

Obor:  
Typ:  
Autor:  
Foto:  
Kontakt:

## Tit.: Reflexní ochrana tepelné izolace ve střeších a fasádách

**Rel.: Stavební tepelné izolace jsou až z 98 procent vyplněny vzduchem a při pokojové teplotě se v nich šíří teplo cca z jedné třetiny sáláním. Intenzita sálání ale roste se čtvrtou mocninou teploty. V rozsahu praktických teplot od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$  se proto mění účinnost tepelné izolace až o 30 procent. Podstatně omezit vliv sálání v izolaci a tím zlepšit její tepelněizolační vlastnosti lze pomocí reflexních fólií.**

Výrobci minerálních i pěnových tepelných izolací někdy v žertu, ale s oblibou říkají, že jejich cílem je prodávat vzduch, protože ten je prý nejlepší tepelný izolant. Není to šťastná argumentace. I kdyby vláknitá nebo pěnová struktura izolace dokázala úplně znehybnět vzduch, ale neclonila sálání, měla by taková izolace o tloušťce 100 mm tyto součinitele tepelné vodivosti:

$\lambda = 0,391 \text{ W}/(\text{mK})$  při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  
 $\lambda = 0,593 \text{ W}/(\text{mK})$  při teplotě  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  
 $\lambda = 0,860 \text{ W}/(\text{mK})$  při teplotě  $+60^{\circ}\text{C}$ .

S rostoucí tloušťkou se tyto výsledky ještě zhoršují, např. při tloušťce 200 mm a teplotě  $+20^{\circ}\text{C}$  je  $\lambda = 1,162 \text{ W}/(\text{mK})$ . Klasická tepelná vodivost vzduchu s  $\lambda_{\text{vzduch}} = 0,025 \text{ W}/(\text{mK})$  se na celkovém prostupu tepla podílí několika procenty. Suverénně dominantní je zde transport tepla sáláním.

Výše uvedené hodnoty byly spočteny na základě Planckova zákona upraveného pro sdílení tepla mezi rovnoběžnými rovinami o termodynamických teplotách  $T_1$ , resp.  $T_2$  v kelvinech (K). Ty se počítají tak, že k teplotě ve  $^{\circ}\text{C}$  připočteme 273,15. Abychom počítali *lambda* při dané teplotě, volíme velmi malé rozestupy teplot  $T_1$  a  $T_2$ , např.  $(20 + 273,15) \text{ K}$  a  $(20,1 + 273,15) \text{ K}$ , a pak dosazujeme do vztahu:

$$\lambda = \frac{L}{T_1 - T_2} \cdot \left[ \left( \sigma \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} + \lambda_{\text{vzduch}} \right) \right], \quad (1)$$

kde  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$  je Stefanova - Boltzmannova konstanta,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$  je bezrozměrná emisivita rovin a  $L$  je tloušťka vzduchové vrstvy, neboli vzdálenost desek. Je vidět, že vzduch v tepelné izolaci sám o sobě nic neznamena. Nutnou podmínkou pro fungování izolace je, aby její vláknitá nebo pěnová struktura omezovala průchod tepelného záření.

Přibližme si to. Má-li skutečná tepelná izolace součinitel  $\lambda = 0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ , na níž se podílí vzduch příspěvkem  $0,025 \text{ W}/(\text{mK})$ , potom téměř 30 % tepla, přesně  $(0,035 - 0,025)/0,035$  v procentech, se přenáší zářením. To, že je to jen 30 %, plyne z toho, že vlákna či pěna izolace částečně pohlcují tepelné záření. Když se podaří oněch 30 % záření v izolaci odclonit, dostaneme se k vodivosti na úrovni nehybného vzduchu.

Ideálním prostředkem k tomu jsou reflexní fólie.

Z fyzikálního hlediska je pro reflexní fólie charakteristická velmi nízká emisivita od  $\varepsilon = 0,02$  do  $\varepsilon = 0,2$ .

Připomeňme, že je vždy  $\varepsilon \leq 1$ , u běžných povrchů je ca  $\varepsilon = 0,9$ . Ideální reflexní fólie nepropouští dopadající záření, nýbrž  $100 \times \varepsilon$  procent z něj pohlcuje a zbytek,  $100 \times (1 - \varepsilon)$  procent, odráží. Dosadíme-li např.  $\varepsilon = 0,1$  do vztahu (1), dostaneme pro tloušťku  $d = 100 \text{ mm}$  vzduchové mezery s nehybným vzduchem:

$\lambda = 0,0442 \text{ W}/(\text{mK})$  při teplotě  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  
 $\lambda = 0,0549 \text{ W}/(\text{mK})$  při teplotě  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  
 $\lambda = 0,0689 \text{ W}/(\text{mK})$  při teplotě  $+60^{\circ}\text{C}$ .

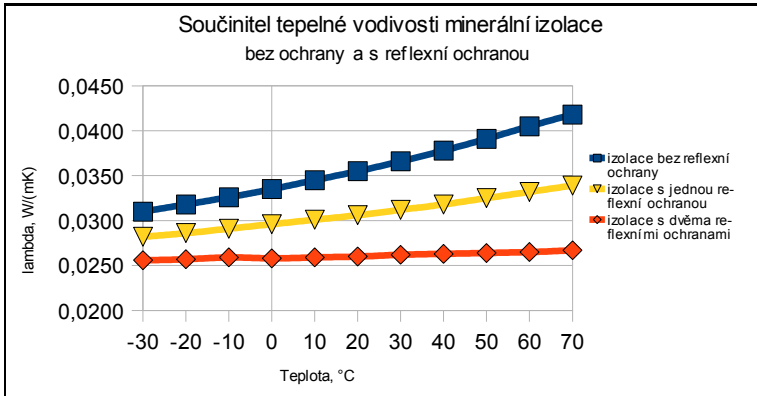
Výsledek oproti řešení bez fólie nebo s nereflexní fólií ( $\varepsilon = 1$ ) jsme zlepšili zhruba o 90 procent. Výsledné hodnoty přesto nejsou nejlepší a navíc jde o dost neohrabané řešení. Prostou vzduchovou mezeru ohraničenou z obou stran reflexní fólií bychom bez pomocných konstrukcí těžko realizovali, natožpak nehybnost vzduchu, jehož proudění by výsledky úplně znehodnotilo.

## Vlastnosti tepelné izolace chráněné reflexními fóliemi

Pohodlnější je aplikovat reflexní fólii na jeden či oba povrchy izolačních desek nebo rohoží se stabilními

rozměry a tím spojit několik výhod, které u vzduchové mezery chybějí:

- vláknitá nebo pěnová struktura izolace sloní sálání,
- vlákna či pěna zajistí nehybnost vzduchu,
- izolační desky jsou dostatečně tuhé, což zajišťuje geometrickou stabilitu celé sestavy.



Obr. 1: Teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  nechráněné, chráněné z jedné strany a oboustranně chráněné izolace podle modelu popsaného v článku.

### Výpočtový model a předpoklady

To, že vláknitá nebo pěnová složka izolace brzdí sálavý tok energie, znamená, že pohlcuje tepelné záření ve smyslu Beerova - Lambertova zákona:

$$dI = -I \cdot k \cdot dx \quad (2)$$

Rovnice (2) říká, že sálavý tok o intenzitě  $I$  se po průchodu (nekonečně tenkou) vrstvou izolace  $dx$  zmenší o hodnotu  $dI$ . Součin  $k \cdot dx$  lze nazvat *pohltivostí* vrstvy, klíčová materiálová konstanta úměrnosti  $k$  se nazývá součinitel absorpce. Čím je  $k$  větší, tím izolace víc pohlcuje tepelné záření a víc brzdí sálavý tok. Jestliže podle Planckova zákona sálá okrajová fólie o termodynamické teplotě  $T_1$  s intenzitou  $I = \sigma \varepsilon_1 T_1^4$ , potom vrstva izolace  $dx$  ve vzdálenosti  $x$  pohlcuje z tohoto záření část  $\sigma \varepsilon_1 T_1^4 e^{-kx} \cdot k \cdot dx$ . Exponenciální člen  $e^{-kx}$  vyjadřuje pokles intenzity záření po projití od okraje k vrstvě  $dx$  ve vzdálenosti  $x$ , jak plyne z integrace (2).

Z 2. zákona termodynamiky plyne, že vrstva  $dx$  musí zároveň teplo sálát (emitovat), a to se stejnou účinností, jako jej pohlcuje. Její pohltivost  $k \cdot dx$  se tedy musí rovnat i emisivitě. Vrstva  $dx$  o teplotě  $T(x)$  tedy sálá s intenzitou  $dI = \sigma \cdot T^4(x) \cdot k \cdot dx$  a okrajová fólie z něho pohltí část  $\sigma \cdot T^4(x) \cdot k \cdot \varepsilon_1 \cdot e^{-kx} dx$  (také fólie pohlcuje i emituje se stejnou účinností danou číslem  $\varepsilon$ ). Výsledná bilance výměny sálavého tepla mezi fólií a vrstvou  $dx$  je:

$$dI = \sigma k \varepsilon_1 (T_1^4 - T^4(x)) \cdot e^{-kx} dx \quad (3)$$

Integrací přes tloušťku izolace, tedy od  $x = 0$  do  $x = L$ , spočítáme intenzitu výměny sálavého tepla mezi okrajovou fólií a zbytkem izolace, označme ji jako  $I$ . K ní připočítáme ještě výměnu sálavého tepla, které si okrajová fólie předává s fólií na opačné straně izolace s emisivitou  $\varepsilon_2$  a teplotou  $T_2$ :

$$I_{1,2} = \frac{\sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 e^{-kL}}{1 - (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2) e^{-2kL}} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4)$$

a konečně i tok tepla klasickým vedením vzduchem, do něhož započítáme i dva odpory  $r_k$  při přestupu tepla vedením. Pro celkový součinitel vedení tepla, který zahrnuje i sálání tepla izolací je:

$$\lambda = \frac{L}{T_1 - T_2} \cdot (I + I_{1,2}) + L \frac{\lambda_{\text{vzduch}}}{L + 2r_k \lambda_{\text{vzduch}}} \quad (5)$$

### Výsledky

Pro jednodušší integraci rovnice (3) jsme uvažovali lineární průběh teploty v izolaci, což je pro velké

hodnoty  $k$  a malé teplotní spády v izolaci dobře splněno. Celkový součinitel vodivosti  $\lambda$  v (5) výrazně závisí na součiniteli absorpce  $k$ . **Ten jsme nastavili na hodnotu  $k = 543 \text{ m}^{-1}$**  tak, aby při vodivosti vzduchu  $\lambda_{\text{vzduch}} = 0,025 \text{ W/(mK)}$ , teplotě  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  (přesněji  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  na teplém a  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  na chladném okraji) a tloušťce izolace  $100 \text{ mm}$  bylo  $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$ , jak je tomu u skutečných izolací. Při této hodnotě  $k$  zaujímá sálavá složka  $28 \%$  z celkové vodivosti. **Teplotný paprsek se po  $1,3 \text{ mm}$  oslabí v izolaci na polovinu.**

teplota	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
izolace bez reflexní ochrany	<b>0,0318</b>	<b>0,0326</b>	<b>0,0335</b>	<b>0,0345</b>	<b>0,0355</b>	<b>0,0366</b>	<b>0,0378</b>	<b>0,0391</b>	<b>0,0405</b>
odchylka od vztažné hodnoty	-9,1%	-6,9%	-4,3%	-1,4%	1,4%	4,6%	8,0%	11,7%	15,7%
izolace s jednou reflexní ochranou	<b>0,0286</b>	<b>0,0291</b>	<b>0,0296</b>	<b>0,0301</b>	<b>0,0306</b>	<b>0,0312</b>	<b>0,0318</b>	<b>0,0325</b>	<b>0,0332</b>
odchylka od vztažné hodnoty	-18,3%	-16,9%	-15,4%	-14,0%	-12,6%	-10,9%	-9,1%	-7,1%	-5,1%
izolace s dvěma reflexními ochranami	<b>0,0257</b>	<b>0,0259</b>	<b>0,0258</b>	<b>0,0259</b>	<b>0,0260</b>	<b>0,0262</b>	<b>0,0263</b>	<b>0,0264</b>	<b>0,0265</b>
odchylka od vztažné hodnoty	-26,6%	-26,0%	-26,3%	-26,0%	-25,7%	-25,1%	-24,9%	-24,6%	-24,3%

Tab. 1: **Teplotní závislost součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  nechráněné izolace, chráněné z jedné strany a oboustranně chráněné.** Údaje v procentech znamenají odchylku hodnoty  $\lambda$  pro danou teplotu od vztažné hodnoty  $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$  u nechráněné izolace při  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ .

V tab. 1 a na grafu v obr. 1 jsou výsledky výpočtů teplotní závislosti součinitele celkové tepelné vodivosti izolace, která je a) bez reflexní ochrany, b) s jednou ochrannou reflexní fólií o emisivitě  $\varepsilon = 0,1$  a c) se dvěma reflexními fóliemi o emisivitě  $\varepsilon = 0,1$ .

Na první pohled je vidět, že u izolace bez reflexní ochrany roste součinitel tepelné vodivosti rychle s teplotou. Naopak, pokud izolaci z obou stran chráníme reflexní fólií orientovanou *do izolace*, je teplotní růst "lambdy" velmi malý, prakticky je "lambda" konstantní.

*Zcela zásadní ale je, že už aplikací jedné reflexní fólie na jednom z okrajů izolace podstatně snížíme celkový součinitel tepelné vodivosti pod úroveň  $0,035 \text{ W/(mK)}$  a při oboustranné aplikaci dokonce pod  $0,0275 \text{ W/(mK)}$ , a to i při extrémně vysokých teplotách.*

### Reflexní fólie - nejlepší ochrana střešních izolací

Vysoké venkovní teploty až k  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  v tab. 1 a obr. 1 jsou uvedeny proto, že se často objevují pod střešní krytinou při celodenním letním slunečním svitu. Ochranou tepelné izolace reflexní fólií docílíme při těchto podmínkách až  $30$  procentního snížení prostupu tepla do podkroví a podstatně zlepšíme pobytové podmínky.

### Odrazivé povrchy orientovány do izolace

Výpočet předpokládá, že jsou reflexní fólie orientovány odrazivou vrstvou do izolace. **Tím, že odrazivá vrstva míří do izolace, nemůže být ochlazována (nebo ohřívána) proudícím vzduchem. Zároveň odráží tepelné záření zpět do izolace a sama do izolace vyzařuje minimum.** Zářivý přestup tepla na reflexní vrstvě je (oproti nereflexní fólii) snížen na  $10 \%$  (pro  $\varepsilon = 0,1$ ) nebo až na  $2 \%$  (pro  $\varepsilon = 0,02$ ). Při opačné orientaci reflexních vrstev ven se výsledky zhorší o vliv proudění vzduchu podél reflexních povrchů.

### Chování izolace v extrémních teplotních podmínkách

Pokud nechráněná izolace přenáší velké teplotní rozdíly, bude na jejím teplém okraji citelně vyšší součinitel tepelné vodivosti než na chladném. Pracovní hodnota, se kterou v pracujeme v obvyklém lineárním přiblížení, bude ležet někde uprostřed. Pokud izolaci ochráníme z obou stran reflexní fólií, docílíme nejen toho, že se „lambdy“ v celé tloušťce izolace vyrovnají, ale navíc se výrazně přiblíží k hodnotě nehybného vzduchu. Ukazuje to tab. 2.

rozdílné teploty, $t_1 \rightarrow t_2$	+60 $^\circ\text{C} \rightarrow +25 \text{ }^\circ\text{C}$	-30 $^\circ\text{C} \rightarrow +20 \text{ }^\circ\text{C}$
$\varepsilon_{\text{INT}} = \varepsilon_{\text{EXT}} = 1$	$\lambda = 0,0382 \text{ W/(mK)}$	$\lambda = 0,0333 \text{ W/(mK)}$
$\varepsilon_{\text{INT}} = 1$ a $\varepsilon_{\text{EXT}} = 0,1$ $\varepsilon_{\text{INT}} = 0,1$ a $\varepsilon_{\text{EXT}} = 1$	$\lambda = 0,0313 \text{ W/(mK)}$ $\lambda = 0,0331 \text{ W/(mK)}$	$\lambda = 0,0306 \text{ W/(mK)}$ $\lambda = 0,0285 \text{ W/(mK)}$
$\varepsilon_{\text{INT}} = \varepsilon_{\text{EXT}} = 0,1$	$\lambda = 0,0263 \text{ W/(mK)}$	$\lambda = 0,0258 \text{ W/(mK)}$

Tab. 2: **Hodnoty součinitele tepelné vodivosti chráněné a nechráněné tepelné izolace tloušťky  $200 \text{ mm}$  při extrémní zátěži a odpovídající intenzity prostupujícího tepelného toku.** V prvním datovém sloupci je znázorněn příklad, kdy pod rozpálenou střešní krytinou extrémně vzroste teplota.