

20. ročník, úloha IV. E ... vyřete nám zrak (8 bodů; průměr 5,61; řešilo 18 studentů)

Změřte, jak závisí součinitel smykového tření mezi dvěma vámi vybranými materiály na velikosti stykové plochy a na hmotnosti smýkajícího se tělesa. Nezapomeňte nám napsat, s čím a jak jste měřili.

Úloha napadla Honzu Prachaře při čtení Feynmanových přednášek z fyziky.

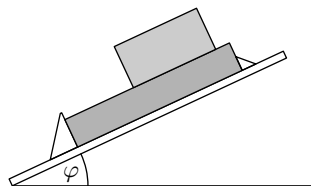
Teorie

Při měření součinitele smykového tření je důležité si uvědomit, že existují dva různé součinitele. Tedy že existuje součinitel klidového tření a součinitel smykového tření. Klidová třecí síla je definovaná jako síla působící na stojící těleso, kdežto smyková třecí síla je síla, která působí proti pohybu při smýkání jednoho tělesa po druhém. Pro klidové tření platí $F \leq f_0 N$ (rovnost nastává těsně před uvedením tělesa do smýkavého pohybu), pro smykové tření platí

$$F = f N,$$

kde N je přítláčná síla kolmá k podložce a F je výše definovaná třecí síla. Klidové třecí síle odpovídá součinitel klidového tření f_0 a smykové třecí síle zase součinitel smykového tření f . Součinitel klidového tření bývá zpravidla o něco vyšší než součinitel smykového tření.

Pro měření těchto součinitelů se používají *tribometry*. Nejčastěji jste používali sklonný tribometr, který je na obrázku 1. Na tomto tribometru lze měřit jak součinitel klidového tření, tak součinitel smykového tření. Součinitel klidového tření se měří jednoduše tak, že položíme zkoumané těleso na smýkací plochu a zvětšujeme úhel náklonu φ , dokud se těleso nepočne pohybovat, a tento mezní úhel si zapíšeme.



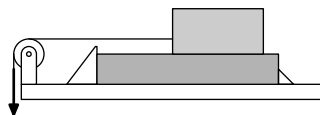
Obr. 1. Sklonný tribometr.

Měření součinitele smykového tření je o něco komplikovanější, hledá se totiž úhel, při kterém se zkoumané těleso bude pohybovat po počátečním postrčení rovnoměrně přímočaře, tedy ani zrychleně, ani zpomaleně. Zde je znatelnější vliv subjektivního vnímání, a proto je lepší měření pro stejné parametry několikrát zopakovat, čímž snížíme statistickou chybu.

Z nalezeného úhlu φ určíme daný součinitel f díky jednoduché geometrii a rozkladu tíhové síly jako

$$f = \frac{F}{N} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Někteří z vás také použili vodorovný tribometr, vyobrazený na obrázku 2. Na tomto tribometru lze opět měřit jak součinitel klidového tření, tak součinitel smykového tření. Obdobně jako u sklonného tribometru součinitel klidového tření hledáme tak, že za konec provázku taháme stále větší silou a hledáme mezní sílu, při které se začne těleso pohybovat. Součinitel smykového tření určujeme tak, že hledáme sílu, kterou tahat za provázek tak, aby se těleso po počátečním postrčení počalo pohybovat rovnoměrným přímočarým pohybem. Opět je zde významný vliv subjektivního vnímání a odhadu pro rovnoměrný pohyb. Z nalezené mezní síly F_m vypočítáme součinitel f opravdu triviálně, jelikož velikost F_m je díky kladce rovna velikosti F , tedy



Obr. 2. Vodorovný tribometr.

$$f = \frac{F_m}{N}.$$

Měření

My jsme použili sklonný tribometr a měřili jsme klouzání nelakovaného tvrdého dřeva po tvrdém nelakovaném dřevu. Pro změnu hmotnosti jsme používali směs magnetů a železných kroužků připevněnou ke dřevu pomocí hřebíčků, čímž jsme dosáhli vcelku rovnoměrného rozložení přidávané hmotnosti. Pro změnu povrchu jsme vždy kousek dřeva uřízli. Nejdříve jsme zkoumali závislost součinitelů na hmotnosti tělesa, potažmo tedy na přítláčné síle. Pro každou hmotnost závaží jsme měřili pětkrát a v následující tabulce jsou uvedeny vždy průměrné hodnoty. V této tabulce uvádíme pouze statistické chyby měření, o celkové chybě měření se zmíníme v diskusi.

Měření závislosti součinitelů na hmotnosti.

| m [g] | φ [°] | f | φ_0 [°] | f_0 |
|---------|----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 170 | $28,1 \pm 0,4$ | $0,533 \pm 0,005$ | $32,7 \pm 0,5$ | $0,641 \pm 0,006$ |
| 220 | $28,3 \pm 0,4$ | $0,537 \pm 0,004$ | $32,7 \pm 0,5$ | $0,643 \pm 0,006$ |
| 250 | $27,8 \pm 0,6$ | $0,527 \pm 0,007$ | $32,5 \pm 0,4$ | $0,638 \pm 0,005$ |
| 300 | $28,7 \pm 0,6$ | $0,548 \pm 0,006$ | $33,1 \pm 0,6$ | $0,651 \pm 0,007$ |
| 400 | $30,4 \pm 0,5$ | $0,588 \pm 0,006$ | $33,0 \pm 0,5$ | $0,650 \pm 0,006$ |

Obdobně jsme pro každou velikost styčného povrchu také měřili pětkrát a průměrnou hodnotu včetně statistické chyby jsme zanesli do tabulky. Závislost na povrchu jsme měřili při hmotnosti tělesa 250 g.

Měření závislosti součinitelů na velikosti styčné plochy.

| S [cm ²] | φ [°] | f | φ_0 [°] | f_0 |
|------------------------|----------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 150 | $27,8 \pm 0,6$ | $0,527 \pm 0,007$ | $32,5 \pm 0,5$ | $0,638 \pm 0,005$ |
| 120 | $28,0 \pm 0,4$ | $0,532 \pm 0,005$ | $32,8 \pm 0,7$ | $0,645 \pm 0,008$ |
| 100 | $28,3 \pm 0,5$ | $0,539 \pm 0,006$ | $32,7 \pm 0,5$ | $0,642 \pm 0,007$ |
| 80 | $28,1 \pm 0,7$ | $0,535 \pm 0,008$ | $33,2 \pm 0,5$ | $0,654 \pm 0,006$ |
| 50 | $28,7 \pm 0,6$ | $0,547 \pm 0,007$ | $33,0 \pm 0,6$ | $0,651 \pm 0,007$ |

Diskuse

V literatuře¹ se lze dočíst, že pomocí výše popsaných tribometrů lze dosáhnout přesnosti kolem 10 %. Když vezmeme v potaz to, že samotné určování úhlu či zavěšené hmotnosti je zatíženo v amatérských podmínkách někdy i podobně velkou chybou, je zřejmé, že celková chyba měření je podstatně vyšší než výše uvedené statistické chyby, konkrétně v našem případě odhadujeme chybu kolem 15 % danou také tím, že reálná plocha či hmotnost zkoumaného tělesa jsou také o něco jiné než námi stanovené.

Výsledek experimentu silně závisí na zvoleném povrchu zkoumaného tělesa, povrchu skluzu a zkoumaném oboru parametrů. Dopředu nelze vyloučit prakticky žádné kvalitativní chování. Jediná „jistota“ je, že součinitel klidového tření by měl být vyšší než součinitel smykového tření. Nicméně závislost obou součinitelů by měla být velmi pozvolná, takřka konstantní. Při relativně malých hmotnostech může hrát velkou roli nedokonalé dosednutí třených ploch. Při vyšších hmotnostech sice těleso dosedne lépe, ale zase hrozí prohnutí kluzné plochy. Celkově mohou také ovlivnit měření jakékoliv nehomogenity třených povrchů.

¹⁾ Brož, J.: *Základy fyzikálních měření (I)*. SPN, Praha 1983.

Poznámky k došlým řešením

Většina řešitelů nezaznamenala žádnou závislost součinitelů ani na hmotnosti tělesa, ani na styčné ploše. Ti, kteří nějakou závislost zaznamenali, povětšinou nepřekonali relativní rozdíl 10 % mezi největším a nejmenším naměřeným součinitelem, a je tedy diskutabilní, zda lze tuto závislost považovat za něco jiného než chybu měření. Při našem měření jsme se také pouze přiblížili k relativnímu rozdílu odpovídajícímu chybě měření, a tedy jsme neprokázali žádnou závislost součinitele smykového či klidového tření ani na hmotnosti tělesa, ani na velikosti styčné plochy.

Petr Sýkora

petr@fykos.mff.cuni.cz