

IDEÁLNÍ NÁVRH PLOCHÉ STŘECHY Z HLEDISKA ŠÍŘENÍ VLHKOSTI

Petr Slanina

Ing. Petr Slanina

Fakulta stavební, ČVUT v Praze, Česká republika, petr.slantina@fsv.cvut.cz

IDEÁLNÍ NÁVRH PLOCHÉ STŘECHY Z HLEDISKA ŠÍŘENÍ VLHKOSTI

ABSTRAKT

Vývoj plochých jednoplášťových střech započal na začátku 20.století a trvá dodnes. Střešní pláště by měly být navrhovány podle nejnovějších poznatků stavební fyziky a materiálového inženýrství. V současné době jsou však střešní pláště nejčastěji navrhovány podle zastaralých a jednoduchých výpočetních modelů šíření vlhkosti a na základě nevhodných tepelně vlhkoštní požadavků technických norem.

Příspěvek se zaměřuje na vývoj plochých jednoplášťových střech v zahraničí i v České a Slovenské republice. Na základě nejnovějších poznatků o šíření vlhkosti ve stavebních konstrukcích je provedena numerická analýza. Tato analýza je zaměřena na transport vlhkosti v plochých jednoplášťových střechách v závislosti na různých vnějších okrajových podmínkách i na různých materiálových variantách jednotlivých střešních vrstev. V závěru příspěvku je na základě výsledků analýzy prezentováno několik ideálních skladeb jednoplášťových plochých střech z hlediska šíření vlhkosti.

VÝVOJ OBALOVÝCH PLÁŠŤŮ BUDOV Z POHLEDU VLHKOSTI V ZAHRANIČÍ

Počátky zateplení obvodových pláštěů, 1920-1935

Tepelná izolace je poprvé použita k prevenci růstů plísní v průmyslových objektech (mlýny a továrny s vyšší relativní vlhkostí vzduchu). Jako tepelná izolace je používán korek. Je důležité podotknout, že tepelná izolace nesloužila ke snížení tepelných ztrát, ale k prevenci studených míst v objektech s vyšší relativní vlhkostí. Jako hydroizolace jsou používány roztíratelné asfalty případně asfaltové pásy s hadrovou vložkou. Transport vlhkosti je uvažován jako pohyb vzduchu póry materiálu[1].

Vývoj difúzní teorie, 1935-1940

Peclet a Fick [2] naznačili, že ve vzduchu se bude vodní pára šířit lineárně podle částečného tlaku vodních par a v závislosti na difúzní propustnosti materiálů. Aplikování Fickovy teorie a počátky použití parotěsnících zábran souvisejí s prací Dr. Franka Rowleyho z University of Minnesota. Dr. Rowley navrhl dvou poschodový experimentální dům uvnitř obrovského chladicího zařízení. Při testu, akumulace vlhkosti v plášti domu byla malá – 0,19g na 1m², a s použitím parotěsnící zábrany pouze 0,01 g/m². Tento rozdíl se zdá být obrovský. Je nutné se zmínit i o podmínkách experimentu, které byly uvnitř objektu 21°C a 40% relativní vlhkost a vně objektu -29°C [1]. Rowleyho práce se rychle rozšířila a s ní i navrhování parotěsnících zábran pro zateplené pláště [3].

Počátky parotěsnících zábran, 1940-1945

V roce 1942 *U.S. Federal Housing Authority* (Stavební úřad USA) vydal technickou normu s požadavky pro rezidenční objekty. V tomto dokumentu se bez jakýchkoliv referencí a citací objevují dvě zásadní pravidla: použití parotěsnící zábrany a pravidlo pro odvětrání půdních prostor, tj. velikost otvorů 1/300 plochy [1].

Rozšíření parotěsnících zábran, 1946-1952

Parotěsnící zábrana je doporučena v mnoha stavebních a architektonických příručkách [1]. V Kanadě se rozšířilo použití parotěsnící zábrany pro rezidenční objekty. Parotěsnící zábrany jsou navrhovány v plochých zateplených střechách, což působí mnohé problémy [3].

Parotěsnící zábrana jako hlavní ochrana před vlhkostí, 1952-90.léta

Po roce 1952 v USA převážily názory pro navrhování parotěsnících zábran v zateplených pláštích budov, a tak otázky týkající se užitečnosti použití parotěsnících zábran byly odloženy na dobu 40let [1]. Kanadský výzkum se začal soustředit na transport vzduchu skrz obalové pláště budov. Profesor Hutcheon uzavírá svoji práci doporučením, že parotěsnící zábrany plní svoji funkci pouze v určitých případech, ale neměly by být používány jako základní princip navrhování zateplených plášťů budov [3]. Západní Evropa sleduje difúzní teorii a použití parotěsnících zábran. V roce 1958 je rozšířena difúzní teorie pomocí Glaserovy grafické metody [4], která se používá v mnoha případech dodnes.

Další možnosti ochrany před vlhkostí, 90léta – dosud

Ve světě se postupně rozšiřuje názor, že parotěsnící zábrana by se ve střešních pláštích budov měla navrhovat pouze pokud je zapotřebí [5] a [6]. Z hlediska transportu vlhkosti je nezbytné rozlišit větrané střechy, u kterých převládá transport vlhkosti pomocí proudění vzduchu, a střechy nevětrané s celistvou hydroizolační vrstvou, které jsou vzduchotěsné, a ve kterých dochází k transportu vlhkosti hlavně difúzí vodní páry [5]. V odborné literatuře se objevuje nový problém plochých jednoplášťových střech – uzavření vlhkosti mezi vrstvou parotěsnící a hydroizolační, které nemá možnost se ze střechy vypařit. Vlhkost se ve střešním plášti akumuluje [5] a [7], což může vést k zatékání vlhkosti do interiérů a k degradaci tepelně izolačních vlastností zabudovaných materiálů. Snahou je předejít akumulaci vlhkosti ve střešním plášti za pomoci použití parotěsnících zábran s proměnlivým difúzním odporem [7], odvětráním střech pomocí větracích kanálků nebo navržením střechy s obráceným pořadím vrstev [5].

VÝVOJ PLOCHÝCH STŘECH V ČSR

Počátky zateplení střech, 1900-50.léta

V prvních dvou dekádách 20.století jednoplášťové střechy byly navrhovány s tepelnou izolací v podobě silikátových materiálů a bez parotěsnících vrstev. Tyto střechy nevykazovaly problémy s vlhkostí až do doby jejich nesprávné rekonstrukce v 50. a 60.letech 20.století [8].

Ve 30. až 50. letech 20. století jednoplášťové střechy nejvíce trpí z důvodu jejich nedbalé realizace. Nejčastější poruchou je zatékání dešťové vody do střešní konstrukce a do interiérů [8].

Počátky používání parotěsnících zábran, 60. a 70. léta

Jednoplášťové ploché střechy jsou nejčastěji navrhovány s asfaltovým hydroizolačním systémem, který se skládal ze dvou asfaltových pásů s nasákovou vložkou. Jako tepelně izolační vrstva byly použity plynosilikátové tvárnice, které byly v 60. letech nahrazeny expandovaným polystyrenem. Do těchto střech zatékalo, neboť byly navrhovány bez střešního spádu. Později tyto střešní pláště trpěly z nedbale provedené lidské práce. Jejich poruchy byly chybně přičítány difuzi a kondenzaci vodní páry uvnitř střešního pláště. Tento názor vedl k používání parotěsnících zábran, což byla samozřejmě velká chyba, viz [8].

Špatná zkušenost s jednoplášťovými plochými střechami, 70. až 80. léta

Ploché jednoplášťové střechy bylo v tomto období navrhovány s parotěsnící vrstvou a buď s nebo bez odvětrávacích kanálků. V těchto střechách docházelo k uzavření vlhkosti ve střešním plášti, avšak zvýšená vlhkost materiálů výrazně nezkrátila životnost těchto střech. Největším problémem jednoplášťových plochých střech byla opět špatně provedená práce a nevhodné aplikování asfaltových pásů. Od 70. let, hlavně pak v 80. letech dochází k navrhování dvouplášťových střech, a to hlavně z důvodu špatných

zkušeností s jednoplášťovými střechami s klasickým pořadím vrstev. Ve stejném období jsou navrhovány ploché jednoplášťové střechy s opačným pořadím vrstev, a to hlavně z toho důvodu, že tyto střechy splňovaly požadavky normy na kondenzaci vodní páry uvnitř střešního pláště [8].

Rozdílný přístup k použití parotěsnících vrstev, 90.léta až dosud

V 90.létech 20. století se projektanti navrátili k navrhování jednoplášťových střech s klasickým pořadím vrstev. Byly hlavně vedeni ekonomickými důvody a použitím nových materiálů, které se používaly pro hydroizolační souvrství (např. PVC). Jednoplášťové střechy jsou nejčastěji navrhovány s parotěsnící vrstvou [8].

Setkáváme se i s jinými přístupy: Šilarová [9] vyžaduje použití parotěsnící vrstvy v zateplené jednoplášťové střeše s klasickým pořadím vrstev. Novotný & Misar [10] doporučují použití parotěsnící zábrany v jednoplášťové střeše a konečně Fajkoš [11] sleduje požadavky normy ČSN 731901:1999 a doporučuje použít parotěsnící zábranu pouze v případě, že relativní vlhkost v interiéru bude vyšší než 60%.

NUMERICKÁ ANALÝZA ŠÍŘENÍ VLHKOSTI V PLOCHÝCH JEDNOPLÁŠŤOVÝCH STŘECHÁCH

Numerický model

Künzelův numerický model [12] šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích byl vybrán pro následné simulace šíření vlhkosti v plochých jednoplášťových střechách. Model řeší současný transport tepla a vlhkosti. V transportu vlhkosti jsou zahrnuty: šíření vlhkosti v podobě vodní páry (difúze) i šíření kapalně vlhkosti v materiálech. Zmrzlá voda se uvažuje jako nepohyblivá fáze.

Vlastností materiálů

Základní materiálové charakteristiky jsou uvažovány jako proměnné v závislosti na množství vlhkosti, které se vyskytuje v materiálu. Např.

$$\lambda(w), \mu(\varphi), D_{ws}(w), D_{ww}(w) \quad (1)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)], μ je faktor difusního odporu [-], D_{ws} je součinitel kapilární nasákavosti materiálů [m^2/s], D_{ww} je součinitel kapilární nasákavosti materiálů redistribucí [m^2/s], w je množství vlhkosti v materiálu [kg/m^3] a φ je relativní vlhkost [-], ve které se materiál nachází.

Dále je ve výpočtech uvažováno s adsorpcí vlhkosti ze vzduchu. Nevýhodou Künzelova modelu je, že neuvažuje hysteresi materiálů a tedy akumulaci vlhkosti v závislosti na čase.

Vnitřní okrajové podmínky

Pro vnitřní okrajové podmínky byla použita pro teplotu i relativní vlhkost sinusoida takovým způsobem, že vnitřní teplota osciluje mezi 20°C (zima) a 22°C (léto), průměrná vnitřní teplota je tak 21°C. Relativní vlhkosti osciluje mezi 40% (zima) a 60% (léto), průměrná relativní vlhkost je 50%. Tyto vnitřní okrajové podmínky jsou doporučeny [13].

Vnější okrajové podmínky

Pro vnější okrajové podmínky byly použity hodinové naměřené hodnoty následujících veličin: teplota, relativní vlhkost, množství srážek, směr a síla větru, krátkovlnné a dlouhovlnné záření. Vzhledem k tomu, že nebyly pro simulaci k dispozici data z Československého území, byly vybrány klimatická data z následujících čtyř lokalit, viz *Tabulka 1*.

Tabulka 1. Zvolené lokality pro vnější okrajové podmínky

Místo	Nadmořská výška	Průměrná teplota	Min/Max teplota	Průměrná relativní vlhkost	Min/Max relativní vlhkost	Množství ročních srážek
	m.n.m	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm/a]
Vienna (A)	198	10,4	-10,9/32,4	73	24/99	625
Krakow (PI)	237	8,3	-20,1/31,0	78	22/100	661
Holzkirchen (D)	680	6,6	-20,1/32,1	81	24/98	1185
Hof (D)	567	6,1	-16,9/28,9	81	27/100	881

Posuzovaná skladba

Posuzována byla skladba jednoplášťové ploché střechy s klasickým pořadím vrstev nad masivní nosnou konstrukcí. Střešní skladba se dále dělí na několik variant podle materiálového složení jednotlivých vrstev, které jsou označeny velkým písmenem.

0) stabilizace střešního pláště

X - přitížení kamenivem (není uvažováno krátkovlnné a dlouhovlnné záření)

Y - lepením (je uvažováno krátkovlnné i dlouhovlnné záření)

1) hydroizolace

A - 1,2 mm, $\mu=15000[-]$, (odpovídá folii 1,2 mm PVC nebo 1,5 mm VAE)

B - 1,5 mm, $\mu=150000[-]$, (odpovídá folii 1,5mm FPO nebo asfaltový pás 4,5 mm)

2) tepelná izolace – EPS tl.240 mm, 30kg/m^3 , $\lambda_s = 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$, $\mu=50[-]$

Tloušťka tepelné izolace byla zvolena takovým způsobem, aby střecha vyhověla doporučenému požadavku normy ČSN 730540-2:2007 na součinitel prostupu tepla stavební konstrukcí.

3) parotěsnící zábrana

O - skladba je bez parotěsnící zábrany

P - 1 mm, $\mu=200000[-]$, (odpovídá folii 0,22mm LDPE)

4) nosná konstrukce – železobeton tl.150 mm, 2200kg/m^3 , $\lambda_s = 1,6 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$, $\mu=250[-]$

5) štuková omítka tl. 1,5 mm

Dále je u skladeb s parotěsnící vrstvou uvažováno i s možností, že do střešního pláště zatýká srážková voda (značeno jako varianta „%“). Zatékání je uvažováno jako procentní podíl z úhrnu srážek v dané lokalitě a jedná se o množství srážkové vody, které je schopno se ze střešního pláště vypařit, aby byly splněny následující požadavky.

Požadavky na střešní pláště z pohledu šíření vlhkosti

Byly zvoleny jiné požadavky na šíření vlhkosti ve střešním plášti než jsou současné požadavky uvedené v normě ČSN 730540-2:2007, neboť autor považuje následující požadavky za zcela dostatečné pro dlouhodobou životnost střešního pláště.

1) V celém střešním plášti nesmí docházet k akumulaci vlhkosti během několika ročních cyklů (pro numerickou simulaci byla zvolena doba pěti let).

2) V jakékoliv střešní vrstvě nesmí docházet k akumulaci vlhkosti během několika ročních cyklů (pro numerickou simulaci byla zvolena doba pěti let).

Poznámka: slovo vlhkost je potřeno, aby se nezaměňovalo se slovy „zkondenzovaná vlhkost“ nebo „kondenzace“. Slovem vlhkost se rozumí množství vlhkosti, které je ve střešní vrstvě v podobě vodní páry, kapaliny i ledu.

Výsledky numerické analýzy

Výsledky numerické analýzy jsou přehledně shrnuty v *Tabulce 2*. Jednotlivé výstupy budou v grafické podobě prezentovány při ústní přednášce.

Tabulka 2. Výsledky numerické analýzy

Skladba Lokalita	XAP	YAP	XBP	YBP	XAO	YAO	XBO	YBO	XAP %	YAP %	XBP %	YBP %
Vienna (A)	VYH	VYH	VYH	VYH	VYH	VYH	VYH	VYH	0,018	0,05	0,001	0,004
Krakow (PI)	VYH	VYH	VYH	VYH	VYH	VYH	NEV	VYH	0,012	0,04	0,001>	0,003
Holzkirchen (D)	VYH	VYH	NEV	VYH	VYH	VYH	NEV	VYH	0,006	0,02	-	0,001
Hof (D)	VYH	VYH	NEV	VYH	NEV	VYH	NEV	VYH	0,007	0,03	-	0,002

Legenda: XAP, YAP, atd. – označení jednotlivých variant střešních skladeb; XAP%, YAP%, atd. – schopnost střechy vypařit množství vlhkosti, které je stanoveno jako % podíl z množství spadlých srážek v dané lokalitě;

VYH – skladba vyhovuje zvoleným požadavkům, NEV – skladba nevyhovuje zvoleným požadavkům.

NÁVRH IDEÁLNÍHO STŘEŠNÍHO PLÁŠTĚ Z POHLEDU ŠÍŘENÍ VLHKOSTI

Z numerické analýzy šíření vlhkosti pro vybranou skladbu jednoplášťové střechy s klasickým pořadím vrstev vyplynuly následující velmi překvapivé závěry.

- 1) Při posuzování střešních skladeb vyhověly požadavkům stanoveným autorem i mnohé skladby bez parotěsnicí vrstvy.
- 2) Příklady výpočtů, ve kterých bylo uvažováno s dlouhovlnným a krátkovlnným zářením, mají přibližně třikrát větší potenciál pro vypaření vlhkosti ze střešního pláště, než případy, ve kterých dlouhovlnné a krátkovlnné záření nebylo uvažováno.
- 3) Střešní skladby s parotěsnicí vrstvou mají velmi malý vypařovací potenciál, neboť maximální množství vlhkosti, která se může ze střešního pláště vypařit, bylo vypočteno jako 0,018% z ročního úhrnu srážek (skladba XAP a lokalita Vienna). To znamená, že při ročním množství srážek 625mm/rok, dojde k vypaření 0,11mm vodního sloupce na 1m², což je 0,11 litrů vody na 1m², respektive pouze 0,11 kg vlhkosti na 1m²!

Výsledky numerické analýzy vedou k následujícím doporučením pro návrh ideální střešního pláště, který bude na masivní nosné konstrukci (těžká střecha). Autor příspěvku jednotlivé typy střešních pláštů seřadil od ideální až k nejhorší variantě střešního pláště.

1. Střešní plášť s obráceným pořadím vrstev - tento střešní plášť není zapotřebí posuzovat na šíření vlhkosti.
2. Střešní plášť duo – jedná se o střešní plášť, kdy část tepelné izolace je pod a část nad hydroizolační vrstvou. Množství tepelné izolace, která může být pod hydroizolační vrstvou, musí být posouzeno výpočtem.
3. Střešní plášť s klasickým pořadím vrstev bez vrstvy parotěsnicí - tento střešní plášť by měl být navržen tak, aby vrstva hydroizolační měla co nejmenší difusní odpor. To znamená, že jsou upřednostňovány jednovrstvé fóliové hydroizolace na bázi mPVC nebo VAE. Nevhodné hydroizolace jsou například hydroizolační souvrství složené z více asfaltových pásů nebo fólie na bázi FPO.
4. Střešní plášť s klasickým pořadím vrstev a s vrstvou parotěsnicí - tento střešní plášť by měl být navržen pouze tehdy, pokud není možno navrhnout předchozí střešní pláště. Pokud dojde k návržení střešního pláště s klasickým pořadím vrstev a s vrstvou parotěsnicí, měly by být dodrženy následující zásady. Hydroizolační vrstva by měla mít co nejmenší difúzní odpor (viz předchozí střešní plášť). Parotěsnicí vrstva musí být celistvá, umístěna co nejbližší k vnitřnímu prostředí, ne však pod monolitickými vrstvami, atd. viz [14]

Pro správnou funkci střešních pláštů označených body 2 až 4 je nezbytné, provést důkladné posouzení na šíření vlhkosti ve střešním plášti.

Výše vyjmenované pořadí střešních pláštů vyplývá z numerické analýzy, při které bylo použito pouze omezené množství materiálových variant pro jednotlivé střešní vrstvy. Například pro vrstvu tepelně izolační byly simulace provedeny jen s pěnovým polystyrenem. V případě použití tepelné izolace z minerálních vláken může být situace zcela jiná a je zapotřebí jednotlivé skladby znovu posoudit. Při numerické simulaci byl hodnocen pouze střešní plášť v ploše střechy a nebyly řešeny jednotlivé stavební detaily.

Současně, jednotlivé skladby střešních variant byly posuzovány podle požadavků, které si stanovil sám autor. Znamená to, že jednotlivé skladby nemusejí vyhovět současným normovým požadavkům na šíření vlhkosti ve střešních pláštích.

ZÁVĚR

Na závěr příspěvku je nezbytné říci, že neexistuje jedno obecné pravidlo jak navrhnu ideální střešní plášť. Každý střešní plášť je zapotřebí posoudit z hlediska šíření tepla a vlhkosti. Při výpočtu je nutné použít správné materiálové charakteristiky zabudovaných materiálů, danou střechu posoudit pro konkrétní lokalitu i vnitřní okrajové podmínky a použít kvalitní výpočetní model.

Text byl zpracován za podpory projektu VZ MSM 6840770001

LITERATURA

- [1] Rose, B.R. (1997). Moisture control in the Modern Building Envelope: history of the Vapor Barrier in the U.S., 1923-52. *APT Bulletin* 28(4), 13-19.
- [2] Fick, A. (1855). Über diffusion. *Annalen der Physik und Chemie* 94, 59-86.
- [3] Hutcheon, N.B. (1989). Forty Years of Vapour Barriers. In H.P.Trechsel & M.Bomberg (Eds), *Water Vapor Transmission Through Building Materials and Systems. Mechanisms and Measurement* (pp.5-7). Philadelphia: ASTM STP.
- [4] Glaser, H. (1959). Grapisches Verfahren zur Untersuchung von Diffusionsvorgängen. *Kaltetechnik*, 11, 345-355.
- [5] Tobiasson, W. (1994). General Considerations for Roofs. In H.R.Trechsel (Ed), *Moisture Control in Buildings* (pp.35-53). Philadelphia: ASTM.
- [6] Lstiburek, J.W. (2004). Understanding Vapor Barriers. *ASHRAE Journal* 46(August), 40-47.
- [7] Künzle, H.M. (1998). More Moisture Load Tolerance of Construction Assemblies through the Application of a Smart Vapor Retarder. In *Proceeding Thermal Envelopes VII* (pp.129-132). Clearwater Beach: ASHRAE.
- [8] Kutnar, Z. (2005). Vývoj skladeb plochých střech – interakce vad a poruch. In L. Hanzalová & Š.Šilarová (Eds), *Ploché střechy* (pp.284-305). Praha: Informační centrum CKAIT.
- [9] Šilarová, Š. (2005a). Střechy jednoplášťové. In L. Hanzalová & Š.Šilarová (Eds), *Ploché střechy* (pp.100-116). Praha: Informační centrum CKAIT.
- [10] Novotný, M. & Misar, I. (2003). *Ploché střechy*. Praha: Grada Publishing.
- [11] Fajkoš A. (1997). *Ploché střechy*. Brno: Akademické nakladatelství CERM. [in Czech]
- [12] Künzle, H.M. (1995). Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics.
- [13] WTA 6-2-01.(2004). *Simulation of heat and moisture transfer*, WTA Publications, Munchen, Germany, 16p.
- [14] Slanina, P. (2007). Návrh střechy z hlediska transportu vlhkosti. *Prezentace stavebních materiálů* (2), 79-81.