

# MOŽNOSTI URČENÍ EMISIVITY MATERIÁLŮ POMOCÍ INFRAČERVENÉ TERMOGRAFIE

**Stanislav Šťastník, Jan Hollan, Radek Steuer**

*Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Fakulta stavební,  
Vysoké učení technické v Brně*

**Abstrakt:** Příspěvek vysvětluje základy fyziky záření a seznamuje s některými současnými problémy spojenými s přenosem tepla zářením ve stavebnictví, dále se zabývá možnostmi určování tepelné emisivity povrchů stavebních materiálů pomocí infračervené termografie. Pro přesná měření spektrální emisivity se používají infračervené spektrometry vybavené měřicím nástavcem s pozlacenou sférou do níž se vkládá měřený materiál. Těchto zařízení však není mnoho a jejich pořizovací cena je značná, proto se hledají dostupnější způsoby jak emisivitu určovat alespoň přibližně.

## Úvod

Pro radikální snížení zimních tepelných ztrát budov bylo klíčovým krokem potlačení zářivé složky tepelného toku mezi okenními skly. Novým tématem, které vyvstalo s nástupem vnějších tepelných izolací s tenkovrstvými omítkami, je omezení zářivého nočního podchlazování povrchů omítek zateplovacích systémů a jejich následného orosování – ne z důvodů tepelných, ale estetických (na vlhkých plochách neošetřených biocidy rostou řasy). Omezení zářivé složky tepelných toků je možné buď opatřeními konstrukčními, nebo snížením schopnosti tepelného vyzařování samotných materiálů, aneb emisivity povrchů. Následující text vysvětluje základy fyziky vyzařování a také navrhuje praktické měření emisivit stavebních materiálů.

## Co je to emisivita

Slovo *emisivita* není zatím součástí běžné jazykové výbavy českého obyvatelstva. Slovo *emise* ale slychávají občas všichni, a většinou vědí, že se jedná o nějaké vypouštění, vydávání něčeho do okolí. Typicky oxidů síry nebo popílku ze zařízení, v nichž probíhá spalování. Ve stavební praxi se pod emisivitou obvykle rozumí relativní schopnost nějaké plochy vydávat elektromagnetické záření odpovídající její teplotě, jde tedy o číslo od nuly do jedné. Přesně jde o podíl intenzity vyzařování teplotního zářiče a intenzity vyzařování absolutně černého tělesa o stejné teplotě.

Emisivita dosahuje jedničky pro tzv. černé těleso (černé ve smyslu termodynamickém, obšírněji a postaru se říká „absolutně černé těleso“), které se v praxi realizuje jako malý otvor do velké dutiny. Ideálně by jeho ústí mělo být ohraničené ostrým břitem. Pak platí tzv. Stefanův-Boltzmannův zákon, který říká, že intenzita vyzařování z povrchu černého tělesa (emitovaný zářivý tok dělený obsahem vyzařující plochy) je roven násobku Stefanovy-Boltzmannovy konstanty  $\sigma = 5,67E^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$ , (všimněte si, jak pěkně se pamatuje: pět šest sedm osm) a čtvrté mocniny (absolutní) teploty tělesa.

Povrchy běžných těles mají emisivitu menší než jedna, nejsou tedy v termodynamickém smyslu černé. Ale jsou přesto většinou „hodně tmavé“, s emisivitou zhruba 0,9. Jedinou běžnou výjimku tvoří čisté kovové povrchy, jejichž emisivity jsou běžně desetkrát menší - kolem 0,1. Intenzitu vyzařování z reálných povrchů zjistíme, když do výše uvedeného zákona doplníme

další koeficient, totiž když součin v něm uvedený vynásobíme emisivitou daného povrchu. Pak máme pravidlo pro běžné povrchy.

Označení „černé těleso“ (černá plocha) evokuje ale něco jiného než schopnost vyzařovat, z fotometrické obdoby cítíme, že jde spíše o schopnost pohlcovat. Je to opravdu tak, i pro obecné elektromagnetické záření: černé těleso žádné záření neodráží. Místo emisivita můžeme skutečně často říkat pohltivost. To znamená, že u povrchů s emisivitou menší než jedna platí, jde-li o tělesa pro dané záření neprostupná, že z dopadajícího záření pohltí podíl rovný své emisivitě  $\varepsilon$ , a že odrazí (zrcadlově či rozptýleně) podíl rovný doplňku emisivity do jedné,  $1-\varepsilon$ .

To je ovšem přístup ryze formální. Povrch dané teploty vyzařuje méně, než by vyzařoval, kdyby byl termodynamicky (rozuměj pro elektromagnetické záření všech relevantních vlnových délek) černý, a poměr intenzit vyzařování je onou emisivitou. Ta se, jak patrně, týká souhrnného vyzařování do celého poloprostoru, a přísně vzato platí jen pro danou teplotu tělesa. To proto, že se změnou teploty se povrch může stát pro danou vlnovou délku záření pohltivější či naopak méně pohltivý. A také proto, že reálný povrch, i pokud se jeho vlastnosti s teplotou nemění, nebývá zcela „bezbarvý“, tj. záření různých vlnových délek pohlcuje, tedy i emituje různě účinně. A víme, že s růstem teploty přibývá zejména vyzařování krátkých vlnových délek (přesně to popisuje Planckův zákon), takže pokud je např. právě v nich povrch více odrazivý (kdyby šlo o světlo, šlo by o povrch např. zelenomodrý), jeho emisivita při vzrůstu jeho teploty klesne.

Povrch s takto definovanou „poloprostorovou“ emisivitou řekněme 0,90 ale nemusí mít při kolmém pohledu zář přesně devíti desetin záře černého tělesa stejné teploty, může do takového směru zářit poněkud silněji. A naopak, pozorujeme-li jej z boku, může jeho zář být slabší. Jak víme z obdoby ve světelné doméně, téměř tečné paprsky se na všech povrchích odrážejí více než paprsky dopadající na ně strmě (dobře je to patrné při pohledu na vodní hladiny), tedy bráno v pojmech z optiky, s růstem úhlu dopadu (měřeným od kolmice k danému povrchu) roste zpravidla odrazivost povrchu. Jinými slovy, na reálném povrchu, na rozdíl od otvoru do velké dutiny (např. do jeskyně), se zdroje světla či jiného záření více či méně lesknou. A sálající povrch se při pohledu hodně z boku proto naopak jeví v termokameře méně teplý. Zář povrchu  $L$  můžeme pak vyjádřit jako

$$L = \varepsilon_{\alpha} \sigma T^4 / \pi \text{ sr}$$

– index  $\alpha$  naznačuje, že jde o emisivitu jen do daného směru např. měřeného od kolmice k danému povrchu. Pak je obvykle emisivita klesající funkcí úhlu  $\alpha$ .

Emisivitu můžeme navíc vztáhnout jen k jedné vlnové délce (a užít ji v Planckově vyzařovacím zákoně) nebo nějakému intervalu vlnových délek. Při její znalosti můžeme přepočítat měřenou černou teplotu povrchu (též zvanou jasová teplota), tj. takovou, kterou by mělo černé těleso poskytující stejný signál, na skutečnou teplotu materiálu. Takovou operaci ostatně dělávají měřicí zařízení už sama, problémem tohoto hrubého přístupu je, že v okamžiku měření nemusí být emisivita povrchu dobře známa, a že u termografie mají zpravidla různá místa scény emisivitu různou – spolehlivá informace, kterou měřicí zařízení může skutečně udat, je jen černá teplota daného elementu prostorového úhlu.

Tím není řečeno, že vlastnosti povrchů jsou pro vlnové délky světla (půl mikrometru) a pro záření, které samy vydávají (nejhojněji emitované vlnové délky jsou nepřímo úměrné absolutní teplotě, takže při 300 K místo 6000 K je to kolem deseti mikrometrů, lze mu říkat dlouhovlnné infračervené) stejné, ale geometricky jsou obdobné. Dá se navíc říci, že v dlouhovlnném oboru jsou předměty zrcadlovější, méně matné – nerovnosti několikrát menší než daná vlnová délka (např. setina milimetru) se už neprojevují. Barevné odstíny a stupně šedi, které vidíme, s oněmi dlouhovlnnými barvami a tmavostí nemají ale společného vůbec nic. Přesto těm dlouhovlnným můžeme porozumět, protože dlouhovlnný svět je vlastně jednodušší: vše kromě čistých kovů a některých vzácných speciálních materiálů s obsahem kovů je ve dlouhovlnném oboru tmavé.

Pokud sousedí dvě tělesa stejné teploty, i když různých emisivit, září sice různě silně, ale přesto je tepelný tok mezi nimi nulový. Pokud však má jedno těleso vyšší teplotu, dochází

k přenosu energie zářením z jednoho na druhé těleso. To znamená, že když má nějaký předmět teplotu výrazně vyšší než okolí (a než my sami), tak cítíme, jak na nás sálá. Čistá kovová žehličicí plocha žehličky (s nízkou emisivitou) sálá naproti tomu tak málo, že si toho ani nevšimneme a můžeme se nečekaně spálit, když se jí omylem dotkneme.

To nám připomíná, že pro optické elektromagnetické záření (infračervené, viditelné, ultrafialové) máme spolehlivý detektor: svou pokožku. Zvláště citlivý je hřbet ruky, ještě více obličej. O jaké optické záření jde, vnímáním pokožkou nijak nepoznáme, kamna nás můžou hřát k nerozeznání od slunce.

## **Materiály průhledné a průsvitné**

Naprostá většina předmětů kolem nás má ještě další jednoduchou vlastnost v dlouhovlnném infračerveném oboru: takové záření prostě nepropouštějí. Pro ty právě platí, že součet jejich emisivity a odrazivosti je jednička. Výjimkou jsou tenké vrstvy některých plastů a polovodiče. Ty záření vlnových délek pět až padesát mikrometrů více či méně propouštějí. Platí pak, že součet emisivity, odrazivosti a propustnosti je jednička (pohltivost je samozřejmě stále rovna emisivitě, jde-li o stejné spektrum). U tenké uhlovodíkové fólie, která v dlouhovlnném oboru na rozdíl od oboru světelného vždy nezanedbatelně pohlcuje, je samozřejmě propustnost ještě více závislá na úhlu dopadu než odrazivost, protože s rostoucím úhlem dopadu prochází záření fólií po větší dráze.

Propustnost klesá s odklonem od svislice také u zemského ovzduší: to je totiž směrem strmě vzhůru za bezoblačného počasí také zčásti propustné. Od pevných či kapalných těles se ale bezoblačná atmosféra velmi liší tím, že má nulovou odrazivost (světlo rozptyluje, jak dopředu tak i nazpět, ale hlavně jeho krátkovlnnou část, proto je čisté nebe modré, podíl rozptýleného záření je nepřímo úměrný čtvrté mocnině vlnové délky). U atmosféry, bereme-li ji v plné tloušťce, už ale těžko lze mluvit o její emisivitě např. ve smyslu doplněného Stefanova-Boltzmannova zákona, protože není jasné, jakou teplotu uvažovat (teplota ovzduší se velmi mění s výškou). Zvolíme-li přesto emisivitu rovnou pohltivosti, vyjde nám z onoho zákona nějaká teplota atmosféry pozorované ze země (jak moc sálá na metr čtvereční vodorovného zemského povrchu). Výmluvnější je počítat s neupraveným S-B zákonem, pak ze sálání na vodorovný povrch vypočteme tzv. efektivní teplotu, tj. tu, jakou by měla černá plocha všude nad námi, kdyby sálala dolů stejně jako atmosféra. Je také možné přepočítat zář oblohy jen kolem zenitu na černou teplotu, pak se udává, že okolí zenitu září, jako kdyby bylo o dvacet kelvinů chladnější, než je teplota přízemního vzduchu (jde o záření dlouhovlnné, které lze kalorimetricky měřit v noci, ve dne je potřeba odfiltrovat krátkovlnnou rozptýlenou sluneční složku).

Je-li nízko nad zemí souvislá tlustá oblačná vrstva, je emisivita atmosféry blízka jedné a záření jde dolů zhruba tolik, jako by šlo z černé vrstvy stejné teploty, jako má dolní základna oblačnosti. Přijde-li taková oblačná příkryvka nad krajinu, která začátkem noci pod jasným nebem vystydla, ochlazování se zastaví a dokonce se může začít přízemní vzduch mírně oteplovat.

Přesto je vzduch pro dlouhovlnné záření hodně propustný, pokud jde o vzdálenosti desítek či stovek metrů. Měřicí přístroje, jako infrateploměry a termokamery navíc využívají těch vlnových délek, kde je vzduch nejpropustnější, totiž od sedmi do čtrnácti mikrometrů. V těchto vlnových délkách se výrazně uplatňuje jen ozón. Je-li měřený cíl blíže než sto metrů, lze vzduch brát jako prostředí zcela průhledné. Namíříme-li takové zařízení do zenitu, ukáže za jasného počasí teplotu ne o pouhých dvacet kelvinů nižší, než je teplota přízemního vzduchu, ale teplotu nižší o čtyřicet, ba i šedesát kelvinů (podle spektrální citlivosti přístroje a podle absolutní vlhkosti vzduchu).

## **Proč nás zajímá emisivita omítek**

Pokud povrch tělesa září vůči chladnějšímu tělesu (nebo vyzařuje do prázdného prostoru), ztrácí tím těleso svou energii a ochlazuje se. Tak se během noci podchlazují venkovní povrchy září-

cí vůči jasné noční obloze, stavební povrchy nevyjímaje. Při podchlazení pod teplotu rosného bodu dochází na povrchu materiálu ke kondenzaci vzdušné vlhkosti, za jasných vlhkých nocí stačí, aby se povrch ochladil o dva až tři stupně.

K výraznému zářivému nočnímu podchlazování omítek na zateplených budovách (a povrchů v exteriéru vůbec) nastává tam, kde jsou subtilní povrchové vrstvy odděleny od ostatních masivních konstrukcí (zateplovací systémy) s nimiž by mohly sdílet teplo vedením. Klasickým příkladem jsou ploché, vodorovně skloněné listy trávy, zářivě izolované od půdy jinými stébly. Ještě extrémnějším příkladem je pohozená tlustá deska pěnového polystyrénu na otevřeném prostranství – ta se na rosný bod ochladí za večerního bezvětří dříve než co jiného. V případě omítek jde hlavně o to, jak velký je prostorový úhel, který zabírá obloha. Orosení nastává hlavně tam, kde je to celý čtvrtprostor (necloní žádný blízký dům, vegetace, žádná umělá konstrukce). V menší míře o to, jaký je charakter terénu – je-li v těsné blízkosti vodní plocha nebo les, je tím zvýšen v okolí stavby obsah vlhkosti ve vzduchu a ke kondenzaci pak stačí podchlazení třeba jen o jediný kelvin pod teplotu okolního vzduchu, je-li v okolí zatravněná plocha, ochladí se na rosný bod dřív než omítka a k ochlazování omítky zprvu také přispívá, je-li to rozsáhlá tlustá betonová plocha, stydne tak pomalu, že omítku může zvečera udržovat svým zářením též nad rosným bodem, může také bránit chladnutí vzduchu. Velmi tlustá omítka do rána nemusí stačit vystydnout až na rosný bod, tenká ale může vystydnout už zvečera a zkonzenzované vody může být ráno až jeden milimetr ekvivalentní tloušťky.

Jednou z cest, jak snížit četnost nocí s kondenzací, stejně jako okamžik začátku kondenzace a tedy i množství kondenzátu, je snížit emisivitu povrchu omítky. Přesněji vzato, jde zejména o emisivitu v těch vlnových délkách, kde je ovzduší zvláště propustné a kde se tedy málo uplatňuje záření jeho přízemních, teplejších vrstev. A jde také o emisivitu do směrů, kde je obloha nejchladnější, tedy strmě vzhůru (zde mají mírnou výhodu povrchy hodně hladké, které při velkých úhlech dopadu mají pohltivost nižší).

### **Měření emisivity omítek**

Při zkoušení vývoje omítek se sníženou emisivitou povrchu, pro omezení četnosti kondenzace vody na vnějším povrchu omítky, je důležité umět tuto vlastnost účinně změřit. Úplnou odpověď na otázku, jaké je tempo zářivého ochlazování pro ten který povrch v konkrétní situaci, je možné zjistit jen průběžným kontaktním měřením teplot zkoumaných povrchů. Pro rozhodnutí, co stojí za takové monitorování in situ, stačí ale měření mnohem jednodušší a rychlejší. Žádoucí nízká emisivita nepropustného tělesa znamená jeho vysokou odrazivost. Náš přístup je proto pořídit snímek termokamerou, na kterém se mohou projevit různé odrazivosti různých povrchů, pokud jde o záření z bezoblačné oblohy. Abychom přitom zkoumali jen odrazivost, je vhodné, aby srovnávané povrchy měly stejnou skutečnou teplotu. Umístíme-li je pod jasnou oblohu a odkryjeme, jejich rozdílná (zdánlivá) černá teplota na následném termosnímku pak bude projevem jejich různé odrazivosti. Vysoce odrazivé materiály se budou jevit velmi chladné, blízké černé teplotě nebe nad sebou. Materiály s vysokou emisivitou budou mít naopak černou teplotu blízkou své skutečné teplotě.

Pod širým nebem samozřejmě zkoumané vzorky začnou měnit svou vlastní teplotu (v noci chladnout). Aby se to moc neprojevovalo na zkoumání odrazivosti, je potřeba nechat vzorky vytemperovat v místnosti na stejnou teplotu a po vynesení ven v termo-obalu je po odkrytí rychle vyfotit termokamerou. Ideální je, když mají vzorky velkou tepelnou kapacitu (aby se ochlazovaly pomaleji). Lze je nanést (jde o tenkovrstvé omítky) na tentýž masivní předmět, např. betonový hranol (může jít ovšem i o měděnou či zlatou cihlu...), který je na nezkoumaných plochách vysoce odrazivý (aby se zářivými toky jeho teplota pokud možno neměnila; v případě betonu se to snadno docílí nalepením hliníkové fólie).

Přímé srovnání relevantních emisivit poskytuje snímek jen tehdy, když jsou srovnávané povrchy podobně hladké či hrubé. Povrchy různé struktury se totiž chovají v různé míře zrcadlově, a tak odrážejí různě teplé oblasti nebe (tedy s různou černou teplotou). Pokud je potřeba srovnávat povrchy výrazně různých struktur, může být vhodné obrátit je raději směrem k ploše,

jejíž černá teplota je méně závislá na směru pohledu (takovou může představovat zasněžený terén, ale také obloha zatažená nízkou oblačností). Jsme-li nejistí, nakolik se zrcadlovost ploch liší, je vhodné umístit vzorky poblíž nějaké překážky a pořídit jejich snímek ze dvou směrů, tak aby se v jednom směru ve vzorcích zrcadlila ona překážka a ne obloha.

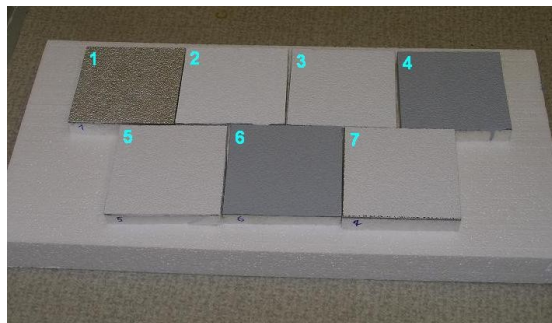
Vzorky samozřejmě nutno umístit vodorovně pod otevřené nebe, je možné je orientovat i do „pracovní polohy“, tj. svisle, a pořídit snímek směrem šikmo vzhůru (ve vzorcích se zrcadlí nebe) a šikmo dolů (ve vzorcích ze zrcadlí terén). Zajímavé mohou být i pohledy směrem vzhůru, ale pod různými úhly dopadu, až po téměř tečné pohledy. O reálném budoucím zářivém nočním chování povrchů na zdi domu mohou takové snímky říci nejvíce.

### Praktické výsledky z měření a závěr

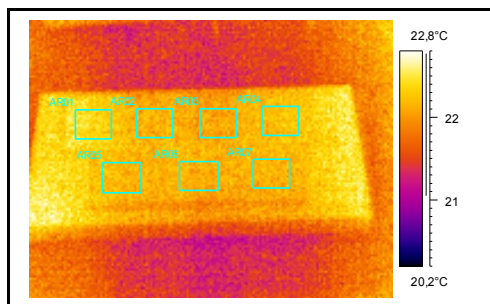
Výše popsaná metodika porovnávání emisivit povrchů různých vzorků materiálů byla ověřena měřeními. Z analýzy výsledků získaných při měření lze konstatovat, že metoda je vhodná k rychlému měření a porovnávání více zkušebních vzorků najednou. Pokud známe skutečnou teplotu měřených vzorků a mezi měřené vzorky umístíme etalony se známou emisivitou, je možné zjistit přibližné hodnoty emisivity např. iterací softwarem pro vyhodnocování termosnímků (tím, co je dodaný k termokameře).

Na následujících obrázcích a v tabulkách je uveden příklad výsledků z jednoho měření. Na termosnímku pořízeném v místnosti (obr. 2) se černé teploty jednotlivých vzorků příliš neliší (rozdíly jsou srovnatelné s nejistotou měření termokamery). To je způsobeno tím, že okolí má stejnou teplotu jako vzorky, a ty tedy odrážejí záření o stejné teplotě jakou mají samy – čím méně záření povrch emituje, tím více odráží záření z okolí (absorpce a reflexe musí dát dohromady jedničku).

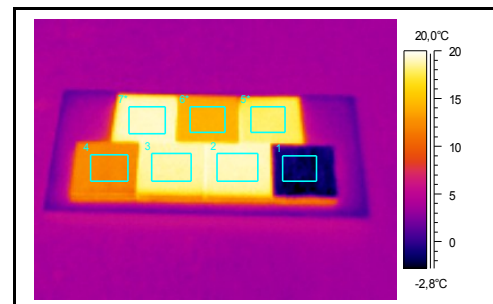
Na obr. 3 je termosnímek stejných vzorků pořízený v exteriéru pod bezoblačnou oblohou. Jsou jasně patrné rozdíly zdánlivých černých teplot jednotlivých vzorků – ty jsou rostoucí funkcí emisivit. Vzorek v levém horním rohu má známou emisivitu 0,95 a vzorek vpravo dole 0,5. V tabulce č. 2 je uvedena emisivita jednotlivých vzorků stanovená přibližně pomocí softwaru pro vyhodnocování termosnímků.



Obr. 1 Fotografický snímek měřené sestavy zkušebních vzorků



Obr. 2 Termografický snímek testovaných vzorků omítek pořízený v místnosti



Obr. 3 Termosnímek testovaných vzorků pořízený v exteriéru – vzorky mají stejnou skutečnou teplotu 22 °C

Tab. 1 Výsledky analýzy obr 2

Číslo vzorku	Černá teplota vzorku [°C]
1	22,4
2	22,2
3	22,1
4	22,3
5	22,2
6	22,1
7	22,2

Tab. 2 Výsledky analýzy obr 3

Číslo vzorku	Černá teplota vzorku [°C]	Emisivita [-]
1	-1,7	0,52
2	19,1	0,93
3	18,8	0,92
4	12,2	0,78
5	18,0	0,91
6	14,2	0,82
7	19,2	0,94

Použitá termokamera FLIR ThermaCAM E4 měří v oblasti vlnových délek 7,5  $\mu\text{m}$  až 13  $\mu\text{m}$ . Z výsledků získaných pomocí použité kamery tak můžeme usuzovat na efektivní hodnotu emisivity pro tento interval vlnových délek. V něm se nachází maximum energie vyzařované tělesy o běžných teplotách, navíc je v této oblasti atmosféra dobře propustná pro elektromagnetické záření. Z těchto důvodů je daná oblast vlnových délek z hlediska nočního ochlazování stavebních povrchů nejzajímavější.

## Literatura

(text je dostupný online jako omtky06\* v adresáři <http://amper.ped.muni.cz/jenik/LW-infrared/>)

- [1] Hollan, J.: Termografické zjišťování tepelných vlastností budov in situ (zjišťování emisivit a tepelných toků pomocí termokamery). In *Workshop Nedestruktivní testování v technických oborech*, FAST VUT v Brně, prosinec 2004. ISBN 80-7204-371-4. Online jako term\_tep.\* v adresáři <http://amper.ped.muni.cz/jenik/windows>
- [2] Hollan, J.: Termografické ověřování tepelně izolačních vlastností oken se speciálními roletami. Příspěvek k dílně Nedestruktivní testování v technických oborech, FAST VUT v Brně, listopad 2005. *Workshop NDT 2005, proceedings* p. 25-27. ISBN 80-7204-420-6 Online jako term05.\* v adresáři <http://amper.ped.muni.cz/jenik/windows>