

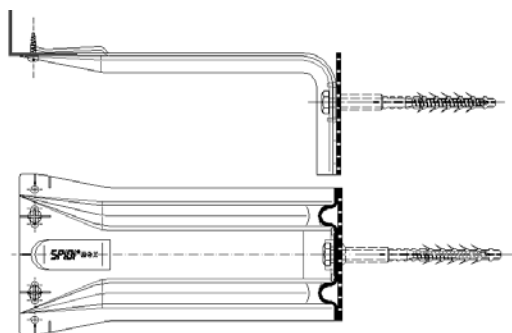
Tepelné efekty bodových kotev zavěšených fasádních obkladů

Zbyněk Svoboda, ČVUT v Praze

Tloušťky tepelných izolací ve stěnových konstrukcích se již poměrně běžně přibližují k hranici 200 mm a nezřídka ji i výrazně překračují – a to i u objektů, které nemají žádné ambice na zařazení do kategorie nízkoenergetických budov. V souvislosti s tím stoupá potřeba korektního zohlednění vlivu různých tepelných mostů umístěných v takto mohutných tepelně izolačních vrstvách. Mezi typické tepelné mosty, jejichž důsledky již nelze kvůli vzrůstající tloušťce tepelných izolací dále zanedbávat, patří bodové kotevní prvky pro zavěšené fasádní obklady.

Úvodem

Pro upevnění nosné konstrukce vnějšího pláště se u dvouplášťových stěn často používají lehké bodové kotvy z hliníkových či ocelových slitin, jakými jsou např. kotvy SPIDI max (obr. 1).



Obr. 1 Kotva SPIDI max 210/80

Tepelný vliv těchto kotev se v projekční praxi dosud spíše zanedbává či se zohledňuje jen orientačními přírážkami k tepelné vodivosti tepelné izolace, v níž jsou kotvy umístěny. Často se doporučuje např. zvýšit tepelnou vodivost o 5 až 15 % v závislosti na předpokládané hmotnosti zavěšeného obkladu. Naneštěstí ale nemusí podobné přírážky vždy dostatečně přesně zohlednit skutečné tepelné působení tohoto typu kotvení. Výsledný efekt kotev nelze totiž vyjádřit nějakou konstantní hodnotou, protože závisí výrazně na celé řadě faktorů počínaje počtem kotev v 1 m² a konče typem podkladní nosné konstrukce. Přesné zhodnocení tepelného efektu bodové kotvy lze provést jen s pomocí numerického řešení třírozměrného šíření tepla ve 3D charakteristickém výseku konstrukce kolem kotvy.

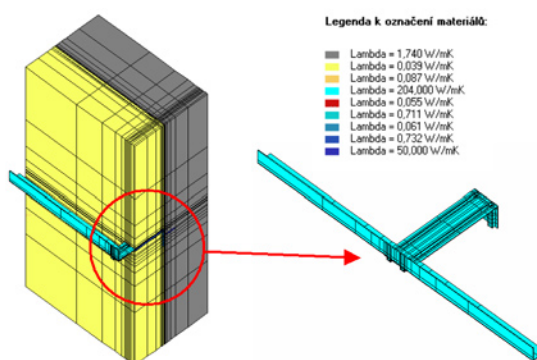
Numerická analýza

Pro vyjádření tepelných efektů bodových tepelných mostů se používá bodový činitel prostupu tepla χ [W/K]. Vypočte se podle EN ISO 10211-1 z tepelné propustnosti stanovené numerickým výpočtem třírozměrného teplotního pole.

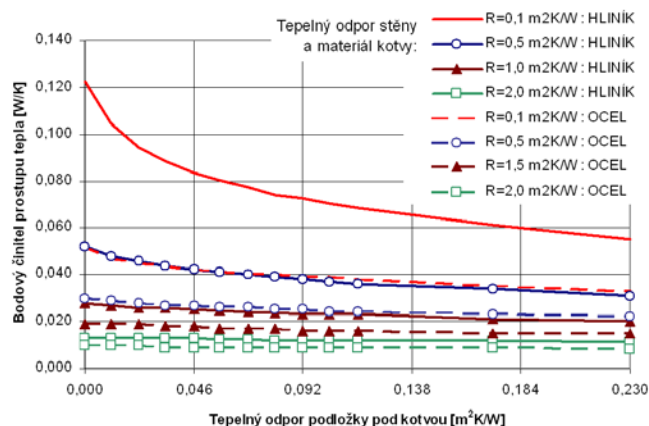
Hodnota bodového činitele prostupu tepla diskutované kotvy je závislá na materiálu kotvy, tloušťce tepelné izolace, izolační podložce pod kotvou a na materiálu nosné stěny. Pro určení míry těchto závislostí byl vytvořen 3D model kotvy s proměnnými tloušťkami izolační podložky pod kotvou a s proměnnou tloušťkou tepelné izolace. Kotva byla modelována přesně včetně prolamování (obr. 2). Těsně kolem kotvy (v jejím prolamování) nebyla uvažována tepelná izolace, ale realističtější uzavřená vzduchová dutina.

Tepelné vodivosti jednotlivých materiálů byly uvažovány podle ČSN 730540-3. Snížené proudění vnějšího vzduchu ve větrané vzduchové vrstvě pod obkladem bylo zohledněno tepelným odporem při přestupu tepla 0,13 m².K/W, tedy stejným jako na vnitřní straně.

Výsledky výpočtu bodového činitele prostupu tepla v závislosti na tepelném odporu izolační podložky pod kotvou jsou přehledně uvedeny na obr. 3, a to pro různé tepelné odpory nosné stěny. Graf platí pro hliníkovou i ocelovou kotvu a pro tloušťku tepelné izolace 140 mm – obdobné závislosti lze ovšem získat i pro tepelné izolace o jiných tloušťkách (v analýze byly hodnoceny tloušťky od 80 do 260 mm). Ve všech případech byla uvažována styčná plocha kotvy se stěnou o rozměru 90 x 80 mm a kotva o tloušťce stěny 2 mm. Z výsledků je patrná zvláště výraz-



Obr. 2 Model charakteristického výseku s kotvou a částí nosného roštu



Obr. 3 Bodový činitel prostupu tepla kotvy pro tloušťku tepelné izolace 140 mm

ná závislost bodového činitele prostupu tepla na tepelném odporu stěny. Izolační podložka pod kotvou se projevuje výrazněji především u stěn s nízkým tepelným odporem (např. u časté železobetonové stěny tl. 200 mm), u nichž je obzvláště výrazná i deformace teplotního pole (obr. 4).

Vliv kotev na zvýšení součinitele tepelné vodivosti tepelné izolace

Podívejme se nyní na to, jak výrazně mohou kotvy ovlivnit ekvivalentní tepelnou vodivost tepelné izolace, kterou lze stanovit ze vztahu:

$$\lambda_{eqv} = d / (U^{-1} - R_{si} - R_{se} - R_w) \quad (1)$$

kde d je tloušťka tepelné izolace v m,

R_{si}, R_{se} tepelné odpory při přestupu tepla na vnitřní a vnější straně v m².K/W,

R_w tepelný odpor nosné stěny v m².K/W,

U součinitel prostupu tepla ve W/(m².K), který lze stanovit s vlivem kotev jako

$$U = 1 / (R + R_{si} + R_{se}) + (n \cdot \chi) / A \quad (2)$$

kde R je tepelný odpor konstrukce bez vlivu kotev v m².K/W,

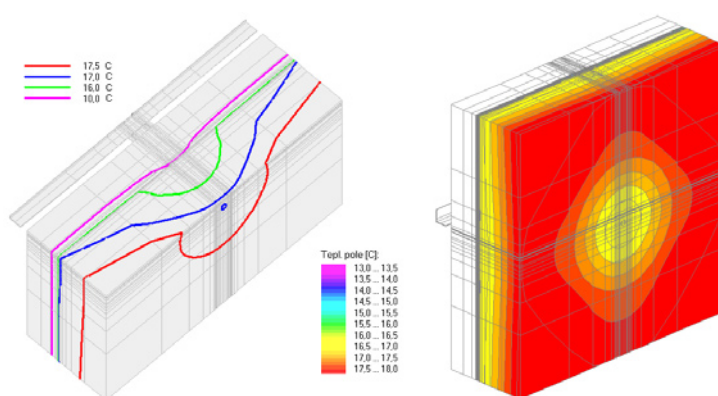
n počet kotev v 1 m²,

χ bodový činitel prostupu tepla kotvy ve W/K,

A plocha charakteristického výseku v m² (zde 1 m²).

V Tab. 1 je uvedeno procentuální zvýšení tepelné vodivosti tepelné izolace pro nejneprůzračnější stěnu s nízkým tepelným odporem, a to pro dva mezní případy: bez podlahy pod kotvou a s podlahou o tl. 16 mm.

Z výsledků je zřejmé, že i pro nejpříznivější uvažované kombinace se tepelná vodivost tepelné izolace zvýší o více než 25 %. V nejneprůzračnějších situacích (žb stěna, kotvy bez podložek, 3 kotvy/m²) se může tepelná vodivost zvýšit dokonce až na téměř trojnásobek původní hodnoty. Je evidentní, že zanedbávat či podceňovat takto výrazný faktor je hrubou chybou. Pro praktické výpočty je ovšem nereálné provádět vždy podrobnou 3D analýzu vli-



Obr. 4 Izotermie v řezu hliníkovou kotvou a teplotní pole na vnitřním povrchu (podložka tl. 2 mm, tepelná izolace tl. 140 mm, železobetonová stěna tl. 200 mm)

vu kotev. Pro prvotní analýzy postačí orientační výpočetní postup, který s pomocí jednoduchých vztahů zohlední všechny rozhodující faktory.

Zjednodušená výpočetní metodika

Zjednodušená výpočetní metodika, která bude prezentovaná dále, vychází ze závislostí, které byly zjištěny během rozsáhlé citlivostní analýzy problému. Jedním z východisek pro další odvozování byl charakter závislosti bodového činitele prostupu tepla na tepelném odporu stěny, který je obdobný pro různé tepelné odpory podlahy pod kotvou (obr. 5).

Uvedené křivky lze proložit logaritmickou funkcí ve tvaru:

$$y = -A \cdot \ln(x) + B \quad (3)$$

v níž koeficienty A a B závisí na tepelném odporu podlahy pod kotvou. Tuto závislost lze aproximovat polynomičnou funkcí 4. až 6. stupně, takže lze získat vztahy:

a) pro hliníkovou kotvou: (4)

$$A = 166,76 \cdot R_p^6 - 254,7 \cdot R_p^5 + 149,71 \cdot R_p^4 - 42,82 \cdot R_p^3 + 6,2782 \cdot R_p^2 - 0,4917 \cdot R_p + 0,0366$$

$$B = 1,0509 \cdot R_p^4 - 1,2329 \cdot R_p^3 + 0,5347 \cdot R_p^2 - 0,1167 \cdot R_p + 0,0316$$

b) pro ocelovou kotvou: (5)

$$A = 59,487 \cdot R_p^6 - 87,015 \cdot R_p^5 + 48,155 \cdot R_p^4 - 21,665 \cdot R_p^3 + 1,6627 \cdot R_p^2 - 0,1179 \cdot R_p + 0,0138$$

$$B = 0,2807 \cdot R_p^4 - 0,3781 \cdot R_p^3 + 0,1938 \cdot R_p^2 - 0,0484 \cdot R_p + 0,0196$$

kde R_p je tepelný odpor podlahy v m².K/W.

Tab. 1 Vliv kotev na tepelnou vodivost tepelné izolace tl. 140 mm

Tep. odpor stěny	Tep. odpor podlahy	Kotva	Bod. činitel	Počet kotev v 1 m²	Ekv. tep. vodivost	Zvýšení tep. vodivosti
R_w [m².K/W]	R_p [m².K/W]		χ [W/K]		λ_{eqv} [W/(m.K)]	
0,10	0,00	hliník	0,12	2	0,085	+113 %
				3	0,112	+ 179 %
		ocel	0,05	2	0,058	+ 44 %
				3	0,067	+ 68 %
	0,17	hliník	0,06	2	0,061	+ 54 %
				3	0,073	+ 83 %
		ocel	0,03	2	0,050	+ 26 %
				3	0,056	+ 40 %

Výše uvedené rovnice byly odvozeny pro tloušťku tepelné izolace 140 mm, a proto je třeba ve výsledném vztahu pro bodový činitel prostupu tepla ještě zohlednit vliv odlišné tloušťky tepelné izolační vrstvy. Pro **hliníkové kotvy** lze použít vztah:

$$\chi = -A \cdot \ln(R_w) + B + \Delta B + \Delta\chi_1 + \Delta\chi_2 \quad (6)$$

přičemž koeficienty A a B se uvažují podle vztahu (4), R_w je tepelný odpor stěny v $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, ΔB je korekce pro tenčí podložky ($\Delta B=0,003 \text{ W/K}$ pro R_p do $0,01 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; $\Delta B=0,002 \text{ W/K}$ pro R_p od $0,01$ do $0,02 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; $\Delta B=0,001 \text{ W/K}$ pro R_p od $0,02$ do $0,03 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; $\Delta B=0 \text{ W/K}$ pro R_p nad $0,03 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$), $\Delta\chi_1$ je korekce na tloušťku tepelné izolace ($\Delta\chi_1=0,005 \text{ W/K}$ pro tl. izolace nad 140 mm, je-li tepelný odpor stěny vyšší než $0,5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ a pro tl. izolace pod 140 mm, je-li tepelný odpor stěny nižší než $0,5 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; jinak $\Delta\chi_1=0 \text{ W/K}$) a $\Delta\chi_2$ je bezpečnostní přírážka (doporučeno $0,002$ až $0,005 \text{ W/K}$).

Pro **ocelové kotvy** lze použít vztah:

$$\chi = -A \cdot \ln(R_w) + B + \Delta\chi_1 + \Delta\chi_2 \quad (7)$$

v němž se koeficienty A a B uvažují podle vztahu (5), $\Delta\chi_1$ je korekce na tloušťku tepelné izolace ($\Delta\chi_1=0,005 \text{ W/K}$ pro tl. izolace nad 140 mm, je-li tepelný odpor stěny vyšší než $0,7 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ a pro tl. izolace pod 140 mm, je-li tepelný odpor stěny nižší než $0,7 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$; jinak $\Delta\chi_1=0 \text{ W/K}$) a $\Delta\chi_2$ je bezpečnostní přírážka (viz výše).

Podívejme se ještě závěrem na srovnání výsledků přibližného a přesného 3D výpočtu, a to pro kombinace, které nebyly pro vytvoření zjednodušené metodiky použity. Na obr. 6 je vidět srovnání obou postupů pro dvě různé stěny a tloušťky tepelné izolace. Z výsledků je patrné, že zjednodušená metodika poskytuje pro uvažované případy výsledky s dostatečnou bezpečnostní rezervou, a to i bez zahrnutí bezpečnostní přírážky $\Delta\chi_2$.

Nově vytvořenou zjednodušenou meto-

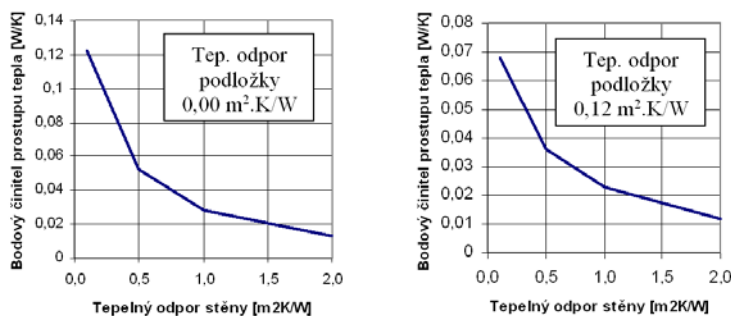
diku výpočtu tepelných efektů bodových kovových kotev lze použít jak při ručním výpočtu, tak především při tvorbě různých programů.

Zbývá uvést omezení zjednodušené metodiky. Použít ji lze pro tepelný odpor nosné stěny od $0,1$ do $2,0 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, pro tepelný odpor podložky pod kotvou od 0 do $0,4 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ a pro tloušťku tepelné izolace od 80 do 260 mm . Kotva přitom může být buď hliníková nebo ocelová – tloušťku může mít maximálně 2 mm a styčná plocha kotvy a stěny nesmí překročit $90 \times 80 \text{ mm}$.

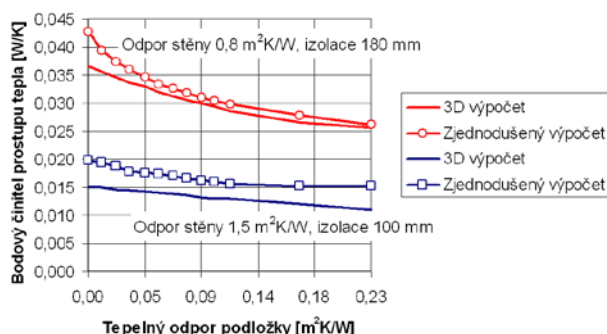
Tento příspěvek byl podpořen výzkumným záměrem MSM 6840770005.

Literatura:

- [1] ŠÁLA, J.: *Zateplování budov v praxi*. Praha: Grada, 2004
- [2] SVOBODA, Z.: *Program Cube3D 2008*. Kladno: Svoboda Software, 2007
- [3] Slavonia Baubedarf GesmbH: *Dokumentace pro kotvy SPIDI max*, 2007



Obr. 5 Závislost bodového činitele prostupu tepla hliníkové kotvy na tepelném odporu stěny



Obr. 6 Porovnání výsledků přesného a zjednodušeného výpočtu pro hliníkovou kotvu