

## Úloha III.E ... tenisky na vodě

8 bodů; průměr 4,93; řešilo 40 studentů

Změřte koeficient statického a dynamického tření mezi teniskou (botou) a vodorovným hladkým povrchem v situacích, kdy je povrch suchý a kdy je mokrá. Výsledky srovnajte a interpretujte.

*Karel uklouznul na suchu.*

## Jednoduchý model

Smykové tření je jev, ke kterému dochází při posouvání jednoho tělesa po povrchu tělesa jiného. Rozlišujeme tření statické a dynamické. Velikost třecí síly vypočteme ze vztahu

$$F_t = F_n f, \quad (1)$$

kde  $F_n$  je přítláčná síla kolmá na styčnou plochu těles a  $f$  je koeficient dynamického, resp. statického tření. O dynamickém tření hovoříme, jsou-li smýkající se tělesa navzájem v pohybu. Při rovnoměrném přímočarém pohybu má tažná síla způsobující pohyb tělesa stejnou velikost jako třecí síla.

Ke statickému tření dochází u těles, která jsou navzájem v klidu. Až do jisté meze mají statická třecí síla a tažná síla působící na těleso rovnoběžně s podložkou stejnou velikost. Při překročení této meze se těleso dává do pohybu a tření se mění na dynamické. Koeficient statického tření určuje maximální sílu, kterou je možno na těleso působit rovnoběžně s podložkou, aby ještě zůstalo v klidu.

Maximální statické tření je většinou větší než dynamické. Je-li mezi tělesem a podložkou kapalina, tření se obvykle snižuje (záleží na konkrétním povrchu a kapalině).

## Problémy

V praxi dochází k mnoha jevům, které situaci komplikují. U pružných těles dochází k odsakování, kdy jejich povrchy jsou navzájem v klidu, avšak tělesa se pružně deformují. Když je síla pružnosti větší než klidová třecí síla, dojde k odskoku, při kterém tělesa dočasně ztratí kontakt a dochází k jejich volnému pohybu než se působením přítláčné síly opět dotknou a děj se opakuje. U adhezivních povrchů se tření projevuje, i když je přítláčná síla nulová, třecí síla může záviset na povrchu atd. Tření může dále záviset na rychlosti a na mokřem povrchu může docházet k tzv. aquaplaningu, kdy se mezi tělesem a podložkou vytvoří souvislá vrstva vody a tření se dramaticky snižuje.

## Výsledky měření

Měření bylo prováděno pomocí elektronického siloměru systému Vernier Dual range force sensor a vyhodnoceno v programu LoggerLite 1.7. Měření probíhalo na vodorovném povrchu. Přítláčná síla je tedy rovna tíze boty se závažím. Bota byla tažena siloměrem za nit. Nejprve se pomalu zvětšovala tažná síla dokud se bota nedala do pohybu poté byla tažena konstantní rychlostí. Kvůli stabilitě byla teniska tažena za nit provlečenou špičkou podrážky. Při měření bylo dbáno na to, aby nit směřovala rovnoběžně s podložkou. Teniska byla tažena velmi pomalu (cca  $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) kvůli minimalizaci chyby způsobné závislostí třecí síly na rychlosti.

Měření bylo provedeno na čtyřech různých podložkách. V tabulce 1 je uvedena závislost statické ( $F_s$ ) a dynamické ( $F_d$ ) třecí síly na síle přítláčné ( $F_n$ ).

Výsledky byly zpracovány lineární regresí podle vztahu (1). Vztah odpovídá rovnici  $y = ax + b$ , kde násobný koeficient  $a$  je přímo hledaný koeficient tření a  $b$  parametr, který

Tabulka 1: Měření třecí síly.

linoleum				sklo				papír	kov	
suché		mokrě		suché		mokrě		suchý	suchý	
$\frac{F_n}{N}$	$\frac{F_d}{N}$	$\frac{F_s}{N}$	$\frac{F_d}{N}$	$\frac{F_s}{N}$	$\frac{F_d}{N}$	$\frac{F_s}{N}$	$\frac{F_s}{N}$	$\frac{F_d}{N}$	$\frac{F_s}{N}$	$\frac{F_d}{N}$
4,4	3,9	3,3	2,4	4,6	3,7	4,5	1,4	3,3	1,4	1,2
6,3	5,0	5,4	2,5	6,7	6,1	6,5	1,5	4,8	1,9	1,6
8,2	7,2	6,6	3,5	8,1	7,9	7,9	1,4	7,0	3,1	2,1
10,0	9,4	9,0	4,8	9,7	9,4	9,0	2,6	8,6	3,4	3,0
12,9	11,1	9,6	7,3	12,2	12,0	12,6	1,9	11,3	4,7	3,7

Tabulka 2: Výsledné koeficienty tření pro všechny měřené povrchy.

materiál	$f_s$	$f_d$
lino suché		$0,87 \pm 0,02$
lino mokré	$0,80 \pm 0,03$	$0,50 \pm 0,03$
sklo suché	$0,98 \pm 0,02$	$0,94 \pm 0,01$
sklo mokré	$0,96 \pm 0,02$	$0,20 \pm 0,02$
papír		$0,96 \pm 0,03$
kov	$0,39 \pm 0,03$	$0,31 \pm 0,02$

zohledňuje možné systematické chyby měření. Statický koeficient značíme  $f_s$ , dynamický  $f_d$ . Pro některé povrchy nedocházelo k poklesu třecí síly při uvedení tělesa do pohybu. Pro tyto povrchy je v tabulce 2 uveden pouze dynamický koeficient, statický je pravděpodobně stejný. Pro rychlosti, při kterých bylo měření prováděno, nebyla zjištěna výrazná závislost na rychlosti.

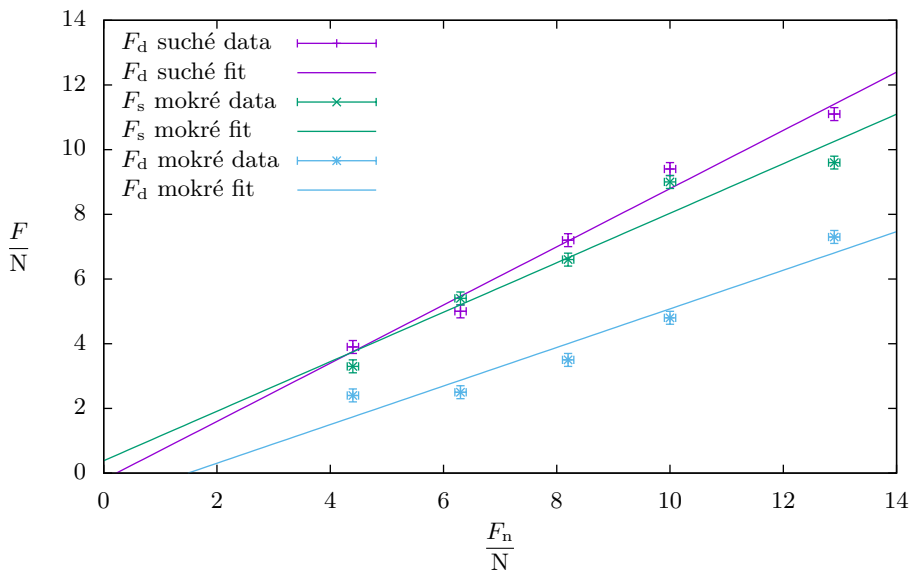
### Diskuse

Z grafů je vidět, že proložená závislost neleží v intervalu standardní nejistoty. Body jsou od proložené přímky vzdáleny méně než  $3\sigma$ , ale krajní nejistotu v grafech neuvádíme s ohledem na individualitu každého měření. I přes snahu dodržet vždy stejný způsob a trajektorii pohybu docházelo například k vibračním popsáním v teorii, které měly značný efekt na měření dynamické třecí síly. Nejpřesnějších výsledků bylo dosaženo pro papír a pro lakovaný kov, kde k žádným vibračním nedocházelo.

### Závěr

Změřené hodnoty částečně odpovídají teoretickým předpokladům. Největší rozdíl mezi statickým a dynamickým třením vzniká na mokřém skle, kde se však zdá, že koeficient dynamického tření příliš nezávisí na přítláčné síle. Největší rozdíl mezi statickým a dynamickým třením se projevil u lakovaného kovu. Pro suchý papír a suché linoleum je naopak koeficient statického tření menší nebo roven koeficientu dynamického tření.<sup>1</sup> Pro mokřé sklo a linoleum vychází

<sup>1</sup>Může se jednat o nepřesnost měření nebo o závislost koeficientu dynamického tření na rychlosti. Ve skutečnosti může být koeficient statického tření minimálně roven koeficientu dynamického tření.



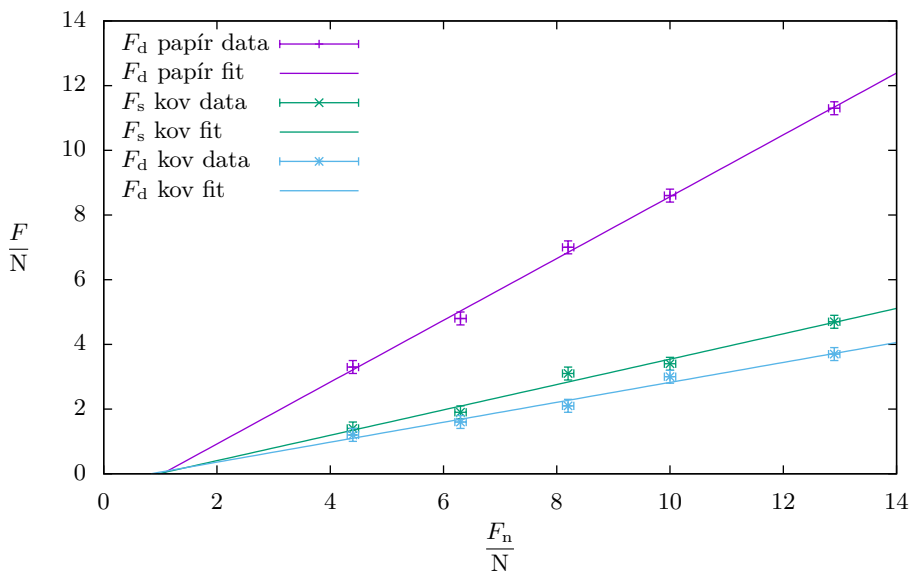
Obr. 1: Závislost třecí síly na přitlačné pro tenisku na linoleu.

koeficient nižší než pro suché povrchy pro sklo je rozdíl asi pětinašobný.

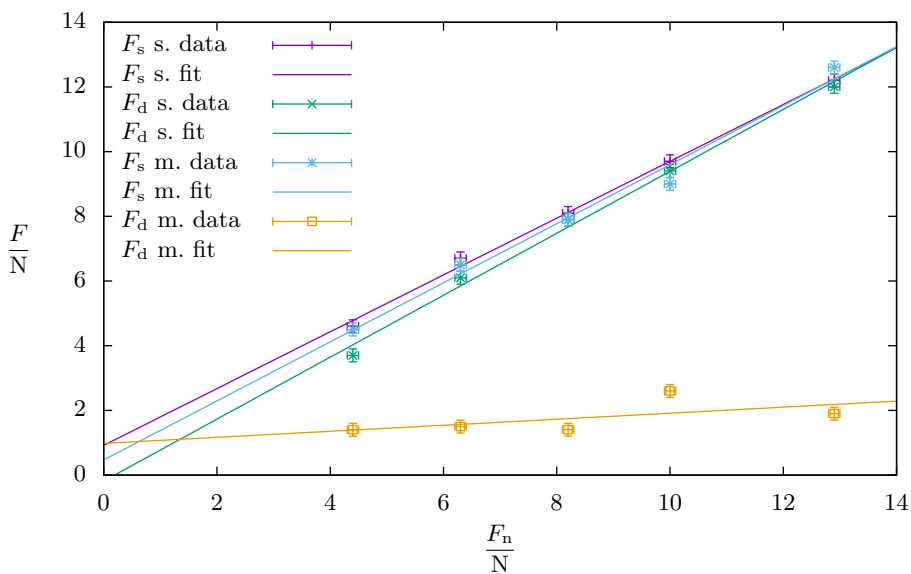
**Erik Hendrych**  
erik@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported. Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.



Obr. 2: Závislost třecí síly na přitlačné pro tenisku na papíře a lakovaném kovu.



Obr. 3: Závislost třecí síly na přitlačné pro tenisku na skle.