

22. ročník, úloha IV. 2 ... na tenkém ledě (3 body; průměr 1,80; řešilo 30 studentů)

Je známo, že led vystavený většímu tlaku snižuje svou teplotu tání. Funguje tento jev při bruslení (tedy je tlak brusle dostatečný, aby se led rozpustil i při nízkých teplotách)? Pokud ne, co jiného zaručuje hladký skluz? *Při návštěvě kluziště si počítal Dan.*

Nejprve se pokusme odpovědět na první otázku, tedy jestli tzv. regelace ledu souvisí s hladkým skluzem při bruslení. U ledu se v praxi projevuje tak, že na každou přidanou atmosféru klesne teplota tání o $0,0072\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tedy na snížení teploty tání o pouhých $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ potřebujeme vyvolat tlak 139 atm , což je přibližně 14 MPa . Otázkou zůstává jaký tlak vyvolá bruslař jedoucí po ledu na jedné brusli. Ze základního definičního vztahu

$$p = \frac{F}{S},$$

kde za sílu přítlačnou považujeme tíhovou sílu, dostaneme po dosazení běžných hodnot $m = 80\text{ kg}$, $g = 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, $S = 6 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$ tlak $1,33\text{ MPa}$ (13 atm). Vidíme, že tento tlak je řádově nižší, než je tlak potřebný k roztavení ledu o teplotě $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Představíme-li si navíc teplotu $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, při které se jistě také dá bruslit a zjistíme, že regelace ledu hladký skluz nezpůsobuje. Někdo by mohl namítnout (a také to mnozí z řešitelů poznamenávali), že nůž brusle má buď jedno mnohem užší ostří uprostřed, nebo dvě po stranách, čímž se tlak řádově zvětší, ale musíme si uvědomit, že v takovém případě se brusle trochu zaboří, a síla se tudíž opět rozloží na větší plochu. Ostří slouží spíše k lepší ovladatelnosti brusle, umožňuje projíždět zatáčky ve větší rychlosti a také pomáhá při prudkém brzdění.

Nesmíme zapomenout, že dobře klouže také puk a na hladkém ledě i boty bez vzorku. Jaké další efekty tedy připadají v úvahu?

Nejprve probereme nízký koeficient smykového tření, ten samozřejmě za bruslením stojí, ale musíme si uvědomit, že není argumentem proti výše a níže podaným vysvětlením, nýbrž jejich důsledkem. Jak od začátku naznačujeme, za nízkým třením mezi ledem a ocelí stojí malá vrstva vody na povrchu ledu, pro níž jsou dvě možná vysvětlení. Prvním vysvětlením je prostá existence takové vrstvy na povrchu ledu, protože molekuly vody nejsou zcela vázány a mají tedy dostatečnou volnost. Tento jev poprvé objevil Faraday již v roce 1840, když k sobě přiložil dvě kostky ledu, a tím je spojil. Původně povrchovým molekulám přidal potřebné vazby. Důkladné měření na sebe nechal čekat až do roku 1996, kdy v Lawrence Berkeley National Laboratory rentgenovou fotoelektronovou spektroskopii vyvodili jednoznačný závěr. Tenká vrstva vody na povrchu ledu skutečně existuje při teplotách nad $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ je její tloušťka 20 \AA . Když ke stejnému výsledku došli o pár let později i v Německu, zdála se kluzkost ledu objasněná.

V roce 2002 Miquel Salmeron, taktéž z Lawrence Berkeley, přišel s novým měřením. Nezpochybnil výsledky svých kolegů, ale vyslovil domněnku, že přirozená povrchová vrstva vody na ledu není dostatečně tlustá na to, aby měla nějaký vliv na kluzkost ledu při teplotách různých od bodu tání. Po experimentu s AFM¹ dokonce tvrdil, že led klade proti pohybu velký odpor. Podle něj v běžném měřítku tloušťka vrstvy vody vzroste jako důsledek zahřívání třením. Svým experimentem to ale dokázat nemohl, protože hrot mikroskopu byl natolik malý, že voda okamžitě zamrzala. Tuto teorii podporují i starší měření z počátku 90. let, při nichž byly použity speciální brusle schopné měřit třecí sílu. Podle jejich autorů je kapalina podobná

¹) Atomic Force Microscope

povrch skutečnou příčinou nízkého tření ledu s bruslí. Teplo vzniklé třením je dostatečné pro roztání tenké vrstvy ledu. Pro třecí sílu platí vztah

$$F_t = fF_n.$$

Při 100% účinnosti bychom roztavili vrstvu tlustou zhruba $30\ \mu\text{m}$. Použitý vztah však není použitelný pro případy, kdy se jeden materiál boří do druhého, a po započítání dalších faktorů včetně vedení tepla se výsledek posune opět k vrstvám řádově tenčím.

Kupodivu jednoznačné řešení našeho problému v 21. století stále neexistuje. Nakonec už jen uvedme, že nejmenšího tření nedosáhneme při teplotách okolo nuly, kdy je sice vrstva vody nejtlustší, ale zároveň se do ledu více boříme. Jako optimální se z experimentů ukazuje teplota kolem $-7\ ^\circ\text{C}$, na kterou také mnohá kluziště svůj led chladí.

Kryštof Touška

krystof@fykos.mff.cuni.cz