja pri drsenju jeklene kroglice po jekleni podlagi, ki jo je prekrivala tanka plast indija. Pravokotna sila se je prenesla med jeklenima telesoma, prava stična površina pa je bila odvisna od debeline indijeve plasti. Oboji poskusi so pokazali, da je sila trenja neodvisna od pravokotne sile in da je sorazmerna s pravo stično površino.

Pri poskusih s klado in podlago iz zglajenega stekla ali kremenca so neposredno opazovali maloštevilne *vroče predele*, ki so se pojavili okoli stičnih točk. Po drsenju bakrene klade je bilo mogoče opaziti pritaljene koščke bakra na podlagi. Koščkov je bilo več, če je bila stična ploskev suha, in manj, če so jo mazali (slika 1). Pri drsenju mehkejše kovine po trši, na primer bakra po jeklu, se kdaj pa kdaj košček trše kovine pritali na mehkejšo in v trši kovini nastane jamica. Tako se na primer obrabi jeklena os v ležaju iz mehkejše kovine.



Slika 1. Sledi bakra na kovini brez mazanja (zgoraj) in z mazanjem (spodaj).

Trganje koščkov snovi so opazovali z radioaktivnimi izotopi. Podlago iz bakrove zlitine so obsevali z devteroni iz ciklotrona. Nato so preiskali radioaktivnost klad iz neradiaoaktivne snovi, ki so drsele ali se kotalile po podlagi. Po tej poti je bilo mogoče opaziti koščke radioaktivne bakrene zlitine z maso  $10^{-4} \mu\text{g}$ , ki so s podlage prešli na klado. Ugotovili so, da se njihova skupna masa poveča, če se poveča hrapavost, in je za jeklene klade sorazmerna s površino. Nekaj snovi je prešlo tudi pri zelo majhni pravokotni sili. Ta prenos snovi s telesa na telo v eni in drugi smeri, pri katerem gladke površine postanejo hrapave, je tesno povezan z obrabo.

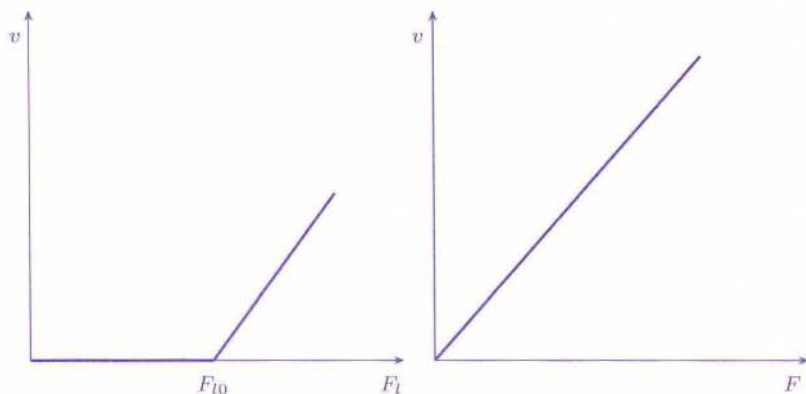
V posebnih primerih je mogoče razmeroma preprosto ugotoviti, da je koeficient trenja odvisen od hitrosti. Pri zaviranju vlaka z veliko hitrostjo morajo popustiti zavore, ko se nekoliko zmanjša hitrost, da kolesa ne zdrsnejo in sunek pri zaustavljanju ni premočan. Francis Galton je že leta 1878 ugotovil, da koeficient trenja z naraščajočo hitrostjo pojema okoli hitrosti 30 m/s. Podobno kot pri zaustavljanju vlaka je veljalo pri zaustavljanju avtomobila, če zavor ne krmili elektronika. Podrobnejša merjenja so pokazala, da za čiste površine koeficient trenja pri zelo majhni hitrosti z naraščajočo hitrostjo narašča, na območju hitrosti od cm/s do m/s je neodvisen od hitrosti, a pri veliki hitrosti pojema z naraščajočo hitrostjo. Na spodnjem robu območja velikih hitrosti je Ludwig Prandtl s sodelavcema leta 1930 navedel enačbo

$$k_t = \frac{1 + k_1 v}{1 + k_2 v} k(0)$$

s  $k_1 = 0,112 \text{ s/m}$ ,  $k_2 = 0,06 \text{ s/m}$  in koeficientom lepenja  $k(0)$  kot koeficientom trenja pri hitrosti 0. Pojemanje koeficienta trenja pri velikih hitrostih so poskusili pojasniti s špranjo, ki se pojavi med podlago in

klado. Tako špranjo s širino nekaj valovnih dolžin vidne svetlobe so zaznali pri merjenjih.

Zanimivo je “zatikanje in drsenje” ali *relaksacijsko nihanje* (slika 2). V grozljivkah se pogosto pojavi prizor, v katerem se počasi odprejo škripajoča vrata. Pojav opazimo v posebnih okoliščinah in je povezan z odvisnostjo koeficienta trenja od hitrosti. Znani primeri so gibanje skoraj navpično postavljene krede po tabli, močno zaviranje avtomobila, gibanje vrat v starih ležajih, noža po kovini v stružnici. V vseh teh primerih slišimo značilen zvok, ki ga navadno opišemo kot škripanje ali cviljenje. K temu pojavu sodi tudi gibanje loka po struni pri godalih. Struna se zatakne ob s smolo namazani lok, ki struno napne, dokler se sila toliko ne poveča, da struna hitro zdrsne v prvotni položaj, nakar se igra ponovi. Ob vsakem zdrsu se vzbudi nihanje strune in potem struna po svoje dušeno niha.



Slika 2. Za trenje je značilno zatikanje. Sila vzmetne tehtnice narašča in z njo narašča tudi sila lepenja  $F_l$ . Klada se ne premakne, dokler sila lepenja ne doseže največje sile lepenja  $F_{l0}$  (levo). Pri upor, na primer pri gibanju telesa po vodi ali zraku, ni zatikanja. Telo se premakne pri poljubno majhni sili, le da se pri zelo majhni sili giblje z zelo majhno hitrostjo (desno).

Pri pojavu je prava stična površina zelo majhna, tako da se v okolici maloštevilnih stičnih točk sprosti znatna toplota in pojavi visoka temperatura. Tam se obe telesi pritalita, drsenje preneha, dokler velika sila ne prekine pritaljenih mest in telesi zdrsneti. Poskuse so delali tudi s kovino, ki se je gibala po kovini. Pojav je bilo mogoče v tem primeru zasledovati po sledovih prve kovine na drugi. Dolžina zdrsa je večja pri večji hitrosti. Pri nekem poskusu je narasla frekvenca na  $150 \text{ s}^{-1}$ , ko je pri

znatni pravokotni sili hitrost narasla na nekaj cm/s. Frekvenca je odvisna tudi od uporabljene merilne naprave. Nekateri razlagajo pojav samo s tem, da je koeficient lepenja večji od koeficienta trenja. V tem primeru naj bi bile hitre spremembe sile trenja učinek in ne vzrok zatikajočega se gibanja.

Pri torni žagi se kovinski valj ali trak giblje s hitrostjo od 60 do 100 m/s in reže vse mogoče snovi, ne pa na primer gumija. Ob trenju se sprosti veliko toplote, ki ne more odteči, snov se ob žagi močno segreje in v tanki plasti zmehta, stali ali zgori. Vroče ostružke odnese od telesa, tako da se telo ne segreje znatno. Pri rezanju železa se pojavijo svetle iskre, trdni delci železa, ki se pogosto zaradi visoke temperature razpočijo. Žaga se le malo izrabi, ker je malo neposrednega stika med njo in telesom, prav tako se tudi ne segreje, ker se deli hitro umikajo in hladijo.

Trenje se pojavi tudi med izstrelkom in cevjo. Izstrelak ima obroč iz mehke kovine, na primer bakra, v katerega se vrežejo žlebovi, da se izstrelak vrtil. Iztrečki ob izstopu iz cevi dosežejo hitrost do 1000 m/s. Koeficient trenja so izmerili tako, da so opazovali gibanje izstrelka v cevi brez žlebov. Uporabili so tudi izstrelak z votlim zadkom, katerega stene so izgoreli plini dodatno stisnili na steno cevi; hitrost se je zmanjšala. Pri poskusih so ugotovili, da opiše koeficient trenja pri gibanju jekla po jeklu navedena enačba s konstantami  $k_1 = 0,0044 \text{ s/m}$ ,  $k_2 = 0,064 \text{ s/m}$  in  $k(0) = 0,27$ . Iz nje sledi za mejni koeficient trenja  $k(v \rightarrow \infty) = 0,019$ . Podobno kot pri žagi se tudi cev zaradi trenja le neznatno segreje, ker se izstrelak hitro giblje. V cevi z žlebovi se močneje segreje le obroč na izstrelku. Snov obroča se plastično deformira, delno stali in delno izhlapi, pri tem velik del toplote ne izvira iz trenja, ampak iz izgorelih plinov. Kot se žaga pri rezanju bakra pobakri, se pobakri cev, če je obroč na izstrelku iz bakra. Kaže, da se pri velikih hitrostih med trdnima telesoma pojavi tanka plast maziva v obliki staljene kovine.

V trenje je vpleten tudi električni naboj. Silo med dotikajočimi se pojasnimo z medsebojnim delovanjem elektronov v njiju. Včasih pa se nabere tudi večji naboj, ki ga je mogoče zaznati. Pri dotiku se eno telo naelektri pozitivno in drugo negativno. Na novo izdelani papir v svitku je na primer močno naelektren. Nabrani naboj je odvisen tudi od vrste plina, ki obdaja telo, in od njegovega tlaka in vlažnosti. Naboj se zveča, če se zniža tlak in zmanjša vlažnost. V kisikovi atmosferi se naboj močno zmanjša, ker verjetno negativni kisikovi ioni izravnajo pozitivni naboj kovine. Pri tem nastane plast oksida, če je to kemijsko mogoče.

Koeficient trenja se zmanjša, če nastane na površju kovine tanka plast oksida in se trdno drži kovine. Krogle iz litega železa s tanko plastjo rje se veliko manj obrabijo kot krogle iz jekla. Tanka plast rje štiti dele železa pod njo pred oksidacijo in obrabo. Nasprotno pa se jekla plast oksida ne drži. Plast sulfida, fosfida in drugih spojin ima podobno vlogo. Celo plast adsorbiranega plina, na primer iz zraka, zmanjša koeficient trenja. Sveže zglajene in v vakuumu žarjene kovinske površine imajo zelo velik koeficient trenja, 5 in več. Dostop kisika, živosrebrnih par in par žveplove kisline zmanjša koeficient trenja. Dostop ogljikovega tetraklorida, cigaretnega dima, dima, ki nastane pri gorenju izolacije vodnikov, pa ga poveča.

Čeprav je mazanje zelo pomembno, mu posvetimo le nekaj besed. Omenili smo, kako je Coulomb pojasnil, da smukec zmanjša trenje kovin. Prav nevidna plast olja, ki znatno zmanjša koeficient trenja, opozarja na to, da lahko prispeva hrapavost samo majhen delež k sili trenja. Po prvi od dveh razlag mazivo izpolni votline med telesoma, ki se taretata, zaradi česar se pojavi manj drobnih neprožnih deformacij. Po drugi pa se zaradi maziva poveča prava stična površina in se s tem zmanjša tlak. Učinek je po obeh razlagah enak. Če sodelujejo pri trenju adhezija in sile med naboji, mazivo zmanjša te sile. Vloga maziva je odvisna od debeline plasti. Pri debeli plasti, pri *hidrodinamičnem mazanju*, je pomembna viskoznost, pri tanki plasti pa je pomembna tudi adhezija.

V zadnjem času raziskovanje trenja postaja vse pomembnejše. Novi načini merjenja omogočajo *nanotribologijo*, opazovanje trenja na ravni atomov. Poskusi so že dali odgovor na nekatera vprašanja, novi pa obetajo pojasniti še preostala.

Janez Strnad

## ASTRONOMSKI POJAV BREZ PRIMERE – Rešitve nalog s str. 263

- $x = b(a + c)/c$
- a) Označimo z  $\alpha$  zorni kot Venere pri pogledu z Zemlje. Ker je kot majhen, lahko sestavimo enačbo  $\alpha/360^\circ = 2R/2\pi r$ , od koder sledi

$$\alpha = \frac{360 \cdot 60' \cdot 6100 \text{ km}}{3,14 \cdot 0,29 \cdot 150 \cdot 10^6 \text{ km}} \doteq 1'$$

- b) Kvocient je  $30'/1' = 30$  (preveri z merjenjem premera slike Sonca in premera slike Venere – temnega krožca).

Marijan Prosen