

Tření ve vědě, praxi a škole

Vladislav Navrátil
Pedagogická fakulta MU

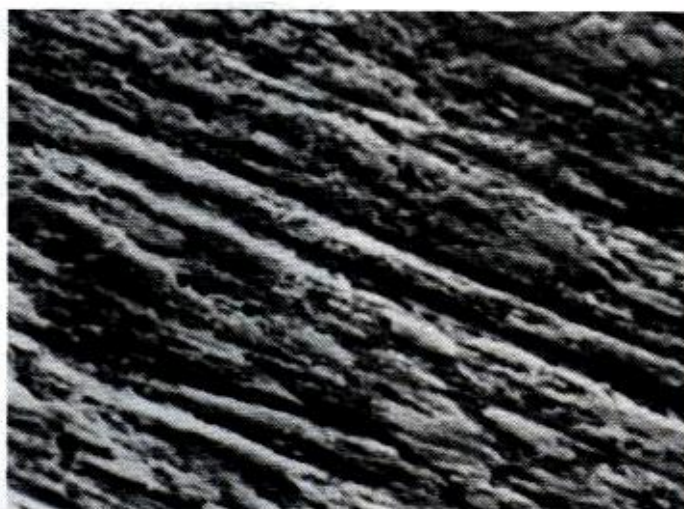
Úvod

Kluzné tření je jedním z nejstarších fyzikálních problémů a má obrovský praktický význam. Odborné odhady uvádějí, že finanční ztráty v USA, plynoucí z opomíjení tření, tvoří asi 6% celkového národního produktu, což činí asi 420 miliard dolarů. Schopnost produkovat plochy s malým třením a mazací kapaliny hraje důležitou roli při miniaturizaci pohyblivých součástí v mnoha technických zařízeních. Příkladem mohou být magnetické paměti a záznamové systémy (počítačové disky a jejich hlavy), miniaturní motorky a mnohá zařízení v letectví. Krátce řečeno, moderní svět závisí na systémech s nízkým třením, které jsou brány jako samozřejmost. Přesto mnoho aspektů kluzného tření není ani v současnosti dobře pochopeno zejména z mikroskopického hlediska.

Avšak tření není pouze na obtíž. Bez tření by neexistovala hudba na houslích a nebyla by možná chůze, nebo jízda autem. Existují případy, kdy je třeba tření spíše zvýšit, než minimalizovat. Takovým příkladem z běžné praxe je tření mezi pneumatikou automobilu a vozovkou během brzdění. Na tento problém bylo až dosud vynaloženo mnoho výzkumné práce.

Kluzné tření bylo intenzívně studováno po několik století mnoha významnými vědci, jako byl např. Leonardo da Vinci, Coulomb a Reynolds. Teoretická podstata tohoto zkoumání zahrnuje základy fyziky, tj. otázky vratnosti dějů a v případě mazání rozhraní jsou to fázové přechody v tenkých vrstvách maziv.

Ze zkušenosti víme, že vyrobit ideálně hladký povrch pevné látky bude asi dosti obtížné, ne-li nemožné. I tzv. zrcadlově hladký povrch kovu se nám při dostatečném zvětšení jeví jako hrbolatý (Obr. 1). Proto posouváme-li po sobě dvě tělesa, budou mezi nimi působit tzv. *síly tření*. Tyto síly dělíme na *síly tření smykového, valivého, řemenového a vrtného*. Z jiného hlediska dělíme tření na *tření suché a mokré*.



Obr. 1. 1500 x zvětšený povrch vyleštěné ložiskové oceli.

1. Tření smykové (suché)

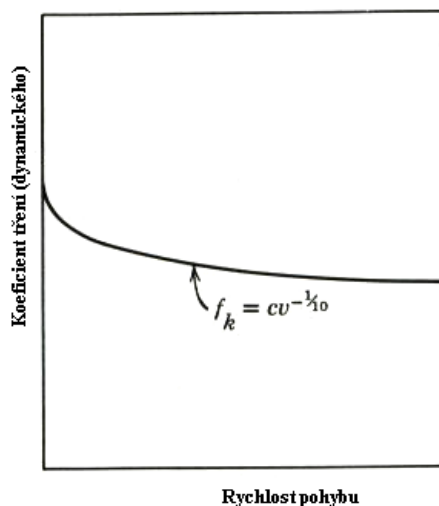
Tření smykové vzniká při pohybu jednoho tělesa po druhém (předpokládáme, že obě plochy jsou rovinné). Pro sílu tření mezi oběma tělesy platí experimentálně určený Coulombův – Amontův zákon:

$$F_t = \mu \cdot N \quad (1)$$

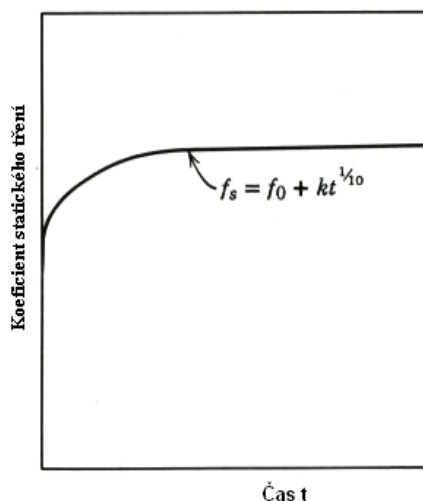
kde μ je koeficient tření a N je kolmý tlak, tj. složka výsledné síly, kolmá k třecí ploše.

Koeficient tření je funkcí (zřejmě kromě jiných parametrů) rychlosti vzájemného pohybu obou těles (Obr. 2.). Jeho závislost na době, po kterou obě tělesa na sobě spočívají, je uvedena na Obr. 3. Na Obr. 4. je vynesena závislost síly tření na čase. Z obrázku plyne z praxe známá zkušenost: táhneme-li např. sáně po umrzlém sněhu, musíme nejdříve působit dosti velkou silou, než se dají do pohybu. Po překonání jisté maximální síly, při níž se sáně daly do pohybu je síla, potřebná k jejich dalšímu pohybu již menší.

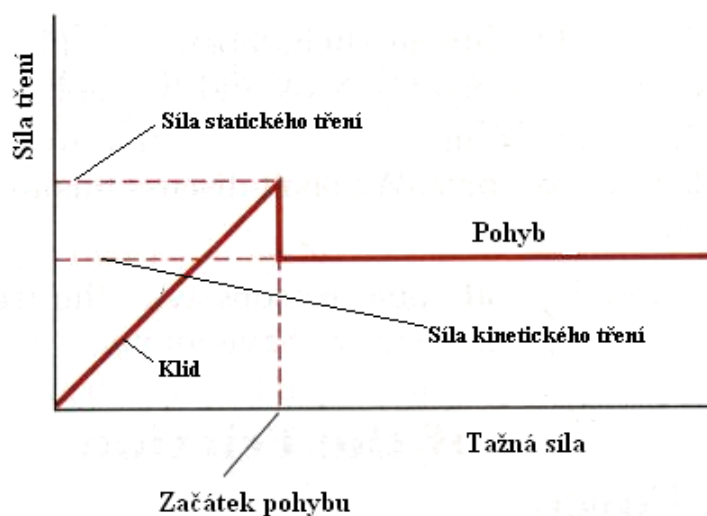
Obě uvedené závislosti lze kvalitativně vysvětlit pomocí tzv. *teorie mikrosvárů*. Základní myšlenka této teorie plyne z Obr. 5., kde jsou schematicky znázorněny dva po sobě klouzající povrchy. Právě v místech, kde se vzájemně dotýkají „výstupky“ obou ploch, dochází k tak těsnému kontaktu, že atomy obou povrchů jsou tak blízko u sebe, že mezi nimi začnou působit meziatomové síly – vzniknou *mikrosváry*. V případě kovů je situace komplikována v důsledku přítomnosti heterogenní vrstvy, která vzniká na jejich povrchu v důsledku oxidace a technologického zpracování (Obr. 6.).



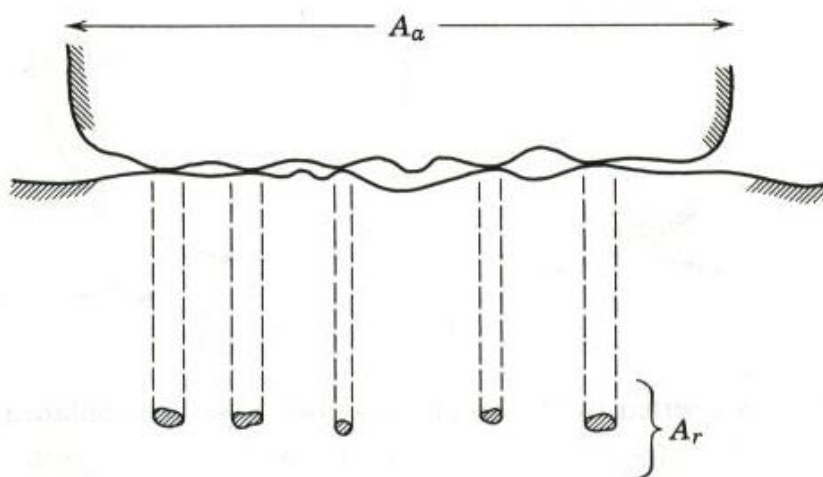
Obr. 2. Závislost koeficientu tření na rychlosti pohybu.



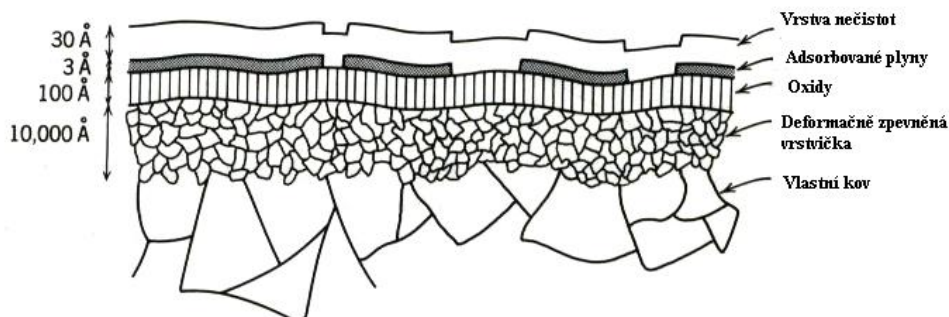
Obr. 3. Závislost koeficientu tření na čase (do začátku pohybu)



Obr. 4. Závislost síly tření (koeficientu tření) na tažné síle (čase).



Obr. 5. Vzájemný vztah mezi skutečnou a zdánlivou třecí plochou.



Obr. 6. Schematické znázornění složité situace na povrchu kovů.

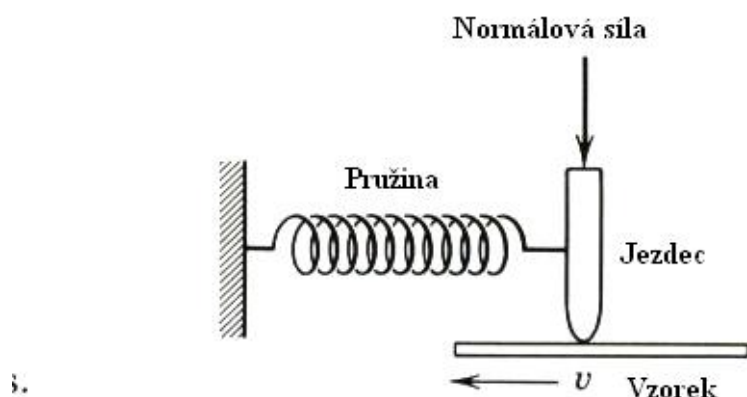
V Tabulce 1. jsou uvedeny koeficienty tření pro některé v praxi používané dvojice materiálů

Tab. 1. Koeficienty tření

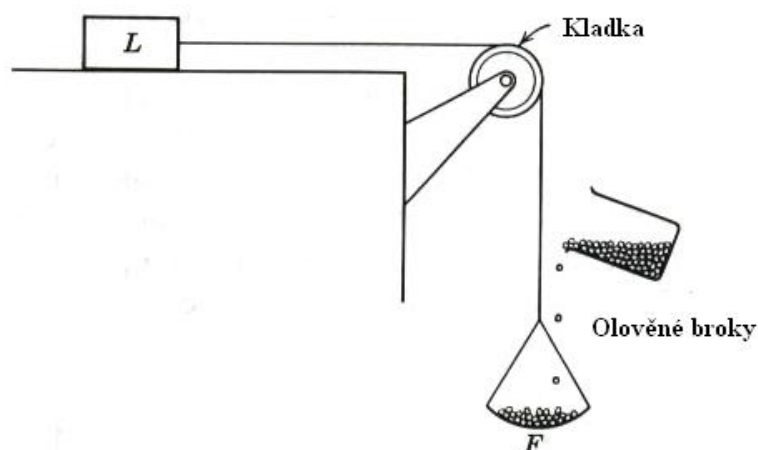
Materiál	μ	Materiál	μ
Dřevo – dřevo (suché)	0,40	Kov – kov (olej)	0,05
Dřevo – dřevo (namydlené)	0,20	Velmi dobře vyleštěné plochy	0,03
Kov – dubové dřevo (suché)	0,55	Ocel – achát (suché)	0,20
Kov – dubové dřevo (mokrý)	0,25	Ocel – achát (olej)	0,11
Kůže – dubové dřevo	0,32	Ocel – křemen (suché)	0,50
Kůže – kov (suché)	0,56	Pneumatika – beton (suché)	0,70
Kůže – kov (mokrý)	0,36	Pneumatika – beton (mokrý)	0,25
Kůže – kov (olej)	0,15	Dřevo - kámen	0,40
Kov – kov (suché)	0,17	Teflon - teflon	0,07
Kov – kov (mokrý)	0,30	Nylon - nylon	0,25

2. Měření koeficientu tření.

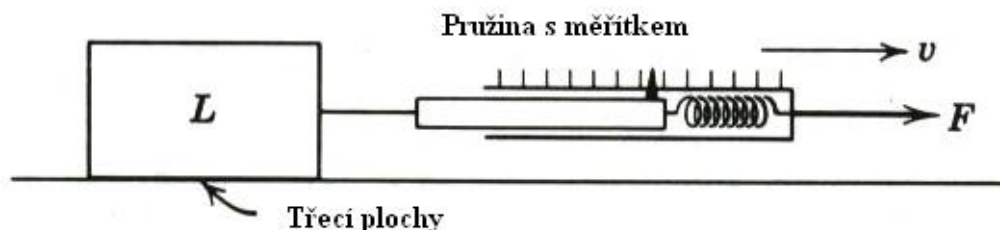
Koeficient tření μ lze měřit různými metodami. Některé z nich jsou uvedeny na Obr. 7 a Obr. 8 a jejich princip je patrný z obrázků.



Obr. 7. Měření koeficientu tření



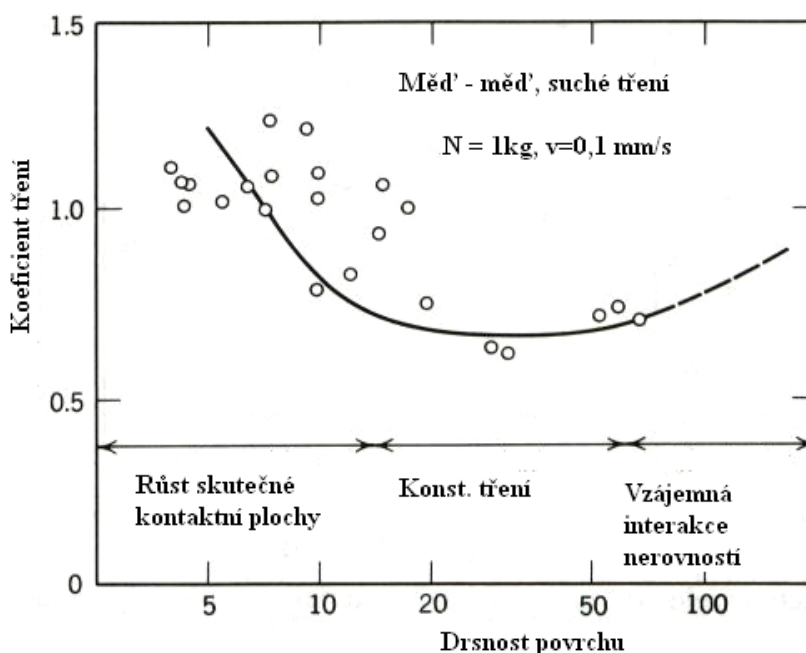
Obr. 8. Měření koeficientu tření



Obr. 9. Měření koeficientu tření

Základní zákony suchého tření lze shrnout do několika bodů:

- Úměra mezi velikostí třecí síly a kolmým tlakem je důsledkem skutečnosti, že každá z obou veličin závisí na materiálových konstantách, charakterizujících obě kontaktní plochy, násobené toutéž hodnotou skutečné kontaktní plochy A_S .
- Nezávislost třecí síly na zdánlivé kontaktní ploše A_Z lze objasnit pomocí představy, že to je skutečná a nikoliv zdánlivá plocha, která řídí interakci mezi oběma tělesy. A tato skutečná plocha nezávisí na ploše zdánlivé.
- Poměrně slabá závislost třecí síly na rychlosti pohybu obou těles po sobě (Obr. 2.) souvisí s malou závislostí mezi napětím a relativním prodloužením v plastické oblasti většiny materiálů. Tam, kde je tato závislost výraznější, je výraznější i závislost třecí síly na rychlosti pohybu.
- Slabá závislost třecí síly na drsnosti třecích ploch (Obr. 10.) souvisí s tím, že nejvíce deformační práce se spotřebuje na vyvolání smykového posunutí výstupků na plochách (na rozdíl od mnohem menší práce, spotřebované na jejich vzájemné „obcházení“, tj. klouzání po sobě)



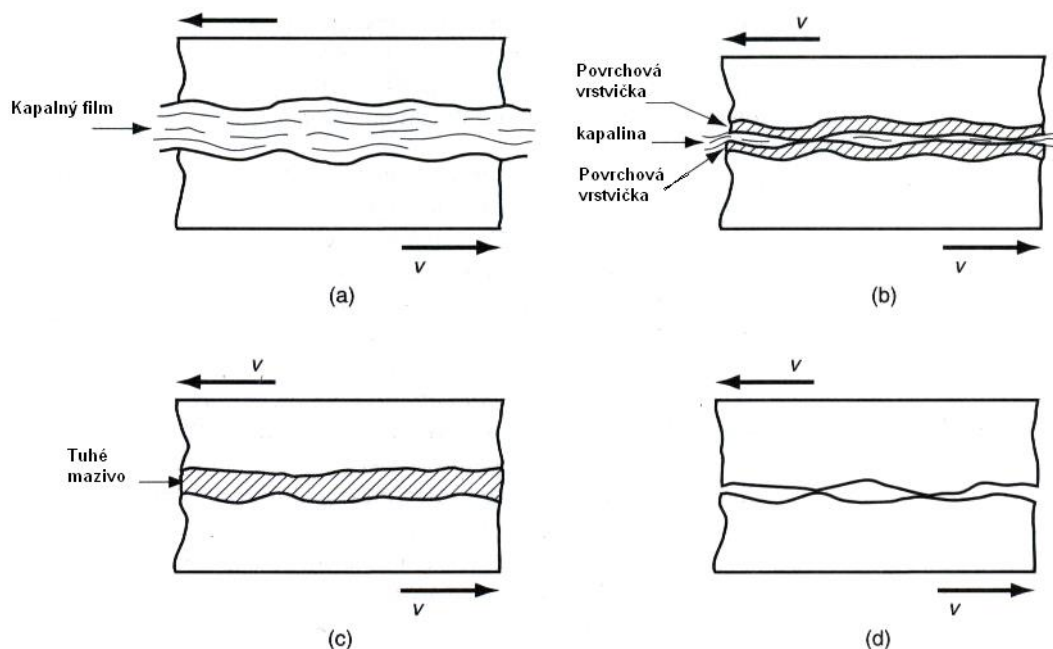
Obr. 10. Závislost koeficientu tření na drsnosti povrchu.

3. Snížení tření mazáním

Praxe nám ukazuje, že suché tření lze značně snížit, použijeme – li maziv. Způsoby mazání můžeme rozdělit do tří skupin:

- Mazání pomocí tenkého kapalného filmu. V ideálním případě takového mazání jsou obě třecí plochy vzájemně odděleny tenkou vrstvičkou vhodné kapaliny. Mezera mezi oběma plochami bývá velká ve srovnání s jejich drsností. Koeficient tření je v tomto případě dán vlastnostmi mazací kapaliny, zejména její viskozitou. Proto hovoříme o tzv. *hydrodynamickém mazání*. (Obr. 11.)
- Mazání pomocí vytvoření povrchové vrstvičky. Tento způsob mazání spočívá ve vytvoření dvou povrchových vrstviček na obou třecích plochách tak, aby nedošlo ke vzájemnému kontaktu kovů. Zmíněné vrstvičky jsou vytvořeny pomocí adsorpce různých maziv (minerální či rostlinné oleje, tuky, mastné kyseliny, mýdla apod.). Tento způsob mazání se používá většinou při nižších teplotách a tlacích. Pro vysoké teploty a tlaky se tyto vrstvičky vytvářejí pomocí různých *aditiv*, přidávaných do minerálních olejů (fosfor, chlór a síra). Tak vzniknou poměrně pevné vrstvičky (soli), které mají vysokou teplotu tání a brání přímému kontaktu obou kovů mezi sebou.
- Mazání pomocí tuhých maziv. Mezi tuhá maziva řadíme grafit, sirník molybdenu a teflon. Tyto látky aplikujeme ve formě prášku, který přilne k oběma třecím plochám a chemicky s nimi reaguje. Posláním těchto maziv je oddělit od sebe obě třecí plochy prostředím s malým koeficientem tření. Tohoto způsobu mazání se používá při

vysokých teplotách a tlacích a v agresivním prostředí, kde jsou jiné druhy maziv neefektivní.



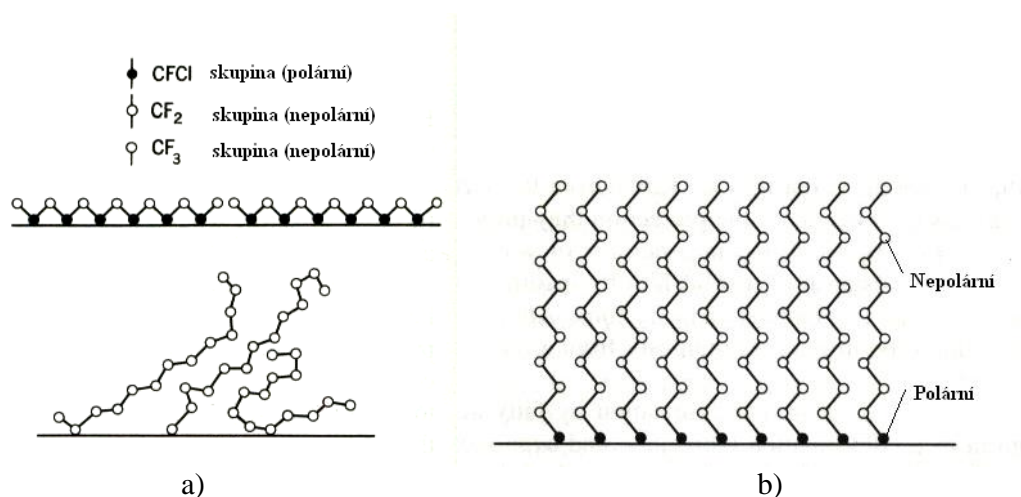
Obr. 11. Základní principy mazání: a) hydrodynamické, b) pomocí adsorbovaných tenkých vrstviček, c) pomocí tuhých maziv, d) suché tření.

Konkrétní druhy maziv a jejich vlastnosti:

- **Minerální oleje:** Vyrábějí se z ropy a vytvářejí na povrchu třecích ploch tenké povrchové vrstvičky. Jsou velmi rozšířené.
- **Rostlinné oleje, tuky a jejich deriváty:** Vyrábějí se z rostlin a zvířecích tuků. Patří k prvním používaným mazivům. Řadíme k nim i mýdla, tuky, vosky a mastné kyseliny.
- **Syntetická kapalná maziva:** Většinou jsou svojí strukturou podobné olejům. Patří sem syntetické estery a silikonové oleje. Používají se za vysokých teplot.
- **Kompozitní maziva:** Sem řadíme minerální oleje, doplněné tzv. aditivy, kterými jsou: (1) sloučeniny fosforu, síry a chlóru. (2) Pevné látky, jako grafit a sírník molybdenu. (3) Oxidační inhibitory. (4) Přidávky, zamezující pění. (5) Přidávky proti množení bakterií a jiných organismů.
- **Vodní maziva:** Voda je sama o sobě špatné mazivo, avšak přidáme – li do ní vhodné látky, můžeme ji k mazání použít, neboť má dobré chladicí schopnosti. Jako přísady můžeme použít olej (emulze s vodou), nebo i jiné speciální chemikálie, rozpustné ve vodě.

- **Povrchové vrstvy:** Povrchy třecích ploch lze pokrýt například (1) kovy (Zn, Sn apod.), které na nich vytvářejí plastické povlaky. (2) polymery (teflon). (3) skla (pro vysoké teploty).

Obecně lze říci, že nejlepší maziva mají takovou strukturu, že jejich molekuly jsou tvořeny dlouhými řetězci, ukončenými nenasycenou vazbou (která se naváže na jednu plochu). Mazací účinek potom připomíná „klouzání“ po mokré trávě. (Obr. 12)

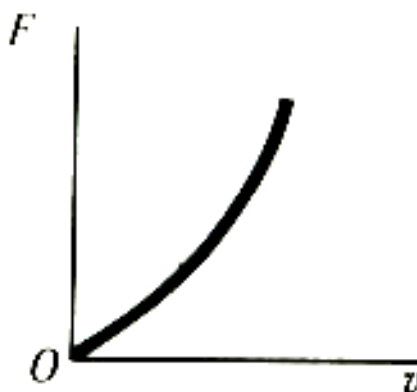


Obr. 12. Princip mazání: a) nepříliš efektivní maziva, b) velmi dobrá maziva.

4. Vnitřní tření.

Z předcházejícího odstavce plyne, že použití kapalin jako maziv značně snižuje tření obou třecích ploch. Názorně si to lze představit tak, že se po sobě již nepohybují obě plochy, ale tenké vrstvičky kapaliny (maziva) – tzv. *vnitřní (mokrý) tření*. Podobně je tomu v případě, že se v nějaké kapalině pohybuje těleso (např. kulička o poloměru r). V obou případech pozorujeme, že statické tření je nulové (obě třecí plochy se po sobě začnou pohybovat už při působení nepatrné síly). Je to rozdíl proti suchému tření, u kterého bylo třeba působit jistou (někdy dosti značnou silou), aby se tažené těleso dalo do pohybu (viz Obr. 4.).

Závislost síly mokrého tření na rychlosti je schematicky znázorněna na Obr. 13.



Obr. 13. Schematická závislost síly mokrého tření na rychlosti.

Matematicky lze tuto závislost popsat Stokesovým vztahem

$$F_t = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v = \beta \cdot v \quad (2)$$

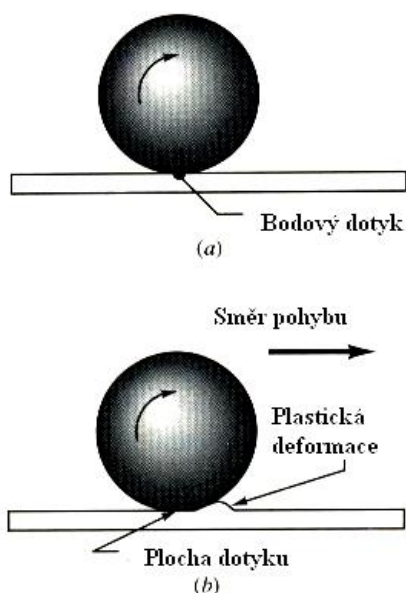
Kde η je vazkost kapaliny a r je charakteristický rozměr těles (poloměr kuličky, vzdálenost třecích ploch, apod.). Z Obr. 13. plyne, že pro větší rychlosti se přímá úměrnost změni na kvadratickou závislost (Newtonův vztah):

$$F_t = C \cdot v^2 \quad (3)$$

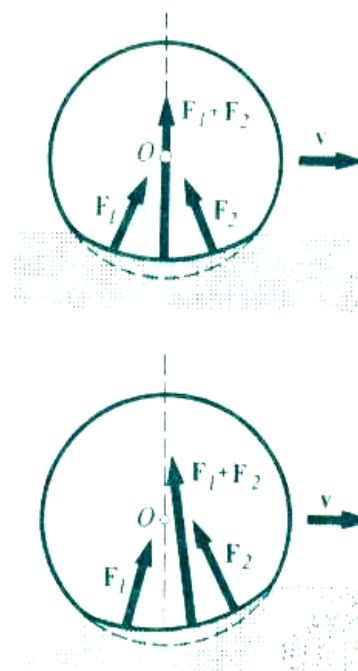
4. Valivé tření

V předcházejících odstavcích jsme si ukázali, že suché tření lze snížit např. výběrem vhodných materiálů pro třecí plochy, nebo mazáním. Další cestou je použití valivých ložisek, tj. přeměnou suchého nebo mokrého tření na tření valivé.

Při valivém pohybu pevného oblého tělesa (kuličky, válečku) po jiném pevném tělese, k němuž je oblé těleso přitlačováno nějakou silou (a navíc tlačeno ve směru, rovnoběžném s rovinou druhého tělesa), odporuje tomuto pohybu tzv. *tření valivé*. Fyzikální podstatu valivého tření lze objasnit pomocí Obr. 14 a 15. Protože na kuličku (váleček) působí síla, která ji vtlačuje do podložky (a zároveň ji pohání jedním směrem, což je typické pro praktické využití jako kuličková nebo válečková ložiska), dojde k deformaci jak kuličky, tak i podložky. Pokud by tato deformace byla ideálně pružná, nevznikala by síla valivého tření. Celková síla, působící na kuličku, je podle tohoto obrázku rovna $\mathbf{F} = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$ a momenty těchto sil vzhledem k ose kuličky se navzájem vyruší. Výslednice \mathbf{F} je v rovnováze s vnější silou, působící na kuličku (zvětšenou o její tíhu). Nevzniká tedy žádná síla valivého tření.



Obr. 14. K objasnění valivého tření.



Obr. 15. Síly při valivém tření.

Protože je však ve skutečnosti tato deformace plastická (i když velmi malá), vzniká síla valivého tření a síly F_1 a F_2 budou různé, takže jejich výslednice bude mít složku vertikální i horizontální. Momenty obou sil mají opačný směr a nerovnájí se jeden druhému. Moment síly F_2 , brzdící otáčení kuličky je větší, než moment síly F_1 , který ji urychluje, takže výsledkem je zpomalování rotace kuličky a tedy vznik valivého tření.

Síla valivého tření je tedy důsledkem nepružného charakteru deformace kuličky (válečku) a povrchu ložiska v okolí jejich vzájemného kontaktu. Vztah pro sílu valivého tření má tvar

$$F_v = \frac{\mu_v}{r} N \quad (4)$$

(μ_v je koeficient valivého tření, r je poloměr kuličky a N je kolmý tlak, který na ni působí). Hodnota koeficientu valivého tření μ_v (v cm) je vždy menší, než je koeficient suchého tření, jak ukazuje Tab.2:

Tab. 2.

Dvojice materiálů	μ_v (cm)
Tvrdé dřevo – tvrdé dřevo	0,05
Ocel - ocel	0,005
Ocelové kuličky v ložiskách	0,0005 – 0,001

Odtud vidíme, jak je vhodné převádět suché i mokré tření na tření valivé; (je-li to možné).

Zákony valivého tření lze opět shrnout do několika bodů:

- Síla valivého tření je rovna mocnině zatěžovací síly. Pro malá zatížení, kdy je deformace kuličky i podložky prakticky pouze pružná, je exponent mocniny $\sim 1,3$. Pro velká zatížení, kdy již plastická deformace na styku kuličky a plochy není zanedbatelná, je exponent větší, dosahuje až hodnot 2,0.
- Síla valivého tření je nepřímo úměrná poloměru křivosti kuličky (válečku).
- Síla valivého tření je tím menší, čím hladší jsou oba povrchy (kuličky i povrchu ložiska).

Závěr

Po přečtení tohoto pojednání by si měl žák i učitel uvědomit, jak důležitou roli hraje tření v našem životě. Setkáme se s ním všude kolem nás, bez přítomnosti tření by nebyla možná chůze, ani jízda automobilem, nefungovala by velká většina strojů. Častokrát se však naopak snažíme tření omezit a proto vznikla celá odvětví vědy a průmyslu, zabývající se právě tímto problémem. Popis jevu a kvalitativní představy o tření nejsou příliš složité, proto je tření vhodným námětem pro projektovou výuku na všech typech škol. Nezanedbatelná je i skutečnost, že pokusy, popisující tření jsou velmi jednoduché a i průměrně zručný žák může sestavit jednoduché zařízení pro demonstraci tření.

Literatura

- [1] RABINOWICZ, E.: *Friction and Wear of Materials*. John Wiley & Sons, Inc. 1995
- [2] BOWDEN, F. P., TABOR, D.: *The Friction and Lubrication of Solids*. Oxford 2001
- [3] GROOVER, M. P.: *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, 1996.
- [4] CALLISTER, W. D.: *Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 1999.
- [5] HIGGINS, R. A.: *Materials for Engineers and Technicians*. Elsevier 2006
- [6] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fyzika*. VUTIUM, PROMETHEUS, 2015.
- [7] HORÁK, Z., KRUPKA, F.: *Fyzika*. SNTL, SVTL, 1966
- [8] SVOBODA, E. A kol.: *Přehled středoškolské fyziky*. PROMETHEUS, 1996