



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

ANALÝZA TEPLOTNÍ ODOLNOSTI IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ Z PĚNOVÝCH PLASTŮ VE SKLADBÁCH STŘECH

ANALYSIS OF THE THERMAL RESISTANCE OF INSULATION SYSTEMS FROM FOAMED
INSULANTS IN FLAT ROOFS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Rundt

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. NIKOL ŽIŽKOVÁ, Ph.D.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lukáš Rundt
Název	Analýza teplotní odolnosti izolačních systémů z pěnových plastů ve skladbách střech
Vedoucí práce	doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

SABER, H., H. et al. Long-term hygrothermal performance of white and black roofs in North American climates, *Building and Environment*, Vol. 50, 2012, p. 141–154.

MLEZIVA, J., ŠŇUPÁREK, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*, Brno 2000, ISBN 80-85920-72-7.

DUCHÁČEK, V. *Polymery – výroba, vlastnosti, zpracování, použití*, VŠCHT Praha, 2006, ISBN 80-7080-617-6.

AKBARI, B., BAGHERI, R. Deformation behavior and mechanical properties of polystyrene/organoclay/SEBS, *Mechanics of Materials*, Vol. 103, 2016, p. 11–17.

ETAG 006. Příslušné technické normy, články v odborných časopisech a sbornících, jiná odborná literatura.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem diplomové práce bude provedení analýzy teplotní odolnosti izolačních systémů z pěnových plastů. Práce bude řešena ve spolupráci s firmou STAVEBNINY DEK a.s. Ve stavební praxi se často setkáváme s problémem degradace tepelné izolace z pěnových plastů ve skladbách plochých střech v důsledku působení vyšších teplot (např. prohřívání systémů vlivem působení slunečního záření a jeho odrazu v místě velkých prosklených ploch atd.). V práci proveďte:

- 1.) Rešerši tuzemské a zahraniční literatury zaměřenou na problematiku tepelného namáhání izolačních systémů z pěnových plastů a jejich odolnosti vůči působení vyšších teplot.
- 2.) S ohledem na předpokládané teplotní odolnosti předmětných izolantů navrhnete metodiku pro stanovení teplotní stability izolačních systémů z pěnových plastů včetně optimalizace velikosti zkušebních těles.
- 3.) Proveďte experiment dle navržené metodiky včetně analýzy dosažených výsledků, které zpracujete formou tabulek a grafů.
- 4.) Na základě dosažených výsledků posuďte využitelnost a doporučte možnosti použití navržené metodiky ve stavební praxi.

Rozsah práce 60–80 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Na mnoha stavbách se vyskytnul problém degradace tepelné izolace na bázi expandovaného pěnového polystyrenu působením vysoké teploty v blízkosti prosklených ploch. V teoretické části této diplomové práce jsou popsány nejčastěji používané tepelně-izolační materiály, stručně pak povlakové hydroizolace a teplotní namáhání konstrukcí. Praktická část se zabývá návrhem metodiky pro posouzení teplotní odolnosti pěnových plastů ve skladbách plochých střech a experimenty podle této metodiky provedenými.

KLÍČOVÁ SLOVA

Teplotní odolnost, expandovaný pěnový polystyren, plochá střecha, sluneční záření, tepelné namáhání konstrukcí, tepelné izolace

ABSTRACT

On many structures there occurred a problem of expanded polystyrene-based thermal insulation material degradation caused by high temperatures close to glazed areas. In a theoretical part of this Master's Thesis there are the most common thermal insulation materials described, followed by a brief description of flat roof waterproofing materials and a thermal stress of structures. An experimental part describes a design of a methodology for evaluation of thermal resistance properties of foamed insulants in flat roofs and several experiments carried out according to the methodology.

KEYWORDS

Thermal resistance, expanded polystyrene, flat roof, solar radiation, thermal stress, thermal insulation materials

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Lukáš Rundt *Analýza teplotní odolnosti izolačních systémů z pěnových plastů ve skladbách střech*. Brno, 2018. 79 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 1. 2018

Bc. Lukáš Rundt
autor práce

Poděkování

Na prvním místě bych rád poděkoval doc. Ing. Nikol Žižkové, Ph.D. (nejen) za bezproblémovou komunikaci během celého procesu tvorby této diplomové práce. Stejně velký dík patří Ing. Antonínu Žákovi, Ph.D. za spoustu užitečných připomínek a rad během psaní. Poděkování patří také pracovníkům centra AdMaS, zejména Ing. Šárce Keprdové, Ph.D. za pomoc s laboratorní technikou a organizací práce. Děkuji také společnosti Stavebniny DEK za poskytnutí několika kubíků expandovaného polystyrenu a zapůjčení vozidel na transport vzorků. Děkuji svým rodičům a sestře za nepolevující podporu během celého mého studia. Děkuji svým přátelům a známým, protože relaxace je také důležitá aktivita.

Obsah

1	Úvod a cíle diplomové práce	9
1.1	Současný stav řešené problematiky	9
1.2	Cíle diplomové práce	11
2	Teoretická část	12
2.1	Skladba ploché střechy	12
2.2	Druhy tepelné izolace ve skladbách střech	14
2.2.1	Polystyren	14
2.2.1.1	Výroba polystyrenu	15
2.2.1.2	Retardéry hoření v EPS	16
2.2.1.3	Vlastnosti expandovaného polystyrenu	18
2.2.1.4	Chování polymerů při zahřívání	19
2.2.1.5	Trvanlivost a odolnost EPS	20
2.2.1.6	Odpady z pěnového polystyrenu	22
2.2.1.7	Rozdělení EPS	23
2.2.1.8	Extrudovaný polystyren a polystyren s přídavkem uhlíku	23
2.2.2	PUR a PIR	25
2.2.3	Mínérální a skelná vlna	27
2.2.4	Fenolická pěna	27
2.2.5	Pěnové sklo	28
2.2.6	Organické tepelné izolace	29
2.2.7	Ostatní tepelně-izolační materiály	29
2.3	Druhy hydroizolace ve skladbách plochých střech	30
2.3.1	Asfaltové pásy	30
2.3.2	Termoplastické a elastomerické hydroizolační fólie	32
2.3.3	Stěrky	33
2.4	Tepelné namáhání střech	33
3	Vývoj metodiky	36

3.1	Zkoušení rozměrové stability EPS při určených teplotních a vlhkostních podmínkách v klimatické komoře.....	36
3.1.1	Postup zkoušení	36
3.1.2	Výsledky a dílčí vyhodnocení.....	37
3.1.3	Vývoj poměrné deformace při různém průběhu teplotní křivky	42
3.2	Zkoušení rozměrové stability EPS při zahřívání na keramické topné desce ...	46
3.2.1	Měření hloubky propadu středu spodní stěny na topné desce	49
3.2.2	Zkoušení teplotní odolnosti EPS s povlakovou hydroizolací na keramické topné desce.....	51
3.2.3	Zkoušení rozměrové stability EPS při zahřívání infračervenou lampou ..	53
4	Návrh metodiky pro zkoušení teplotní odolnosti výrobků z EPS.....	55
4.1	Zkušební zařízení	55
4.2	Příprava zkušebních těles	55
4.3	Postup zkoušky a teplotně-vlhkostní podmínky	55
4.4	Vyjádření výsledků	57
5	Experimentální ověření teplotní odolnosti EPS podle navržené metodiky	58
5.1	Zkoušení teplotní odolnosti desek z EPS různého data výroby od stejného výrobce.....	58
5.2	Zkoušení teplotní odolnosti desek z EPS 100 různých výrobců	59
5.3	Zkoušení teplotní odolnosti desek z EPS 150	66
6	Diskuse dosažených výsledků	70
7	Závěr	73
8	Zdroje.....	74
9	Seznamy.....	77
9.1	Seznam obrázků	77
9.2	Seznam tabulek	78
9.3	Seznam grafů.....	78
9.4	Seznam zkratk	79

1 Úvod a cíle diplomové práce

V nedávné době došlo na řadě staveb k degradaci tepelné izolace na bázi expandovaného pěnového polystyrenu (dále jen EPS) v konstrukci ploché střechy vlivem zvýšeného teplotního namáhání. To je zapříčiněno působením přímého a odraženého slunečního záření. Nejcitlivější části střešního pláště jsou přitom ty, které jsou vzdálené cca 1 m od balkonových dveří, prosklených střešních atrií, liniových světlíků apod. Výsledkem je úbytek hmoty EPS způsobující propad povlakové hydroizolace, vznikání kaluží a estetické znehodnocení střechy.

1.1 Současný stav řešené problematiky

Problém degradace tepelné izolace na bázi EPS byl pozorován již na mnoha stavbách. Informoval o něm např. M. Voltner v článku [1], kde prezentoval několik případů:

- Řadový rodinný dům v Lázních Bohdaneč. Terasy jednotlivých rodinných domů orientovaných jihovýchodním směrem mají jednoplášťovou skladbu s klasickým pořadím vrstev, u jedné terasy byl však položen místo dlažby na podložkách travní koberec z umělé hmoty. Pod tímto kobercem byla separační textilie, EPS 200 a spádové klíny z pěnového polystyrenu. Povrch střechy se přibližně metr před výplněmi otvoru začal propadat, ukázalo se, že se tepelně-izolační vrstva zdeformovala (viz Obrázek 1.1). Spodní vrstva i vrstva z měkčeného PVC zůstaly beze změny.



Obrázek 1.1 - Poškozený EPS – Rodinný dům v Lázních Bohdaneč [1]

- Stejnou skladbu terasy měl objekt rodinného domu s orientací terasy jihozápadním směrem. Funkci nášlapné vrstvy plnil travníkový koberec. Před výplněmi otvorů došlo k degradaci EPS (Obrázek 1.2).



Obrázek 1.2 - Poškozený EPS – Rodinný dům [1]

- K degradaci polystyrenu nemusí docházet jen odrazem slunečního záření od oken a dveří, ale také třeba při skladování světlíků na střeše. Na střeše skladové haly v Moravských Budějovicích došlo k vytvoření prohlubně před čelní stěnou světlíků. Poškození EPS přesně odpovídalo tvaru světlíku, jak je vidět na Obrázku 1.3.



Obrázek 1.3 - Poškozený EPS – Hala v Moravských Budějovicích [1]

O poškození tepelné izolace prosklenými plochami v atriu (viz Obrázek 1.4) informovaly také publikace Izolační praxe 3 – Ploché střechy a pěnový polystyren [3] a prospekt ISOVER pro systémy plochých střech – Informace pro projektanty a realizační firmy [8].



Obrázek 1.4 - Poškozený EPS – Atrium [3]

Více detailněji popsanych příkladů je k nalezení v diplomové práci O. Židka [2], na kterou tato práce také volně navazuje.

1.2 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce bylo navrhnout metodiku zkoušení teplotní odolnosti tepelných izolací na bázi pěnových plastů používaných ve skladbách střech. Experimentálně bylo ověřováno chování expandovaného polystyrenu při vystavení teplotám kolem 100 °C. Byly studovány možné faktory zodpovědné za deformaci materiálu. V teoretické části jsou formou rešerše popsány skladby ploché střechy, její jednotlivé vrstvy, především tepelné izolace. Největší prostor je věnován polystyrenu.

Experimentální část diplomové práce je rozdělena na tři části:

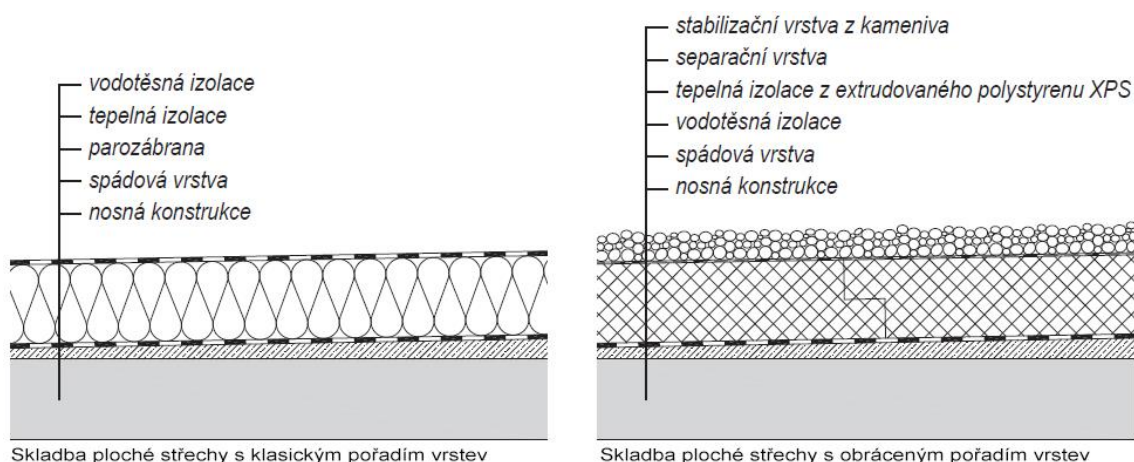
- V kapitole 3 jsou popsány kroky, které vedly k návrhu metodiky zkoušení teplotní odolnosti tepelné izolace na bázi expandovaného polystyrenu ve skladbách střech.
- Kapitulu 4 tvoří popis metodiky samotné.
- V kapitole 5 byl proveden experiment podle popsané metodiky. Byly zkoumány vlastnosti izolačních desek z expandovaného pěnového polystyrenu různých výrobců, EPS různé pevnosti v tlaku při 10% stlačení (EPS 100 a EPS 150) a tři šarže (různá data výroby) EPS od jednoho výrobce.

2 Teoretická část

Ploché střechy se na naše území dostávají z oblastí jižní Evropy s mírnějším klimatem na konci devatenáctého století. Důvodem byla rozvíjející se výstavba průmyslových objektů společně s nástupem nových materiálů – povlakové izolace z dehtových či asfaltových lepenek s nátěry, posléze natavitelné asfaltové pásy a hydroizolační fólie. K většímu rozšíření došlo v 60. letech 20. století, to bylo způsobeno hlavně možností zvýšené produktivity práce, zdánlivou jednoduchostí provádění a samotným vzhledem ploché střechy jako prvku tehdejší architektury.

2.1 Skladba ploché střechy

Podle normy ČSN 73 1901:2011 „Navrhování střech – Základní ustanovení“ jsou ploché střechy takové střechy, které mají sklon vnějšího povrchu menší než 5°. Dle technického provedení se dělí na jednoplášťové (nejpoužívanější), dvouplášťové (s větranou či nevětranou vzduchovou vrstvou), výjimečně tříplášťové. Rozeznáváme jednoplášťové střechy s klasickým pořadím vrstev nebo s obráceným pořadím vrstev (viz Obrázek 2.1). V případě tzv. obrácené střechy brání zatížení od sání větru stabilizační vrstva kameniva, případně dlažba nebo střešní zahrada. V případě provedení tepelné izolace pod hydroizolací i nad ní jde o tzv. DUO střechu.



Obrázek 2.1 - Skladba plochých střech [2]

Při rekonstrukci plochých střech se uplatňují jak DUO střechy (na stávající hydroizolační vrstvu se umístí tepelná izolace z extrudovaného polystyrenu), tak tzv. PLUS střechy, kdy se na stávající/novou hydroizolaci umístí nová tepelná izolace s novou povlakovou vodotěsnou izolací.

Dvouplášťová plochá střecha je střecha zajišťující všechny funkce dvěma střešními pláštěmi – horní s vodotěsnou izolací, spodní s tepelnou izolací, mezi nimiž je vzduchová vrstva.

Návrh ploché střechy je nutno řešit od počátku přípravy stavby a ovlivňují jej následující faktory:

- Druh nosné konstrukce – železobeton, trapézový plech, dřevěné bednění atd.
- Počet plášťů.
- Požadovaný sklon střechy a způsob jeho dosažení – v nosné konstrukci, spádovou vrstvou nebo samotnou tepelnou izolací.
- Způsob odvodnění – vnitřními toky, podokapními žlaby, zaatikovým/mezistřešním žlabem, úžlabím apod.
- Tepelně technické parametry vnitřního prostředí (požadovaná teplota a relativní vlhkost vzduchu), vnějšího vzduchu (v závislosti na umístění objektu), střešního pláště (součinitel prostupu tepla U_n).
- Volba povlakové vodotěsné izolace.
- Případně využití ploché střechy (terasa, střešní zahrada, parkoviště, ...).
- Požární bezpečnost.

V souladu s normou ČSN 73 1901:2011 a podle [3] se doporučují tyto zásady návrhu ploché střechy:

- Použít masivní nosnou konstrukci kvůli zajištění dostatečné teplotní akumulace a vzduchotěsnosti.
- Minimální sklon alespoň 2 %.
- Výběr vhodné parozábrany je nutno prověřit tepelně technickým výpočtem s ohledem na realizaci pokládky a způsob provedení střešního pláště.
- Při použití vnitřních vtoků by měla být jedna vnitřně odvodňovaná plocha střechy odvodněna minimálně dvěma vnitřními vtoky nebo jedním vtokem a bezpečnostním přepadem.

Většina střech realizovaných před rokem 2002 nevyhoví požadavkům podle tepelně technické normy ČSN 73 0540-2:2011, je třeba je proto doizolovat. Návrh rekonstrukce závisí na skutečném stavu a provedení jednotlivých vrstev střešního pláště, atiky, zateplení fasády objektu, možné změně využití jak objektu pod střechou, tak střechy

samotné. K možným závadám patří zavlhlá, až mokrá tepelná izolace, odseparované vrstvy hydroizolace, trhliny nebo kaluže v hydroizolaci nebo uchycená náletová zeleň.

2.2 Druhy tepelné izolace ve skladbách střech

U plochých střech s klasickým pořadím vrstev může tepelnou izolaci tvořit pěnový polystyren, jak expandovaný (EPS), tak extrudovaný (XPS), minerální vlna, pěnový polyuretan nebo například pěnové sklo. V minulosti jsme se mohli setkat také s lehčenými betony, heraklitem, někdy i korkem. V případě opačného pořadí vrstev střechy používáme jen XPS.

2.2.1 Polystyren

Polystyren byl objeven v roce 1839, ačkoli masivně se ho začíná využívat až v druhé polovině 20. století. Umožnila to nízká cena styrenu a snadná zpracovatelnost z něho vzniklých polymerů. Styren je bezbarvá, těkavá kapalina se sladkým zápachem. Vyskytuje se volně v přírodě v malém množství, při průmyslové výrobě pak může obsahovat aldehydy, které zápach mění na ostrý a nepříjemný. Styren působí negativně na nervový systém a je považován za možný lidský karcinogen, podle IARC označený stupněm 2B.

Chemickou reakcí z ropy získaného benzenu s etylenem a katalyzátorem vzniká ethylbenzen. Z něj dostaneme styren katalytickou dehydrogenací [5]. Monomerní styren polymeruje relativně snadno bez přítomnosti inhibitorů i za normální teploty (80% konverze dosáhne během 1 roku). Polymeraci urychlíme světlem, teplem a iniciátory. Před dopravou a skladováním je styren nutno stabilizovat inhibitory (např. 20 ppm 4-terc.butylpyrokatecholu). V případě technické polymerace je však vhodný pouze velmi čistý styren (minimálně 99,6%), inhibitory je tedy nutné odstranit [4].

Rozeznáváme několik druhů polystyrenu:

- Standardní – homopolymery styrenu, které jsou průzračné, lesklé a křehké.
- Zpěňovatelný– obsahují nadouvadlo, které umožní materiál vypěnit v různých formách.
- Houževnatý – jsou neprůhledné s menším leskem a sníženou křehkostí. Vyrábí se disperzací kaučuku v polystyrenu mechanickým směřováním, nebo roubováním styrenu na kaučuk.

- Kopolymery styrenu s akrylonitrilem/dalšími monomery – mají lepší odolnost vůči teplotě, rozpouštědlům či mechanickému namáhání.
- Polymery ABS – vyrábí se z akrylonitrilu, butadienu a styrenu.

2.2.1.1 Výroba polystyrenu

Styren polymeruje všemi mechanismy polymerace, v praxi se využívá radikálová reakce znázorněná na Obrázku 2.2 [6]. Výrobní technologií je nejčastěji bloková a suspenzní polymerace.



Obrázek 2.2 - Polymerace styrenu [6]

Při blokové polymeraci se využívá polymerace do neúplné konverze v horizontálních nebo vertikálních reaktorech s pístovým tokem materiálu, případně v reaktorech s promíchávaným obsahem speciální konstrukce. Styren ve směsi s 5-10 % ethylbenzenem je přes ohřívač veden do reaktoru, následná polymerace je iniciována termicky. Vzniklý viskózní roztok se zavede do filmové odparky a za sníženého tlaku destiluje zbylý nezreagovaný styren s ethylbenzenem. Roztavený polystyren je dále veden do granulačního zařízení. V evakuační zóně extrudéru se odstraní zbytky těkavých látek.

Při suspenzní polymeraci je důležitá volba stabilizátoru, který mimo jiné ovlivní také výslednou granulometrii perliček. Používají se např. fosforečnan vápenatý, polyvinylpyrollidon nebo polyvinylalkohol. Je nutno také dosáhnout nízkého obsahu zbytkového styrenu. Toho docílíme přidáním směsi peroxidů s různou charakteristikou rozpadu a účinností při stupňovém zvyšování polymerační teploty. Používají se kotlové reaktory o objemu 20-100 m³.

Pro výrobu zpěňovatelného polystyrenu je nutná přítomnost těkavých alifatických uhlovodíků (typicky pentan v množství 6-7 %), které jsou rozpustné jen v monomeru. Mají nízký bod varu a vzhledem k tomu, že polymerace se provádí za zvýšené teploty, musí se zvýšit tlak. Zpěňovatelný polystyren ve formě perliček se předpěňuje zahřátím

na teplotu přibližně 100 °C vodní párou, vroucí vodou nebo v termostatu. Těkavý uhlvodík vytvoří v perličkách dutinky, čímž se jejich objem zvýší 20 - 50krát. Většina uhlvodíku v průběhu několika dní na vzduchu z kuliček difunduje a nahradí se vzduchem. Předpěněné kuličky se následně plní do forem a za zvýšené teploty se pomocí vzniklého tlaku vytvarují do požadovaného tvaru za současného spojení jednotlivých částic [4]. Takto vzniká EPS.

Výroba a použití polystyrenu by nebyla možná bez dalších přísad jako jsou změkčovadla, barviva nebo retardéry hoření [7].

2.2.1.2 Retardéry hoření v EPS

Plastické látky jsou ze své chemické podstaty hořlavé, nicméně tuto negativní vlastnost je možno do jisté míry regulovat přísadami, které je možno podle jejich efektu v plastu dělit do 3 skupin:

- Aditivní retardéry – jako jiné přísady se přidávají do polymerů za účelem úpravy vlastností.
- Reaktivní retardéry – látky, které jsou součástí reakční směsi při polymeraci a zůstávají v makromolekulárním řetězci polymeru.
- Povrchové retardéry – směsi látek schopné vytvořit vrstvu na povrchu plastů.

Aby byl polystyren nehořlavý, musel by obsahovat kolem 10 % retardérů. Tím by se ale stal pro stavební účely nepoužitelný. V EPS je koncentrace retardéru kolem 0,7 % a materiál je díky tomu samozhášivý, takže dochází k ukončení hoření při odstranění plamene. Při přidavku synergických látek k retardérům na bázi bromovodíku může koncentrace klesnout i na 0,4 %.

Na zpomalení hoření se používají v případě polystyrenu sloučeniny na bázi bromu (bromchlórecyklohexan, tetrabrometylen, dibrompropylfosfát), případně pak fosfáty [7]. Jedním z nejpoužívanějších retardérů hoření je však HBCD, tedy hexabromcyklododekan. Je to bílý krystalický prášek s počáteční teplotou rozkladu 210 °C, má však persistentní, bioakumulační a toxické vlastnosti. Je nutno kontrolovat uvolňování emisí HBCD, v případě výroby EPS jde o vymývání během předpěňování, vypěňování a formátování. V případě energetického využití po skončení životnosti desek se musí zabránit úniku furanu a dioxinů. V článku [19] prokázali autoři uvolňování HBCD z drobných odpadních částic EPS do mořské vody v důsledku společného

působení UV světla, teploty a samotného omývání vodou, která dále rozrušuje povrch polystyrenu. Uvádí se však, že 90 % emisí HBCD pochází z textilu [18], protože HBCD je pevně vázán v polymerní matici EPS.

V současnosti už řada výrobců (například Isover [16], Bachl [17]) přešla z HBCD na retardér Polymeric FR (též PolyFR) – trojblokový kopolymer polystyrenu a polybutadienu, přičemž selektivně je bromován blok polybutadienu. Je stabilní a netoxický. Jde také o bílý prášek s čistotou 99,8 %, obsahem bromu 61-64 % a molekulovou hmotností 60-160 000 g/mol. Zbytkový obsah styrenu je pod 10 ppm, bromu pak pod 200 ppm. Teplota rozkladu je o 20 až 30 °C vyšší než u HBCD. Mechanické vlastnosti EPS se použitím retardéru nemění.

Podle Stockholmské úmluvy z roku 2013 je HBCD zakázáno používat od srpna 2017, výjimkou je použití ve stavebnictví, kde přechodné období trvá do roku 2019. Důvodem byla nedostatečná produkce retardéru PolyFR. Při zkoušení konvenčního indexu toxicity (CIT) pro hoření látek bylo zjištěno, že přírodní izolace a izolace na bázi kamenné vlny upravené organickými látkami vykazují horší výsledky než EPS. Taktéž se neprokázal negativní vliv retardéru hoření nebo grafitu v šedém EPS.

Obecně lze poznamenat, že správně provedený vnější kontaktní zateplovací systém (anglicky external thermal insulation composite system, česky VKZS, dále jen ETICS) je s ohledem na požár bezpečný. Příkladem může být výbuch a požár bytového domu ve Frenštátě pod Radhoštěm postaveného v roce 1973, dodatečně zatepleného v roce 2009. Na Obrázku 2.3 je vidět, že nedošlo k rozšíření požáru [15].



Obrázek 2.3 - Dům ve Frenštátě pod Radhoštěm po požáru [15]

2.2.1.3 Vlastnosti expandovaného polystyrenu

Jako u všech tepelně-izolačních materiálů, i u EPS je nejsledovanější vlastností součinitel tepelné vodivosti, který vyjadřuje schopnost materiálu vést teplo z teplejší části do chladnější. Ve stavebnictví se u běžně používaných EPS pohybuje mezi 0,034-0,039 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [37,38,39] a závisí mimo jiné na jeho objemové hmotnosti, vlhkosti a teplotě. Nejmenší tepelné vodivosti pak dosahuje při objemové hmotnosti v rozmezí 30-50 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a roste se stoupající teplotou a vlhkostí. EPS však nasákavý není, tedy i při poškození konstrukce a případném zatékání či kondenzaci se jeho izolační schopnost příliš nemění.

Pevnost v tlaku se měří při 2% (pružné) nebo 10% (trvalé) deformaci. EPS má hranici pružné deformace při 2-3% stlačení, po odlehčení se tedy ještě vrátí na původní rozměr. Pevnost v tlaku lineárně stoupá s objemovou hmotností. Mezi další sledované mechanické vlastnosti patří také pevnost v tahu a v tahu za ohybu, které také rostou s objemovou hmotností a jsou důležité pro manipulaci s deskami, jejich zpracování a použití ve fasádních zateplovacích systémech.

EPS má ve srovnání s dalšími tepelnými izolanty relativně vysokou hodnotu dynamické tuhosti, která závisí na jeho typu a tloušťce. Vyšší dynamická tuhost je výhodná, když je potřeba dosáhnout malé deformace při zatížení, ale snižuje útlum kročejového hluku nebo například vzduchovou neprůzvučnost u fasád.

Změnu rozměrů expandovaného polystyrenu způsobuje jednak dodatečné smrštění, jednak teplota. V prvním případě jde o smrštění vzniklé díky zbytkovému vnitřnímu pnutí po vypěnění a pohybuje se mezi 0,2 a 0,4 %. Nejrychleji probíhá na začátku, postupně se zpomaluje a závisí na technologických podmínkách výroby. Dochází k němu většinou ještě před řezáním desek v závodě. Změna rozměrů vlivem teploty je dána koeficientem teplotní roztažnosti EPS, který leží v intervalu $(5-7)\cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$. Význam má při kotvení velkých ploch, kdy kotvy musí přenést smyková zatížení vzniklá teplotní roztažností.

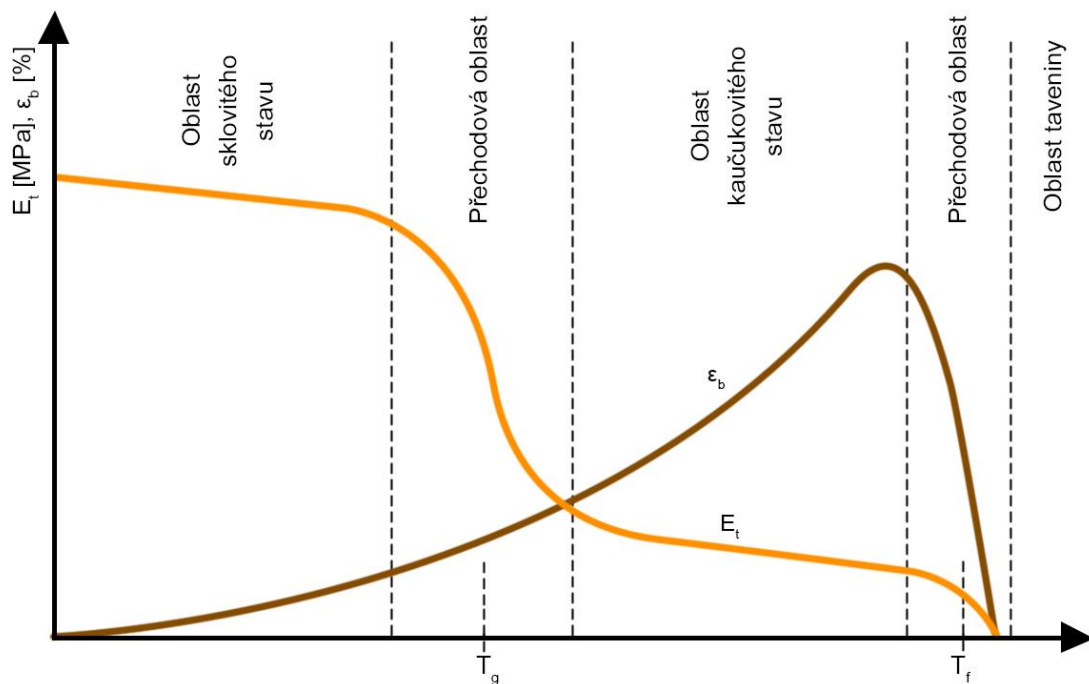
EPS je nerozpustný ve vodě. Nasákavost vlivem vody je nízká, k pohybu kapaliny může docházet jen mezi svařenými částicemi materiálu. Při ponoření do vody vyšší nasákavost vykazuje EPS s nižší objemovou hmotností – při ponoření ve vodě podle ČSN 64 35 10 po dobu 30 dní měl EPS o objemové hmotnosti 15 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nasákavost 5 %. Hodnota nasákavosti je významná zejména u typu Perimetr, tedy desek používaných v konstrukcích v přímém styku s vlhkostí, např. základových deskách.

Jiný případ nastává ve styku se vzdušnou vlhkostí, protože vodní pára může procházet stěnami buněk. Rychlost difúze vodních pár závisí na difuzní tloušťce, tedy na násobku tloušťky vrstvy izolace a faktoru difuzního odporu, který se u EPS pohybuje mezi 20-100 pro objemovou hmotnost $15-30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Je nutno zabránit vzniku rosného bodu v konstrukci, v opačném případě by mohlo docházet ke kondenzaci vodní páry i v buňkách EPS [11].

Elektrické vlastnosti jsou podobné jako u vzduchu, záleží tedy převážně na obsahu vzdušné vlhkosti. Samotný polystyren neobsahuje polárně účinné molekulové skupiny.

2.2.1.4 Chování polymerů při zahřívání

Kromě sesíťovaných polymerů (reaktoplastů, pryží), které jsou netavitelné, se polymerní látky v závislosti na teplotě mohou nacházet ve skupenství tuhém nebo kapalném. Plynný stav pro ně neexistuje, protože bod varu je díky velikosti makromolekul vyšší než teplota degradace polymeru. Díky velikosti molekul mají polymerní látky ve srovnání s nízkomolekulárními látkami také další vlastnost odlišnou: mezi tuhým (skelným) a kapalným skupenstvím (taveninou) existuje charakteristický přechodový stav, tzv. stav kaučukovitý. V určitém rozmezí teplot ke změně ze sklovitého stavu na kaučukovitý, případně z kaučukovitého stavu na stav taveniny, může docházet i náhle (skokově), toto rozmezí se pak označuje jako přechodová oblast.



Obrázek 2.4 - Závislost modulu pružnosti E_t a tažnosti ϵ_b amorfních termoplastů na teplotě [21]

U amorfních termoplastů, ke kterým patří i polystyren, pak rozeznáváme jako charakteristické přechodové teploty teplotu skelného přechodu T_g (též teplota zesklnění) a teplotu viskózního toku T_f . Obrázek 2.4 ukazuje závislost modulu pružnosti a tažnosti na teplotě. Můžeme vidět, že pod teplotou skelného přechodu je polymerní látka tvrdá, křehká a má vysoký modul pružnosti. V přechodné oblasti kolem teploty T_g modul pružnosti klesá a dochází ke kaučukovitému stavu, když poklesnou mezimolekulární síly a roste pohyblivost částí makromolekul, které konají rotační nebo kývavý pohyb.

Po překročení teploty viskózního toku ztrácí polymer kaučukovitě elasticke vlastnosti, makromolekuly se pohybují navzájem vůči sobě a látka se mění v taveninu. Z technologického hlediska má teplota T_f význam pro výrobu, protože můžeme látku vstříkovat, vytlačovat apod. Jako teoretická hranice použitelnosti amorfních termoplastů bez mechanického namáhání je většinou považována teplota T_g . Po překročení dochází k deformaci výrobku a ztrátě funkčnosti. Vzhledem k tématu této práce je více než vhodné uvést teplotu T_g polystyrenu, která se pohybuje mezi 95-100 °C [21, 22].

Teplota skelného přechodu je závislá na molekulární struktuře a na velikosti mezimolekulárních sil. Můžeme ji ovlivnit přidáním změkčovadel, tím snížíme síly mezi makromolekulami. Další možností je kopolymerace monomery, které zvýší pohyblivost makromolekul.

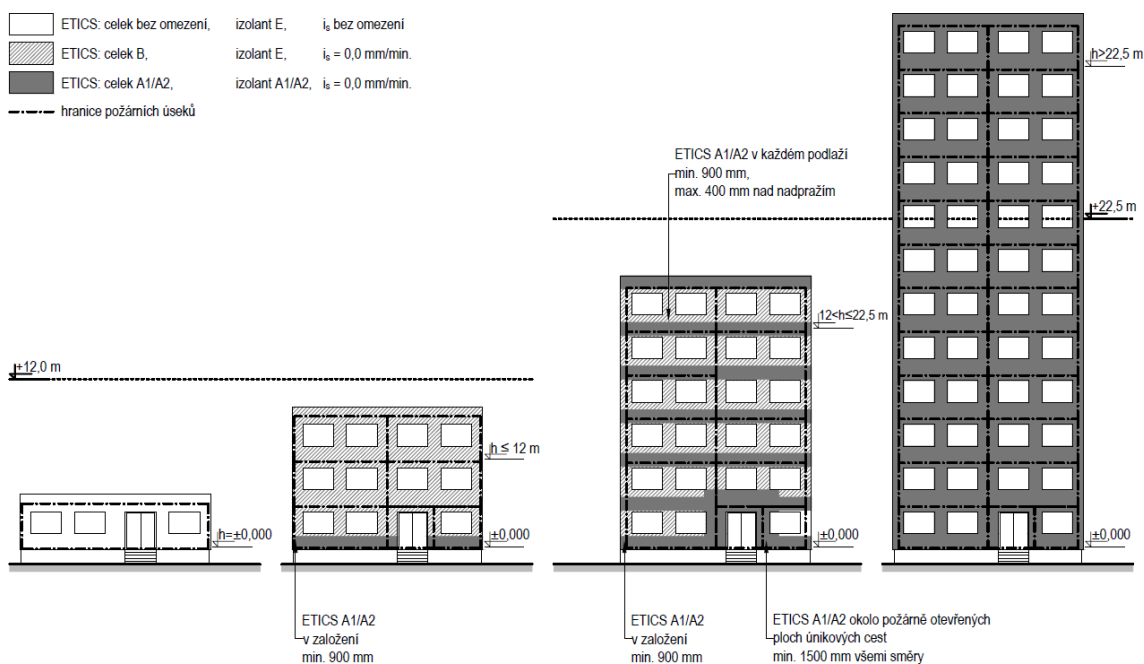
U sesítovaných amorfních polymerů tuhá síť chemických vazeb vylučuje přesun makromolekul, materiály nelze roztavit. Modul pružnosti zůstává víceméně konstantní až do teploty rozkladu. Semikrystalické termoplasty mění své vlastnosti v přechodové oblasti zesklnění v závislosti na obsahu amorfni fáze. Čím větší stupeň krystalinity polymer má, tím výraznější je změna až v oblasti teploty tání T_m . Při této teplotě se rozpadá krystalická struktura a polymer přechází do kapalného stavu.

2.2.1.5 Trvanlivost a odolnost EPS

Expandovaný polystyren se používá už více než půl století a za tuto dobu prokázal, že jeho vlastnosti za předpokladu správného zabudování nedegradují. EPS je však nutno chránit před klimatickými vlivy, křehne a žloutne totiž fotooxidací při vystavení přímému slunečnímu záření, například při nevhodném skladování. Může také dojít k mírnému narušení povrchu a z toho vyplývající horší přilnavosti lepidel.

EPS odolává působení alkoholů, minerálních olejů, zředěných anorganických kyselin, ale rozpouští se v aromatických uhlovodících, vyšších ketonech, tetrahydrofuranu atd. [7]. EPS nevdává přímý styk s živými materiály, ty ale nesmí obsahovat dehet. Dobře se snáší s běžnými stavebními pojivy na bázi silikátů (cement, vápno, sádra...).

Expandovaný polystyren má podle ČSN EN 13501-1 třídu reakce na oheň E (dříve stupeň hořlavosti), je tedy hořlavý. O retardérech hoření v EPS bylo pojednáno výše. Třída reakce na oheň EPS je pravděpodobně nejdůležitější v případě aplikace zateplovacího systému ETICS, kdy norma o požární bezpečnosti staveb ČSN 73 0810 specifikuje vlastnosti zateplovacích systémů v závislosti na požární výšce objektu. Pokud se ETICS aplikuje poprvé, rozeznáváme 4 výškové úrovně: jednopodlažní objekty, objekty s požární výškou do 12,0 m (včetně), objekty s požární výškou od 12,0 do 22,5 m (včetně) a objekty vyšší (viz Obrázek 2.5, na kterém jsou vidět požadavky na třídu reakce na oheň systému).



Obrázek 2.5 - Požární výšky objektů dle ČSN 73 0810 [14]

Stejně postupujeme, pokud starý systém ETICS již neplní svou funkci (má vady nebo tloušťka tepelné izolace není dostatečná) a je potřeba jej nahradit systémem novým. Pokud se aplikuje nová vrstva na vrstvu starou (stále funkční), mohou nastat tyto případy:

- Původní izolant je nehořlavý, aplikujeme nový izolant také nehořlavý (technologicky nejjednodušší varianta).

- Nová vrstva ETICS se aplikuje podle požární normy bez ohledu na původní izolant kromě detailů, kde se případný původní hořlavý izolant musí vyměnit za nehořlavý (požární pásy).

Norma ČSN 73 0810 také řeší soklovou oblast, požární pásy mezi jednotlivými podlažními, specifické detaily a jiné výrobky na fasádách (balkony, lodžie, stříšky) [14].

EPS neplesniví, netrouchniví, nehnije, mikroorganismy jej nenapadají. Může být ukládán společně s domácím odpadem, případně spalován. Je to hygienický materiál, z kterého se vyrábí zboží pro potravinářský průmysl [11].

2.2.1.6 Odpady z pěnového polystyrenu

Po polyvinylchloridu a polyethyleny je pěnový polystyren třetí nejpoužívanější plast v evropském stavebnictví a dle průzkumů bude jeho spotřeba v blízké budoucnosti ještě stoupat. Systémem ETICS s tepelnou izolací z EPS se v Evropě pokrylo více než dvě miliardy m². Polystyren má však také dlouhou životnost, proto je jeho obsah v celkovém množství současného stavebního odpadu malý (méně než 1 %). Do budoucna tedy bude potřeba zdokonalit možnosti recyklace, protože díky své malé objemové hmotnosti není vhodné EPS skládkovat (například v Německu je zakázáno skládkovat plastické látky).

Ve výrobě EPS vzniká odpad, který však není problém opětovně začlenit do procesu, z celkové výroby vzniká méně než 0,1 % znečištěných produktů. Ty se použijí ve spalovnách průmyslových odpadů. Do procesu vypěnění je možno použít až z 20 % odpad z předpěnění, vypěnění či řezání. Při aplikaci systému ETICS může vzniknout 4-7 % odpadu EPS, který lze znovu využít. Nejpracnější je však třídění materiálů.

Komplikace mohou nastat v budoucnu v případě starého, již nevyhovujícího EPS, který ještě obsahuje HBCD, tudíž se nebude moci skládkovat. To se netýká obalového EPS, který neobsahuje retardéry hoření. Odpadní EPS se dá zpracovat následujícími způsoby:











- Komprimace odpadů na vyšší objemovou hmotnost, drcení, granulace na extrudérech a následné uplatnění v procesu vstřikování.
- Využití drtě pro výrobu malt, lehčených cihel a betonu, drenážní zásypy, geoaplikace (při stavbě silnic, dálnic, základů budov v seismických oblastech).
- Energetické využití. Spalné teplo má EPS 40 MJ/kg, před spalováním se EPS komprimuje na objemovou hmotnost 700-800 kg·m⁻³ a drtí. Spalovací teplota je

840-900 °C a k rozkladu HBCD dojde podle měření z více než 99,999 % bez úniku nebezpečných zplodin jako furanů nebo dioxinů.

- Teoreticky je možná solvolýza – rozpouštění odpadního EPS se separací HBCD, ze kterého se dá získat brom využitelný na výrobu retardéru Polymeric FR. Na samostatném zařízení by se tak mohly vyrábět z rozpuštěného EPS nové výrobky s ekologicky přijatelným retardérem hoření [18].

2.2.1.7 Rozdělení EPS

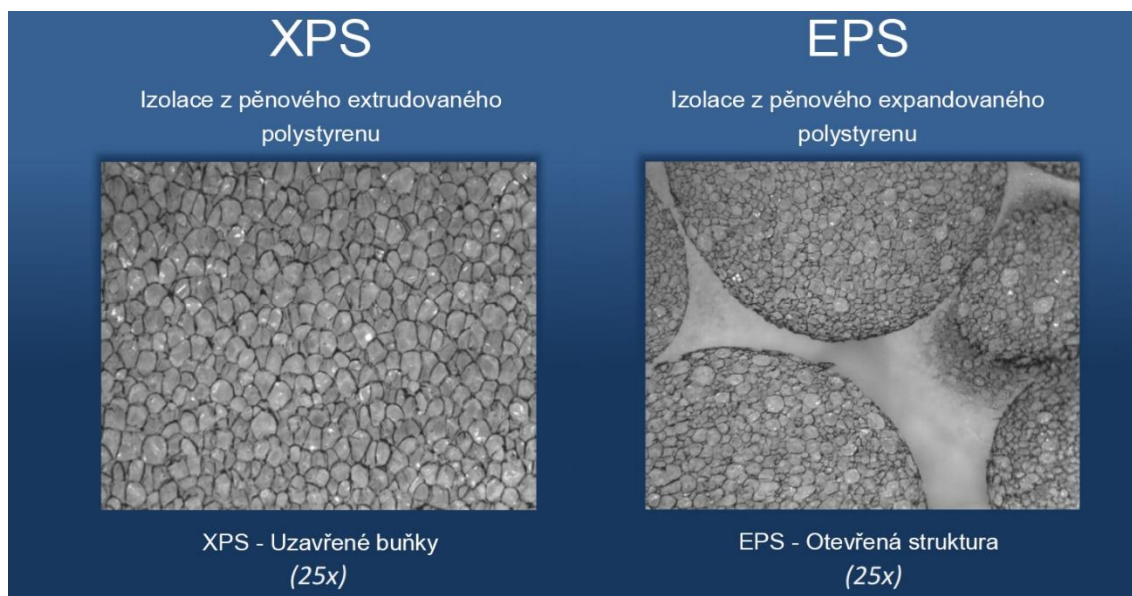
V roce 2015 přistoupili výrobci EPS ke změně značení izolačních desek z pěnového polystyrenu kvůli změně v normě ČSN EN 13 163 a také kvůli tomu, že díky modernějšímu způsobu výroby se upustilo od tzv. základních typů (Z), které neobsahovaly stabilizátory. Přehled značení je na Obrázku 2.6. Stejně značení se týká i šedých typů polystyrenu [20].

Původní značení	Nové značení	Barevný kód	Poznámka
EPS 50 Z	EPS S		pro aplikace bez zatížení (výpiňový materiál)
EPS 70 Z EPS 70 S	EPS 70		základní typy, které nahrazují původní Z a S typy
EPS 100 Z EPS 100 S	EPS 100		
EPS 150 Z EPS 150 S	EPS 150		
EPS 200 Z EPS 200 S	EPS 200		
EPS 70 F EPS 100 F	EPS 70 F EPS 100 F EPS EF	  	speciální typy pro ETICS; EF je nový elastifikovaný typ pro ETICS s lepšími akustickými vlastnostmi
EPS P	EPS P	neznačí se	speciální typ pro použití pod úrovní terénu s nižší nasákavostí
EPS T	EPS T	  	speciální podlahový typ pro tlumení kročejového hluku

Obrázek 2.6 - Značení izolačních desek z pěnového polystyrenu [20]

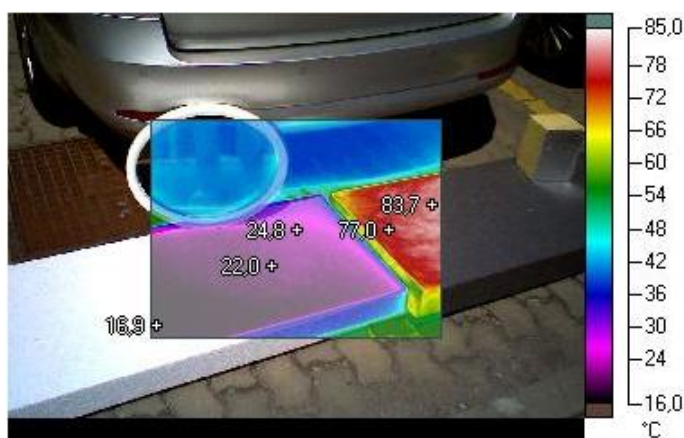
2.2.1.8 Extrudovaný polystyren a polystyren s přídavkem uhlíku

XPS má na rozdíl od EPS uzavřenou strukturu, což má za následek vyšší pevnost v tlaku a nulovou nasákavost. Rozdíl je patrný z Obrázku 2.7. Zatímco mezi kuličkami EPS, které působením vodní páry expandují a spojují se jen v určitých místech, můžou vznikat mezery pro pohyb vody, XPS má buňky spojené v celém objemu [10]. Vyrábí se vytažením s přídavkem nukleárních činidel (např. směsi kyseliny citronové s hydrogenuhličitanem sodným) a nadouvadla (většinou fluoruhlodíku), které se nastříkuje v určitém místě šneku vytlačovacího stroje [4].



Obrázek 2.7 - Srovnání struktury EPS a XPS [10]

Použijeme-li při výrobě expandovaného polystyrenu jako příměs grafit, získáme tzv. šedý EPS. Tento má oproti bílému EPS snížený součinitel tepelné vodivosti $0,032 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Mezi jeho nevýhody však patří zákaz skladování na přímém slunci nebo pod průhlednou fólií, vzhledem ke své barvě povrchu má totiž sníženou emisivitu, a tudíž pohlcuje více tepla. Rozdíl povrchové teploty bílého a šedého EPS je vidět na Obrázku 2.8. Důsledkem může být roztažení desek, které se po zabudování do nestíněné fasády smrští, jakmile na ně přestane svítit sluneční záření. Tím mezi deskami vzniknou mezíčky, které je pak nutno doplnit např. PUR pěnou. Desky taky mají díky rozdílné teplotě na vnějším a vnitřním povrchu tendenci se prohýbat. Další nevýhodou je zhoršená dlouhodobá teplotní odolnost, která se udává hodnotou $70 \text{ }^\circ\text{C}$ [9].

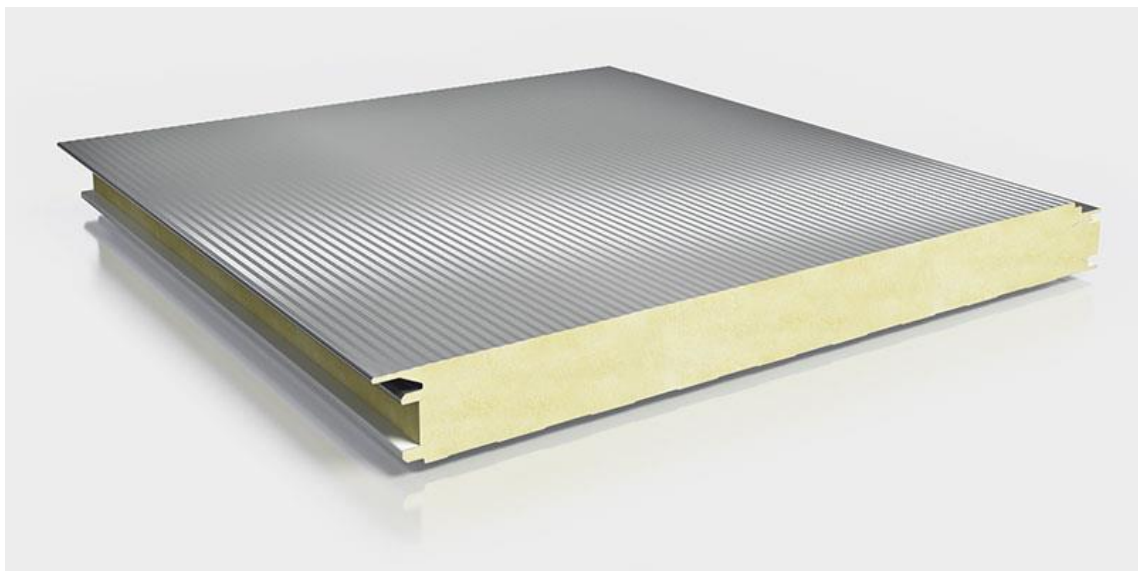


Obrázek 2.8 - Rozdíl teploty povrchu bílého a šedého EPS [9]

2.2.2 PUR a PIR

V posledních 20 letech dochází k rozšíření polyuretanových (PUR) a polyizokyanurátových (PIR) pěn jako tepelných izolací ve stavebnictví. Aplikují se většinou ve třech formách: jako stříkané pěny, izolační desky (např. pro dodatečné zateplení pláště budov) nebo sendvičové střešní/fasádní panely. Mají výborné mechanické a tepelně-izolační vlastnosti a také požární odolnost. Součinitel teplotní vodivosti se pohybuje v rozmezí $0,020-0,029 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [40,41,42]. Nevýhodou je vysoká cena ve srovnání s ostatními tepelnými izolanty.

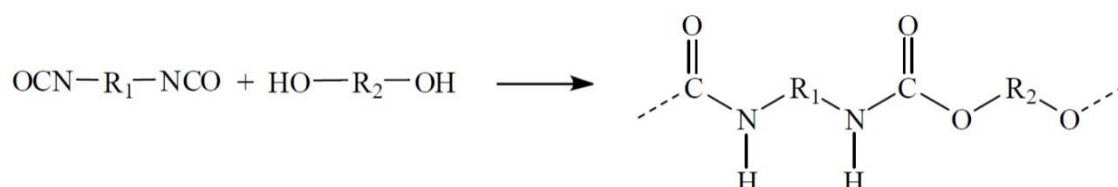
K rychlému rozvoji PUR pěn došlo díky použití sendvičových panelů, které jsou tvořeny obvykle dvěma ocelovými plechy a jádrem z izolační pěny, v celé ploše spojené s plechy, viz Obrázek 2.9. Plechy mohou být z jedné či obou stran profilovány pro zvýšení pevnosti a dekorativnosti, po stranách jsou panely opatřeny zámkem, které zrychlují montáž a brání vzniku netěsností. Tím se zabrání difúzi plynů do buněk pěny a působení vlhkosti, která může mít negativní vliv na trvanlivost pěny. Panely mají nízkou plošnou hmotnost, nezatěžují tedy nosnou konstrukci. Stříkané pěny mají nevýhodu ve své praktické nemožnosti recyklace, protože je není díky pevné vazbě s podkladem rentabilní oddělovat od demoličního odpadu.



Obrázek 2.9 - Sendvičový panel s jádrem z izolační pěny a s dvěma plechy se zámkem [37]

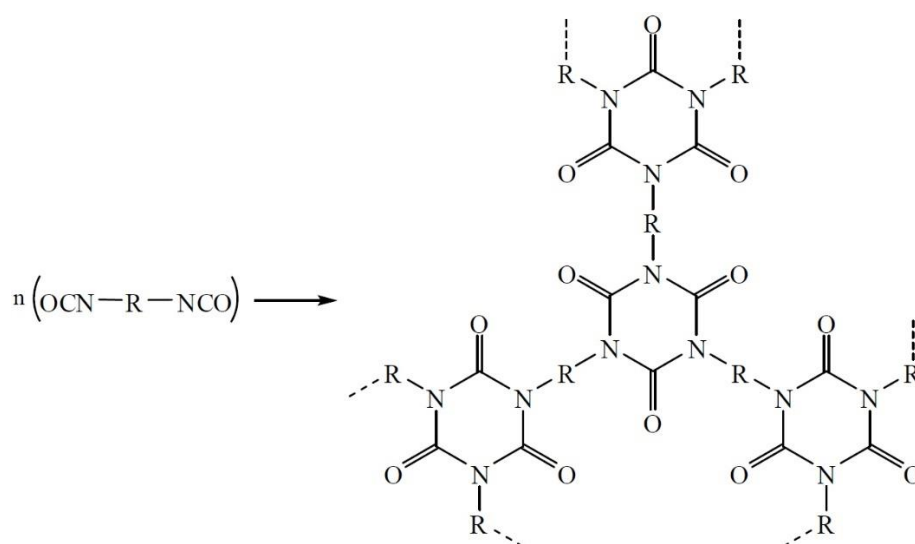
Polyuretany a polyizokyanuráty jsou polyadiční polymery. Reakcí vícefunkčních isokyanátů s dvěma a více funkčními alkoholy (v chemii polyuretanů tzv. polyoly) vznikají polyuretany. Na vlastnosti a chemolytickou odolnost takto vzniklého

polyuretanu má vliv struktura jak použitého isokyanátu, tak polyolů. Na Obrázku 2.10 je zobrazena rovnice vzniku polyuretanu. Isokyanáty mohou reagovat prakticky se všemi sloučeninami s odštěpitelným vodíkem, v polymerních systémech jde pak nejčastěji o reakce s vodou, aminy nebo karboxylovými kyselinami. Reakce alkoholů s izokyanátem by bez katalyzátorů probíhala velmi pomalu, užívá se přitom více mechanismů působení.



Obrázek 2.10 - Obecná rovnice výroby polyuretanu [12]

Jako polyisokyanuráty se označují reaktoplasty, které vzniknou polyadící vícefunkčních isokyanátů cyklotrimerizací za působení vhodného katalyzátoru. Vzniká hustě síťovaný polymer s vysokou teplotní a chemickou odolností. V čisté podobě mají však nevhodné mechanické vlastnosti. Na Obrázku 2.11 je znázorněn vznik polyisokyanurátu. V praxi se polyuretany a polyizokyanuráty kombinují nastavením katalytického systému a složením reakční směsi. Čistá PUR pěna má vysokou hořlavost, ale dobré mechanické vlastnosti a adhezi k povrchům. Naproti tomu PIR pěna odolává teplotnímu namáhání a působení ohně, má však malou pružnost.



Obrázek 2.11 – Obecná rovnice vzniku polyisokyanurátu [12]

Životnost PUR a PIR pěn může přesáhnout 50 let, pokud nejsou vystaveny vnějším vlivům jako je vlhkost, účinky slunečního UV záření či přílišné tepelné namáhání.

Tepelně-izolační vlastnosti se mohou zhoršovat absorpcí vlhkosti pěnou, v menší míře pak difúzí vypěňovacího činidla do prostředí. Tomu však brání hliníková fólie na izolačních deskách, která navíc eliminuje ztráty tepla radiací [12].

2.2.3 Minerální a skelná vlna

Minerální vlna je hojně používaný tepelně-izolační materiál, který vzniká tavením čediče, dolomitu, případně jiných anorganických látek, jako například vysokopecní struska nebo ocel. Z 2–4 % jsou ve výsledném produktu zastoupena pojiva, nejčastěji termosetické pryskyřice. Po tavení, které probíhá při 1500-1600 °C, následuje rozvláknění, většinou za pomoci rychle rotujících válců. Takto vzniklá vlákna padají na pás a pokračují do vytvrzovací pece. Nakonec se minerální vlna nařeže podélně a příčně, odřezky jsou recyklovány.

Součinitel tepelné vodivosti minerální vlny je 0,034-0,041 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, objemová hmotnost nepřekračuje $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Setkáváme se nejčastěji s třemi typy minerální vlny:

- Měkké rohože pro nezatížené stavební izolace.
- Tuhé desky pro systémy ETICS, provětrávané fasády, izolace šikmých střech atd.
- Desky s objemovou hmotností nad $100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ pro tepelnou izolaci podlah.

Výhodou proti pěnovému polystyrenu je nehořlavost vlny (třída reakce na oheň A1). Faktor difúzního odporu je 1-2, pevnost v tlaku při 10% deformaci 10-70 kPa, vlna má také poměrně dobré akustické vlastnosti, hygienickou nezávadnost, vodoodpudivost a dlouhou životnost. Odolává také hlodavcům a hmyzu.

Nejen svou výrobou je minerální vata velmi podobná vlna skelná, kde rozdílem jsou vstupní suroviny. Místo čediče se struskou se používá písek či skelné střepy. Teplota tavení je nižší, v rozmezí 1350-1450 °C. Tavenina je po rozvláknění mísená s pojivy a po pádu na pás vzniká nekonečný pás rohože bílé vaty. Po vytvrzení se vlna nařeže [13]. Skelná vata má do velké míry srovnatelné vlastnosti jako vata minerální, je schopná nicméně dosáhnout menšího součinitele tepelné vodivosti, až $0,032 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [23].

2.2.4 Fenolická pěna

Další z řady polymerních tepelně-izolačních materiálů je fenolická pěna, která se vyrábí napěněním fenolformaldehydových pryskyřic do bloků. Ty se následně řežou a z obou stran opatří skelným vláknem nebo reflexní hliníkovou fólií. Součinitel tepelné vodivosti

dosahuje výborných hodnot v rozmezí $0,020-0,022 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (ideální je při tloušťce desky 45-120 mm). Pro dosažení stejných tepelně-izolačních vlastností můžeme tedy použít tenčí vrstvu tepelného izolantu.

Objemová hmotnost se pohybuje kolem $35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, faktor difúzního odporu je 35, třída reakce na oheň C, v případě zabudování do ETICS pak má celý systém třídu B. Pevnost v tlaku při 10% deformaci převyšuje 100 kPa a dlouhodobá teplotní odolnost se pohybuje mezi -30 a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ [24].

2.2.5 Pěnové sklo

Část materiálu při recyklaci výrobků ze skla se nedá ve sklárnách opětovně využít, řešením je výroba pěnového skla. Ta totiž umožňuje použít i nejmenší skleněné střepy, sklo se tedy nemusí skládkovat. Pěnové sklo má nízkou objemovou hmotnost (v rozmezí $120-190 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), dobré tepelně-izolační vlastnosti (součinitel tepelné vodivosti v intervalu $0,036-0,060 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a nehořlavost (třída reakce na oheň A1). Oproti ostatním tepelným izolacím však pěnové sklo vyniká zejména dobrými mechanickými vlastnostmi (pevnost v tlaku $0,5-1,5 \text{ MPa}$) a difúzní nepropustností. Může se tedy využívat například ve střeších s velkým provozním zatížením nebo v konstrukcích oddělujících prostory s různou vlhkostí. Pěnové sklo má také dobrou chemickou a biologickou odolnost.



Obrázek 2.12 - Deska z pěnového skla [26]

Pro výrobu desek z pěnového skla (viz Obrázek 2.12) můžeme použít sklo různé kvality a původu (láhve nápojové, okenní tabule, ...). Materiál se naveze do zásobníku, ze kterého se sype na dopravní pás se síty, kde se zbaví nečistot (zbytky stavební suti, hlína) a větších střepů, které se využijí ve sklárnách. Sklo se dále drtí v kulovém mlýně na šedobílou moučku o velikosti zrna mezi 10 a $90 \text{ }\mu\text{m}$. Následuje přimíchání nadouvaděl (uhlíkový prach nebo glycerin) a rozprostření do ocelové formy, která posléze prochází tunelovou pecí při teplotě $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. V peci dochází k roztavení skleněného prášku

a k oxidaci částic uhlíku na oxid uhličitý, který způsobuje až dvacetinásobnou expanzi směsi.

Alternativou je výroba kameniva z pěnového skla, která probíhá v peci při teplotě 800 °C. Další rozdíl je v prudkém ochlazení při opuštění pece, kdy se deska samovolně rozpadne na kamenivo frakce 10 až 60 mm [25].

2.2.6 Organické tepelné izolace

Alternativními tepelnými izolacemi jsou materiály na přírodní bázi, jde o vlnu (např. ovčí), konopí, celulózu nebo kupříkladu slámu. Jejich výhodou je ekologická úspornost, v případě ovčí vlny jde zejména o sníženou energetickou náročnost, která je v porovnání s minerální izolací až o 85 % menší. Ovčí vlna je recyklovatelná, dá se i kompostovat. Vlákna z vlny se po stlačení vrací do své původní polohy, rouno z 90 % ovčí vlny a 10 % dvousložkového vlákna má součinitel tepelné vodivosti $0,042 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Vlna přispívá ke zdravému prostředí v interiéru, protože je schopna do určité míry zachytávat nečistoty ze vzduchu. Také je schopna absorbovat a uvolňovat vodní páru bez ztráty tepelně-izolačních vlastností, čímž přispívá k optimální úrovni vlhkosti v interiéru. Záporem může být vyšší cena a reakce na oheň E, ačkoli vlna je samozhášivá a dá se použít do teploty 170 °C [27].

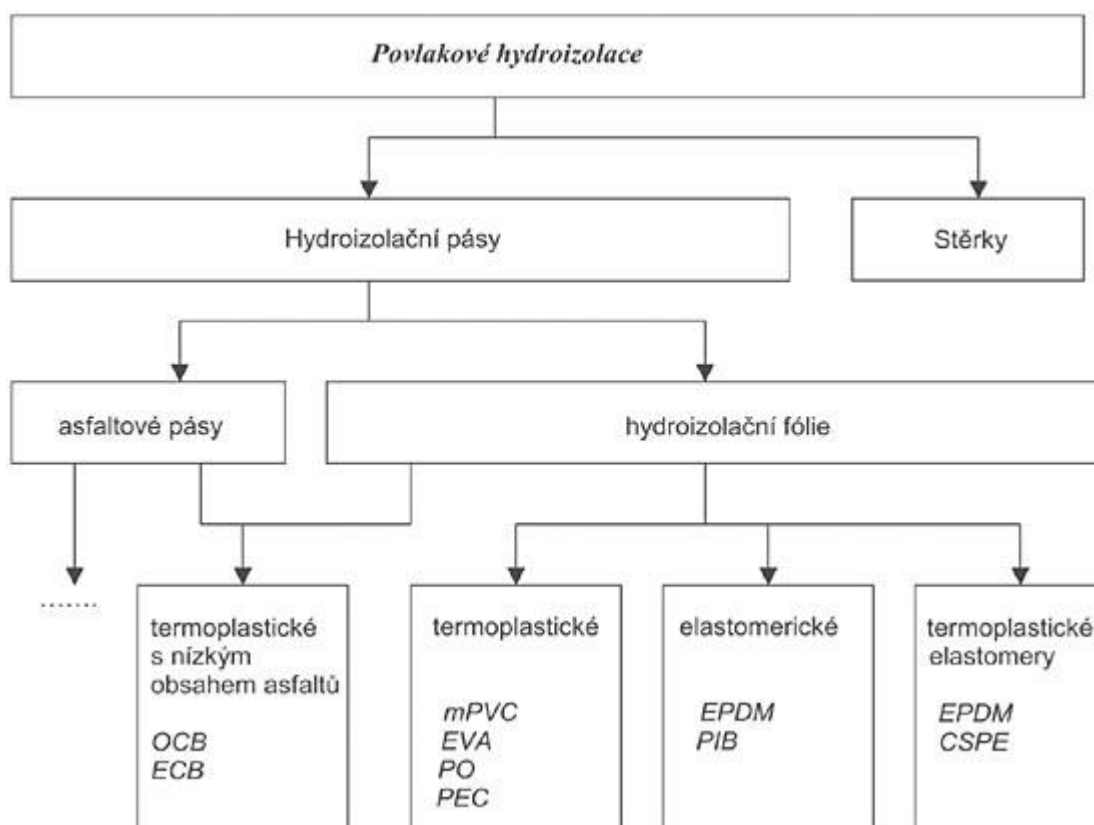
Konopí je poměrně nenáročná rostlina, která se bez větších problémů adaptuje na různé klimatické a půdní podmínky. Výrazně přispívá k redukci CO₂ z atmosféry, roste rychle a výrobky z konopí se vyznačují recyklovatelností, hygroskopicitou, dobrou paropropustností a relativně dobrou odolností i vůči plísním a houbám. Autoři [28] se zabývají vývojem kompozitních polotuhých desek na bázi ovčí vlny a konopí. Konopná vlákna zvyšují objemovou hmotnost desky (na přibližně $130 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) a díky své pevnosti v tahu také její tuhost. Ovčí vlna po přidavku sody uvolňuje část keratinu, který slouží jako přírodní pojivo. Výhodou je možnost použít méně kvalitní vlnu bez ztráty dobrých tepelně-izolačních a akustických vlastností.

2.2.7 Ostatní tepelně-izolační materiály

Kromě již zmíněných izolačních materiálů použitelných ve skladbách plochých střech se můžeme setkat s řadou dalších, jmenujme například vakuové, resp. aerogelové izolace, lehké a ultra lehké betony, dřevovláknité desky atd.

2.3 Druhy hydroizolace ve skladbách plochých střech

Ve střešním souvrství je hydroizolační vrstva nejdůležitější součástí, protože musí vytvořit ochranu proti srážkové a provozní vodě jak v kapalném, tak tuhém skupenství a klimatickým podmínkám – tedy dešti, sněhu, kroupám, náhlým teplotním změnám, ozónu, UV záření, větru. Na ploché střeše tak musí plnit funkci vodotěsného souvislého povlaku – tedy povlakové hydroizolace. Základní rozdělení povlakových hydroizolací je znázorněno na Obrázku 2.13.



Obrázek 2.13 - Rozdělení povlakových hydroizolací [29]

Hydroizolační pásy jsou vyrobeny v konstantní tloušťce, při instalaci jsou pouze rozvinuty, položeny a homogenně spojeny. V případě asfaltových pásů navařením, u termoplastických a elastomerických fólií svařováním horkým vzduchem, chemickými svařovacími prostředky, vulkanizací či samolepicími technologiemi. Oproti tomu stěrky jsou dodávány v tekutém stavu a na střechu se musí nanést, přičemž kvalita závisí na počasí a dalších faktorech, při kterých se aplikace provádí [29].

2.3.1 Asfaltové pásy

Díky různým možnostem použití existuje velké množství asfaltových pásů, které se liší tloušťkou, druhem asfaltu, jeho modifikací, typem a uložením nosné vložky

a povrchovými úpravami. Obvyklá skladba pásu se skládá z povrchové úpravy horní krycí vrstvy, krycí vrstvy horní a dolní, mezi kterými je nosná vložka, a dolní povrchové úpravy dolní krycí vrstvy.

Asfaltová krycí hmota je z asfaltu oxidovaného nebo modifikovaného příměsí. Oxidovaný asfalt se vyrábí destilací ropy nebo fluxací – změnou reologických vlastností reakcí se vzduchem při zvýšené teplotě. Jako modifikátory se používají termoplastické elastomery (např. SBS – styren-butadien-styren, APP – amorfní polypropylen) nebo plastomery. Jako plniva zastávající funkci zejména stabilizátorů, tedy zlepšující proces výroby, skladování a zpracovatelnost, využíváme obvykle jemnozrnné minerální materiály, např. břidlici, vápenec nebo popílek. Plniva však mají rozdílnou měrnou hmotnost, nestačí tedy kontrolovat jen plošnou hmotnost pásu pro zjištění poměru asfaltu a plniv.

Nosná vložka zajišťuje stabilitu, mechanickou pevnost, případně další funkční vlastnosti. Nachází se uvnitř nebo na povrchu pásu, obvykle se impregnují asfaltovou hmotou před nanesením krycí vrstvy a užívá se několika druhů:

- Typ P – polyesterové rouno, případně kombinované se skleněnými vlákny. Je vhodné pro vrchní vrstvy vystavené povětrnosti, má však menší rozměrovou stálost při náhlých teplotních změnách.
- Typ G – skleněná tkanina. Má vysokou pevnost, mechanickou odolnost, ale menší elasticitu než typ P.
- Typ V – skleněná rohož z netkaných vláken. Jsou náchylné na poškození ohybem.
- Typ Al – hliníková fólie, kombinovaná s další nosnou vložkou. Používají se pro snížení paropropustnosti plynů (radon, vodní pára). Tloušťka hliníkové fólie bývá kolem 0,09 μm .
- Speciální typy – tyto vložky mohou obsahovat speciální přísady jako retardéry hoření, případně se jimi dosahuje odolnosti proti prorůstání kořenů (v tomto případě se upravuje i asfaltová hmota).

Výroba asfaltových pásů začíná v přípravně asfaltových hmot předem stanovené kvality. Výrobní linka se pak skládá z:

- Odvíjecího zařízení, vyhřívacích válců a impregnační vany pro nosnou vložku.
- Povlakové vany pro nanesení krycí vrstvy asfaltové hmoty.

- Posypového zařízení a zařízení pro nanesení krycí ochranné fólie.
- Sekce chlazení pásu vodou nebo soustavou chladících válců.
- Případných dalších zařízení pro nanesení speciálních posypových nebo foliových úprav.
- Zásobníkové věže, svinovacího, balícího a paletovacího zařízení.

Asfalt je v případě správné aplikace odolný materiál, neexistuje žádná jeho chemická přeměna, je tedy velmi stabilní [30].

2.3.2 Termoplastické a elastomerické hydroizolační fólie

Hydroizolační fólie se objevují ve 20. letech 20. století s rozvojem organické chemie, můžeme je rozdělit na termoplastické, elastomerické, případně jejich kombinaci. Mají malou tloušťku (většinou do 2 mm), pokládají se v jedné vrstvě, nejsou omezeny sklonem střechy, mají dobrou tažnost, ohebnost a tvárnost i za nízkých teplot. Oproti asfaltovým pásům mají výhodu v nižším difúzním odporu. Některé typy polymerních fólií však vykazují nesnášenlivost s jinými stavebními látkami (např. pěnovými plasty), nedosahují takové životnosti a při aplikaci je nutno dbát na pečlivé provedení detailů.

Velmi rozšířené jsou termoplastické hydroizolační fólie, mezi které řadíme zejména materiály na bázi polyvinylchloridu PVC. Ten je sice odolný povětrnosti, ale také poměrně tvrdý a nepoddajný, musí se tedy měkčit. Existují dvě základní metody měkčení:

- Pomocí změkčovadel (měkčený polyvinylchlorid PVC-P).
- Kopolymerizace nebo legování PVC s etylen-vinyl-acetátem EVA/PVC či s chlorovaným polyetylenem CPE/PVC.

Mezi další termoplastické fólie řadíme ty na bázi polyolefinů (polyetylen PE, polypropylen PP), případně směsi polymerů s ropnými asfalty (etylen-kopolymer-bitumen ECB, olefin-kopolymer-bitumen OCB). Při aplikaci fólií se používají lišty, úhelníky, pásy a další konstrukční díly z poplastovaného plechu, například u zakončení atik, světlíků, okapů atd.

Plně elastické chování při protažení vykazují fólie elastomerní. Nejsou tepelně tvarovatelné, nedají se tedy svařovat horkým vzduchem, místo toho se spojují samolepicími okraji pásů. Řadíme zde materiály na bázi polyizobutylenu PIB a syntetických kaučuků, např. etylen-propylen-dien-monomer-kaučuku EPDM.

Výhody termoplastických a elastomerních fólií spojuje jejich kombinace, tedy fólie termoplasticko-elastomerní. Jedná se například o modifikovaný kaučuk EPDM nebo chlorsulfidový polyetylen CSPE. Pásky se dají svařovat horkým vzduchem, neobsahují migrující změkčovadla a snášejí dobře asfalt i pěnové plasty [29].

2.3.3 Stěrky

Největší slabinou povlakových hydroizolací je komplikované vytváření detailů (např. u komínů, propustí, zakončení u atik), kde je velký potenciál pro chybné provedení a z toho vyplývající netěsnosti, kudy může začít zatékat voda pod vrstvu hydroizolace. Tento problém řeší hydroizolační stěrkové hmoty, které se aplikují stříkáním nebo natíráním. Na trhu existuje řada systémů od různých výrobců.

Stěrky může tvořit polymercementová hmota, polyuretan či silikon. Nanáší se buď v jedné nebo ve dvou vrstvách. V případě dvou vrstev není materiál spodní vrstvy odolný UV záření, zatím co materiál tvořící horní vrstvu záření odolný je, není však stoprocentně vodotěsný. Vrstvu hydroizolační stěrky může doplňovat netkaná textilie či rohož ze skelných vláken.

2.4 Tepelné namáhání střech

Přenos tepelné energie ve stavebních konstrukcích probíhá kombinací tří základních způsobů:

- Vedení (kondukce) – přenos energie z jedné látky na druhou, která je s ní v kontaktu, bez znatelného přemístění částic tvořících tyto látky. Přenos tepla přitom závisí na skupenství látek. Částice pevných látek oscilují kolem svých rovnovážných poloh a ovlivňují částice okolní, přičemž přirozený tepelný tok směřuje z míst s vyšší teplotou do míst teplotou nižší. Částice kapaliny také oscilují, ale kromě toho také mění svou polohu. V plynech přenos tepla vedením probíhá vzájemnými srážkami částic.
- Proudění (konvekce) – přenos energie ve fluidu (kapalině nebo plynu). Probíhá díky mísení jedné části tekutiny s druhou částí rozdílné teploty. Může být přirozené (díky rozdílu hustot vyvolanému odlišnou teplotou) nebo nucené (vyvolané mechanickými prostředky).
- Sálání (radiace) – má-li hmota teplotu vyšší než absolutní nula, vyzařuje spojitě elektromagnetické záření, jehož množství je úměrné teplotě hmoty. Radiace

na rozdíl od vedení a proudění probíhá i ve vakuu [31]. Hmotu přitom zářivou energii může odrážet, pohlcovat nebo propouštět.

Vzhledem k tomu, že k degradaci tepelné izolace ve skladbě střechy dochází za příspěvku odraženého slunečního záření od blízkých prosklených ploch, důležitá vlastnost je součinitel sálání. Absolutně černé těleso má maximální sálavou schopnost, pohlcuje tedy všechnu zářivou energii, která dopadá na jeho povrch. Absolutně bílé těleso pak veškerou sálavou energii odrazí difuzně, dokonalé zrcadlo ji odrazí podle zákonů geometrické optiky a dokonale propustným tělesem energie projde. Reálným látkám se říká šedé, protože nejsou ani dokonale pohltivé, ani dokonale sálavou energii neodráží. Tuhé látky a kapaliny jsou pak prakticky nepropustné. Čím je povrch látky světlejší, tím má menší součinitel sálání, tudíž pohlcuje menší množství tepelné energie [32].

Mnozí autoři se zabývali úpravou střešního pláště a jeho pohltivostí slunečního záření za účelem snížení teploty v interiéru. To vede k energetickým úsporám v letním období a tím potenciálně i k redukci skleníkových plynů a zlepšení prostředí zejména ve velkých městech. Článek [33] přináší přehled studií, které zkoumaly úpravy střechy reflektivními materiály (např. nátěry) a tomu odpovídající ochlazení interiéru. Šlo o zmenšené modely střech (experimentální buňky), CFD simulace (computational fluid dynamics) a monitorované stavby.

Autoři [34] srovnali střechu s horní hydroizolační vrstvou z modifikovaného asfaltu ve světlé a tmavé variantě a upozornili na možné problémy s vlhkostí v zimním období v budovách v chladnějším klimatických podmínkách Severní Ameriky. Světlá střecha se totiž nemusí stihnout dostatečně prohřát a pod hydroizolací zůstane vlhkost, která negativně působí na ostatní vrstvy střešního pláště.

Kromě reflektivních materiálů je jedním z řešení, jak snížit energetickou (a tedy ekologickou) náročnost budov, znečištění ovzduší, riziko povodní díky zadržení dešťové vody a také efekt tzv. městských tepelných ostrovů, výstavba vegetačních systémů. Jde o stěny a střechy (příklad skladby viz Obrázek 2.14). Zelené střechy mohou snížit tepelné zisky budovy v létě až o 80 % a energetickou náročnost až o 15 % v závislosti na zeměpisné poloze a klimatických podmínkách. Nevýhodami jsou cena za výstavbu a údržbu, nicméně ve vyspělých zemích již existují nařízení na pokrytí určité části střechy vegetací, např. minimálně 20 % střešní plochy větší než 2000 m² v Kanadě nebo 20 %

střešní plochy větší než 200 m² v Japonsku [35]. Střešnímu pláští s vegetační vrstvou nehrozí problém degradace izolačních systémů teplotním namáháním.



Obrázek 2.14 - Příklad skladby vegetační střechy [35]

3 Vývoj metodiky

Podkapitola 3.1 se zabývá zkoumáním rozměrových změn expandovaného polystyrenu po vystavení různým teplotním a vlhkostním podmínkám v klimatické komoře. V podkapitole 3.2 byla klimatická komora vyměněna za keramickou topnou desku. Podkapitola 3.3 stručně informuje o možnostech použití infračervené lampy.

3.1 Zkoušení rozměrové stability EPS při určených teplotních a vlhkostních podmínkách v klimatické komoře

Postup zkoušení deformace EPS při působení zvýšené teploty byl inspirován normami ČSN EN 1604 – Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení rozměrové stability za určených teplotních a vlhkostních podmínek a ČSN EN 1605 – Tepelněizolační výrobky pro použití ve stavebnictví – Stanovení deformace při určeném zatížení tlakem a určených teplotních podmínkách. Postup byl upraven, protože maximální teplota při zkoušce je podle ČSN EN 1604 jen 70 °C.

3.1.1 Postup zkoušení

Tělesa EPS nařezaná topným drátem na rozměry 200×200×100 mm byla kondicionována v prostředí o teplotě (23±2) °C a relativní vlhkosti (50±5) %. Následně byla změřena, zvážena a umístěna na plech po dobu 24 hodin do klimatické komory, kde je možno regulovat vlhkost a teplotu. Při každém měření byla zkoušena 3 tělesa, která byla pro jistotu umístěna na plech pro případ, že by mělo dojít během zkoušky ke znehodnocení vzorků. Teplotní a vlhkostní podmínky ukazuje tabulka č. 3.1. Při teplotě 100 °C a vyšší nelze nastavit hodnotu relativní vlhkosti, do prostoru pece proto byla umístěna nádoba s vodou. Relativní vlhkost při teplotě 100 °C byla po 5 hodinách zkoušení 60 %, po 9 hodinách 90 %.

Různé relativní vlhkosti byly zkoušeny následovně: pro měření č. 1-3 byla relativní vlhkost nastavena na 90 %, pro měření č. 6-8 byla nastavena na 70 %. U měření č. 4, 5 a 9 vlhkost nešla nastavit, u měření č. 10 byla zvolena vlhkost nulová (vzorky byly umístěny do sušárny). Cílem bylo zjistit možný vliv vlhkosti na deformaci EPS.

Po 24 hodinách v komoře byla tělesa vytažena a ponechána po dobu více než 3 hodiny opět v prostředí o teplotě (23±2) °C a relativní vlhkosti (50±5) %. Poté byla tělesa změřena a zvážena. Vypočítaly se jednotlivé změny rozměrů podle vzorce:

$$\Delta\varepsilon_x = \frac{x_t - x_0}{x_0} \cdot 100$$

Kde: $\Delta\varepsilon_x$ – změna rozměru [%]

x_t – délka (l), výška (h) nebo šířka (b) po vystavení def. podmínkám [mm]

x_0 – délka (l), výška (h) nebo šířka (b) před vystavením def. podmínkám [mm]

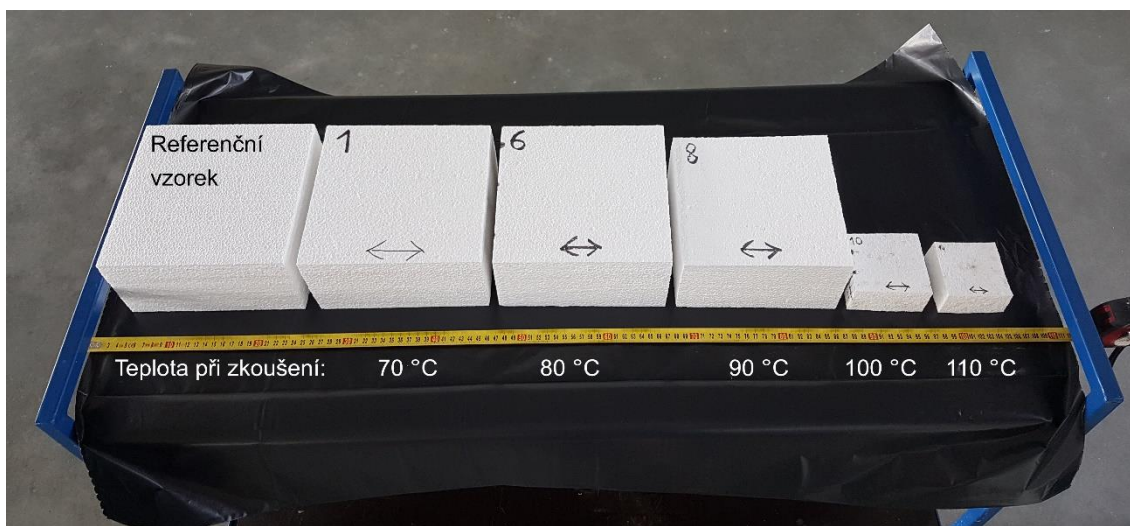
Byl použit pěnový polystyren Isover EPS 100 s deklarovaným součinitelem tepelné vodivosti $0,037 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a s pevností v tlaku při 10% deformaci vyšší než 100 kPa.

Tabulka 3.1 - Přehled prostředí v klimatické komoře

Měření	Teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]	Poznámka
1	70	90	
2	80	90	
3	90	90	
4	100	60-90	Relativní vlhkost neregulována.
5	110	60-90	Relativní vlhkost neregulována.
6	80	70	
7	90	70	
8	95	70	
9	100	60-90	Relativní vlhkost neregulována.
10	100	0	Vzorky umístěny v sušárně.
11	100	60-90	Vzorky umístěny na rošt (bez plechů).

3.1.2 Výsledky a dílčí vyhodnocení

Na obrázku č. 3.1 jsou vidět vzorky po zkoušce z měření 1 až 5. Levý vzorek je referenční. Se stoupající teplotou se vzorky smršťovaly, v tabulce č. 3.2 je přehled poměrných deformací $\Delta\varepsilon$ a změn hmotností Δm při jednotlivých teplotách.



Obrázek 3.1 - Vzorky po zkoušce

Výraznou změnu rozměrů lze pozorovat při vystavení vzorků teplotě 95 °C a více. U vzorků vystavených teplotě vyšší než 90 °C bylo pozorováno mírné zkroucení stěn, střed horní stěny se propadnul. Zvednuté rohy vzorku jsou vidět na obrázku 3.2. Hmotnost vzorků před a po zkoušení se lišila minimálně, největší rozdíl byl u vzorku 15 zkoušeného při teplotě 110 °C, kdy úbytek hmotnosti byl 0,52 g (0,7 %). Jeden vzorek z měření 5 (při teplotě 110 °C) byl podélně rozříznut pilkou na ocel — vzhledem ke zvýšené hutnosti vzorku, kdy objemová hmotnost vzrostla z 18 kg·m⁻³ na 368 kg·m⁻³. Účelem bylo zjistit možné deformace uvnitř struktury, ale vzorek byl v celé rovině řezu homogenní.

Tabulka 3.2 Přehled poměrných deformací a změn hmotnosti po vystavení určeným podmínkám

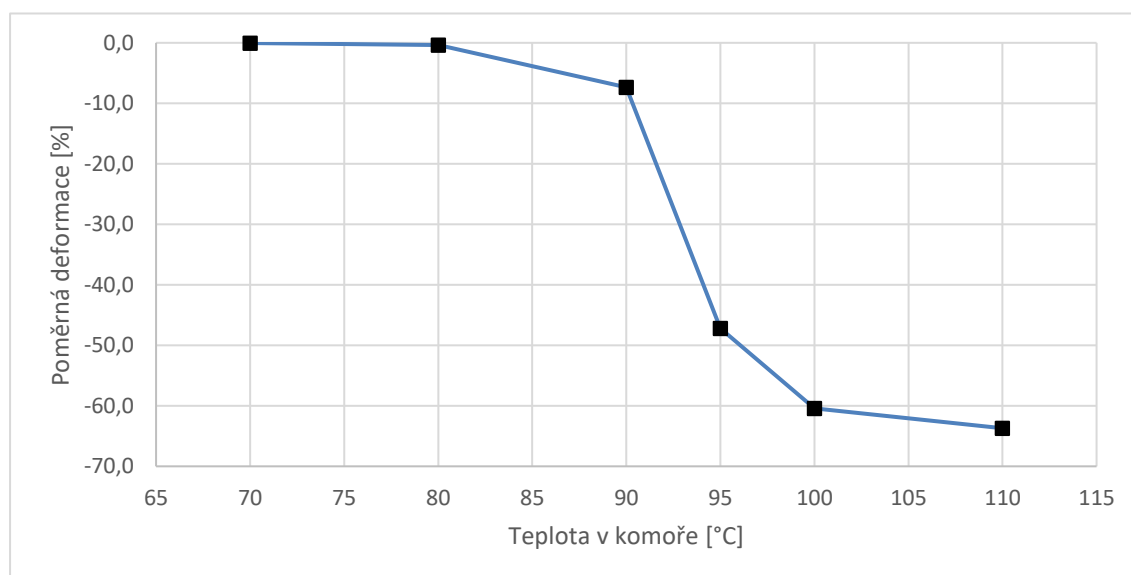
Číslo měření	Teplota v komoře [°C]	Rel. vlhkost [%]	$\Delta\varepsilon_l$ [%]	$\Delta\varepsilon_b$ [%]	$\Delta\varepsilon_h$ [%]	Δm [%]
1	70	90	0,0	-0,1	0,0	-0,28
2	80	90	-0,4	-0,4	-0,3	-0,28
3	90	90	-7,4	-7,5	-7,1	-0,44
4	100	60-90	-59,9	-60,4	-61,0	-0,28
5	110	60-90	-63,9	-62,6	-64,6	-0,63
6	80	70	-0,4	-0,3	-0,4	-0,19
7	90	70	-6,3	-6,5	-6,6	-0,21
8	95	70	-47,0	-47,1	-47,4	-0,39
9	100	60-90	-62,7	-62,3	-62,8	-0,32
10	100	0	-58,7	-58,5	-58,5	-0,26

Byl zkoušen vliv relativní vlhkosti v klimatické komoře, hodnoty se měnily mezi 90 % (měření 1–5), 70 % (měření 6–9) a 0 % (měření 10). Při teplotě zkoušení 90 °C a při relativní vlhkosti 90 % se vzorky smrštily průměrně o 7,3 %, při relativní vlhkosti 70 % pak průměrně o 6,5 %. Zvýšila-li se teplota zkoušení na 100 °C, došlo k deformaci



Obrázek 3.2 - Vzorek vystavený teplotě 110 °C

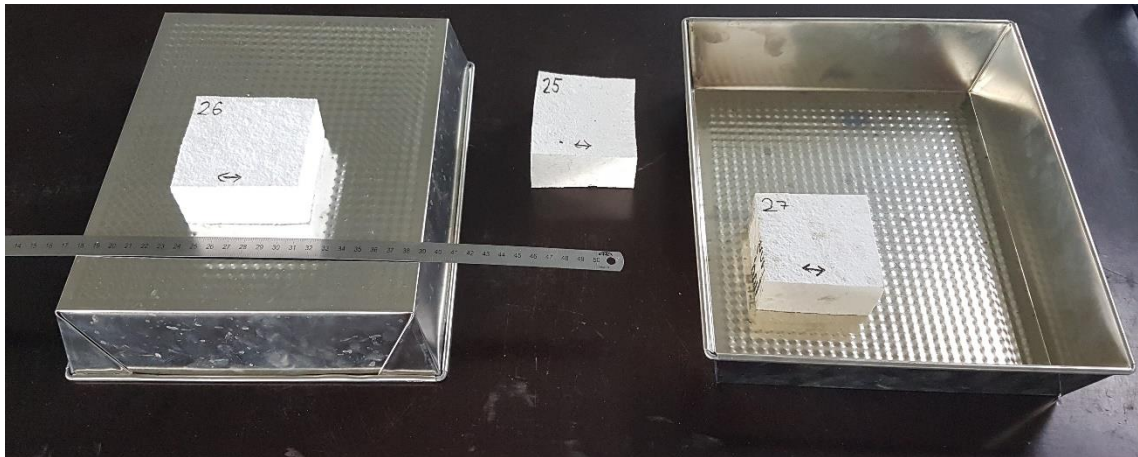
vzorků o 60,4 %, při relativní vlhkosti, která se měnila v rozmezí 60-90 %. Při nulové relativní vlhkosti v prostředí sušárny došlo k deformaci vzorků o 58,6 %. Rozdíl v deformacích je pravděpodobně způsoben spíše faktem, že vzorky po vystavení prostředí v klimatické komoře už nejsou pravidelné kvádry, ale mají mírně zkroucené stěny (viz např. Obrázek 3.2 nebo Obrázek 3.4). Při měření rozměrů tedy vzniká chyba. Výrazný vliv relativní vlhkosti nebyl pozorován v rámci provedených testů.



Graf 3.1 - Závislost poměrné deformace EPS na teplotě při relativní vlhkosti v rozmezí 60-90 %

Na Grafu 3.1 je znázorněna závislost smrštění EPS na teplotě. Je vidět, že k výrazné deformaci za 24 hodin dochází při teplotě vyšší než 90 °C. Při teplotě 95 °C je smrštění polystyrenu přibližně poloviční.

Při měření číslo 9 byl zkoumán vliv umístění vzorku, jeden vzorek byl umístěn v plechové nádobě, jeden vzorek na plechové nádobě a jeden vzorek na roštu komory (viz Obrázek 3.3). Výsledné deformace shrnuje Tabulka 3.3. Výrazný vliv umístění nebyl pozorován vzhledem k tomu, že rozdíl 1 % v poměrné deformaci mezi jednotlivými vzorky se vyskytoval i u ostatních vzorků. V Tabulce 3.3 je vidět srovnání například se vzorky zahříványými na 100 °C v prostředí sušárny, kde rozdíl v deformaci mezi vzorkem 28 a vzorkem 29 je 2,5 %.



Obrázek 3.3 - Zkouška různého umístění vzorků při zahřívání na 100 °C

U vzorku č. 25 je na Obrázku 3.3 možno pozorovat nepravidelné smrštění, kdy je levá stěna větší než pravá a celé těleso je lehce pokroucené. Možným vysvětlením je cirkulace vzduchu v komoře nebo se může jednat o jev vyplývající ze struktury EPS, případně vliv z výroby desky, pokud byl vzorek vyříznut z kraje desky.

Byla provedena další měření při teplotách v komoře 95 a 100 °C, kdy bylo pod vzorek EPS umístěno kovové pravítko tak, aby bylo možno přibližně zaznamenat změny rozměrů v čase. Každých 10 minut byla odečtena délka vzorku s přesností na 1 mm.

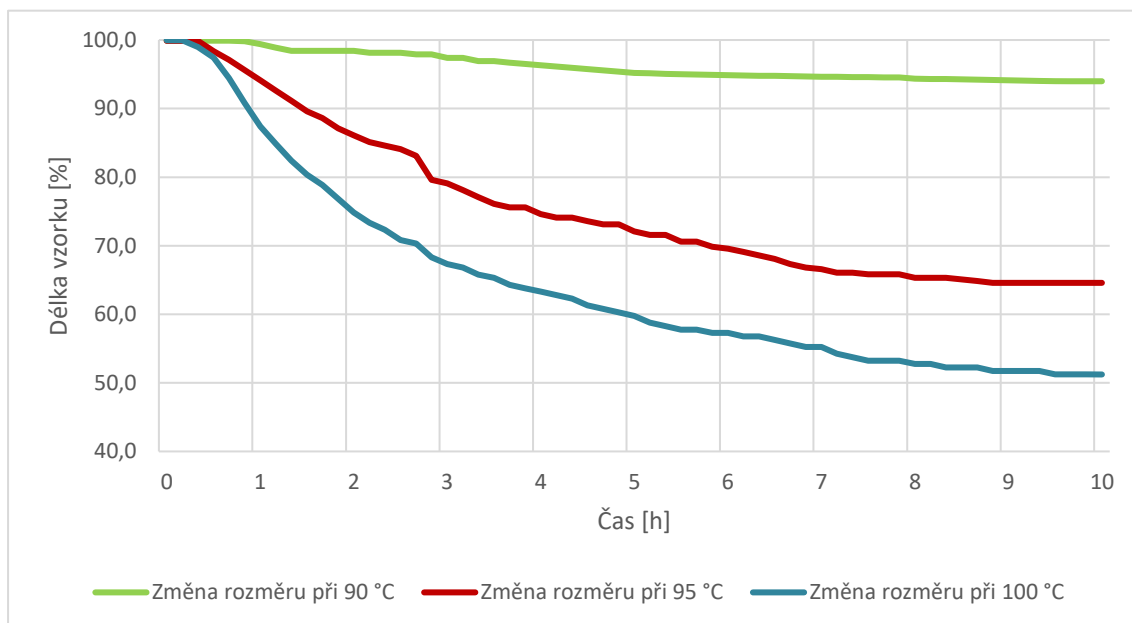
Tabulka 3.3 - Výsledky zkoušky různého umístění vzorků

Číslo vzorku	Teplota v komoře	Rel. vlhkost v komoře	Umístění vzorku	Výsledná poměrná deformace [%]
25	100 °C	60-90 %	Klima komora – na roštu	-61,64
26	100 °C	60-90 %	Klima komora – na plechové nádobě	-62,66
27	100 °C	60-90 %	Klimatická komora – v plechové nádobě	-63,56
28	100 °C	0 %	Sušárna – na roštu	-59,70
29	100 °C	0 %	Sušárna – na roštu	-57,23
30	100 °C	0 %	Sušárna – na roštu	-58,74

Rychlost deformace EPS při teplotě 90, 95 a 100 °C je srovnána v Grafu č. 3.2. Z grafů je patrné, že smrštění těles se s časem zpomaluje s tím, jak roste jejich objemová hmotnost. Měření deformace v čase je zkomplikováno tím, že vzorek se při zahřívání nepravidelně kroučí, jak je vidět na Obrázku 3.4. S postupem času měření se stávají vzorky rovnoměrnějšími.



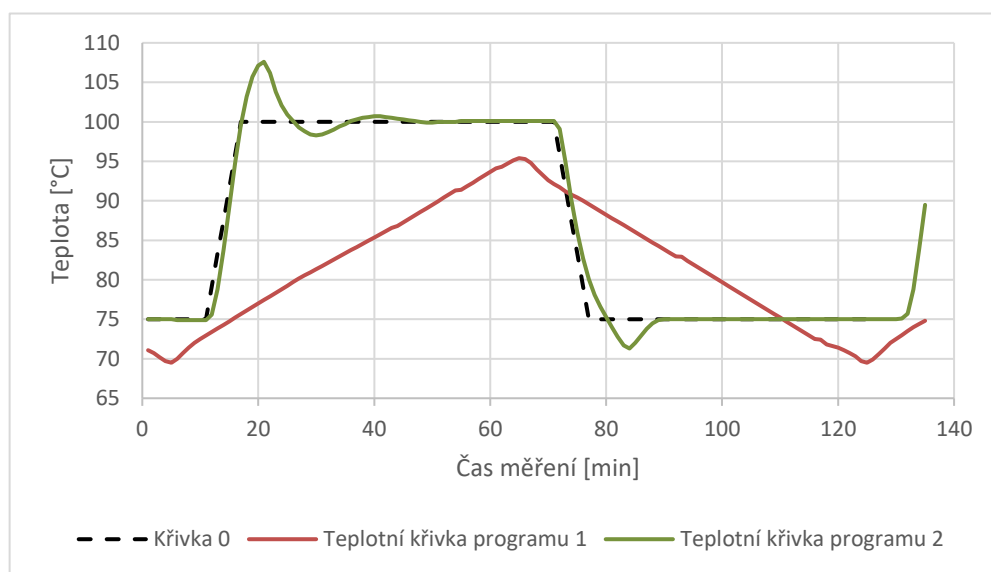
Obrázek 3.4 - Nepravidelné zkroucení vzorku při zahřívání



Graf 3.2 - Poměrná deformace v čase

3.1.3 Vývoj poměrné deformace při různém průběhu teplotní křivky

Při dalším měření bylo úkolem zjistit, jestli se vzorek deformuje v klimatické komoře při cyklické změně teploty stejně jako při konstantním zatěžování po dobu 24 h. Byly nastaveny následující programy, jak ukazuje Graf 3.3. Křivka 0 ukazuje zamýšlený průběh programu, zatím co teplotní křivky programu 1 a 2 ukazují záznam dat získaný z historie klimatické komory.



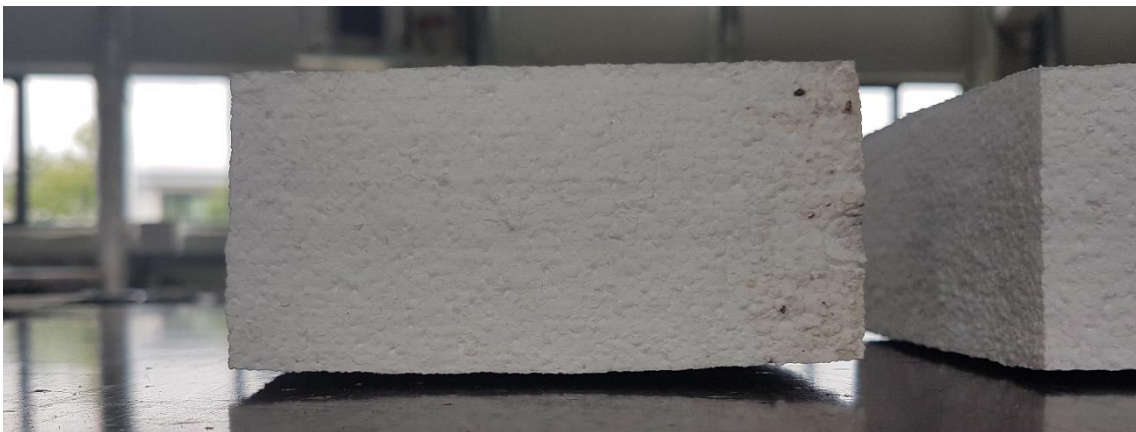
Graf 3.3 - Teplotní křivky programu 1 a 2

Jak je vidět v grafu, program č. 1 byl nastaven špatně, protože nedocházelo k izotermické výdrži ani při teplotě 70 °C, ani při 95 °C. U programu č. 2 byla už chyba napravena, ale vzhledem k faktu, že teplotní skok ze 75 °C na 100 °C probíhal v co nejkratším možném čase, docházelo ke krátkému zvýšení teploty na více než 105 °C. To ovlivnilo výsledek zkoušky. Podobně docházelo ke krátkému snížení teploty pod 73 °C.

Z grafu je nicméně možné odečíst, po jak dlouhou dobu celkově byly vzorky vystaveny určité teplotě a porovnat jejich celkové deformace se vzorky, jejichž poměrná deformace byla měřena v čase při konstantní teplotě v komoře. Vzorky z programu č. 1 byly sice vystaveny teplotě vyšší nebo rovné 90 °C po dobu 2 h 21 minut, ale konečná průměrná poměrná deformace byla pouze -2,5 %. Při vystavení EPS teplotě 90 °C po 24 h byla deformace -7,3 %, pro dosažení stejné hodnoty by tedy byla potřeba přibližně třikrát více zatěžovacích cyklů.

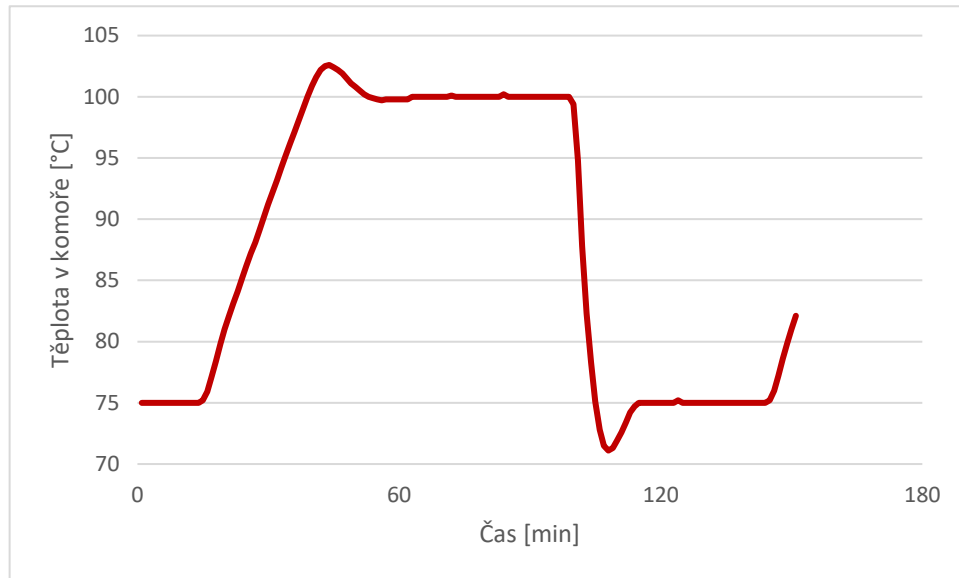
Konečná poměrná deformace vzorků z programu č. 2 byla -44,5 %. Vzorky byly vystaveny po dobu 4 h 51 min teplotě 100 °C, resp. 6 h 26 min teplotě rovné nebo vyšší 98 °C. Cyklů bylo provedeno 6. Měření však mohly ovlivnit rychlé teplotní skoky, které byly eliminovány v programu 3.

Na Obrázku 3.5 je vzorek zatížený programem 2, u kterého lze pozorovat vystoupilý střed dolní stěny, který by se srovnal, pokud by těleso postoupilo více zatěžovacích cyklů.



Obrázek 3.5 - Vzorek po ukončení programu 2

V programu 3 byl teplotní nárůst na 100 °C zpomalen a tím se také snížil maximální teplota v klimatické komoře. Stále však docházelo k překročení potřebné teploty 100 °C o přibližně 3 °C. Znovu byl zpomalen teplotní nárůst i pokles, jak lze vidět na teplotní křivce programu 4 na Grafu č. 3.5. Izotermická výdrž na teplotě 100 °C byla vždy nastavena na 1 h, cyklů bylo pokaždé 8.

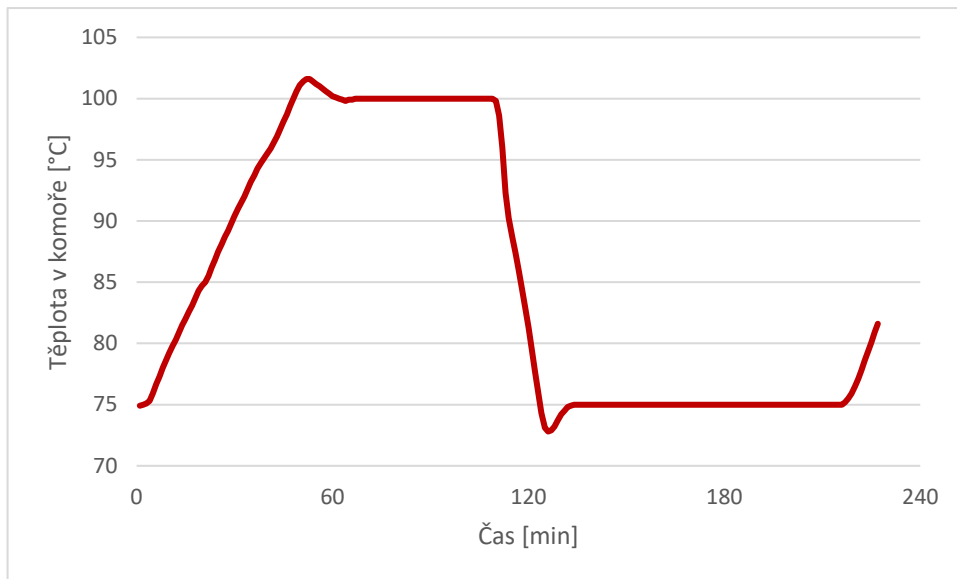


Graf 3.4 - Teplotní křivka programu 3

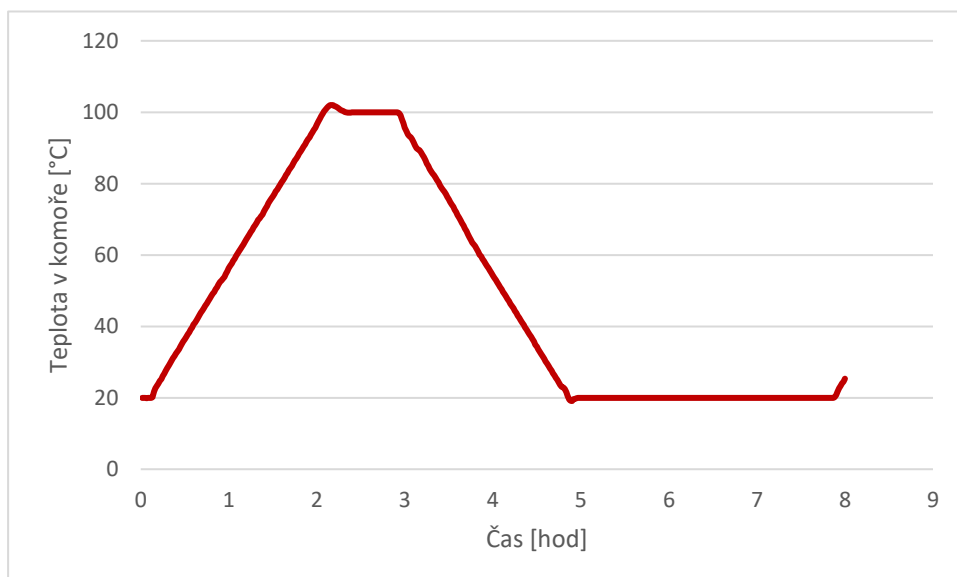
Nakonec byl zkoušen program 5: teplotní nárůst na 100 °C trval 2 h, izotermická prodleva na teplotě 100 °C byla 1 h, pokles na 20 °C proběhnul za 2 h a po dobu 3 hodiny byla v komoře teplota 20 °C viz Graf č. 3.6. Zkouška 8 cyklů trvala 48 hodin.

Přehled poměrných deformací při cyklování a bez něj je v Tabulce č. 3.4. Jako program 0 jsou označeny vzorky umístěné v klimatické komoře po dobu 24 hodin při konstantní teplotě 100 °C. Poměrné deformace jsou porovnávány po 8 cyklech programu 1-5 a po 8 hodinách při konstantní teplotě 100 °C. Vzorky po vystavení konstantní teplotě 100 °C měly konečnou poměrnou deformaci -47,76 %. Vzorky v programu 3 dosáhly konečné deformace -52,22 %. Deformace byla větší, možným vysvětlením je fakt, že teplota v klimatické komoře byla po krátkou dobu vyšší než v případě vzorků vystavených po celý čas měření konstantní teplotě 100 °C. Z grafu historie teploty a vlhkosti v komoře bylo odečteno, že vzorky byly vystaveny teplotě vyšší než 102 °C po dobu 46 minut. Dalším vysvětlením je samotná cyklická změna teploty, která může způsobit větší deformaci materiálu svým dynamickým účinkem.

Celkové smrštění vzorků programu 4 bylo -53,64 %, u programu 5 pak -51,56 %. Konečná deformace při programech 3-5 je srovnatelná vzhledem k chybě měření, přičemž je vždy větší než u vzorků vystavených konstantní teplotě bez cyklování. Teplotní skok z 20 °C na 100 °C v 1 cyklu v programu 5 simuluje možný denní průběh teploty ve skladbě střechy v letním období. Bylo ověřeno, že k degradaci EPS dochází i po pravidelně se opakujících cyklech vysoké teploty.



Graf 3.5 - Teplotní křivka programu 4



Graf 3.6 - Teplotní křivka programu 5

Tabulka 3.4 - Přehled poměrných deformací a změn hmotností při cyklování a bez něj

Číslo programu	Změna délky [%]	Změna šířky [%]	Změna výšky [%]	Průměrná deformace [%]	Změna hmotnosti [%]
0	-47,75	-	-	-47,75	-
1	-2,44	-2,28	-2,79	-2,50	-0,22
2	-44,30	-44,03	-45,36	-44,56	-0,13
3	-52,36	-52,95	-52,35	-52,22	-0,19
4	-53,65	-53,29	-53,98	-53,64	-0,17
5	-51,90	-51,12	-51,67	-51,56	-0,79

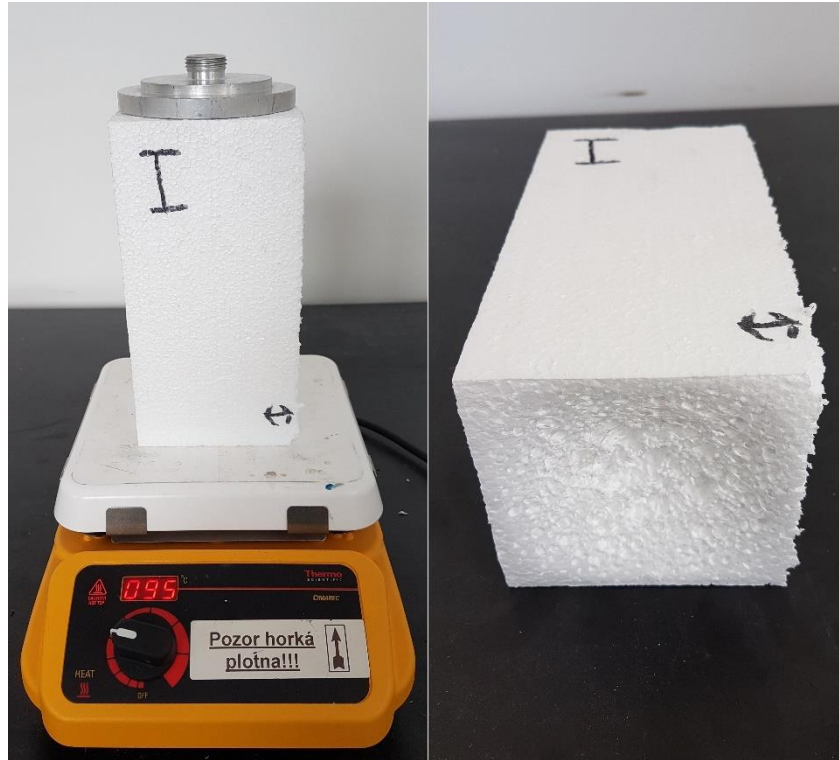
3.2 Zkoušení rozměrové stability EPS při zahřívání na keramické topné desce

Důvodem zkoušení deformace EPS na keramické topné desce byla snaha dosáhnout reálnějších podmínek než v klimatické komoře, protože ve střešní skladbě dochází k zahřívání tepelné izolace převážně z jedné strany. V komoře docházelo k namáhání ze všech stran vzorku rovnoměrně. Fotografie topné desky od firmy Cimarec je na Obrázku 3.6. Maximální teplota povrchu je 540 °C, teplota jde nastavit po 5 °C a maximální závaží je 11,3 kg.

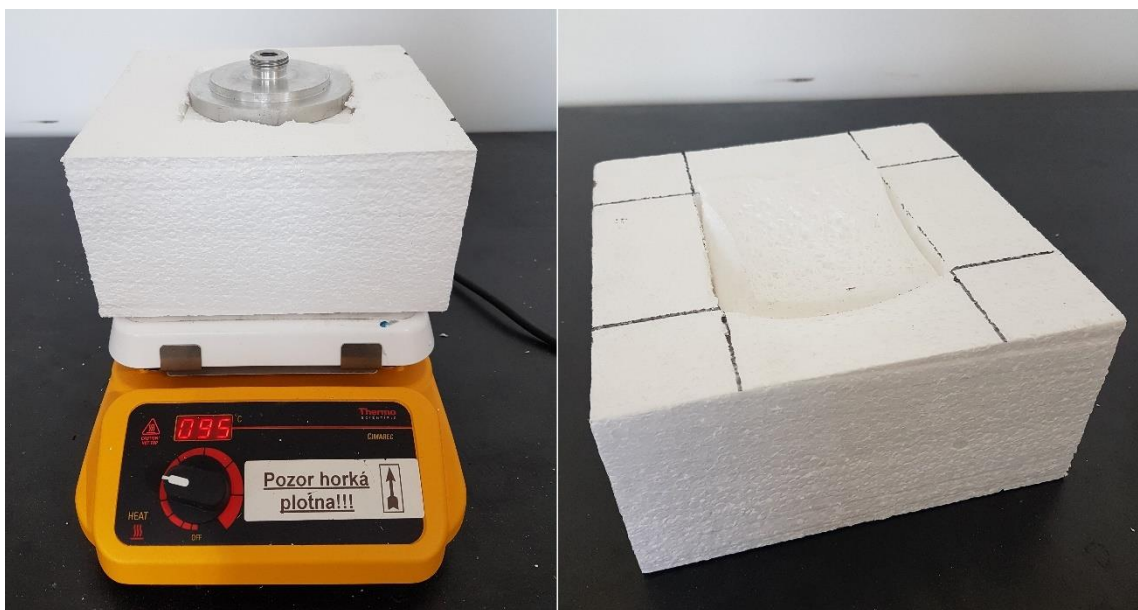


Obrázek 3.6 – Keramická topná deska

Vzhledem k velikosti desky o straně délky 18,4 cm (7,25 palců) byly velikosti vzorků polystyrenu upraveny na 100×100×100 mm. Výjimkou byl první nepřesně nařezaný vzorek, aby se zjistilo, jak se bude EPS na desce chovat. Vzorek byl na desku o teplotě 95 °C umístěn po dobu 24 hodin. Terč na horní stěně sloužil jako zatížení, aby polystyren na povrch desky doléhal rovnoměrně.



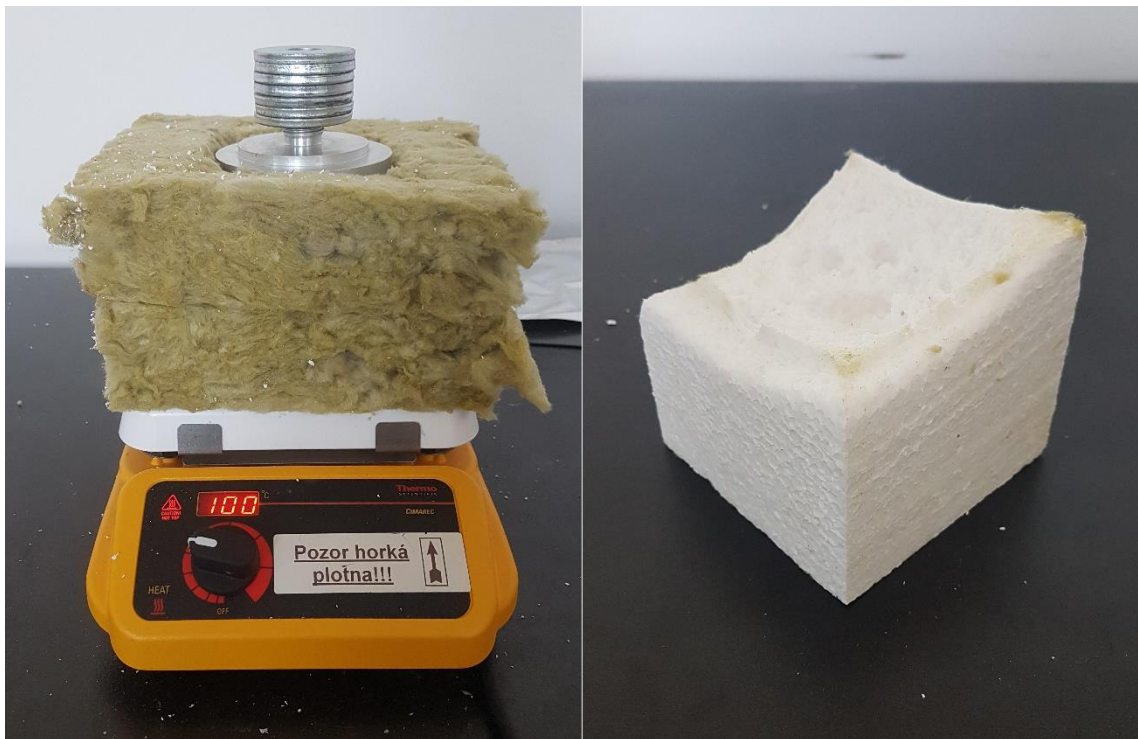
Obrázek 3.7 - Vzorek před zkouškou (vlevo) a po zkoušce (vpravo)



Obrázek 3.8 - Vzorek při zkoušce (vlevo) a po zkoušce (vpravo)

Po 24 hodinách byl vzorek sundán z topné desky, viz Obrázek 3.7. Zatím co hrany spodní stěny vzorky zůstaly neporušeny, střed stěny se propadnul dovnitř. Došlo k vyšší akumulaci tepla uprostřed vzorku, zatím co boční stěny byly ochlazovány vnějším prostředím. Tepelné ztráty stěnami byly sníženy ochrannou obálkou kolem vzorku taktéž z EPS viz Obrázek 3.8. Obálka nebyla v přímém kontaktu s deskou, nýbrž přibližně 5 mm nad ní. Na vzorek byl opět umístěn terč jako závaží. Zkouška trvala 24 hodin. Jak je vidět z Obrázku 3.8 v pravé části, došlo k nerovnoměrné deformaci vzorku i obálky.

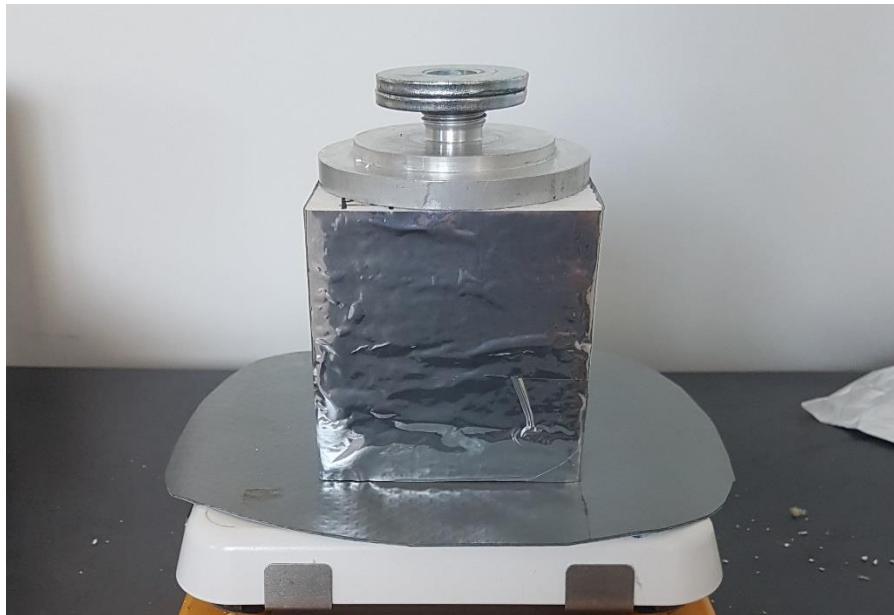
Následovala výměna obálky z EPS za minerální vlnu po celé výšce vzorku, který byl navíc umístěn na fólii z měkčeného PVC. Tím se podmínky zkoušky měly přiblížit těm reálným ve střeše. Na horní stěnu vzorku bylo umístěno závaží hmotnosti 850 g, aby se vzorek deformoval rovnoměrně. Po 48 hodinách na topné desce o teplotě 100 °C došlo nicméně znovu k nerovnoměrné deformaci. Jakmile není zatížení vzorku přesně ve středu jeho horní stěny, čehož je obtížné dosáhnout, začne se více deformovat na jednom rohu viz Obrázek 3.9.



Obrázek 3.9 - Vzorek při zkoušce (vlevo) a po zkoušce (vpravo)

V dalším kroku byl vzorek obalen hliníkovou páskou po 4 stěnách, aby nedocházelo k úniku teplého vzduchu mezi rohy vzorku (Obrázek 3.10). Po 24 hodinách na teplotě

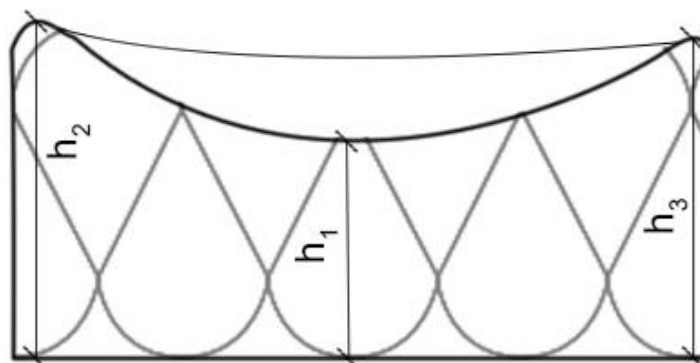
100 °C se zátěží 440 g se EPS zdeformoval rovnoměrněji než předtím. Každý další vzorek byl tedy olepen hliníkovou páskou.



Obrázek 3.10 - Pohled na vzorek EPS obalený hliníkovou páskou

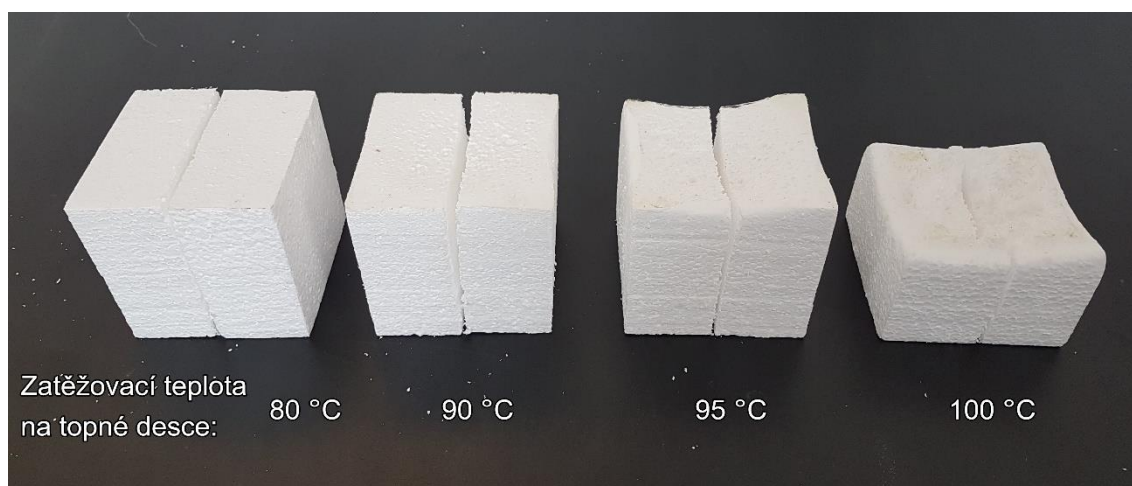
3.2.1 Měření hloubky propadu středu spodní stěny na topné desce

Přistoupilo se k měření výšky prohlubně, která vznikne při položení vzorku EPS o rozměrech 100×100×100 mm na topnou desku o teplotě 80, 90, 95 a 100 °C vždy po dobu 24 hodin. Vzorek byl položen na hydroizolační folii z měkčeného PVC, obalen hliníkovou páskou, minerální vlnou po celé své výšce a na horní stěně bylo umístěno závaží o hmotnosti 440 g, aby vzorek doléhal celou plochou na desku.



Obrázek 3.11 - Zjednodušený řez vzorkem

Po 24 hodinách byl vzorek vizuálně zkontrolován, v místě nejhlubšího propadu středu stěny byl podélně rozříznut a změřila se vzdálenost nejnižšího místa v prohlubni po horní stěnu, na Obrázku 3.11 označena jako h_1 . Měřila se také výška vzorku v rozích (h_2 a h_3). Poměrná deformace se pak vypočítala jako rozdíl výšky vzorku po měření a před měřením, podělený výškou vzorku před měřením. Bylo snahou zjistit, jestli existuje korelace mezi změnou rozměru při vystavení EPS v klimatické komoře a při položení na topnou desku. Ukázka vzorků po měření je na Obrázku 3.12. Vypočtené výsledky jsou pak v Tabulce č. 3.5.



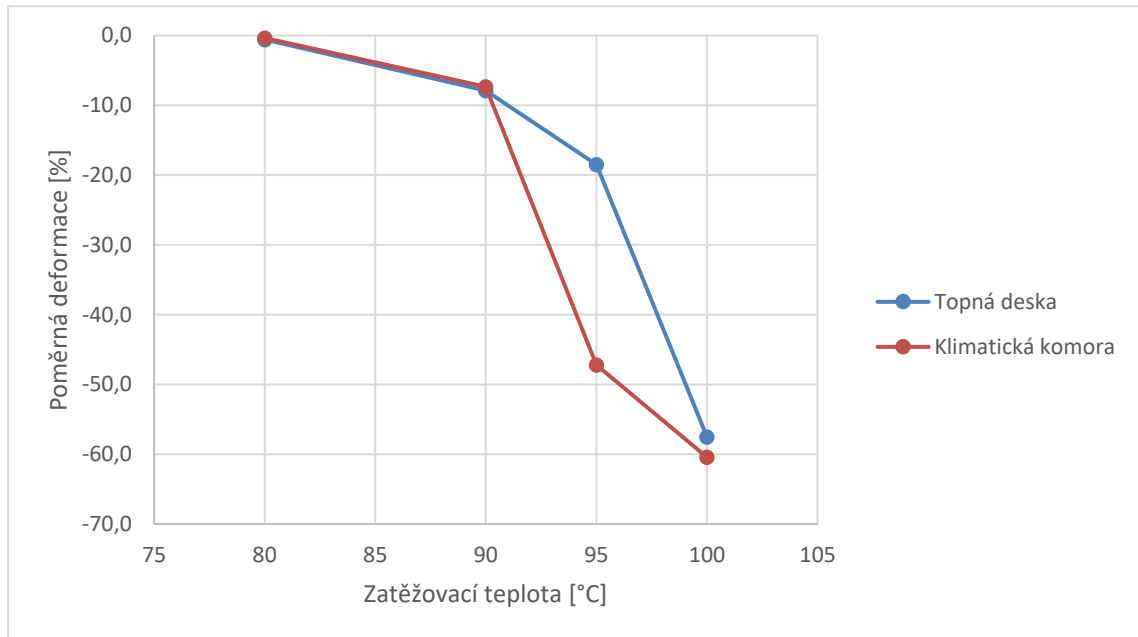
Obrázek 3.12 - Přehled zkušebních vzorků po měření

Ukázalo se, že výška vzorků v rozích po 24 hodinách na topné desce velmi kolísá, proto s ní nebylo dále uvažováno. Naproti tomu výška vzorku v místě propadu středu spodní stěny se lišila jen v řádu jednotek procent. Pro porovnání výsledků z klimatické komory a topné desky byla tedy zvolena pro klimatickou komoru průměrná poměrná deformace vzorku a pro topnou desku poměrná deformace výšky vzorku v místě největšího propadu spodní stěny.

Srovnání výsledků obou zkoušek ukazuje Graf č. 3.7. Na něm je vidět, že poměrné deformace při teplotách 80, 90 a 100 °C si relativně odpovídají, velký rozdíl však nastává při teplotě 95 °C. Zatímco vzorky v klimatické komoře se již výrazně deformují (přibližně na polovinu původního rozměru), na topné desce se výška vzorku ve středu spodní stěny zmenší jen o přibližně 20 %. Tím byla vyloučena možnost srovnání obou zkoušek.

Tabulka 3.5 - Vypočtené výsledky zkoušek

Zatěžovací teplota [°C]	Poměrná deformace [%]		
	Topná deska		Klima komora
	Střed vzorku	Roh vzorku	
80	-0,57	-0,57	-0,3
90	-7,89	-2,05	-7,3
95	-18,49	-3,92	-47,2
100	-57,51	-30,16	-60,4



Graf 3.7 - Srovnání poměrných deformací vzorků po zkoušce v klimatické komoře a na topné desce

3.2.2 Zkoušení teplotní odolnosti EPS s povlakovou hydroizolací na keramické topné desce

Cílem následujícího experimentu bylo prozkoumat možnosti srovnání degradace EPS s různou povlakovou hydroizolací na keramické topné desce po vystavení vysoké teplotě po určený čas. Také ověřit, zda pod hydroizolací z asfaltových pásů dochází k degradaci EPS, protože v praxi docházelo k úbytku EPS jen pod folií. Zvoleny byly dvě skladby:

- Na EPS 100 byla položena netkaná geotextilie z polypropylenu o gramáži 200 g·m² a jednovrstvá hydroizolační folie z měkkého PVC s výztužnou vložkou z polyesteru.
- Na EPS 100 byl položen samolepící hydroizolační pás z SBS modifikovaného asfaltu s nosnou vložkou ze skleněné tkaniny jako spodní vrstva, horní vrstvu pak

tvořil pás z SBS modifikovaného asfaltu s nosnou vložkou z polyesterové rohože s hrubozrnným posypem.

Na topnou desku byly nejdříve položeny povlakové izolace a následně vzorek EPS 100 v tloušťce 100 mm, který byl opět obalen hliníkovou páskou pro zamezení proudění teplého vzduchu a obálkou z minerální vlny pro zamezení tepelných ztrát. Vzorek byl přitížen kovovým závažím o hmotnosti 440 g. Vzorek s asfaltovým pásem je vidět na Obrázku 3.13.



Obrázek 3.13 - Vzorek z EPS položen na izolaci z asfaltových pásů

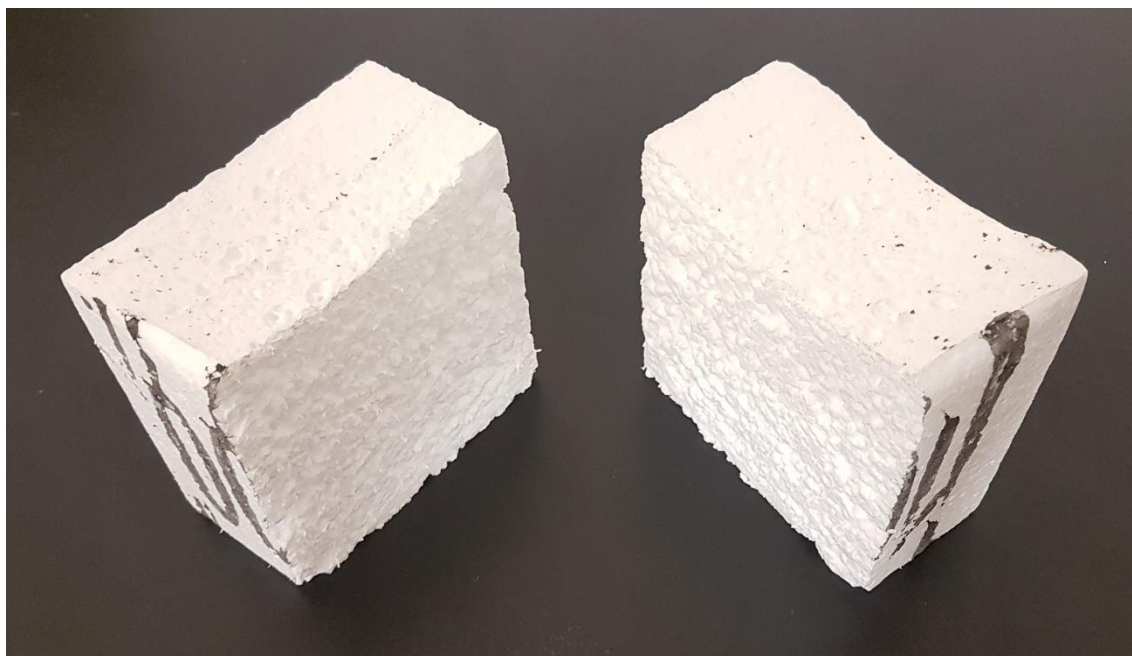
Tabulka 3.6 přináší přehled zatěžovací teploty, doby měření při jednotlivých zkouškách a poměrné deformace ve středu vzorku. Čas 48 hodin při teplotě 90 °C byl zvolen z důvodu měřitelnosti propadu středu spodní stěny vzorku EPS. Poměrná deformace byla vypočtena stejně jako v předchozí podkapitole, tedy jako rozdíl výšky vzorku ve středu spodní stěny před zkouškou a po ní, podělený výškou vzorku před zkouškou a vynásobený 100.

Na Obrázku 3.14 je zobrazen rozříznutý vzorek EPS 100 uložený na asfaltové pásy a vystavený teplotě 95 °C na topné desce po dobu 5 hodin. Aby vzorek doléhal rovnoměrně na asfaltový pás, bylo použito závaží, díky kterému se vzorek mírně vnořil do vrstvy asfaltového pásu. Z poměrných deformací v Tabulce 3.6 je vidět, že k degradaci EPS dochází jak při položení na asfaltové pásy, tak na folii z měkčeného PVC a separační

geotextilii. Deformace vzorků byla srovnatelná při 90 °C na topné desce po dobu 48 hodin. Při 95 °C za 5 hodin se lišila o 3 %, tedy nevýrazně.

Tabulka 3.6 - Přehled def. podmínek zkoušky na topné desce

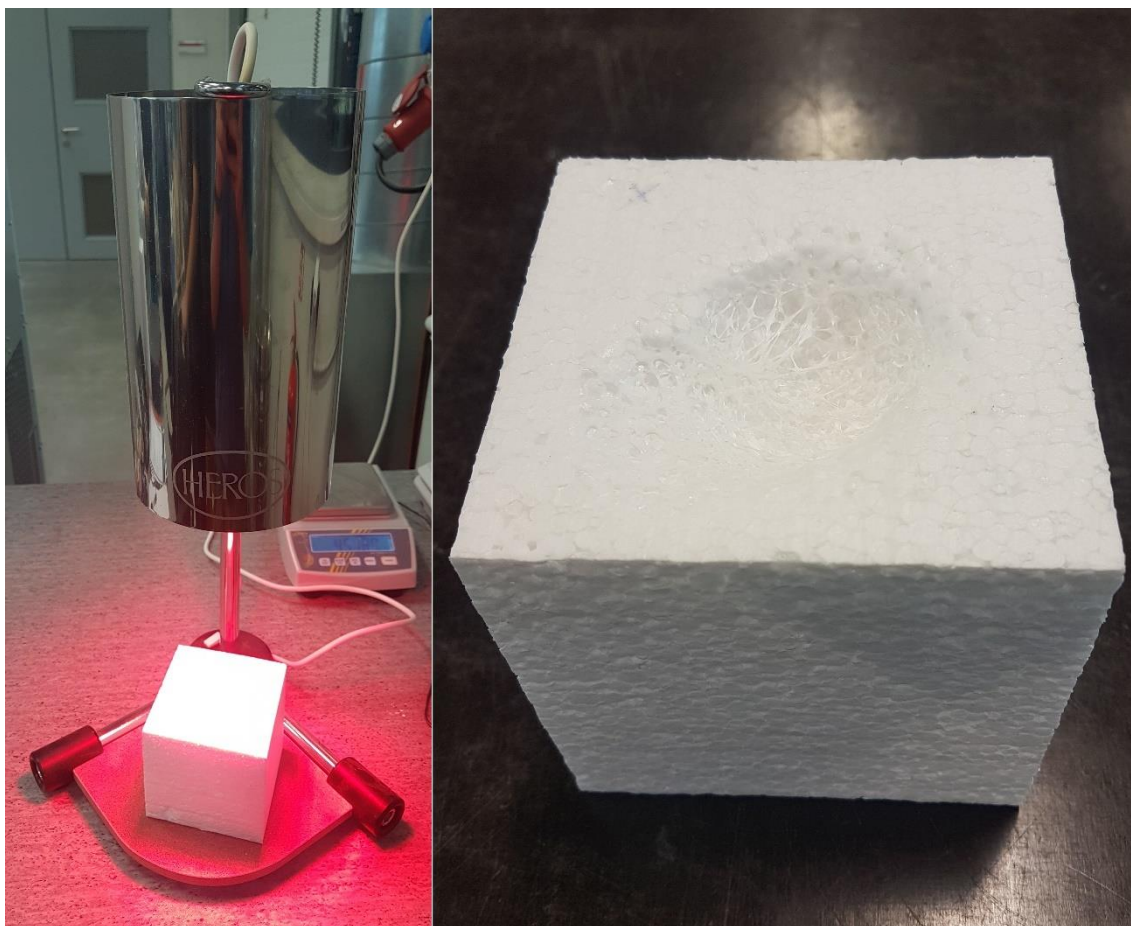
Číslo zkoušky	Typ povlakové izolace	Teplota desky [°C]	Čas měření [h]	Poměrná deformace ve středu vzorku [%]
1	PVC-P	90	48	-4,44
2		95	5	-5,42
3	Asfaltové pásy	90	48	-4,52
4		95	5	-8,47



Obrázek 3.14 - Rozříznutý vzorek EPS po zkoušce č. 4

3.2.3 Zkoušení rozměrové stability EPS při zahřívání infračervenou lampou

Bylo vyzkoušeno teplotní namáhání na jedné stěně zkušebního vzorku pomocí infračervené lampy HEROS, sloužící k vysoušení vzorků, viz Obr. 3.15 nalevo. Teplotní zatížení je možno regulovat posunem lampy nahoru či dolů. Teplota na povrchu vzorku byla měřena pomocí termovizní kamery. Vzorek se deformoval ve středu horní stěny podobně jako při položení na topnou keramickou desku. Vzhledem ke komplikovanému určení teploty na povrchu vzorku, vyplývající z nutnosti určit emisivitu povrchu EPS, nebylo ve zkoušení stability na tomto měřicím zařízení dále pokračováno.



Obrázek 3.15 - Vlevo průběh zkoušky, vpravo výsledek

4 Návrh metodiky pro zkoušení teplotní odolnosti výrobků z EPS

Podle níže popsané metodiky byly provedeny experimenty na deskách z EPS v kapitole 5. Od keramické topné desky bylo upuštěno, proto se metodika zabývá jen zkoušením v klimatické komoře s nastavitelnými teplotně-vlhkostními podmínkami.

4.1 Zkušební zařízení

- Komora s regulovanou teplotou nebo komora s regulovanou teplotou a vlhkostí.
- Posuvné měřítko na měření lineárních rozměrů s přesností alespoň 0,1 mm.
- Váhy s přesností alespoň 0,1 g.

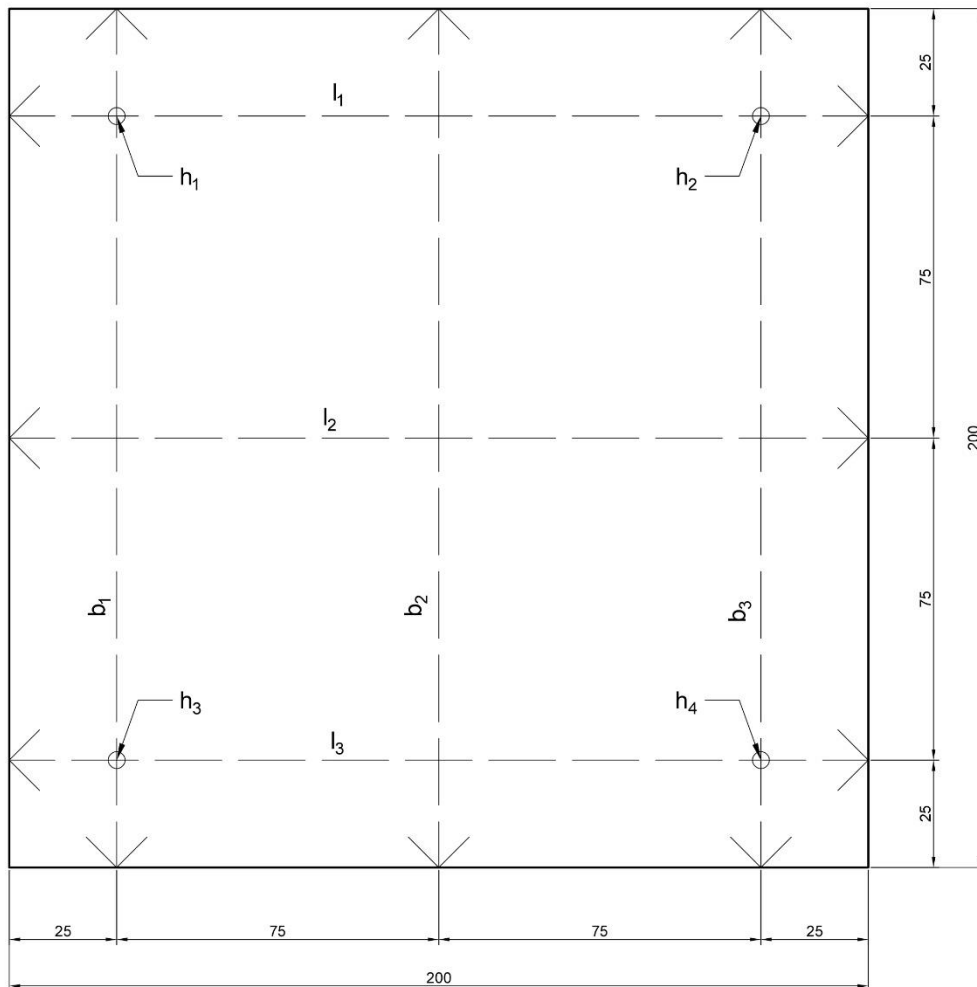
4.2 Příprava zkušebních těles

Zaznamená se název výrobku, výrobní závod (případně dodavatel), výrobní kódové značení, typ výrobku, údaje o historii a odběru vzorků, datum zkoušky, obecné informace vztahující se ke zkoušce (například teplota a relativní vlhkost) a všechny okolnosti, které mohly ovlivnit výsledek zkoušky.

Tloušťka zkušebních těles by měla být totožná s tloušťkou původních výrobků. Zkušební tělesa jsou řezána topným drátem na kvádry o délce a šířce (200 ± 1) mm, přičemž směr délky a šířky musí být vyznačen. Pro každý soubor teplotě-vlhkostních podmínek jsou zkoušena minimálně 3 tělesa. Tělesa musí být kondicionována pro dosažení rovnovážného stavu v prostředí o teplotě (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti (50 ± 5) % po dobu alespoň 24 hodin.

4.3 Postup zkoušky a teplotně-vlhkostní podmínky

Po kondicionování jsou zkušební tělesa změřena podle Obrázku 4.1 s přesností alespoň 0,1 mm (l_{1-3} označují délku, b_{1-3} šířku a h_{1-4} tloušťku tělesa). Tělesa se zváží s přesností alespoň 0,1 g. Tělesa jsou poté vložena do komory ve vodorovné poloze na drátěný rošt, případně perforovanou kovovou desku, aby nebylo zamezeno volnému pohybu vzduchu kolem vzorků. Doba zkoušky je (24 ± 1) hodina. Soubor teplotně-vlhkostních podmínek ukazuje Tabulka č. 4.1. Po uplynutí zkoušek jsou tělesa vyjmuta z komory a po dobu alespoň 3 hodiny jsou vystavena opět prostředí o teplotě (23 ± 2) °C a relativní vlhkosti (50 ± 5) %. Poté se změří konečné rozměry na stejných místech jako před vložením do komory a vzorky se zváží.



Obrázek 4.1 - Přehled měřených rozměrů na vzorku

Tabulka 4.1 - Soubor teplotně-vlhkostních podmínek v komoře

Měření	Zatěžovací teplota [°C]	Relativní vlhkost [%]	Čas měření [h]	Poznámka
1	80	70	24	
2	90	70	24	
3	95	70	24	
4	100	60-90	24	Vlhkost je možno regulovat např. nádobou s vodou v prostoru komory.

4.4 Vyjádření výsledků

Zkušební tělesa se vizuálně posoudí a zaznamenají se možné odchylky jednotlivých těles jako zkrivení stěn, propadnutí středu horní stěny apod. Poměrná deformace (změna rozměrů) jednotlivých rozměrů se vyjádří podle následujících vzorců:

$$\Delta l = \frac{l_1 - l_0}{l_1} \cdot 100$$

$$\Delta b = \frac{b_1 - b_0}{b_1} \cdot 100$$

$$\Delta h = \frac{h_1 - h_0}{h_1} \cdot 100$$

kde: Δl , Δb , Δh ... poměrná deformace délky, šířky a tloušťky tělesa [%]

l_0 , b_0 , h_0 ... průměrná délka, šířka a tloušťka tělesa před vystavením definovaným podmínkám [mm]

l_1 , b_1 , h_1 ... průměrná délka, šířka a tloušťka tělesa po vystavení definovaným podmínkám [mm]

Podobně je vypočtena i změna hmotnosti těles, tedy:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_0}{m_1} \cdot 100$$

kde: Δm ... změna hmotnosti [%]

m_0 ... hmotnost tělesa před uložením do komory [g]

m_1 ... hmotnost tělesa po vytažení z komory [g]

Poměrné deformace a změny hmotnosti jednotlivých vzorků v souboru vystaveném určitým teplotně-vlhkostním podmínkám se nakonec zprůměrují a zapíšou do tabulky.

5 Experimentální ověření teplotní odolnosti EPS podle navržené metodiky

V klimatické komoře byly provedeny 3 experimenty:

- Srovnání 3 různých izolačních desek rozdílného data výroby z EPS 100 od jednoho výrobce
- Srovnání 7 různých izolačních desek z EPS 100 od 7 výrobců
- Srovnání 2 různých izolačních desek z EPS 150

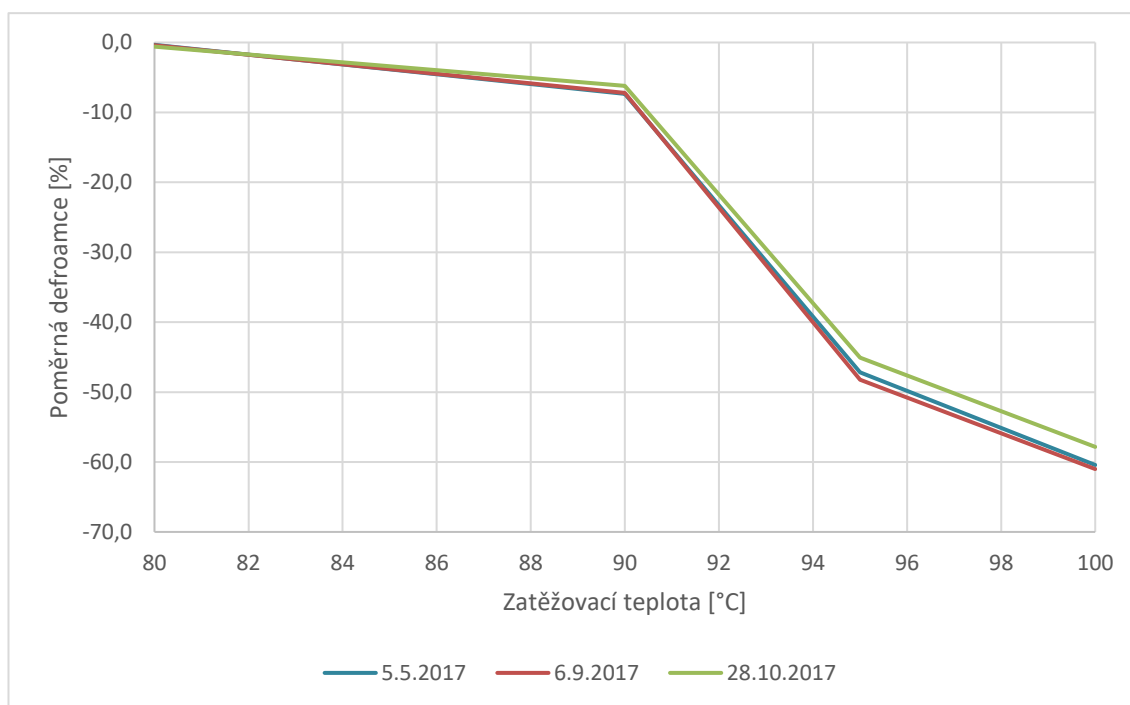
5.1 Zkoušení teplotní odolnosti desek z EPS různého data výroby od stejného výrobce

Dle navržené metodiky byly porovnány 3 desky EPS 100 od jednoho výrobce, přičemž desky se lišily datem výroby: 5.5.2017, 6.9.2017 a 28.10.2017. Přehled dosažených poměrných deformací a změn hmotností ukazuje Tabulka 5.1. Graficky jsou výsledky zobrazeny v Grafu 5.1.

Tabulka 5.1 - Poměrné deformace a změny hmotnosti desek z EPS 100 různého data výroby

Datum výroby desky	Zatěžovací teplota [°C]	Poměrná deformace [%]			Změna hmotnosti [%]
		Délka	Šířka	Výška	
EPS 100 – 5.5.2017	80	-0,40	-0,36	-0,26	-0,28
	90	-7,42	-7,52	-7,07	-0,44
	95	-47,02	-47,15	-47,41	-0,28
	100	-59,91	-60,37	-61,00	-0,39
EPS 100 – 6.9.2017	80	-0,32	-0,39	-0,48	-1,17
	90	-7,68	-7,66	-6,28	-1,35
	95	-49,31	-48,91	-46,43	-0,14
	100	-61,24	-61,43	-60,35	-0,56
EPS 100 – 28.10.2017	80	-0,58	-0,54	-0,66	-1,49
	90	-6,15	-6,07	-6,34	-1,88
	95	-45,93	-44,67	-44,61	-0,54
	100	-57,24	-56,89	-59,38	-0,60

Zatímco desky vyrobené 5.5. a 6.9.2017 mají poměrné deformace srovnatelné, deska z 28.10.2017 má smrštění průměrně o 2 % nižší. Díky nepravidelnému zkroucení vzorků po vystavení definovaným podmínkám tato odchylka pravděpodobně ještě patří do intervalu chyby měření. Objemové hmotnosti jednotlivých desek byly naměřeny podobné: 16,4 kg·m⁻³ pro desku z 5.5., 17,2 kg·m⁻³ pro desku z 6.9. a 17,1 kg·m⁻³ pro desku z 28.10.



Graf 5.1 - Poměrné deformace EPS desek různého data výroby po vystavení def. podmínkám

5.2 Zkoušení teplotní odolnosti desek z EPS 100 různých výrobců

Podle navržené metodiky bylo v klimatické komoře vyzkoušeno 7 izolačních desek z EPS od různých výrobců, u kterých byly předem v rámci jiného projektu stanoveny rozměrové tolerance, pravoúhlost, rovinnost, objemová hmotnost a pevnost v tlaku při 10% deformaci. Desky byly označeny velkým písmenem a hodnotou deklarované pevnosti v tlaku při 10% deformaci. Přehled vybraných vlastností uvádí Tabulka č. 5.2.

Tabulka 5.2 - Přehled vlastností různých izolačních desek

Výrobce	Objemová hmotnost [kg·m ⁻³]	Pevnost v tlaku při 10% deformaci [kPa]	Deklarovaný součinitel teplotní vodivosti [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
A-100	17,0	103,67	0,037
B-100	17,3	105,67	0,037
C-100	19,5	121,67	0,037
D-100	17,9	99,67	0,037
E-100	19,4	166,67	0,037
F-100	18,8	111,00	0,035
G-100	16,7	87,67	0,037

Tloušťka desek byla 120 mm, zkušební tělesa měla rozměry 200×200×120 mm. Zatěžovací teplotám byly vystaveny vždy 3 vzorky od každého výrobce. Naměřené poměrné deformace a změny hmotností jsou uvedeny v Tabulce 5.3, graficky je smrštění vzorků znázorněno v Grafu 5.1.

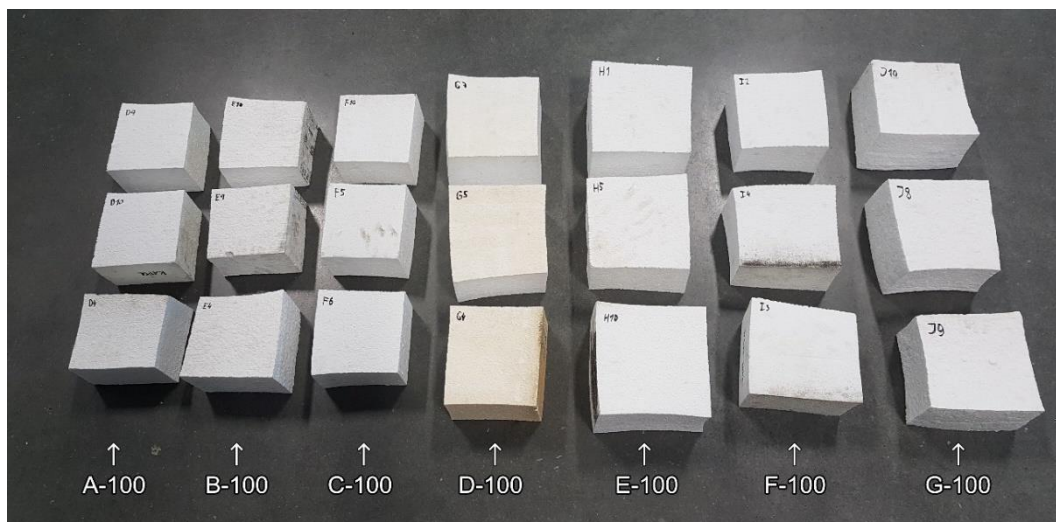
Při teplotě 80 °C vykázaly všechny vzorky EPS nevýrazné smrštění v řádu desetin procent, nejmenší poměrné deformace dosáhla deska G-100 (-0,42 %), největší B-100 (-0,92 %). Zvýšením zatěžovací teploty na 90 °C se poměrná deformace zvětšuje a pohybuje se v rozmezí od -3,78 % (G-100) do -8,58 % (C-100). K výraznému smrštění dochází při 95 °C (viz Obrázek 5.1) a 100 °C (viz Obrázek 5.2). Při 95 °C měla nejmenší poměrnou deformaci deska E-100 (-35,50 %), šířka vzorků byla průměrně 133 mm. Největší deformaci okolo -47 % pak měly srovnatelně 3 desky (A-100, B-100, C-100). Při této teplotě se také jednotlivé desky nejvíce liší (přibližně 12 %), při nižších a vyšších teplotě byl rozdíl napříč výrobci menší. Deformace při poslední zatěžovací teplotě 100 °C se pohybovala mezi -57,78 % (E-100) a -65,49 % (B-100).

V grafu 5.1 lze pozorovat trend, že desky s relativně větší poměrnou deformací při 90 °C mají větší deformaci také při teplotě 95 °C (s výjimkou G-100). Při teplotě 100 °C však dochází u jednotlivých desek k překrývání křivek závislosti poměrné deformace na zatěžovací teplotě. Za 24 hodin zkoušení při teplotě 95 °C nenastává ještě konečná degradace EPS. Napěněním pomocí nadouvadla při výrobě vzniká v materiálu napětí, které se zahříváním uvolňuje a pravděpodobně proto se polystyren smršťuje. Naměřená data ukazují, že dokud nedojde ke konečnému smrštění EPS, je z hlediska teplotní odolnosti obtížné vzájemně porovnávat desky od různých výrobců, protože deska s relativně menší poměrnou deformací za 24 hodin při 95 °C může mít konečnou deformaci relativně větší.

Tabulka 5.3 - Přehled poměrných deformací a změn hmotností 7 různých EPS desek

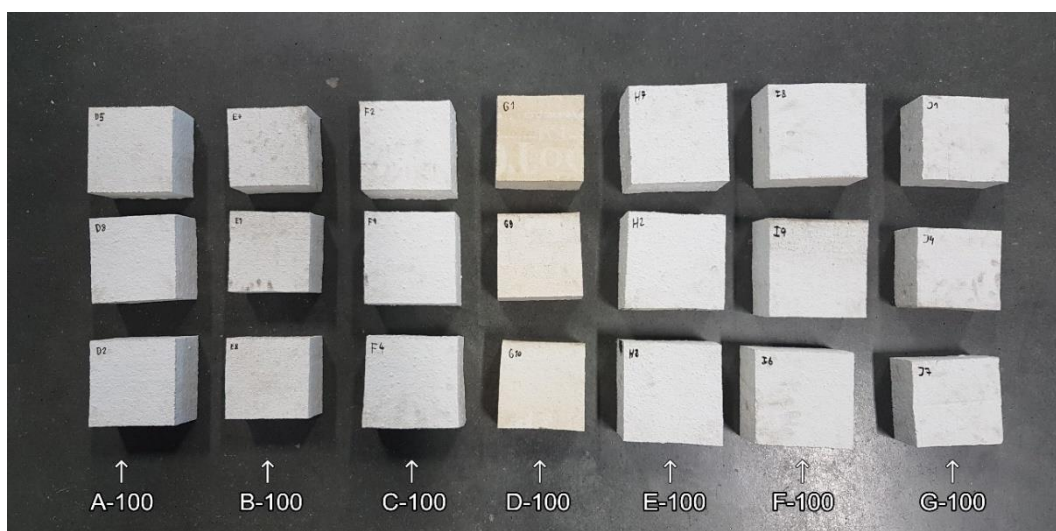
Výrobce	Zatěžovací teplota [°C]	Změna délky [%]	Změna šířky [%]	Změna výšky [%]	Změna hmotnosti [%]
A-100	80	-0,72	-0,71	-0,62	-0,22
	90	-6,80	-6,65	-6,47	-1,33
	95	-47,70	-47,76	-46,55	-0,16
	100	-63,38	-63,35	-63,60	-0,17
B-100	80	-0,84	-0,98	-0,94	-0,35
	90	-8,17	-7,90	-7,50	-1,72
	95	-47,82	-48,07	-47,27	-0,35
	100	-65,77	-65,75	-64,96	-0,25
C-100	80	-0,50	-0,58	-0,46	-0,68
	90	-9,10	-7,69	-8,95	-0,62
	95	-48,00	-47,27	-48,43	-0,12
	100	-59,99	-59,56	-60,84	-0,11
D-100	80	-0,49	-0,44	-0,47	-0,32
	90	-4,94	-4,73	-4,80	-1,04
	95	-39,06	-36,92	-37,60	-0,25
	100	-62,71	-63,10	-62,99	-0,18
E-100	80	-0,52	-0,47	-0,43	-0,28
	90	-4,28	-4,17	-4,26	-0,98
	95	-35,16	-34,44	-36,91	-0,40
	100	-58,01	-57,64	-57,69	-0,41
F-100	80	-0,51	-0,57	-0,53	-0,29
	90	-5,47	-4,97	-5,04	-1,64
	95	-41,83	-42,16	-41,93	-0,27
	100	-59,45	-59,15	-59,21	-0,17
G-100	80	-0,36	-0,43	-0,47	-0,21
	90	-3,66	-4,01	-3,65	-2,14
	95	-40,59	-39,98	-39,38	-0,60
	100	-63,79	-64,07	-63,47	-0,13

Úbytek hmotnosti byl největší u desky G-100 vystavené teplotě 90 °C (-2,14 %). Ve většině případů se jednalo o nevýraznou změnu v řádech desetin procent. Žádná závislost mezi změnou hmotnosti a zatěžovací teplotou nebyla pozorována.

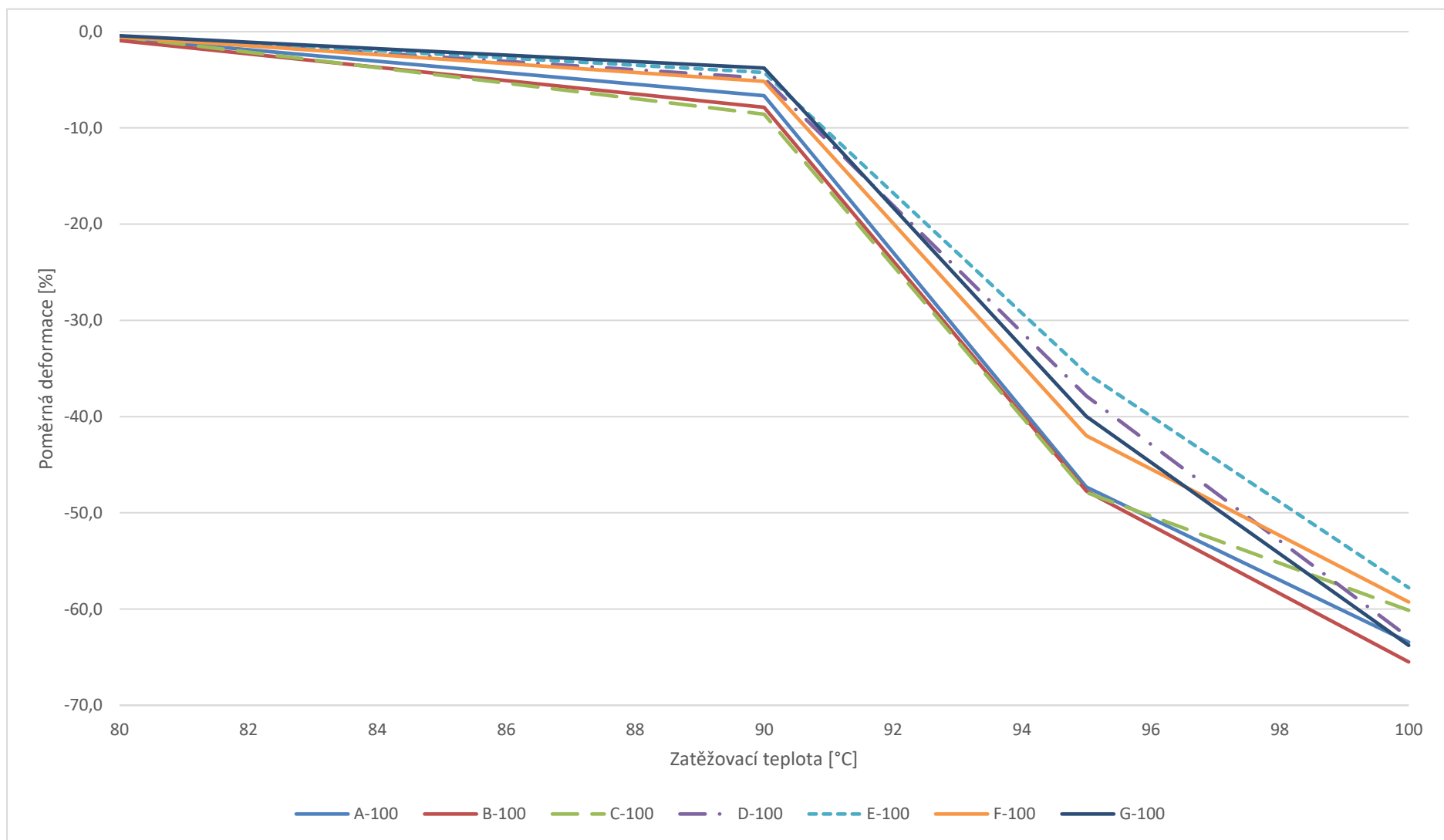


Obrázek 5.1 - Přehled vzorků EPS 100 po vystavení zatěžovací teplotě 95 °C

Byla zkoumána možná závislost teplotní odolnosti EPS desek na objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku při 10% deformaci. V Grafu 5.3 jsou zobrazeny jednotlivé objemové hmotnosti a poměrné deformace desek při zatěžovací teplotě 95 °C, v Grafu 5.4 pak při teplotě 100 °C. V Grafech 5.5 a 5.6 je pak objemová hmotnost zaměněna za pevnost v tlaku při 10% deformaci, která byla na vzorcích měřena v rámci jiného projektu. Do každého grafu byla přidána lineární spojnice trendu.

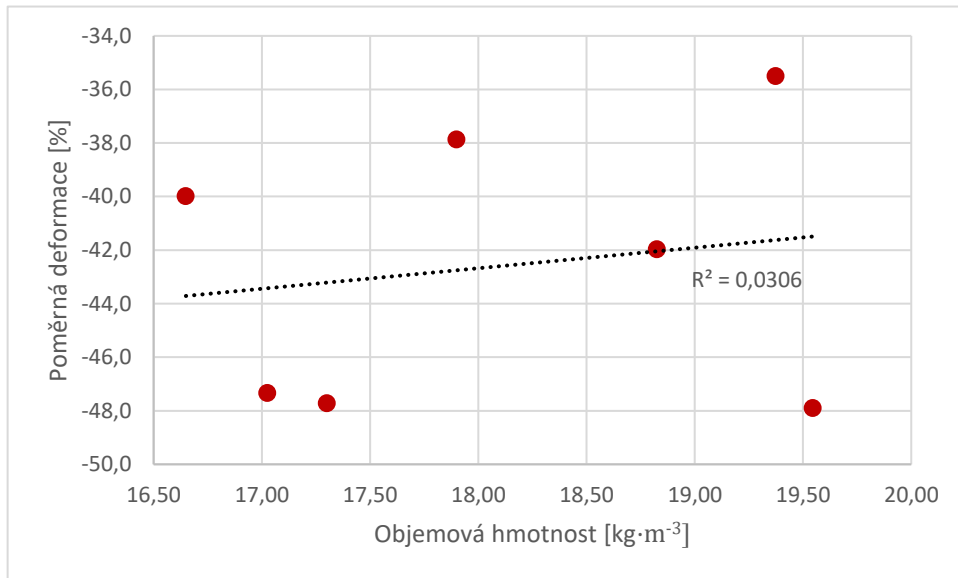


Obrázek 5.2 - Přehled vzorků EPS 100 po vystavení zatěžovací teplotě 100 °C

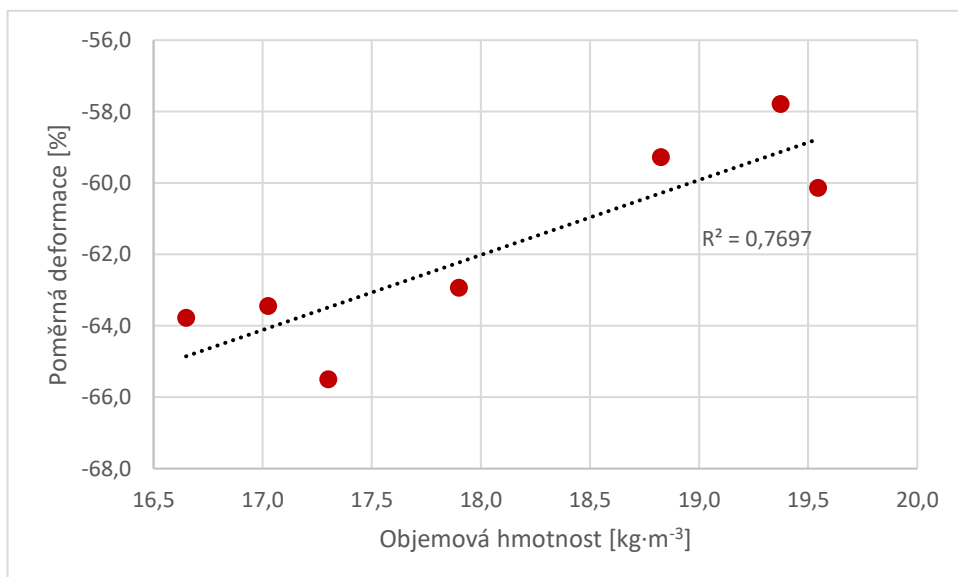


Graf 5.2 - Závislost poměrné deformace různých desek EPS 100 na zatěžovací teplotě

Při teplotě 95 °C nebyla lineární závislost pozorována. Koeficient determinance je pouze 0,0306 pro vztah poměrné deformace a objemové hmotnosti, případně 0,1332 pro vztah poměrné deformace a pevnosti v tlaku při 10% stlačení. Odlišná situace nastala u vzorků vystavených teplotě 100 °C (viz Grafy 5.4 a 5.6), kde koeficient determinance vzrostl na 0,7697 v případě vztahu poměrné deformace a objemové hmotnosti a na 0,6033 pro vztah poměrné deformace a pevnosti v tlaku při 10% stlačení.

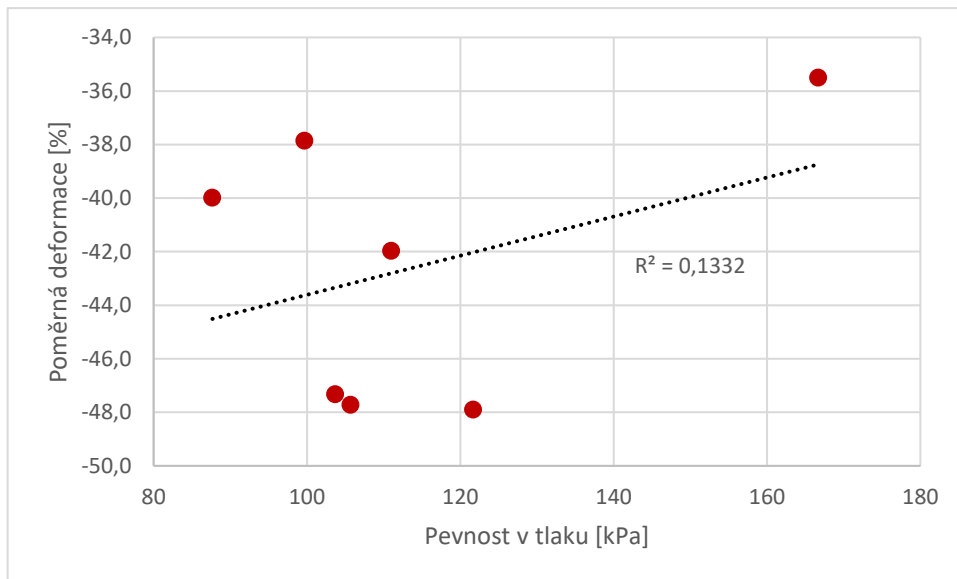


Graf 5.3 - Závislost poměrné deformace na objemové hmotnosti při zatěžovací teplotě 95 °C

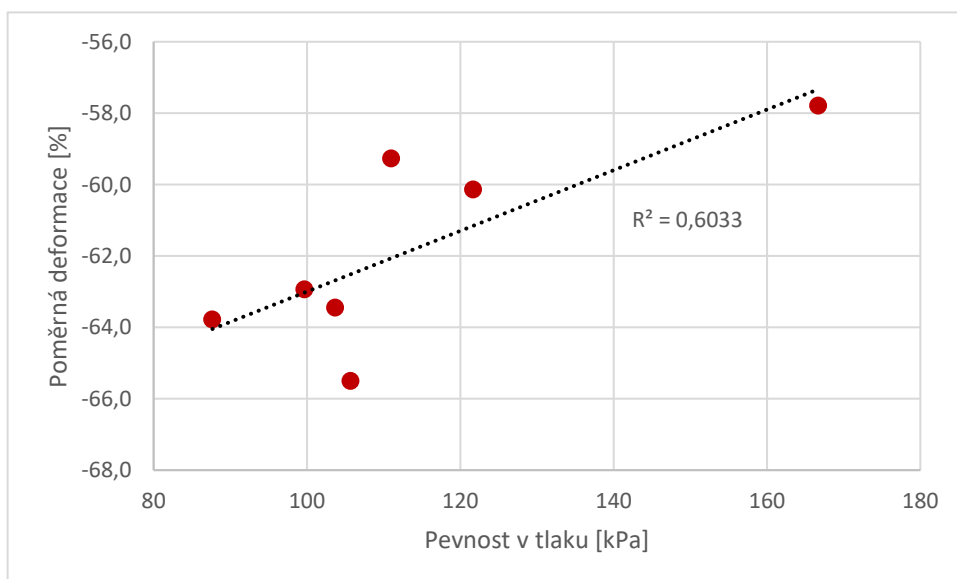


Graf 5.4 - Závislost poměrné deformace na objemové hmotnost při zatěžovací teplotě 100 °C

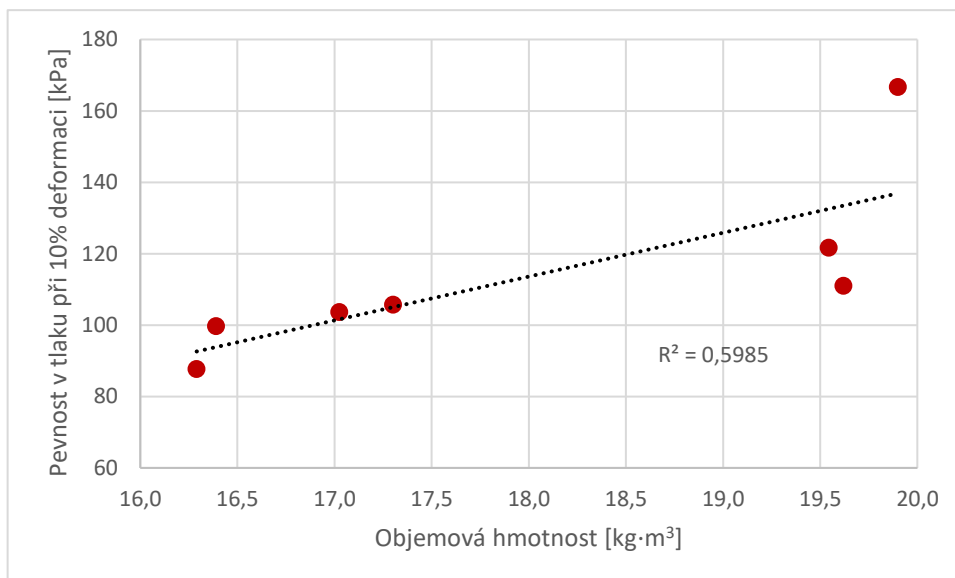
Z výsledků je možno usuzovat, že s rostoucí objemovou hmotností EPS podléhá teplotní degradaci méně, ale jen v případě, že dojde ke konečné deformaci materiálu. Bylo by však vhodné rozšířit statistický soubor (vyzkoušet EPS desky od dalších výrobců), taktéž zvětšit interval objemových hmotností, vzhledem k faktu, že testované vzorky měly objemovou hmotnost v rozsahu $16,5\text{--}20,0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Částečně z tohoto důvodu byl proveden experiment s EPS 150. Graf 5.7 ukazuje vztah objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku při 10% stlačení u zkoušených vzorků, který je u expandovaného polystyrenu lineární [11].



Graf 5.5 – Závislost poměrné deformace na pevnosti v tlaku při 10% deformaci při zatěžovací teplotě 95 °C



Graf 5.6 - Závislost poměrné deformace na pevnosti v tlaku při 10% deformaci při zatěžovací teplotě 100 °C



Graf 5.7 - Závislost pevnosti v tlaku při 10% deformaci na objemové hmotnosti

5.3 Zkoušení teplotní odolnosti desek z EPS 150

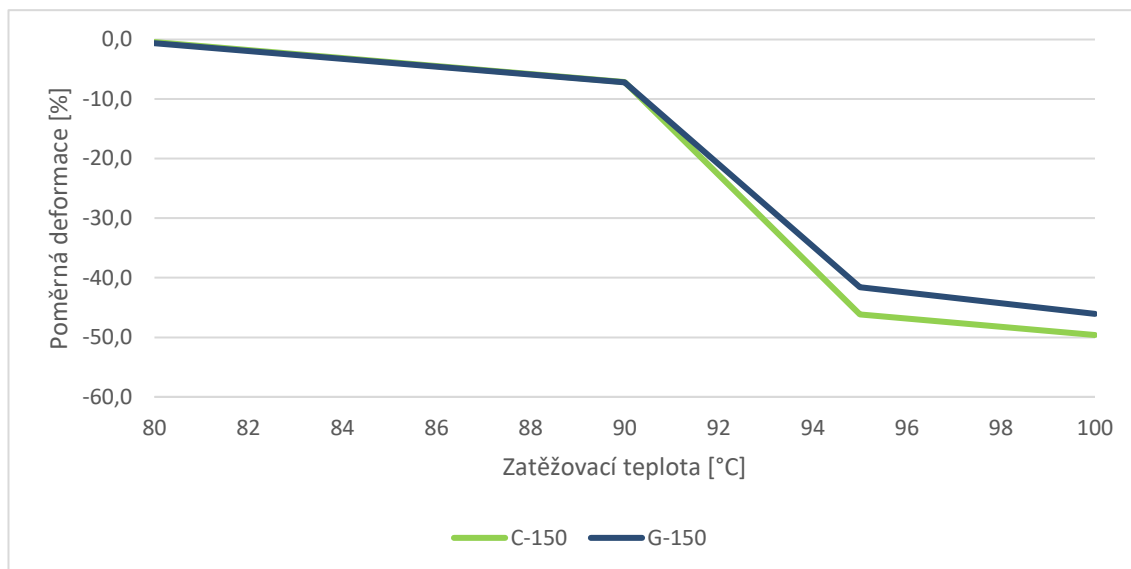
Pro ověření vlastností desek z EPS o pevnosti v tlaku při 10% deformaci 150 kPa byly podle stejné metodiky vyzkoušeny 2 desky označené jako C-150 a G-150. Písmeno značí výrobce a číslo pevnost v tlaku při 10% deformaci. Desky měly tloušťku 100 mm, vzorky tvaru kvádrů měly tedy rozměry 200×200×100 mm. Každé zatěžovací teplotě byly vystaveny 3 vzorky, doba trvání zkoušky byla 24 hodin.

Tabulka 5.4 - Výsledné poměrné deformace vzorků z desek EPS 150

Výrobce	Zatěžovací teplota [°C]	Změna délky [%]	Změna šířky [%]	Změna výšky [%]	Změna hmotnosti [%]
C-150	80	-0,66	-0,57	-0,64	-1,84
	90	-7,54	-6,96	-7,14	-2,22
	95	-42,00	-41,66	-41,11	-1,22
	100	-45,77	-46,77	-45,65	-1,42
G-150	80	-0,48	-0,35	-0,46	-1,54
	90	-7,13	-7,12	-7,23	-1,91
	95	-46,45	-45,71	-46,38	-0,87
	100	-49,73	-48,74	-50,37	-0,97

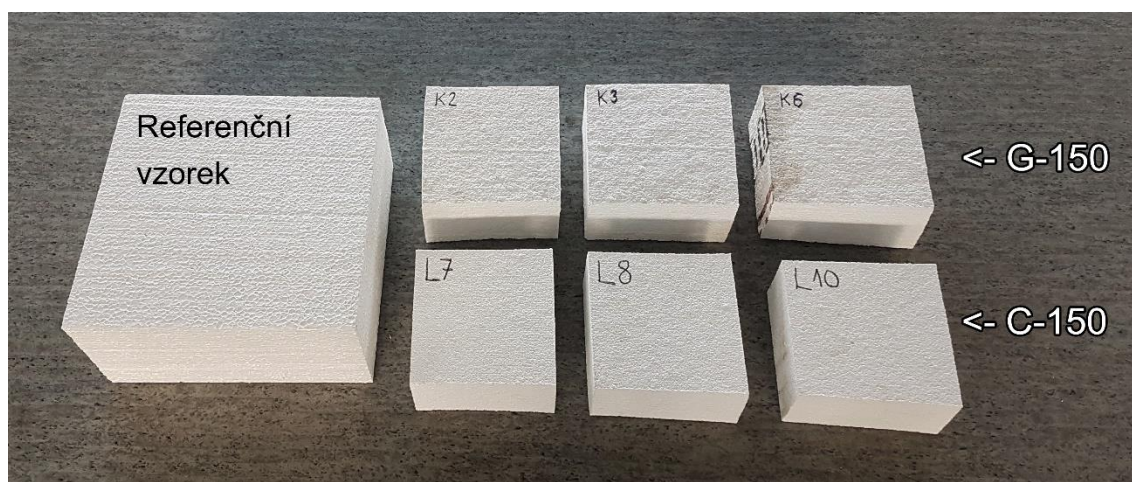
Předpokládalo se menší konečné smrštění vzorků kvůli zvýšené objemové hmotnosti. To se potvrdilo, jak ukazuje Tabulka 5.4 s výsledky zkoušek. Vzorky z desky C-150 dosáhly poměrné deformace po vystavení teplotě 100 °C za 24 hodin -49,61 %, vzorky z desky G-150 pak -46,06 %. Nejmenší deformaci -57,78 % ze zkoušených desek EPS 100

dosáhla deska E-100, rozdíl je tedy okolo 13 %. Graficky jsou poměrné deformace v závislosti na zatěžovací teplotě znázorněny v Grafu 5.8. Je možné, že za 24 hodin vystavení definovaným podmínkám ještě nedochází ke konečné deformaci materiálu kvůli jeho vyšší objemové hmotnosti. Z časových důvodů toto nebylo ověřováno.

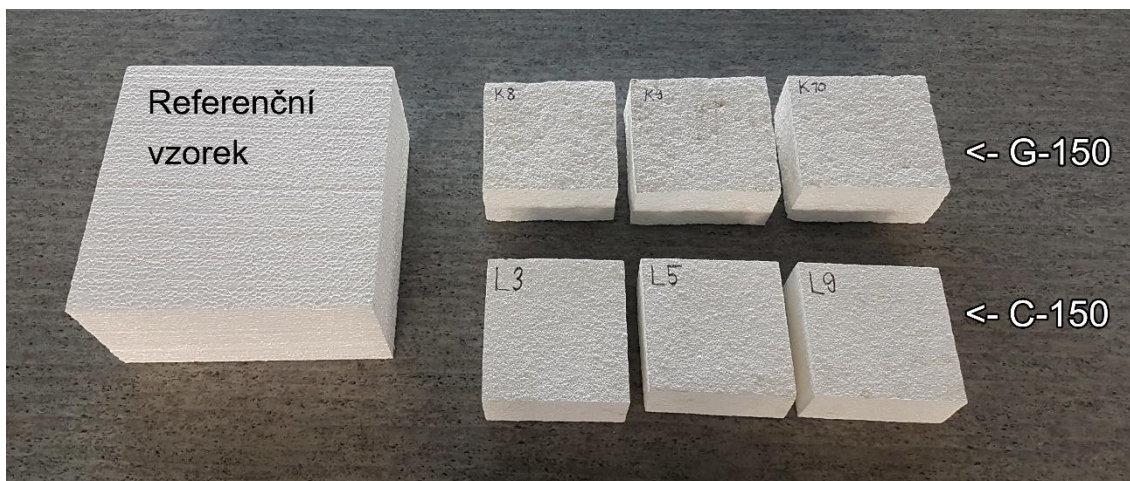


Graf 5.8 - Srovnání 2 desek EPS 150 a jejich poměrné deformace po vystavení def. podmínkám

V porovnání se vzorky z EPS 100 vykazovaly vzorky z EPS 150 rovnoměrnější smrštění, jak je znázorněno na Obrázku 5.3 (vzorky vystavené zatěžovací teplotě 95 °C) a na Obrázku 5.4 (vzorky vystavené zatěžovací teplotě 100 °C). U vzorků desek EPS 150 lze pozorovat menší rozdíl mezi poměrnou deformací při 95 °C a 100 °C než u desek EPS 100.

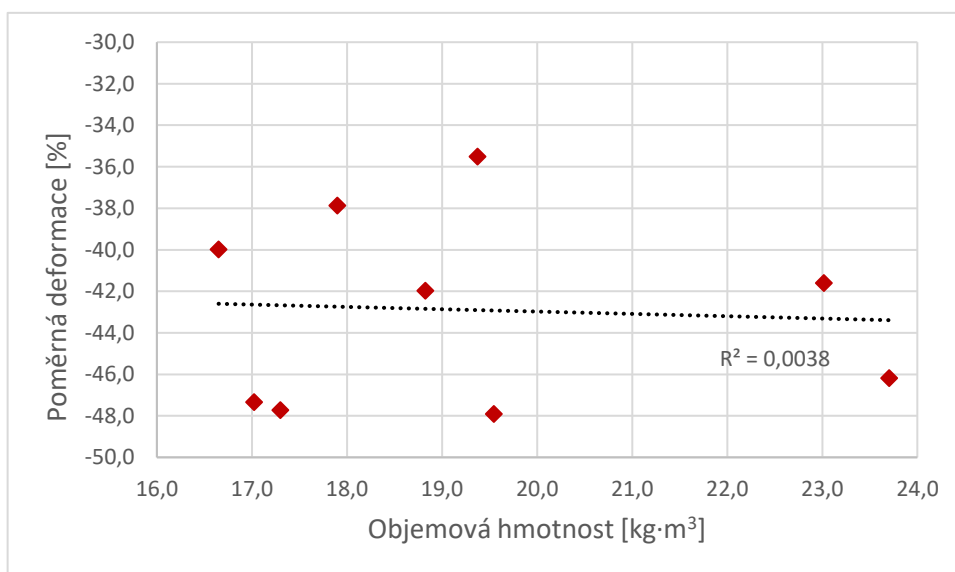


Obrázek 5.3 - Přehled vzorků EPS 150 po vystavení zatěžovací teplotě 95 °C

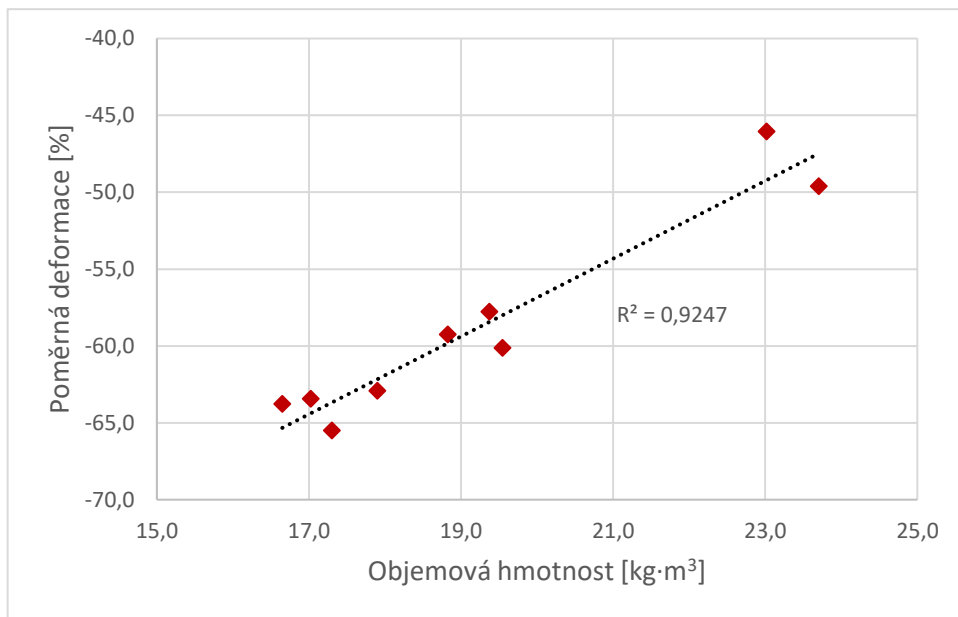


Obrázek 5.4 - Přehled vzorků EPS 150 po vystavení zatěžovací teplotě 100 °C

Doplň-li se objemové hmotnosti desek EPS 150 a jejich poměrné deformace při zatěžovacích teplotách 95 a 100 °C do grafů závislostí z předchozí podkapitoly (Grafy 5.2 a 5.3), získáme jednak Grafy 5.9 a 5.10, jednak potvrzení hypotézy, že dokud nedojde ke konečné deformaci materiálu (vystavení zatěžovací teplotě 100 °C po dobu 24 hodin), neexistuje závislost mezi poměrnou deformací a objemovou hmotností, případně pevností v tlaku při 10% stlačení. V grafu 5.9 je vidět, že koeficient determinance klesnul z 0,0306 (Graf 5.3) na 0,0038. V případě zatěžovací teploty 100 °C, kdy vzorky EPS dosahují konečné deformace, je však už vidět trend závislosti deformace na teplotě, viz Graf 5.10, kdy koeficient determinance vzrostl z 0,7697 (Graf 5.4) na 0,9247.



Graf 5.9 - Závislost poměrné deformace na objemové hmotnosti při zatěžovací teplotě 95 °C



Graf 5.10 - Závislost poměrné deformace na objemové hmotnosti při zatěžovací teplotě 100 °C

6 Diskuse dosažených výsledků

Experimentálně bylo ověřeno, že ve skladbě ploché střechy v blízkosti proskleného otvoru, od kterého se odráží sluneční záření, se může v letním období blížít teplota pod povlakovou hydroizolací k teplotě krátkodobé teplotní odolnosti expandovaného polystyrenu, tedy až ke 100 °C [2]. Rozměrová stabilita a deformace při určených teplotních podmínkách se u EPS však podle norem ČSN EN 1604 a 1605 zkouší jen do teploty 80 °C. Postup zkoušek byl upraven a v podkapitole 3.1 bylo zkoumáno chování EPS při vystavení předem definovaným podmínkám v klimatické komoře.

Zkoumán byl vliv teploty, relativní vlhkosti, umístění vzorku (na plech, do plechu, na rošt) a cyklického namáhání. Po 24 hodinách při konstantní teplotě a relativní vlhkosti v klimatické komoře je zřejmé, že mezi 90 a 95 °C dochází k nejvýraznější deformaci vzorků EPS. Konkrétně při teplotě 95 °C za 24 hodin se vzorky smrští přibližně na polovinu původní velikosti vzorku za současného nárůstu objemové hmotnosti na téměř dvacetinásobek. Dochází k úbytku hmotnosti vzorků, ve většině případů jde o hodnoty kolem 1 %, výjimečně i kolem 2 % (například vzorky EPS C-150 měly změnu hmotnosti po 24 hodinách na teplotě 90 °C -2,22 %).

Relativní vlhkost byla nastavena na hodnoty 0 % (v prostředí sušárny), na 70 a 90 %. Při teplotě 100 °C, kdy nastává největší deformace vzorků, relativní vlhkost nelze regulovat, do prostoru komory byl tedy alespoň umístěn plech s vodou, která se mohla odpařovat a udržovat relativní vlhkost v intervalu mezi 60 a 90 %. Prokázat, případně vyloučit, vliv relativní vlhkosti na deformaci EPS je nicméně obtížné z toho důvodu, že vzorky se při smršťování mírně krouží, deformují se stěny, propadá se střed horní stěny. Kvůli tomu vzniká chyba měření rozměrů v řádu procent, která má pravděpodobně větší vliv na výsledky deformací než relativní vlhkost.

Vzorky EPS byly ze začátku zkoumání umístěny do plechové nádoby, kdyby mělo dojít k jejich znehodnocení. Tím se jednak zamezilo proudění vzduchu kolem vzorků rovnoměrně, jednak mohlo docházet ke zkreslení výsledků vlivem vedení tepla přes stěnu plechové nádoby. Poměrné deformace vzorků, které byly umístěny na plechové nádobě, v ní, případně bez plechové nádoby na roštu, se sice lišily mezi -61,64 a -63,56 %, všechny další vzorky byly nicméně umístěny jen na rošt.

Pomocí ocelového pravítka pod vzorkem EPS v klimatické komoře byla sledována změna šířky v čase, s přesností na 1 mm každých 10 minut. Ke smrštění o 30 % dochází při

teplotě 95 °C do 6 hodin, při teplotě 100 °C do 3 hodin. Degradace má relativně rychlý náběh, posléze se zpomaluje s tím, jak stoupá objemová hmotnost materiálu.

Důležitým experimentem bylo studium cyklického namáhání, tedy snaha zjistit, jestli dojde k větší deformaci při konstantní teplotě nebo při opakovaném programu, kdy výdrž na vysoké teplotě (95 nebo 100 °C) byla zvolena na 60 minut. Ze záznamu teploty v klimatické komoře bylo zjištěno, že při nárůstu teploty dochází k překročení zvolené maximální teploty až o 7 °C, teplotní program musel tedy být upraven. Nicméně překročení menší než 2 °C se nepovedlo dosáhnout. To je jedním z možných vysvětlení, proč výsledná deformace vzorků byla po cyklickém namáhání větší než u vzorků vystavených konstantní teplotě. Další možností je fakt, že vzorky byly vystaveny nejen vysoké teplotě při izotermické výdrži, ale také určitou dobu vysoké teplotě při teplotním nárůstu, který byl zpomalen, aby bylo co možná nejvíce zredukováno již zmíněné překročení maximální teploty.

V podkapitole 3.2 byla teplotní stabilita EPS zkoumána na keramické topné desce. Důvodem byla snaha dosáhnout podmínek namáhání bližších reálné konstrukci, tedy teplotní namáhání pouze z jedné strany, nikoli ze všech, jak tomu bylo v případě klimatické komory. Postupně byly zkoušeny obálky z EPS a minerální vlny kolem vzorku na snížení tepelných ztrát bočními stěnami, vzorek byl taktéž obalen hliníkovou páskou, aby nedocházelo k úniku teplého vzduchu mezi rohy vzorku. Teploty při této zkoušce byly stejné jako v případě klimatické komory.

Ukázalo se, že vrcholy vzorků se nedeformují stejně, pravděpodobně díky závaží, které mělo zaručit rovnoměrné položení vzorku na desku, nicméně nebylo jej možno umístit přesně do středu vzorku. Z toho důvodu se vzorky většinou naklonily na jednu nebo dvě boční hrany a měřit rozměry stěn se ukázalo jako komplikované. Naopak střed spodní stěny vzorku (tzv. „hloubka kráteru“) se propadal u vzorků srovnatelně, poměrná deformace ve středu vzorku tedy byla měřitelná. Porovnat deformaci vzorků v klimatické komoře se vzorky na topné desce nicméně nebylo možné, protože v případě komory dochází k největšímu smrštění při teplotě nižší než 95 °C, v případě topné desky při teplotě 95 °C byl propad středu spodní strany ještě stále relativně malý.

Na topné desce byly porovnány dva druhy povlakové hydroizolace – dvě vrstvy asfaltového pásu a folie z měkčeného PVC se separační vrstvou z geotextilie

z polypropylenu. Výrazný rozdíl v deformacích vzorků na těchto dvou skladbách za 48 hodin při teplotě 90 °C či za 5 hodin při teplotě 95 °C nebyl pozorován.

Kvůli komplikaci s nerovnoměrnou deformací vzorku na topné desce bylo v metodice navržené v kapitole 4 uvažováno pouze s klimatickou komorou. Byly definovány podmínky prostředí při zkoušce, příprava zkušebních těles a způsob vyhodnocení.

Z provedených experimentů v kapitole 5 lze usuzovat, že navržená metodika je vhodná pro porovnání teplotní stability EPS výrobků. Bylo pozorováno, že teplotní odolnost vyjádřenou změnou rozměrů zkušebních těles před a po vystavení definovaným podmínkám není vhodné srovnávat, dokud tělesa nedosáhnou maximálního smrštění. To za 24 hodin při teplotě 95 °C ještě nenastává, při teplotě 100 °C za 24 hodin už však ano (respektive se deformace při 100 °C za 24 hodin velmi blíží té konečné – kdyby byla tělesa vystavena po dobu delší než 24 hodin, k dalšímu, leč obtížně měřitelnému smrštění, ještě může dojít).

Z tohoto důvodu měly desky EPS od dvou různých výrobců při zatěžovací teplotě 95 °C menší poměrnou deformaci ve srovnání se zbylými pěti deskami, při teplotě 100 °C však vykazaly smrštění srovnatelně. Na druhé straně deska C-100 měla při 95 °C největší poměrnou deformaci ze 7 desek, zatím co při 100 °C měla jen třetí nejmenší. Taktéž bylo pozorováno, že dokud nedojde ke konečné deformaci, poměrné deformace jednotlivých desek mají větší rozptyl hodnot (kolem 12 % při 95 °C ve srovnání s 8 % při 100 °C).

Jak lze pozorovat z grafů závislostí poměrné deformace na objemové hmotnosti, případně na pevnosti v tlaku při 10% stlačení, dokud nedojde za zvýšené teploty k uvolnění veškerého vnitřního napětí vneseného do materiálu nadouvadlem při výrobě, závislost mezi těmito dvěma, případně třemi, veličinami není. Při konečné deformaci závislost poměrné deformace na objemové hmotnosti nicméně zřetelná je, zejména když se do grafů promítlo smrštění desek EPS 150 s vyšší objemovou hmotností a menším smrštěním ve srovnání s deskami EPS 100.

7 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout metodiku zkoušení teplotní odolnosti izolačních systémů na bázi pěnových plastů ve skladbách střech, kde hrozí nebezpečí degradace vlivem přímého a odraženého slunečního záření. V teoretické části byly popsány nejčastěji používané materiály plnící funkci tepelné izolace, zejména polystyren. Stručně byly uvedeny také povlakové hydroizolace.

Metodika zkoušení teplotní stability pěnových plastů je popsána v kapitole 4 a byla navržena na základě zkoušek provedených v kapitole 3. Podle této metodiky byly provedeny tři experimenty v kapitole 5, kde byly srovnány tři desky EPS 100 od jednoho výrobce ale různého data výroby, sedm desek EPS 100 od různých výrobců a dvě desky EPS 150 od dvou výrobců pro srovnání s deskami EPS 100. Provedenými experimenty bylo potvrzeno, že navržená metodika umožňuje porovnávat teplotní stabilitu různých výrobků z EPS a že má smysl ověřovat jejich vlastnosti i při teplotách vyšších než 80 °C.

Na základě dosažených výsledků lze navrhnout následující možnosti dalšího výzkumu:

- Vyzkoušet další skladby materiálů ploché střechy nad tepelnou izolací na keramické topné desce.
- Zaměřit se na podrobnější studium chování EPS v teplotním intervalu 90-100 °C a na příčinu úbytku hmotnosti vzorků.
- Dlouhodobě sledovat průběh teplot a rozměrovou stabilitu EPS na experimentálním modelu simulujícím reálné podmínky na ploché střeše v blízkosti proskleného otvoru.
- Vyzkoušet dlouhodobě na experimentálním modelu více různých skladeb plochých střech.

Jako v případě jiných problémů – nejen v oboru stavebního inženýrství – je důležitým krokem prevence. Tedy i degradaci expandovaného polystyrenu ve skladbě střechy lze zabránit instalací vhodné tepelně-akumulační vrstvy. Například betonové dlažby (nejen na terasách) či vegetační vrstvy, které mají celou řadu jiných pozitivních vlastností.

8 Zdroje

- [1] VOLTNER, M. *Kam zmizel ten polystyren? Aneb degradace EPS ve skladbách plochých střech zvýšeným teplotním namáháním*. In: *DEKTIME: Sborník*. Praha: Atelier DEK, 2015, s. 96-98
- [2] ŽIDEK, O. *Analýza účinku koncentrace slunečního záření na degradaci tepelných izolací ve skladbách plochých střech* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2016 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?action=detail&zp_id=95800. Diplomová práce.
- [3] CHALOUPKA, K.; RYDLO P. *Izolační praxe 3: Ploché střechy a pěnový polystyren*. Kralupy nad Vltavou, 2016. Dostupné také z: http://www.epscr.cz/obj/232/Brozura_Ploche_strechy_a_EPS_23_2_16.pdf
- [4] MLEŽIVA, J. *Polymery – výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.
- [5] U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. *Toxicological profile for styrene*. Atlanta, Georgia, 2007. Dostupné také z: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp53.pdf>
- [6] Polystyrene. *Polymer Science Learning Centre* [online]. Hattiesburg, Mississippi: Department of Polymer Science, 2003 [cit. 2017-05-28]. Dostupné z: <http://www.pslc.ws/macrog/styrene.htm>
- [7] DROCHYTKA, R. *Plastické látky*. Brno: VUT Brno, 2007.
- [8] *ISOVER pro systémy plochých střech: Informace pro projektanty a realizační firmy*. Praha, 2015. Dostupné také z: <http://www.isover.cz/sites/isover.cz/files/assets/documents/prospekt-ploche-strechy-200.pdf>
- [9] RYDLO, P. *Dodržujte základní pravidla pro zateplování šedým polystyrenem*. In: *TZB-info* [online]. 2015 [cit. 2017-06-17]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/12722-dodrzujte-zakladni-pravidla-pro-zateplovani-sedym-polystyrenem>
- [10] EXTRUDED POLYSTYRENE FOAM ASSOCIATION. *Polystyrene-based Insulation board products*. Washington DC, 2015. Dostupné také z: http://www.xpsa.com/pdf/Comparison_of_XPS_and_EPS_Foam_Insulation_-_US.pdf
- [11] *Izolační praxe 1 - Vlastnosti EPS*. In: *Sdružení EPS ČR* [online]. Kralupy nad Vltavou: Sdružení EPS ČR, 2004 [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: http://www.epscr.cz/obj/232/Izolacni_praxe_1.pdf
- [12] FIGALLA, S. *Optimalizace mikrovlnné glycerolýzy síťovaných tuhých PU pěn pro využití recyklátu ve výrobě*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jaroslav Petruň, CSc.
- [13] MACHALA, D. *Návrh skladby ETICS využívající izolační jádro z pórobetonu*. Brno, 2011. 64 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc..
- [14] HEJTMÁNEK, P.; POKORNÝ M. *Požární hledisko kontaktních zateplovacích systémů dle ČSN 73 0810:2016*. In: *TZB-info* [online]. Fakulta stavební, ČVUT v Praze: Topinfo, 2016 [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/zateplovaci-systemy/14515-pozarni-hledisko-kontaktich-zateplovacich-systemu-dle-csn-73-0810-2016>

- [15] VÖRÖS, F. *Izolační praxe č. 12 - Snižování hořlavosti EPS izolací*. In: *Sdružení EPS ČR* [online]. Kralupy nad Vltavou: Sdružení EPS ČR, 1998 [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: [http://www.epscr.cz/obj/232/I.P.12 - snizovani horlavosti EPS izolaci.pdf](http://www.epscr.cz/obj/232/I.P.12_-_snizovani_horlavosti_EPS_izolaci.pdf)
- [16] *Isover EPS 100 Technický list*. Praha, 2016. Dostupné také z: <http://www.isover.cz/sites/isover.cz/files/assets/documents/tl-cz-isover-eps100-2016.pdf>
- [17] *BACHL Technický informační list*. Kralupy nad Vltavou, 2016. Dostupné také z: http://www.bachl.cz/media/files/BACHL_technicky_informacni_list_2016_PolyFR.pdf
- [18] VÖRÖS, F. *Izolační praxe č. 13 - Využití EPS odpadů s důrazem na systém ETICS*. In: *Sdružení EPS ČR* [online]. Kralupy nad Vltavou: Sdružení EPS ČR, 2016 [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: [http://www.epscr.cz/obj/232/Aktualizace_I.P.13 - Vyuziti EPS odpadu s durazem na system ETICS.pdf](http://www.epscr.cz/obj/232/Aktualizace_I.P.13_-_Vyuziti_EPS_odpadu_s_durazem_na_system_ETICS.pdf)
- [19] RANI; MANWIRI; SHIM, W. J.; JANG, Mi; HAN, G. M.; HONG, S. H. *Releasing of hexabromocyclododecanes from expanded polystyrenes in seawater -field and laboratory experiments*. *Chemosphere*. 2017, **185**(1), 798-805. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.042. ISSN 00456535. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045653517310858>
- [20] *Izolační desky z pěnového polystyrenu mají nové značení*. In: *Sdružení EPS ČR* [online]. Kralupy nad Vltavou: Sdružení EPS ČR, 2015 [cit. 2017-10-12]. Dostupné z: [http://www.epscr.cz/obj/916/TZ Sdruzeni EPS CR Izolacnich desky z penoveho polystyrenu maji nove znaceni.pdf](http://www.epscr.cz/obj/916/TZ_Sdruzeni_EPS_CR_Izolacnich_desky_z_penoveho_polystyrenu_maji_nove_znaceni.pdf)
- [21] BĚHÁLEK, L. *Polymery*. 1. Střední odborné učiliště Svitavy: publi.cz, 2014. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [22] PROKOPOVÁ, I. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [23] *Unifit 032 Technický list*. In: *Knauf Insulation* [online]. Praha: Knauf Insulation, 2015 [cit. 2017-10-13]. Dostupné z: <http://www.knaufinsulation.cz/sites/cz.knaufinsulation.net/files/technicky-list/Unifit-032.pdf>
- [24] *Kooltherm K5 Kontaktní fasádní deska*. In: *Kingspan Česká republika* [online]. Winterswilk: Kingspan Insulation B.V., 2017 [cit. 2017-10-13]. Dostupné z: <https://www.kingspan.com/cz/cs-cz/produkty/izolace/ke-stazeni/produktove-katalogy/produktovy-katalog-kooltherm-k5-kontaktni-fasadni>
- [25] BUBENÍK, J. *Možnosti využití lehkého kameniva na bázi pěnového skla pro výrobu novodobých stavebních materiálů: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních dílců. 2017. 60 s., 2 s. příloh. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Zach Ph.D.
- [26] FOAMGLAS® T3+. *Foamglas* [online]. Klášterec nad Ohří: PITTSBURGH CORNING ČR, 2017 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: <https://cz.foamglas.com/cs-cz/produkty/prehled-vyrobku-z-penoveho-skla-foamglas-a-prislusenstv/desky-z-penoveho-skla-foamglas/foamglas-t3>
- [27] *Technický list A500 NATURWOOL*. In: *Naturwool* [online]. Brumov: Naturwool, 2017 [cit. 2017-10-24]. Dostupné z: [https://www.naturwool.cz/ file/AMIfv97jTo4mkCszV1bwXBvrJeh3vBfzveiIBVqKqaT4yr18KQ-wDXfzxfdBZ89fvE4aQmHW5sxNLQvGugAfbJ351YuLV2T69Ffqs2i1W6AShAhNvYUDqtr_QKDzeC7Iv08tvu8MunkJTzTjxo3cukq3zi--T30lg/technicky-list_a500-naturwool.pdf](https://www.naturwool.cz/file/AMIfv97jTo4mkCszV1bwXBvrJeh3vBfzveiIBVqKqaT4yr18KQ-wDXfzxfdBZ89fvE4aQmHW5sxNLQvGugAfbJ351YuLV2T69Ffqs2i1W6AShAhNvYUDqtr_QKDzeC7Iv08tvu8MunkJTzTjxo3cukq3zi--T30lg/technicky-list_a500-naturwool.pdf)

- [28] PENNACCHIO, R.; SAVIO L.; BOSIA, D.; THIEBAT F.; PICCABLOTTO, G.; PATRUCCO, A.; FANTUCCI, S. Fitness: *Sheep-wool and Hemp Sustainable Insulation Panels*. *Energy Procedia*. 2017, **111**(1), 287-297. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.030. ISSN 18766102. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610217300528>
- [29] VYKYDAL, L. *Ploché střechy – 4. část. Hydroizolační fólie pro ploché střechy*. In: *Stavebnictví 3000* [online]. Hradec Králové: Vega, 2006 [cit. 2017-11-05]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/ploche-strechy-4-cast/>
- [30] SVAZ VÝROBCŮ ASFALTOVÝCH PÁSŮ V ČR. *Abeceda asfaltových izolací*. Praha: Svaz výrobců asfaltových pásů v ČR, 2016. ISBN 978-80-905563-0-0.
- [31] FICKER, T. *Aplikovaná fyzika (S) Modul 1: Vedení tepla ve stavebních konstrukcích*. Brno, 2008.
- [32] ŠŤASTNÍK, S. *Fyzika stavebních látek: Modul M01*. Brno, 2006.
- [33] HERNÁNDEZ-PÉREZ, I.; ÁLVAREZ, G.; XAMÁN, J.; ZAVALA-GUILLÉN, I.; ARCE, J.; SIMÁ, E. *Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components—A review*. *Energy and Buildings*. 2014, **80**(1), 81-105. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.05.008. ISSN 03787788. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778814003909>
- [34] SABER, H. et al. *Long-term hygrothermal performance of white and black roofs in North American climates*, *Building and Environment*, Vol. 50, 2012, p. 141–154.
- [35] BESIR, A; CUCE, E. Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, **82**(1), 915-939. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.106. ISSN 13640321. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117313680>
- [36] ROMA quick-assembly wall panel, type M. In: *ROMA Official website* [online]. Bittenwiesen: Romakowski, 2017 [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: http://www.roma-daemmsysteme.de/files/roma_files/5.Downloads/Downloads/2.Downloads/Downloads-englisch/Typenblaetter_und_Broschueren/Architectural_design.pdf
- [37] Isover EPS 70. In: *Isover Saint-Gobain* [online]. Praha 8 – Libeň: Saint-Gobain Construction Products CZ a.s, 2017 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: http://www.isover.cz/sites/isover.cz/files/assets/documents/eps_70_tl_cz.pdf
- [38] Isover EPS 200. In: *Isover Saint-Gobain* [online]. Praha 8 – Libeň: Saint-Gobain Construction Products CZ, 2017 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: http://www.isover.cz/sites/isover.cz/files/assets/documents/eps_200_tl_cz.pdf
- [39] Styrotrade Polystyren. In: *Styrotrade* [online]. Čakovičky: Styrotrade, 2008 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: https://www.stavbaonline.cz/media/documents/doc_products/2682_317.pdf
- [40] Technický list ISOSTIF VERCOP. In: *TEGOLA* [online]. Praha 9: Tegola Bohemia, 2009 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: <http://www.tegola.cz/download.php?id=1496>
- [41] Fyzikální vlastnosti, technický list Bachl. In: *Bachl* [online]. Modřice: Bachl, 2015 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: http://www.bachl.cz/media/files/Fyzikalni_vlastnosti_extrudovaneho_polystyrenu_XPS.pdf
- [42] Technický list puren® Protect. In: *Isover Saint-Gobain* [online]. Mnichov: Isover Saint-Gobain, 2013 [cit. 2017-12-18]. Dostupné z: http://www.isover.cz/sites/isover.cz/files/assets/documents/tl_cz_pir_protect.pdf

9 Seznamy

9.1 Seznam obrázků

Obrázek 1.1 - Poškozený EPS – Rodinný dům v Lázních Bohdaneč [1].....	9
Obrázek 1.2 - Poškozený EPS – Rodinný dům [1].....	10
Obrázek 1.3 - Poškozený EPS – Hala v Moravských Budějovicích [1].....	10
Obrázek 1.4 - Poškozený EPS – Atrium [3]	11
Obrázek 2.1 - Skladba plochých střech [2].....	12
Obrázek 2.2 - Polymerace styrenu [6]	15
Obrázek 2.3 - Dům ve Frenštátě pod Radhoštěm po požáru [15].....	17
Obrázek 2.4 - Závislost modulu pružnosti E_t a tažnosti ε_b amorfních termoplastů na teplotě [21].....	19
Obrázek 2.5 - Požární výšky objektů dle ČSN 73 0810 [14]	21
Obrázek 2.6 - Značení izolačních desek z pěnového polystyrenu [20]	23
Obrázek 2.7 - Srovnání struktury EPS a XPS [10]	24
Obrázek 2.8 - Rozdíl teploty povrchu bílého a šedého EPS [9]	24
Obrázek 2.9 - Sendvičový panel s jádrem z izolační pěny a s dvěma plechy se zámkem [37].....	25
Obrázek 2.10 - Obecná rovnice výroby polyuretanu [12]	26
Obrázek 2.11 – Obecná rovnice vzniku polyisokyanurátu [12]	26
Obrázek 2.12 - Deska z pěnového skla [26]	28
Obrázek 2.13 - Rozdělení povlakových hydroizolací [29]	30
Obrázek 2.14 - Příklad skladby vegetační střechy [35]	35
Obrázek 3.1 - Vzorky po zkoušce.....	38
Obrázek 3.2 - Vzorek vystavený teplotě 110 °C	39
Obrázek 3.3 - Zkouška různého umístění vzorků při zahřívání na 100 °C.....	40
Obrázek 3.4 - Nepravidelné zkroucení vzorku při zahřívání.....	41
Obrázek 3.5 - Vzorek po ukončení programu 2.....	43
Obrázek 3.6 – Keramická topná deska	46
Obrázek 3.7 - Vzorek před zkouškou (vlevo) a po zkoušce (vpravo)	47
Obrázek 3.8 - Vzorek při zkoušce (vlevo) a po zkoušce (vpravo)	47
Obrázek 3.9 - Vzorek při zkoušce (vlevo) a po zkoušce (vpravo)	48
Obrázek 3.10 - Pohled na vzorek EPS obalený hliníkovou páskou.....	49
Obrázek 3.11 - Zjednodušený řez vzorkem	49

Obrázek 3.12 - Přehled zkušebních vzorků po měření	50
Obrázek 3.13 - Vzorek z EPS položený na izolaci z asfaltových pásů	52
Obrázek 3.14 - Rozříznutý vzorek EPS po zkoušce č. 4	53
Obrázek 3.15 - Vlevo průběh zkoušky, vpravo výsledek	54
Obrázek 4.1 - Přehled měřených rozměrů na vzorku	56
Obrázek 5.1 - Přehled vzorků EPS 100 po vystavení zatěžovací teplotě 95 °C	62
Obrázek 5.2 - Přehled vzorků EPS 100 po vystavení zatěžovací teplotě 100 °C	62
Obrázek 5.3 - Přehled vzorků EPS 150 po vystavení zatěžovací teplotě 95 °C	67
Obrázek 5.4 - Přehled vzorků EPS 150 po vystavení zatěžovací teplotě 100 °C	68

9.2 Seznam tabulek

Tabulka 3.1 - Přehled prostředí v klimatické komoře	37
Tabulka 3.2 Přehled poměrných deformací a změn hmotnosti po vystavení určeným podmínkám	38
Tabulka 3.3 - Výsledky zkoušky různého umístění vzorků.....	41
Tabulka 3.4 - Přehled poměrných deformací a změn hmotností při cyklování a bez něj	46
Tabulka 3.5 - Vypočtené výsledky zkoušek	51
Tabulka 3.6 - Přehled def. podmínek zkoušky na topné desce	53
Tabulka 4.1 - Soubor teplotně-vlhkostních podmínek v komoře	56
Tabulka 5.1 - Poměrné deformace a změny hmotnosti desek z EPS 100 různého data výroby	58
Tabulka 5.2 - Přehled vlastností různých izolačních desek	59
Tabulka 5.3 - Přehled poměrných deformací a změn hmotností 7 různých EPS desek .	61
Tabulka 5.4 - Výsledné poměrné deformace vzorků z desek EPS 150	66

9.3 Seznam grafů

Graf 3.1 - Závislost poměrné deformace EPS na teplotě při relativní vlhkosti v rozmezí 60-90 %	39
Graf 3.2 - Poměrná deformace v čase	42
Graf 3.3 - Teplotní křivky programu 1 a 2	42
Graf 3.4 - Teplotní křivka programu 3	44
Graf 3.5 - Teplotní křivka programu 4	45

Graf 3.6 - Teplotní křivka programu 5	45
Graf 3.7 - Srovnání poměrných deformací vzorků po zkoušce v klimatické komoře a na topné desce.....	51
Graf 5.1 - Poměrné deformace EPS desek různého data výroby po vystavení def. podmínkám	59
Graf 5.2 - Závislost poměrné deformace různých desek EPS 100 na zatěžovací teplotě	63
Graf 5.3 - Závislost poměrné deformace na objemové hmotnosti při zatěžovací teplotě 95 °C	64
Graf 5.4 - Závislost poměrné deformace na objemové hmotnosti při zatěžovací teplotě 100 °C	64
Graf 5.5 – Závislost poměrné deformace na pevnosti v tlaku při 10% deformaci při zatěžovací teplotě 95 °C	65
Graf 5.6 - Závislost poměrné deformace na pevnosti v tlaku při 10% deformaci při zatěžovací teplotě 100 °C	65
Graf 5.7 - Závislost pevnosti v tlaku při 10% deformaci na objemové hmotnosti	66
Graf 5.8 - Srovnání 2 desek EPS 150 a jejich poměrné deformace po vystavení def. podmínkám	67
Graf 5.9 - Závislost poměrné deformace na objemové hmotnosti při zatěžovací teplotě 95 °C	68
Graf 5.10 - Závislost poměrné deformace na objemové hmotnosti při zatěžovací teplotě 100 °C	69

9.4 Seznam zkratk

EPS – Expandovaný pěnový polystyren

XPS – Extrudovaný pěnový polystyren

HBCD – Hexabromcyklododekan

ETICS – External thermal insulation composite system

VKZS – Vnější kontaktní zateplovací systém

PUR – Polyuretan

PIR – Polyisokyanurát

PVC-P – Měkčený polyvinylchlorid