

## **Pokusy s termocitlivými fóliemi**

*ZDENĚK BOCHNÍČEK, JIŘÍ STRUMIENSKÝ,  
Přírodovědecká fakulta MU, Brno*

### **Abstrakt**

V příspěvku je popsáno několik experimentů využívajících termocitlivé fólie pro demonstrace jevů z termiky a optiky.

### **Úvod**

Termocitlivé fólie na bázi tekutých krystalů, jež reagují na teplotu změnou barvy, se staly již běžně dostupným prostředkem pro orientační měření teploty například lidského těla nebo akvária. Za přijatelnou cenu lze získat i fólie větších rozměrů – 30 × 30 cm se samolepící vrstvou a snadno dělitelné nůžkami<sup>1</sup>. Velkou výhodou je jejich citlivost (celá barevná škála odpovídá teplotnímu intervalu 5°C), rychlost odezvy a malá tepelná kapacita. K dispozici jsou v různých teplotních rozsazích od 20°C do 45°C. Termocitlivé fólie se tak mohou stát snadno dostupným experimentálním prostředkem pro demonstraci jevů spojených s ohřevem látek.

### **Tepelný stopař<sup>2</sup>**

Přiložme prohřátou dlaň na desku stolu a podržme ji tam 10 – 20 sekund. Pak na toto místo položíme termofólii vhodného teplotního rozsahu. Za krátký okamžik se na fólii objeví obraz naší ruky, který překvapivě jen pomalu mizí. K tomu, aby byl tento experiment úspěšný, je třeba dodržet jisté podmínky. Především nesmí být v místnosti příliš teplo, aby ruka byla skutečně výrazně teplejší než deska stolu. Pokus se také nepodaří, máme-li ruce studené. Dále je velmi podstatná i tepelná vodivost materiálu stolu. Nesmí být ani příliš velká, ani malá. Tento vliv lze ukázat tak, že pokus opakujeme s měděnou deskou a deskou z pěnového polystyrénu. Ani v jednom případě se ostrý a kontrastní obraz ruky nevytvoří. V případě měděné desky je tepelná stopa rozmazána vysokou tepelnou vodivostí. Naopak velmi nízká tepelná vodivost pěnového polystyrénu a jeho malá objemová tepelná kapacita nedovolí do materiálu akumulovat dostatečné množství tepla a následně je přenést na fólii. Pokus velmi dobře funguje na dřevotřískce potažené laminem, dřevěná deska stolu, případně dýhovaná laťovka dává výsledky horší.

V tomto i všech dalších experimentech je důležitá i vhodná volba teplotního rozsahu fólie. Většinou zaznamenáváme jen subtilní změny teploty a je tudíž třeba zajistit, aby sledovaný rozsah teplot spadl do intervalu citlivosti fólie. Vzhledem k tomu, že

---

<sup>1</sup> <http://www.omegaeng.cz>

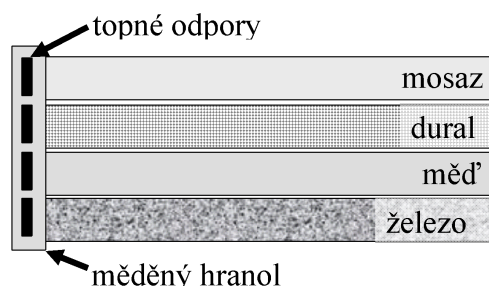
<sup>2</sup> Autorem názvů tohoto i dalších experimentů je dr. Pavel Konečný

pokožová teplota je nejčastěji několik stupňů nad 20°C, najdou největší uplatnění fólie s teplotními rozsahy 20°C - 25°C a 25°C - 30°C.

V horkém letním počasí se pokus pravděpodobně nepodaří. Pak lze vyzkoušet inverzní uspořádání, kdy přikládáme studenou ruku na teplou desku stolu. Ruku účinně vychladíme studenou vodou a nebo ledovou tříští.

## Tepelné závody

V tomto experimentu porovnáme tepelnou vodivost různých kovů. Tyče obdélníkového průřezu stejné tloušťky položíme vedle sebe a na jedné straně zahříváme. Pro ohřev lze použít topné odpory, pro zlepšení homogenity topení můžeme odpory podložit měděným hranolem, viz obr. 1. Alternativně ze na opačném konci (na obr. 1 vpravo) chladit. Rozložení teploty zviditelníme volně položenou termofólií.

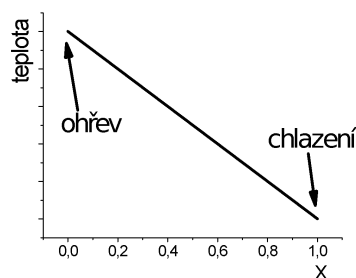


Obr. 1. Uspořádání tyčí z různých kovů

Podle volby tepelného režimu lze odlišit různé situace. Uvedeme si tři příklady:

### 1) Topení a chlazení na protilehlých stranách, zanedbatelné tepelné ztráty, ustálený režim.

Pokud topíme a současně chladíme s tím, že přestup tepla do okolí je zanedbatelný vzhledem k teplu proudícímu kovovými tyčemi, bude teplota klesat lineárně od teplého konce ke chladnému bez ohledu na tepelnou vodivost materiálu, viz obr 2. Rozložení teploty bude tedy ve všech případech stejné. Podmínka zanedbatelných tepelných ztrát bude tím lépe splněna, čím jsou tyče kratší, mají větší průřez a větší tepelnou vodivost.



*Obr. 2: Rozložení teploty v tyči při zanedbatelném vlivu tepelných ztrát.*

### **2) Topení bez chlazení, zanedbatelné tepelné ztráty, ustálený režim.**

Jestliže tepelné ztráty zanedbatelné nejsou, bude rozložení teploty určeno koeficientem tepelné vodivosti materiálu, viz obr. 3. V idealizovaném případě, kdy bude tyč tak dlouhá, že její nevyhříváný konec bude mít teplotu okolí, bude rozložení teploty klesat exponenciálně dle vztahu [1]

$$t = t_o + (t_1 - t_o) \exp\left(-\sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda S}} x\right),$$

kde  $t_1$  je teplota vyhříváného konce,  $t_o$  teplota okolí,  $S$ ,  $P$  plocha průřezu respektive pláště,  $\alpha$  koeficient chladnutí tyče a  $\lambda$  koeficient tepelné vodivosti.

Pro materiál s větší tepelnou vodivostí je daná teplota více vzdálena od vyhříváného konce a také je gradient teploty v každém místě menší než pro materiál s tepelnou vodivostí nižší. Oba tyto rysy se po přiložení termofólie velmi dobře zviditelní.

*Obr. 3: Rozložení teploty v tyči s tepelnými ztrátami do okolí. Plná čára – materiál s vyšší tepelnou vodivostí, čárkovaná čára – materiál s nižší tepelnou vodivostí.*

### **3) Topení bez chlazení, neustálený režim.**

Oba předchozí režimy předpokládají ustálený stav. Pokud se teplota jednotlivých částí mění v čase, je rozložení teploty v materiálu dáno nejen koeficientem tepelné vodivosti, ale také na měrnou tepelnou kapacitou a hustotou. Je to pochopitelné, do tepelné bilance vstupuje i vlastní ohřev každého objemového elementu  $\Delta V$  dle vztahu vyplývajícího z kalorimetrické rovnice

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c\rho\Delta V},$$

kde  $\Delta Q$  je přírůstek tepla,  $c$  měrná tepelná kapacita a  $\rho$  hustota. Lze ukázat, že rozložení teploty v neustáleném režimu je dáno veličinou

$$\Lambda = \frac{\lambda}{c\rho}$$

kteřá se nazývá teplotní vodivost. Při srovnání různých materiálů tak můžeme obecně získat jiný výsledek, než v ustáleném módu, viz tabulka.

materiál	$\lambda$ [W/mK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/kgK]	$\Lambda$ [m <sup>2</sup> /s]
měď	395	9000	390	$1,1 \cdot 10^{-4}$
dural	165	2800	890	$6,6 \cdot 10^{-5}$
železo	60	7800	500	$1,5 \cdot 10^{-5}$

### **Teplo kreslí**

Termofólii lze využít i k zobrazení neviditelného infračerveného záření, jako alternativní metoda k amatérské videokameře [2]. Popíšeme několik možných uspořádání.

#### **Infračervený stín ruky**

Umístíme termofólii do blízkosti intenzivního zdroje tepla. Můžeme použít svisle postavený naplněný elektrický vaříč, pak je vhodná vzdálenost fólie od vaříče asi 1m. Infračervené záření fólii ohřívá a ta mění barvu. Vložíme-li před fólii ruku, ukáže se její stínový obraz.

#### **Zobrazení zdroje tepla**

Intenzivní zdroj tepla – elektrický vaříč – je možné na fólii zobrazit přímo s využitím spojné čočky v experimentálním uspořádání obvyklém při zobrazování v optické oblasti, viz obr. 4.

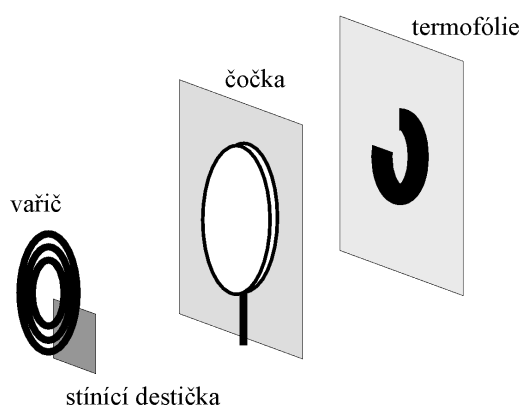
Tento experiment je mezním využitím termocitlivých fólií a aby byl pozorovaný efekt dostatečně jasný a přesvědčivý, je třeba splnit několik zásad.

- 1) Použijeme čočku s co největším průměrem a nejkratší ohniskovou délkou. Takové čočky mají již velmi značnou kulovou vadu, to však zde není důležité. Vzhledem k nenulové tepelné vodivosti samotné termofólie stejně nemůžeme očekávat ostrý obraz. Spolehlivě lze dobrých výsledků dosáhnout s čočkou o průměru  $D = 15\text{cm}$  a ohniskovou délkou  $f = 25\text{cm}$ .
- 2) Výhodnější je spirálový vaříč, jehož povrchová teplota je vyšší než u vaříče s plotýnkovou deskou. Je nutné vaříč dobře upevnit ve svislé poloze a rozehrát na maximální teplotu.
- 3) Lepší výsledky poskytuje uspořádání, ve kterém je obrazová vzdálenost o trochu menší než předmětová. Obraz je pak zmenšený a intenzita IR záření dopadajícího na fólii je vyšší.

4) Je nutné odstínit záření procházející vně obruby čočky. Stačí použít stínící štít z tvrdého kartonu.

5) Aby byl experiment přesvědčivý, je výhodně, aby měl předmět i obraz nějakou vnitřní strukturu. I z tohoto důvodu je lepší spirálový vaříč, který má uprostřed otvor. Pokud část plochy vaříče zastíníme plechem (stínící destička na obr. 4), uvidíme tento stín i v obrazu vaříče. Takto studenty snadno přesvědčíme, že se skutečně jedná o optické zobrazení poskytující převrácený obraz a můžeme zdůraznit odlišnost tohoto experimentu od stínové projekce popsané v předchozím odstavci.

6) Experiment je nutno sestavit tak, aby poloha předmětu, čočky a obrazu vyhovovala zobrazovací rovnici. Přestože sklo je disperzní prostředí, lze s úspěchem využít při sestavování experimentu zobrazení v optickém oboru. Namísto vaříče dáme zdroj světla, s jehož pomocí najdeme správnou polohu čočky a stínítka. Pak světelný zdroj zaměníme za vaříč a můžeme provést vlastní experiment.



*Obr. 4: Zobrazení plotýnky elektrického vaříče v IR oblasti spojnou čočkou.*

### **Vlákno žárovky v IR oboru**

Obraz plotýnky vaříče v předchozím experimentu není příliš kontrastní, navíc manipulace se žhavým vaříčem je problematická a může být zdrojem rizika. Pro demonstraci zobrazení v IR oboru můžeme použít i jiné uspořádání. Zdrojem tepelného záření je obyčejná silnější čirá žárovka (cca 150W) žhavená na nominální napětí. Je však nutné odfiltrout viditelnou část spektra, aby byl obraz vytvořen pouze IR zářením. Vynikající výsledky lze dosáhnout s oboustranně leštěnou křemíkovou deskou, která je ve viditelném oboru zcela neprůhledná, ale IR záření propouští [2]. Velmi dobře lze experiment provést i s komerčně dostupnými absorpčními filtry a jako nejnázve dostupný filtr poslouží i černá polyetylenová fólie.

Nejprve zaostříme obraz vlákna žárovky na bílé stínítko, poté vložíme do optické dráhy absorpční filtr a na stínítko umístíme termocitlivou fólii, kde se po krátké době vytvoří obraz. Je třeba předem vyzkoušet, v jaké obrazové vzdálenosti je nutné fólii umístit, aby intenzita IR záření byla dostatečná. Při použití čočky s  $f = 10\text{cm}$  a  $D = 5\text{cm}$  při absorpci v Si desce získáme spolehlivý výsledek i při obrazové vzdálenosti 50cm. Při použití černé PE fólie musíme obrazovou vzdálenost zmenšit.

Literatura

[1] [www.physics.muni.cz/kof/vyuka/prfyz11.pdf](http://www.physics.muni.cz/kof/vyuka/prfyz11.pdf)

[2] Z. Bochníček, *Amatérská videokamera jako detektor infračerveného záření*. In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 10. Ed Dvořák L. Prometheus Praha 2005. s. 38-42.