

(II) Název: Jiskřící křemeny

Ročník: 8.; 1994 – 1995

Č. úlohy: 12

Text: Když o sebe uhoříme dvěma kousky křemene, vznikají jiskry. Vysvětlete tento jev.

1. Úvod — rozbor

Na úvod několik slov k překladu slova „silex“. Toto slovo můžeme nejlépe přeložit jako oxid křemičitý, mezi jehož mnoho odrůd patří i křemen (angl. quartz). Slovo však pochází z latiny a můžeme jej přeložit právě jako křemen, nebo jako tvrdý kámen — což, jak uvidíme dále není v žádném případě irelevantní. Vidíme, že budeme-li za objekt našeho zájmu dále považovat křemeny, nebude to v žádném případě scestné.

Při studiu této úlohy si musíme nejprve uvědomit několik zásadních faktů. Již nyní můžeme říci, že nejpodstatnější díl cesty k objasnění jevu učiníme již v okamžiku, kdy podrobně prozkoumáme strukturu křemene. Běžný křemen má tvrdost okolo 7,0 Mohsovy stupnice tvrdosti. To je právě oblast, kdy při nárazu již nedochází k deformaci těles, ale vlivem velkých přitažlivých sil působících mezi atomy v krystalické mřížce se krystal třísí, resp. z jeho povrchu se odštěpují jeho úlomky (krystal se třísí na místě s poruchami krystalické mřížky — např. s dislokacemi, s intersticiály či vakancemi; jedná-li se o polykrystal, po nárazu se třísí na hranicích krystalických zrn, poněvadž právě na površích jednotlivých zrn je nejvíce krystalových poruch, je zde porušena celá krystalická struktura a pravidelné uspořádání atomů v mřížce).

2. Pracovní hypotéza

Při nárazu se budou odštěpovat části krystalu, v případě křemene, který je polykrystalem, se bude jednat o systémy jednotlivých zrn polykrystalu, či o jednotlivá zrna.

Po úderu od křemene odlétají obrovskou rychlostí malé úštěpky. Úlomek při svém letu září.

3. Teoretické řešení

Zajímáme-li se o průběh nárazu dvou křemenů, můžeme říci, že na drsný povrch křemene působí relativně velká síla po krátké dráze. Z experimentů jsme odvodili konkrétní hodnoty působící síly a dráhy po níž jsou křemeny ve styku. Průměrné hodnoty pro tuto sílu jsme určili jako 40 N. Měřili jsme jí pomocí úderu do desky vah a zaznamenávali jsme výchylku v okamžiku působení síly. Co se týče dráhy, tato se dá měřit velice snadno a její průměrná velikost je cca 0,01 m. Z toho již můžeme zcela běžně odvodit celkovou energii, kterou předáme při nárazu krystalu ($E = Fs$); pro konkrétní hodnoty můžeme tuto energii vyjádřit takto:

$$E = Fs; \quad \text{po dosazení } E = 0,4 \text{ J} \quad (11.1)$$

Energii, která působí na každý z úštěpků, můžeme určit z poměru plochy odpovídající styku krystalů a plochy úštěpku, na níž působila síla, poněvadž zmo přijímá energii pouze když se o jeho plochu „tře“ druhý křemen, pouze v okamžiku, kdy na něj působí síla. Nyní již můžeme určit energii, která bude předána jednotlivým úlomkům:

$$E_c = E \frac{x^2}{S} \quad (11.2)$$

kde x je strana úštěpku, přičemž předpokládáme že úštěpek má tvar krychle a vzhledem ke krystalické struktuře křemene na straně jedné a vzhledem k různorodosti úštěpků na straně druhé, se nedopouštíme vůbec žádné chyby a spíše se nám daří řešit úlohu v obecnější rovině; S je plocha styku krystalů v okamžiku působení, kterou jsme experimentálně určili jako $5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ (povšimněme si relace mezi plochou a dráhou působící síly).

Stanovili jsme energii, která bude předána úlomku o dané velikosti. Rozeberme však podrobněji, co se bude s úlomkem (zatím přesněji s částí povrchu krystalu) dít v okamžiku úderu. Působíme-li na takovýto tvrdý materiál silou, která je větší než vazebné síly na nejnestabilnějších místech, v našem případě na hranicích zrn polykrystalu, jeho část (zmo) se odštípne; jeho hmotnost je m . Můžeme dosti oprávněně předpokládat, že tento proces proběhne ve velice krátkém čase, a tak úštěpek nemůže předat svoji energii tělesu celého krystalu. Vzhledem k tomu, že i úštěpek sám se chová jako tuhé těleso, nedochází v něm k žádné deformaci, a tedy nemůže dojít k přeměně předané energie na energii tepelnou (znovu uvažme krátký čas celého procesu). Z toho tedy plyne, že celá energie, která je předána úštěpku se přemění na energii kinetickou. Velmi snadno již nyní můžeme vypočítat rychlosti jakou budou úlomky dané velikosti odletovat. Jistě platí:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} x^3 \rho v^2 \quad (11.3)$$

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{\rho x^3}} \quad (11.4)$$

kde ρ je hustota křemene a vše ostatní již bylo definováno.

Je vhodné ještě uvést alespoň několik hodnot pro lepší ilustraci dalšího textu — částice s hranou $1 \text{ } \mu\text{m}$ získá energii $8 \times 10^{-8} \text{ J}$ a rychlost přibližně $8600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; částice s hranou $20 \text{ } \mu\text{m}$ získá energii $3,2 \times 10^{-5} \text{ J}$ a rychlost cca $2000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

4. Experimenty

Sledujeme nyní pohyb úlomku ve vzduchu a nejprve uvedme data zjištěná pozorováním a uvedme je do relace s teorií. Pozorovali jsme vlastní jiskření jednak vizuálně, tak i fotograficky

a videokamerou. Podrobnou analýzou experimentálních údajů jsme zjistili barvu záření, které vzniká při úderech křemenů a která je žlutooranžová, tedy odpovídá záření absolutně černého tělesa o teplotě asi 4500 K (viz dále). Pro určení principu, na němž jiskřící křemeny září, bylo velmi podstatné i určení času, po který bylo záření pozorováno. Zjistili jsme, že záření je pozorovatelné i jistou krátkou dobu poté, co jsme křemeny udeřili o sebe, a to po celé ploše o přibližně stejné intenzitě po celou dobu pozorování jevu. Průměrná doba po kterou jsme záření pozorovali činí asi jednu desetinu sekundy. Rovněž jsme mohli pozorovat velikost zářícího „obláčku“, a tedy také jsme mohli určit délku trajektorie částice, při níž (dle libovolného procesu) vzniká záření.

V dalším experimentu, který byl podstatným přínosem pro analýzu problému distribuce energie vzhledem ke tření o vzduch, jsme křemeny bili o sebe „přes papír“. Křemeny nejprve papír protrhly, poté došlo k jejich kontaktu, odtrhly se úlomky dle mechanismu popsaného výše, narazili do dosud celistvého okraje papíru. Po nárazu se jejich kinetická energie přeměnila na tepelnou (definitivně — podrobnější rozbor je uveden dále) a spálila se jistá oblast okolo úlomku. Tuto oblast jsme poté pozorovali mikroskopem a zjistili jsme, že část papíru vždy shořela, zuhelnatěla a zhnědla, avšak zůstala součástí listu. Další část papíru zcela vypadla a tato chybějící část měla vždy velice přesný tvar, poněvadž v tomto místě došlo ke kontaktu s rozžhaveným křemenem, který při nárazu porušil strukturu vláken papíru a dostal se na jejich místo, „vypálil“ do papíru díru. Papír se však neskládá z jediné vrstvy vláken: mezi jednotlivými vrstvami je vzduchová vakance. Pod jednou spálenou vrstvou dle předchozího popisu se nalézala prakticky neporušená papírová vrstva. Tímto experimentem lze tedy odhadnout energii (podle plochy spáleného papíru) křemene po části průletu a též zjistit velikost dopadajících částic.

Předpokládáme nejprve, že záření úštěpků odpovídá záření absolutně černého tělesa. Žlutooranžová barva jisker odpovídá teplotě tělesa o teplotě cca 4500 K, což je výrazně vyšší teplota než teplota varu křemene (cca 2900 K). Křemen, ohřál-li by se na tuto teplotu, nemohl by zářit po celé trajektorii, ale pouze do místa, kde dosáhne teploty varu, poté se částice rozptýlí volně do okolí. Samozřejmě reálná tělesa nezáří jako absolutně černé těleso, ale jejich záření se blíží záření tzv. šedého tělesa, která má ve všech bodech svoji spektrální křivky intenzitu odpovídající určitému zlomku intenzity absolutně černého tělesa. Čili je prakticky jisté, že nelze, aby těleso s teplotou cca např. 1000 K zářilo ve vizuální oblasti na maximum s vlnovou délkou odpovídající žlutooranžové barvě, jak zcela zřejmě plyne z tvaru Planckovy křivky.

Při pohybu úštěpku nastává tedy jev, který můžeme pozorovat např. při vletu meteoroidu do zemské atmosféry a obecně při pohybu rychle letících těles v odporujícím plynném prostředí. Vlivem srážek s molekulami obsaženými ve vzduchu dochází k jejich ionizaci a následně

rekombinaci spojené s vyzářením elektromagnetického kvanta, přičemž existuje mnoho hladin, které emitují fotony ve viditelné oblasti. Současně následuje difúze molekul do prostoru, a tím pádem dochází k rozšíření či rozptylu stopy, ať už po meteoritu či po úštěpku od křemene.

Současně se průletem vzduchem úštěpek brzdí a rozžhavuje třením o vzduch, v jeho malém okolí dochází k rychlému přenosu tepla a prakticky rovnoměrnému ohřívání, což je rozdílem s analogií od meteorů, kde se odpařuje a ohřívá pouze povrchová vrstvička (u malého úštěpku není dost materiálu k vytvoření povrchové vrstvičky, která by se ohřála). Po uražení právě asi jednoho centimetru se částice zpomalí natolik, že její rychlost a tudíž i srážková energie je již příliš malá na to, aby docházelo k ionizaci molekul vzduchu, což plyne zejména z pozorování meteorů. Ty když zpomalí pod cca 1000 m/s (odpovídá poměru ionizační energie a změny hybnosti částice, která popisuje změnu energie molekuly vzduchu), přestávají vytvářet ionizační stopu. Dále můžeme říci, že malé částice mají tuto rychlost příliš velkou na to, aby se na této dráze natolik zbrzdily, vlivem přeměny na tepelnou energii třením dochází k jejich rychlému zahřátí a sublimaci. Větší částice se na této dráze a zpomalí a přestanou zářit (částečně se též vypaří). Částice, jejichž rychlost je menší než 1000 m/s nezáří vůbec, pouze se částečně ohřívají. Je zajímavé, že délka zářivé dráhy je pro všechny částice přibližně stejná (vypaření či zpomalení).

5. Dosažené výsledky

Měřením spálené oblasti papíru jsme došli k závěru, že námi vypočtená energie částic velmi dobře odpovídá energii potřebné k spálení daného objemu papíru (cca 70% celkové energie), zbytek se přeměnil v závěru na energii zářivou, z ionizovaných molekul.

6. Diskuse

V průběhu řešení celého problému jsme byli nuceni používat pouze vesměs empirické a přibližné vztahy, které však ve velice širokém spektru řešení problému výborně odpovídají naměřeným experimentálním hodnotám.

7. Závěr

Úderem křemenů se odšlupne malý úlomek, kterému je předána velká energie — jako kinetická. Úlomek se při svém letu brzdí o molekuly vzduchu, které ionizuje a ony září. Úlomek se při svém letu též rozžhavuje a případně sublimuje.

(12) Název: Kapka

Ročník: 8.; 1994 – 1995

Č. úlohy: 3