



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

**STUDIUM CHOVÁNÍ IZOLAČNÍCH MATERIÁLŮ
NA BÁZI ORGANICKÝCH VLÁKEN
PO ZABUDOVÁNÍ DO KONSTRUKCE**

POSSIBILITIES OF IMPROVEMENT OF FIRE PROPERTIES OF INSULATION MATERIALS
BASED ON ORGANIC FIBERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Urbánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ ZACH, Ph.D.

BRNO 2019



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. Tomáš Urbánek
Název	Studium chování izolačních materiálů na bázi organických vláken po zabudování do konstrukce
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] CHYBÍK, J. Přírodní stavební materiály. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009. 272 s. ISBN978-80-247-2532-1.
- [2] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J. Zkoušení izolačních materiálů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 95 s. ISBN 80-214-2253-X
- [3] VAVERKA, J.; KOZEL, V.; LÁDYŠ, L.; LIBERKO, M.; CHYBÍK, J. Stavební fyzika 1, urbanistická stavební a prostorová akustika. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. 343 s. ISBN 80-214-1283-6.
- [4] ŠŤASTNÍK, S., ZACH, J., Stavební akustika a zvukoizolační materiály. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2002. 209 s. ISBN 80-214-2117-7.
- [5] KÜNZEL, H.M. Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters. PhD Thesis. Stuttgart: Fraunhofer Institute of Building Physics, 1995.
- [6] Slípková, A., Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken, Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2012.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Práce se bude věnovat studiu chování izolačních materiálů na bázi organických vláken po zabudování do konstrukce, z pohledu požární bezpečnosti. Cílem bude především navrhnout způsob zlepšení reakce na oheň těchto organických materiálů. Bude se jednat nejprve o rešerši v oblasti možností modifikace organických vláknitých izolantů pro dosažení zlepšení reakce na oheň. Dále pak se bude jednat o návržení vhodného způsobu úpravy vláken (případně izolantů) pro zlepšení jejich reakce na oheň. V konečné fázi se pak bude jednat o praktické ověření navržených opatření na laboratorních prototypových vzorcích a provedení klíčových experimentů minimálně v rozsahu zkoušek malým plamenem a SBI testu u vybrané nejlepší varianty. V závěru práce pak bude navržen ucelené technologický postup pro výrobu izolantů se zlepšenou reakcí na oheň a posouzení uplatnění takto modifikovaných výrobků na stavebním trhu.

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).

doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na modifikaci izolačních materiálů na bázi organických vláken z hlediska zlepšení jejich reakce na oheň po zabudování do konstrukce. Cílem je nalezení způsobu zlepšení reakce na oheň a dosažení alespoň třídy reakce na oheň D.

KLÍČOVÁ SLOVA

Izolační materiál, organické vlákno, požární bezpečnost, reakce na oheň, hoření, oheň, modifikace, retardéry hoření, aplikace, zkouška malým plamen, SBI test.

ABSTRACT

This work is focuses on the modification of organic fiber insulating materials in terms of their reaction to fire after installation into the construction. The target is to find a way to improve the reaction to fire and to at least reach the reaction to fire D.

KEYWORDS

Insulation materials, organic fiber, fire safety, reaction to fire, combustion, fire, modifications, flame retardant, application, test a small flame, SBI test.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Tomáš Urbánek *Studium chování izolačních materiálů na bázi organických vláken po zabudování do konstrukce*. Brno, 2018. 68 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Zach, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Studium chování izolačních materiálů na bázi organických vláken po zabudování do konstrukce* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2019

Bc. Tomáš Urbánek
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Studium chování izolačních materiálů na bázi organických vláken po zabudování do konstrukce* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2019

Bc. Tomáš Urbánek
autor práce

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Zachovi, Ph.D., Ing. Vítězslavovi Novákovi a Ing. Martinovi Sedlmajerovi, Ph.D. za jejich veškerý čas, cenné rady a odbornou pomoc během vypracování této práce.

Dále bych rád poděkoval své rodině a přítelkyni za pomoc a podporu při studiu.

Obsah

1 ÚVOD	10
2 TEORETICKÁ ČÁST	12
2.1 Tepelně izolační materiály	12
2.1.1 Rozdělení tepelně izolačních materiálů.....	12
2.1.2 Bavlněné vlákno.....	13
2.2 Požadavky na tepelně izolační materiály zabudované v konstrukci	15
2.2.1 Požární bezpečnost staveb.....	17
2.2.2 Tepelná ochrana budov	21
2.3 Princip hoření	22
2.3.1 Příčina vzniku plamene	25
2.3.2 Jevy probíhající během hoření.....	26
2.3.3 Rozklad celulózy vlivem zvýšené teploty	28
2.4 Retardéry hoření	30
2.4.1 Mechanismus retardace	31
2.4.2 Rozdělení retardérů hoření	33
2.4.3 Způsoby aplikací retardérů.....	38
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	40
3.1 Metodika práce.....	40
3.2 Použité materiály a přípravky	42
3.2.1 Izolační materiály.....	42
3.2.2 Přípravky pro snížení hořlavosti.....	42
3.3 Metodika přípravy zkušebních vzorků a těles	44
3.4 Metodika zkoušek.....	47
3.4.1 Zkouška zápalnosti	47
3.4.2 Zkouška jednotlivým hořícím předmětem	50
3.5 Provedení a výsledky zkoušek.....	52
3.5.1 Zkouška malým plamenem	52
3.5.2 Zkouška jednotlivým hořícím předmětem	55

3.6	Diskuze výsledků	55
4	ZÁVĚR.....	59
5	POUŽITÉ ZDROJE.....	61

1 ÚVOD

Díky výzkumu a modernizaci technologií nabízí stavebnictví stále novější materiály s lepšími vlastnostmi. Kromě samotných stavebních materiálů se tento trend týká i izolačních materiálů. Z důvodu stále se zvyšujících nákladů na vytápění, chlazení, ohřev vody a osvětlení je snaha co nejvíce snížit energetickou náročnost budov. Kromě modernizace zařízení pro vytápění objektu je důležité snížit tepelné ztráty konstrukce budovy a to použitím tepelně izolačního materiálu. Na trhu existuje řada tepelně izolačních materiálů, které mají rozdílné vlastnosti a vhodnost použití. Je proto velmi důležité zvolit správný typ tepelné izolace. [1]

Stavební průmysl se snaží držet aktuálního trendu a to, aby jejich výrobky byly co nejšetrnější k životnímu prostředí. Neustále se zvyšující produkce skleníkových plynů (v rámci ČR se jedná především o CO₂) má za následek globální oteplování nebo úbytek ozónové vrstvy. Problémem je i úbytek neobnovitelných zdrojů energie nebo změny klimatických podmínek. To jsou jedny z důvodů, proč ekologie vstupuje stále častěji i do tohoto odvětví průmyslu. Snaha o recyklaci, používání druhotných surovin nebo surovin na bázi obnovitelných zdrojů, se aplikuje i při výrobě tepelně izolačních materiálů. Jedním z těchto přírodních organických materiálů, který je použit v praktické části této práce, je bavlna. [2]

Cílem práce je především problematika požární bezpečnosti konstrukcí vyrobených izolantů na bázi organických vláken, konkrétně zlepšením reakce na oheň těchto izolantů. V rámci diplomové práce byla nejprve provedena rozsáhlá literární rešerše a byla navržena optimální metodika modifikace organických vláken s cílem zlepšit jejich reakci na oheň. V konečné fázi byla provedena praktická verifikace navržených opatření na vytvořených zkušebních vzorcích pomocí experimentálních měření. V závěru práce

pak byl navržen ucelený technologický postup pro výrobu izolanů se zlepšenou reakcí na oheň a posouzení uplatnění takto modifikovaných výrobků na stavebním trhu.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Tepelně izolační materiály

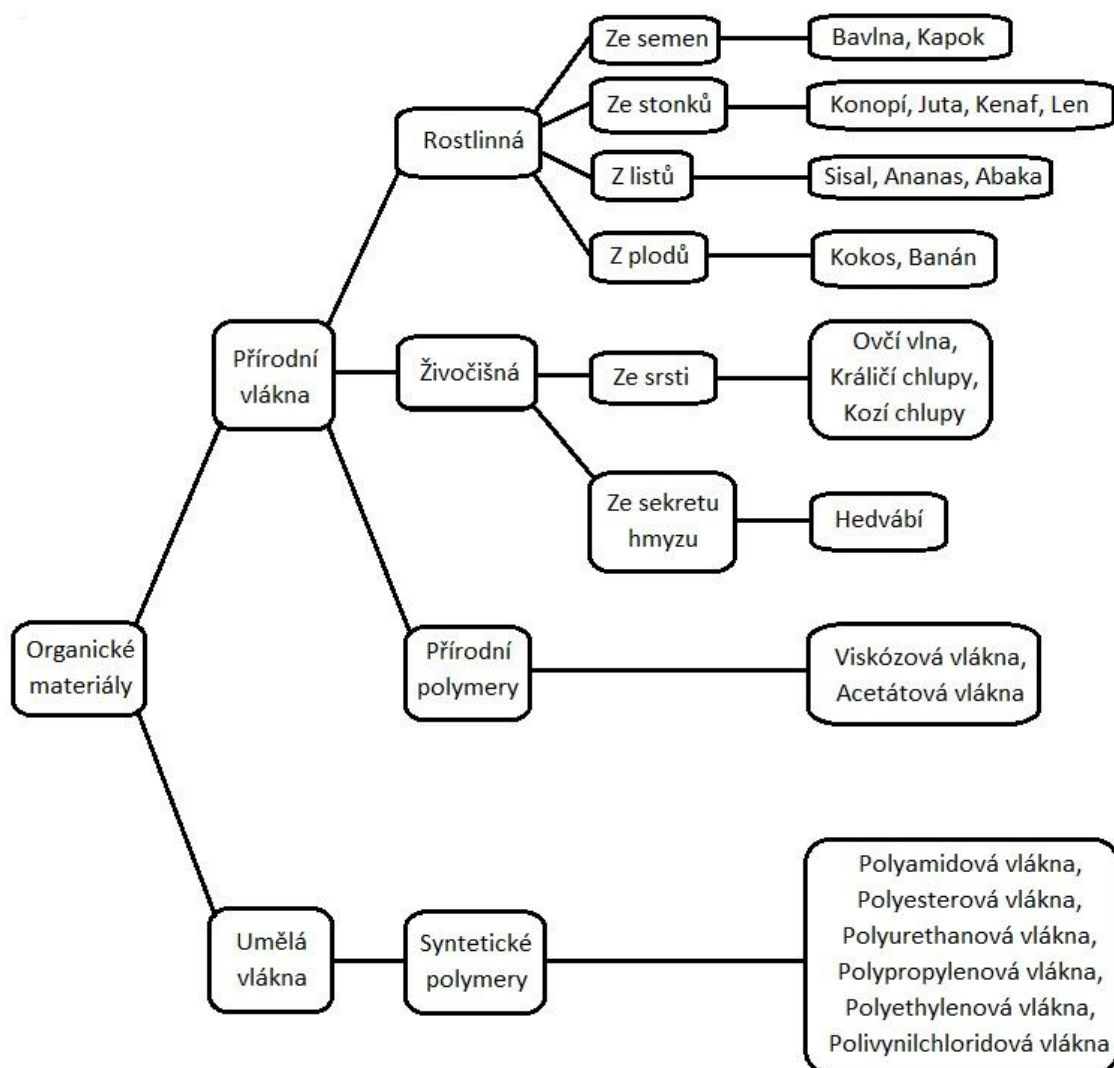
Na základě normy ČSN 73 0540-1: Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie můžeme označit stavební materiály za tepelně izolační, které výrazně omezují šíření tepla. Takto označené materiály vykazují hodnotu součinitele tepelné vodivosti maximálně 0,1 W/m·K. Jejich hlavním úkolem je zamezit úniku tepla z konstrukce v zimním a letním období naopak zamezit prostupu tepla dovnitř konstrukce, čímž výrazně přispívají ke snížení energetické náročnosti budov. [6, 7]

2.1.1 Rozdělení tepelně izolačních materiálů

Tepelně izolačních materiálů je velké množství a lze je rozdělit podle několika způsobů. Obecně je můžeme rozdělit na umělé a přírodní, které se dále dělí na minerální, rostlinné a živočišné. Dále je možné je rozdělit podle struktury (vláknité, pórovité, zrnité), nebo podle materiálu, ze kterého jsou vyrobeny (např. expandovaný polystyren, expandovaný perlit, minerální vlákna, ovčí vlna, rozvlákněná celulóza, sláma, konopná vlákna, bavlna atd.). V této práci nás zajímají především organické tepelně izolační materiály (rostlinná, živočišná a polymerní vlákna). Rostlinná vlákna se získávají z různých částí rostlin. Ze semen bavlníku se získává bavlna, ze stonků konopí konopná vlákna. Své využití mají i plody banánovníku nebo kokosové ořechy. Z listů agáve sisalového se vyrábí sisalové vlákno. U živočišných vláken má největší využití ovčí vlna nebo králičí srst. Své uplatnění má i trus, konkrétně sekret housenky bource morušového, který se používá při výrobě hedvábí. Polymerní vlákna se dělí na přírodní a syntetická. Jedná se o makromolekulární organické látky, kde se jednotlivé články řetězce opakují. Přírodní polymery se získávají modifikací celulózy. Příkladem jsou acetátová vlákna nebo kaučuk.

Mezi syntetické polymery patří například polyesterová, polyuretanová nebo polyamidová vlákna. [7, 8, 9, 26]

Pro praktickou část byla zvolena přírodní bavlněná vlákna, o kterých se řekne více v následující části práci.



Obr. 1 Schéma rozdělení organických vláken [11, 27]

2.1.2 Bavlněné vlákno

Bavlna je bílá měkká látka, která patří mezi přírodní rostlinné materiály. Roste na keřích zvaných bavlníky. Bavlněná vlákna rostou ze semen nacházejících se v tobolce. Ta po dozrání praskne a tím se uvolní bavlněná vlákna, která se sklízí ručně nebo mechanicky pomocí speciálních kombajnů

na bavlnu. Poté se z bavlny musí odstranit semena a následně se získaná vlákna roztřídí podle jejich velikosti. Bavlna vykazuje tepelně izolační a akustické vlastnosti. Kromě toho má velmi dobrou pevnost v tahu, která se vlhkostí zvyšuje (po namočení až o 20 %). Bohužel je však velmi náročná na pěstování. Pěstování je značně nevýhodné z hlediska ekonomického i ekologického. Několikrát do roka je třeba bavlníky postříkat přípravky proti škůdcům, plísním nebo plevelům. Proto se začala používat i recyklovaná bavlna pro výrobu izolačních materiálů. [7, 12, 13, 14, 16]

Kromě stavebního průmyslu se bavlna využívá nejvíce v textilním průmyslu. Najdeme ji ve více než 50 % vyrobeného textilu. Používá se pro výrobu běžných věcí (ručníky, utěrky apod.), ale i pro výrobky luxusních módních značek šatů a spodního prádla. I přesto že v současnosti existuje řada umělých vláken používaných v textilním průmyslu, bavlna stále patří mezi nejlevnější, nejkvalitnější a nejprodávanější materiály. [15]

První zmínka o pěstování bavlny je datována už 5 800 let př. n. l. ve střední Americe a 3 000 let př. n. l. v Číně a Indii. V současnosti jsou největšími pěstiteli bavlny USA, Čína, Indie, Brazílie a Egypt. Z počátku se bavlna sklízela ručně, od 2. poloviny 20. století se začaly používat speciální kombajny pro sklizeň bavlny. Poté, co tobolek na keři bavlníku dozrají, prasknou a uvolní se z nich bílé chomáčky bavlny. Ty se ručně nebo pomocí kombajnu sklídí a slisují do velkých bloků. Avšak před samotnou sklizní je nutné keře bavlníku postříkat chemickými defolianty z důvodu zbavení se listů. Dalším krokem při zpracování bavlny je odstranění bavlněných semen od bavlněných vláken. Z počátku se tato činnost prováděla ručně a byla fyzicky velmi náročná. Dnes se používá speciální odzrňovací stroj. Následně se bavlna opět slisuje do velkých balíků a přepraví se do přádelny. Zde se jednotlivé balíky bavlny nejprve rozvlíní pomocí rozvolňovacího stroje. Dále se bavlna čistí, suší a třídí podle tloušťky vláken. Poté prochází čechradlem a potěracím

strojem, který vytvoří bavlněné rouno. Další zástavkou teď už vytvořeného bavlněného rouna je mykací stroj. Tento stroj se dvěma kotouči a lištami s několika hroty čistí a natahuje jednotlivá vlákna. Vytváří se tak tenká pavučina, která se mění na prameny bavlny. Ty putují do posukovacího stroje, kde se z šesti jednotlivých pramenů zformuje jeden jediný rovnoměrné tloušťky. Posledním procesem je spřádání, které má tři fáze. V první fázi se jednotlivé prameny přeměňují v přást, který je lehce zakroucen a navíjen na cívku. Ve druhé fázi je přást znovu předpřádán, aby dosáhl dostatečné jemnosti a pravidelnosti pro závěrečné dopřádání ve třetí fázi. V poslední třetí fázi je přást znovu dopřádán pro dosažení požadované tloušťky. Pro zamezení trhání se přást opět mírně zakrucuje. Výsledkem všech výše popsaných procesů je příze (neboli nit), která se následně zpracovává na tkalcovském stavu, kde se z nití utkají látky. [15, 19, 20]

Z chemického hlediska bavlna obsahuje téměř 90 % celulózy, dále vodu, bílkoviny, tuky a vosky. Proto je tolik citlivá na tepelný rozklad a spalování. To sebou přináší i možnost vzniku požáru. Ke snížení rizika vzniku požáru a jeho následného šíření se používají zpomalovače (retardéry) hoření pro zabránění nebo alespoň zpomalení hoření bavlny fyzikálními, chemickými nebo kombinací fyzikálně-chemickými metodami. [17]

2.2 Požadavky na tepelně izolační materiály zabudované v konstrukci

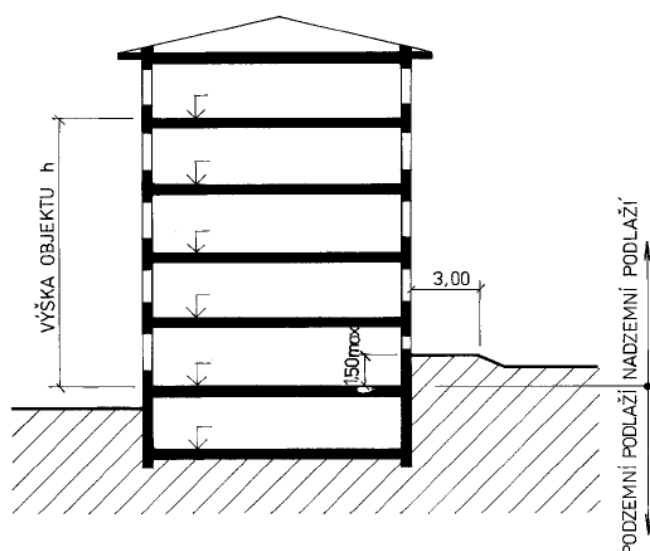
Na základě vyhlášky č. 268/2009 Sb., O technických požadavcích na stavby ve znění pozdějších předpisů musí stavba a všechny použité materiály pro její výstavbu splňovat základní požadavky na bezpečnost a vlastnosti staveb. Tyto základní požadavky jsou uvedeny ve třetí části v § 8. Konkrétně se jedná o: [38]

- **mechanická odolnost a stabilita** – navržení stavby tak, aby nedošlo k deformaci, případně destrukci stavby nebo jejích částí,
- **požární bezpečnost** – zabezpečení stavby proti vzniku požáru; v případě vzniku samotného požáru musí být zajištěna co nejdéle stabilita stavby pro možnost evakuace osob a zvířat, co nejpomalejší šíření požáru a omezení produkce kouře a nedýchatelných plynů,
- **ochrana zdraví osob a zvířat, zdravých životních podmínek a životního prostředí** – navržení stavby tak, aby nedocházelo k ohrožení života a zdraví osob a zvířat uvnitř stavby nebo v jejím okolí, včetně životního prostředí; zároveň stavba musí odolávat nepříznivému působení prostředí i škodlivých látek,
- **ochrana proti hluku** – stavba musí dostatečně chránit zdraví osob a zvířata proti působení hluku a vibracím; zároveň zajišťuje dostatečně klid prostředí pro pobyt osob a zvířat včetně okolních staveb a pozemků,
- **bezpečnost při užívání** – stavba musí být navržena tak, aby hlavní domovní komunikace byly dostatečně velké pro přepravu předmětů a bezpečný pohyb po objekt,
- **úspora energie a tepelná ochrana** – navržení a provedení stavby musí být takové, aby spotřeba energií byla co nejnižší a energetická náročnost budovy byla co nejmenší. [38]

V této práci nás budou nejvíce zajímat požadavky a vlastnosti staveb na požární bezpečnost a také úspora energie a tepelná ochrana. [38]

2.2.1 Požární bezpečnost staveb

Jedním z důležitých požadavků při výstavbě staveb je požární bezpečnost. Vyhláška č. 23/2008 Sb. o technických podmínkách požární ochrany staveb ve znění pozdějších předpisů uvádí technické podmínky návrhu, provedení a užití stavby. Jedná se například o navrhování a umístění stavby, rozdělení na požární úseky, stanovení požárního rizika, stupně požární bezpečnosti nebo požární odolnosti stavební konstrukce. V případě všeobecných požadavků na požární odolnost staveb je tu norma ČSN 73 0810: Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení. Tato norma upřesňuje podmínky použití stavebních materiálů a výrobků podle jejich třídy reakce na oheň. V případě zateplovacích soustav, které se skládají z několika dílčích výrobků (např. ETICS), se posuzují v závislosti na výšce objektu jako celek. [39, 4]



Obr. 2 Schéma výšky objektu [18]

U jednopodlažních budov s požární výškou 0 m musí být použity materiály a výrobky třídy reakce na oheň alespoň E. Tepelně izolační materiály u stavebních objektů s požární výškou do 12 m (včetně) musí vykazovat třídu reakce na oheň alespoň E. Zároveň je podmínkou, aby celá tepelně izolační

soustava splňovala podmínky třídy reakce na oheň alespoň B a šíření plamene po povrchu stavební konstrukce bylo nulové. [4]

Použité stavební materiály pro vnější zateplení stavebních objektů s požární výškou 12,0 – 22,5 m musí splňovat požadavky pro stavební objekty s požární výškou do 12 m. Musí být použity tepelně izolační materiály, které jako celek vykazují třídu reakce na oheň A1 nebo A2 v místech vnějšího schodiště a pavlače sloužící jako únikové cesty, v místech průjezdu a průchodů, spodní strana horizontálních konstrukcí (např. balkóny, lodžie apod.), mezi jednotlivými stavebními objekty, okolí otvorů (např. okna, dveře apod.) a vnitřních schodišť. U střešních konstrukcí s přesahující římsou je nutné pro omezení šíření plamene do střešní konstrukce chránit spodní stranu přesahující římsy tepelně izolačními materiály třídy reakce na oheň A1 nebo A2 minimální tloušťky 25 mm. Ve všech případech uvedených v tomto odstavci lze provést alternativní řešení a to použití ucelené soustavy tepelně izolačních materiálů kontaktně spojených po celé ploše vyhovující požadavkům třídy reakce na oheň B s krycí vrstvou A1 nebo A2 tloušťky minimálně 25 mm. [4]

V případě vnějšího zateplení stavebních objektů s požární výškou větší než 22,5 m je nutné použít ucelenou soustavu tepelně izolačních materiálů vykazující třídu reakce na oheň A1 nebo A2. Totéž platí i pro stavební materiály vnějšího zateplení v případech nekontaktního spojení tepelně izolačních materiálů s povrchem konstrukce u stavebních objektů s požární výškou 0 – 22,5 m. [4]

Třída reakce na oheň se stanovuje na základě splnění požadavků stavebních výrobků podle normy ČSN EN 13501-1+A1: Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků

zkoušek reakce na oheň. Podle této normy můžeme zatřídit výrobky do tříd F, E, D, C, B, A2 a A1 od nejvíce hořlavých až po nehořlavé. [3]

- **Třída F** – na materiály zařazené do této třídy reakce na oheň nejsou kladeny žádné požadavky; patří sem materiály nevyhovující požadavkům zkoušky dle ČSN EN ISO 11925-2 (Zkouška malým zdrojem plamene) pro zařazení do třídy reakce na oheň E. [3]
- **Třída E** – pro zařazení do této třídy reakce na oheň musí materiály splnit požadavek zkoušky dle ČSN EN ISO 11925-2 (Zkouška malým zdrojem plamene), kdy nesmí dojít k rozšíření plamene při 15 s působení od místa zdroje plamene o více než 150 mm (včetně), a to po dobu 20 s od začátku působení zdroje plamene. [3]
- **Třída D** – materiály zařazené do této třídy reakce na oheň musí splnit hned 2 podmínky. Nejprve musí vyhovět požadavkům zkoušky dle ČSN EN ISO 11925-2, kdy nesmí dojít k rozšíření plamene při 30 s působení od místa zdroje plamene o více než 150 mm (včetně), a to po dobu 60 s od začátku působení zdroje plamene. Druhou podmínkou je vyhovění požadavku zkoušky dle ČSN EN 13823 (Zkouška jednotlivým hořícím předmětem, tzv. SBI test). V průběhu této zkoušky se měří rychlost růstu intenzity hoření, která nesmí překročit hodnotu 750 W/s. [3]
- **Třída C** – materiály patřící do této třídy reakce na oheň musí vyhovět stejným požadavkům, jak materiály zařazené do třídy reakce na oheň D. V případě požadavku podle zkoušky ČSN EN 13823 (Zkouška jednotlivým hořícím předmětem) je hodnota rychlosti růstu intenzity hoření, kterou nesmí materiál

překročit, snížena na 250 W/s. Dále nesmí docházet k horizontálnímu šíření plamene po povrchu k hraně vzorku a celkové množství uvolněného tepla nesmí překročit hodnotu 15 MJ. [3]

- **Třída B** – požadavky na materiály pro zařazení do této třídy reakce na oheň jsou stejné, jako v případě třídy reakce na oheň C, jen s přísnějšími hodnotami. Intenzita hoření nesmí přesáhnout hodnotu 120 W/s a celkové množství uvolněného tepla nesmí překročit hodnotu 7,5 MJ. I zde platí, že nesmí docházet k horizontálnímu šíření plamene po povrchu směrem ke hraně vzorku. [3]
- **Třída A2** – v této třídě reakce na oheň jsou zahrnuty materiály splňující požadavky třídy reakce na oheň B společně s dalšími požadavky. Jedním z dalších požadavků je zkouška podle ČSN EN ISO 1716 (Stanovení spalného tepla), kdy hodnota spalného tepla nesmí překročit hodnotu 3,0 MJ/kg. Alternativou je splnění požadavků zkoušky podle ČSN EN ISO 1182 (Zkouška nehořlavosti), kdy celkový nárůst teploty ΔT nesmí být vyšší jak 50 °C, úbytek hmotnosti zkušebního tělesa nesmí být vyšší jak 50 % a celková doba trvalého plamenného hoření nesmí být více jak 20 s. Tyto podmínky platí pro stejnorodé i pro nestejnorodé výrobky. [3]
- **Třída A1** – pro zařazení do této třídy reakce na oheň musí stavební výrobky splňovat následující požadavky. Stejnorodé výrobky musí vyhovět požadavkům zkoušky podle ČSN EN ISO 1716 (Stanovení spalného tepla), kdy hodnota spalného tepla nesmí překročit hodnotu 2,0 MJ/kg. Zároveň musí splnit požadavky podle ČSN EN ISO 1182 (Zkouška nehořlavosti),

kdy celkový nárůst teploty ΔT nesmí být vyšší jak 50 °C, úbytek hmotnosti zkušebního tělesa nesmí být vyšší jak 50 % a nesmí vykazovat trvalé plamenné hoření. Nestejnorodé výrobky musí vyhovět stejným požadavkům podle zkoušky ČSN EN ISO 1716 (Stanovení spalného tepla). Pokud se množství spalného tepla nestanovuje na hmotnost materiálu, ale na jeho plochu, je nutné splnit několik dalších požadavků podle ČSN EN 13823+A1 (Zkouška jednotlivým hořícím předmětem). Intenzita hoření nesmí přesáhnout hodnotu 20 W/s a celkové množství uvolněného tepla nemůže překročit hodnotu 4 MJ. Dále nesmí docházet k horizontálnímu šíření plamene po povrchu směrem ke hraně vzorku, rychlost vývinu kouře musí být nižší než 30 m²/s² a celkové množství vyvinutého kouře za 600 s nesmí překročit hodnotu 50 m². Posledním požadavkem je, aby nedocházelo ke tvorbě plamenně hořících částicím (kapkám) během prvních 600 s zkoušky. [3]

Doplňkovou klasifikací pro jednotlivé třídy reakce na oheň je klasifikace podle vývinu kouře (s1, s2, s3) a klasifikace podle plamenně hořících částic kapek/částic (d0, d1, d2). [3]

2.2.2 Tepelná ochrana budov

Požadavky na materiály pro tepelnou ochranu budov jsou uvedeny v normě ČSN 73 0540-2: Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky. Dodržením těchto tepelně technických požadavků se zvyšuje prevence proti tepelně technickým vadám a poruchám budov, ochrana zdraví a zdravých životních podmínek, zajišťuje se tepelná pohoda uvnitř budovy včetně optimálního stavu vnitřního prostředí pro užívání. Avšak dodržením

předepsaných požadavků je základ co nejnižší energetické náročnosti budovy.

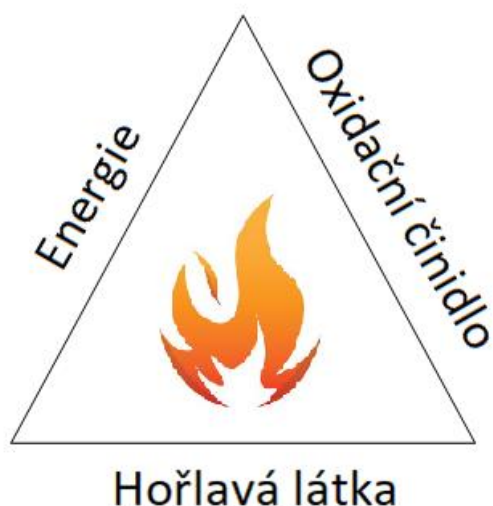
[5]

- **Šíření tepla konstrukcí a obálkou budovy**
 - Nejnižší vnitřní povrchová teplota konstrukce
 - Součinitel prostupu tepla
 - Průměrný součinitel prostupu tepla
 - Lineární a bodový činitel prostupu tepla
 - Pokles dotykové teploty podlahy
- **Šíření vlhkosti konstrukcí**
 - Zkondenzovaná vodní pára uvnitř konstrukce
 - Roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry uvnitř konstrukce
- **Šíření vzduchu konstrukcí a budovou**
 - Průvzdušnost
 - Větrání místností
- **Tepelná stabilita místnosti**
 - Pokles výsledné teploty v místnosti v zimním období
 - Tepelná stabilita místnosti v letním období [5]

2.3 Princip hoření

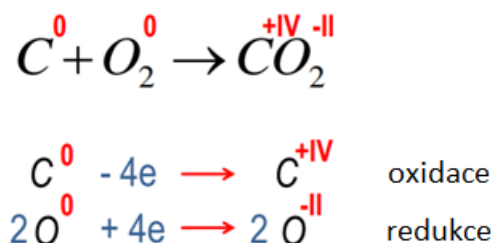
Z fyzikálně chemického hlediska můžeme označit hoření za exotermní reakci, při které dochází k rozkladu materiálu za vzniku tepla, světla a zplodin hoření. Aby mohla tato reakce nastat, musí být splněny tři základní podmínky. První podmínka je přítomnost hořlavé látky (hořlaviny). Při působení tepla na hořlavou látku dochází k uvolňování hořlavých plynů a páry. Pokud je dosaženo určité koncentrace, která se smísí v prostředí s oxidačním činidlem (druhá podmínka), vytváří se hořlavá směs. Nejběžnějším oxidačním činidlem je vzdušný kyslík. Třetí podmínkou je dodání dostatečné energie

(zdroj zapálení) hořlavé směsi, kdy dojde k zahájení procesu hoření. Všechny tyto podmínky lze souhrnně nazvat jako trojúhelník hoření. Pokud nejsou splněny všechny tři podmínky, nedojde k reakci a tedy k samotnému hoření. Tohoto principu využívají i jednotky požární ochrany, které se snaží při likvidaci požáru jednu z těchto podmínek hoření odstranit. [21]



Obr. 3 Požární trojúhelník

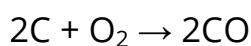
Princip hoření můžeme vyjádřit i pomocí chemické rovnice (Obr. 4). Během redoxní reakce dochází k oxidaci i redukci zároveň. Dochází k zániku a tvorbě nových vazeb mezi atomy. V průběhu oxidace dochází u částic k odevzdání elektronů a při redukci naopak k přijímání elektronů. Oba děje probíhají současně. [22]



Obr. 4 Chemická reakce hoření [22]

Proces hoření můžeme rozdělit na plamenné hoření (stejnorodé) a hoření žhnutím (nestejnorodé). Látky, u kterých dochází k plamennému hoření (především kapaliny a hořlavé plyny), se vlivem působení tepla mění v plyny a páry. Následně ve směsi s kyslíkem hoří. V případě hoření žhnutím nedochází k odpařování látek, ale hoření probíhá přímo na povrchu hořlavé pevné látky za přítomnosti vysoké teploty. I v tomto případě je nutná přítomnost kyslíku. Typickým příkladem tohoto typu je hoření uhlí nebo koksů. [23]

Z pohledu rozdílných podmínek můžeme proces hoření rozdělit na dokonalé a nedokonalé. Dokonalé hoření se vyznačuje tím, že při něm nevznikají zplodiny, které jsou schopny dalšího hoření. Důležitým faktorem je přítomnost dostatečného množství vzduchu. Během tohoto typu hoření vzniká oxid uhličitý (Obr. 4) a vodní páry. V případě nedokonalého hoření vzniká oxid uhelnatý (Obr. 5). Při spalování vznikají zplodiny, které jsou schopny dalšího hoření. V tomto případě je zde nedostatečná přítomnost vzduchu během hoření. [23, 24]



Obr. 5 Vznik oxidu uhelnatého

Speciálním případem hoření je explozivní hoření. Jedná se o velmi rychlou fyzikálně chemickou reakci formou výbuchu, kdy dochází k okamžitému uvolnění velkého množství energie. Podle rychlosti oxidace rozlišujeme na samotné explozivní hoření a detonaci. Rychlost šíření explozivního hoření nepřevyšuje rychlost zvuku ($1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). V případě detonace dochází k šíření rychlostí vyšší, než je rychlost zvuku. Zároveň tlaková vlna dosahuje až dvojnásobně vyšší hodnoty tlaku, než v případě explozivního hoření. [24]

Co přesně se odehrává během procesu hoření lze vysvětlit pomocí dvou hlavních teorií, a to peroxidové a řetězové. Podle peroxidové teorie dochází během zahřívání hořlavé látky k rozpadu molekul na atomy a radikály. Je to způsobeno tím, že vlivem zvyšování teploty (dodáním energie) se jednotlivé vazby v molekule oslabují a po dosažení určité energetické hladiny dochází k jejich rozpadu. Zároveň jsou i aktivovány molekuly kyslíku, které se snadno slučují s hořlavými látkami. Na základě toho vznikají hydroperoxydy a peroxydy (primární produkty oxidace). Jedná se však pouze o počáteční dobu oxidace. Tyto primární produkty jsou citlivé na průběh zvyšování teploty, proto se snadno rozkládají a vznikají nové látky nebo radikály. Řetězová teorie navazuje a spíše doplňuje peroxidovou teorii. Dokazuje vytváření aktivních částic (radikálů) způsobující průběh řetězové reakce vlivem tepelného rozkladu hydroperoxidů a peroxydů. [21, 23]

2.3.1 Příčina vzniku plamene

Nejčastější a nejběžnější hořlavou látkou jsou organické látky (dřevo, rostlinná a živočišná vlákna, paliva). Běžně se vyskytují společně s oxidačními činidly (kyslík, fluor, chlór atd.) a přesto za běžných teplot nehoří. Jedním z důvodů je samotná rychlost oxidace hořlavých látek. Ta všehovšudy probíhá, ovšem její reakční rychlost je velmi malá. Za běžných podmínek je tedy nereálné, aby došlo k procesu hoření. Je proto nutné dodat větší množství energie. Dalším důvodem, za těchto běžných podmínek, je zdánlivá (nepravá) rovnováha systému hořlavá látka – kyslík. Nepravá rovnováha z toho důvodu, že může dojít k její narušení zvýšením teploty. Tím dojde velmi rychle k odstartování oxidačně-redukční reakce spojené s uvolněním tepla a světla (hoření). Prává rovnováha nastane až po úplném spálení organické látky, která se přemění na oxid uhličitý a vodu. Tyto dvě sloučeniny už dále nereagují s kyslíkem a nastává skutečná (pravá) rovnováha systému oxid uhličitý a voda – kyslík. [21]

Každá hořlavá látka má určitou hořlavost. Ta je dána mírou schopnosti hořlavé látky slučovat se s kyslíkem ve volném stavu nebo ve stavu chemicky vázaném ve sloučenině. Výsledkem těchto slučovacích procesů (oxidací) jednotlivých prvků v hořlavé látce s kyslíkem jsou jejich oxidy. Na základě toho, jak snadno tyto prvky tvoří oxidy, se jednotlivé prvky rozdělují na hořlavé a nehořlavé. U nehořlavých prvků vůbec nedochází ke tvorbě oxidů. Hořlavé prvky naopak oxidy tvoří a dochází přitom ke tvorbě velkého množství energie (v tomto případě tepla). V případě sloučenin je hořlavost ovlivněna i počtem a hmotností nehořlavých prvků v dané sloučenině. Čím vyšší hodnota, tím více hořlavost sloučeniny klesá. [21]

Kromě samotné míry schopnosti slučování s kyslíkem je hořlavost látek ovlivněna i velikostí částic, modifikací, odlišným množstvím vnitřní energie a skupenstvím. Nejvyšší slučovací rychlost mají plynné látky. Kapalné látky mají slučovací rychlost nižší a nejmenší slučovací rychlost mají pevné látky. [21]

2.3.2 Jevy probíhající během hoření

Během procesu hoření, tedy oxidačně-redukční reakci, se odehrává několik doprovodných jevů. Jedním z nich je přenos tepla. Během hoření vzniká teplo, které se nehromadí, ale naopak se šíří do okolí pomocí proudění, vedení a sálání. Tepelný přenos prouděním probíhá pomocí ohřátého kouře a zplodin hoření. Nepodporuje samotné hoření, avšak může založit nová ohniska během požáru. Přenos tepla vedením souvisí s tepelnou vodivostí materiálu a týká se zejména pevných látek. Vlivem hoření se zvýší jejich teplota, která může způsobit šíření plamene. Třetím způsobem přenosu tepla je sálání. Teplo se přenáší z největší části do všech směrů okolí a z menší části zpět do místa zdroje hoření. Takto přenesené teplo ohřívá okolní materiál. Pokud dojde k dosažení teploty vznícení, okolní materiál se zapálí. [24]

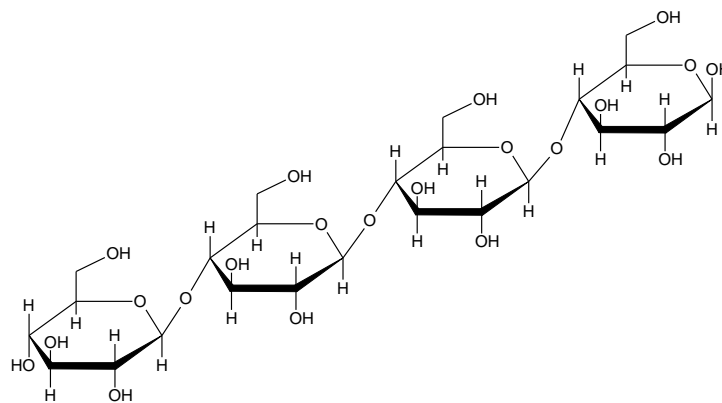
Hoření je dále doprovázeno světelným zářením celého vlnového spektra. Podmínkou je existence plamenného hoření. [24, 25]

Třetím jevem, který může doprovázet hoření, je plamen. Ten se vyskytuje u hořlavých látek, u kterých dochází během hoření k uvolnění plynů a páry. V případech, kdy k tomu nedochází (některé pevné látky), se vyskytuje pouze bezplamenné hoření (žhnutí, doutnání). Nejčastějším případem, kdy hoření probíhá, je plynná fáze. Tedy i u pevných látek, které uvolňují hořlavé plyny. Samotný plamen můžeme rozdělit podle několika kritérií. Prvním z nich je podle způsobu, jakým se připravuje plynná směs. Pokud je hořlavá látka s oxidačním činidlem smíchána předem, jedná se o kinetický plamen (např. výbuch plynu). U difúzního plamene dochází k promíchání v průběhu hoření (např. hoření kapaliny). Plamen můžeme hodnotit i podle toho, zda se ve směsi šíří (přemísťuje se v prostoru). Pokud ano, jedná se o nestacionární plamen. V opačném případě, tedy pokud je na stejném místě, se jedná o stacionární plamen. Dále můžeme plamen rozdělit na turbulentní, kde vznikají různé víry, mění se rychlost a směr proudění částic a tedy i samotného plamene. Opakem je pak laminární plamen, kde nejsou viditelné žádné víry, a směr proudění plamene je rovnoběžný. Posledním kritériem, jak můžeme plamen rozlišit, je podle oxidace uhlíku. Nesvítivý plamen vzniká tehdy, pokud je více než 50 % kyslíku obsaženo v hořlavé látce a ten oxiduje s uhlíkem ještě před pásmem hoření. Pokud koncentrace kyslíku je menší jak 50 % a oxidace s uhlíkem probíhá až v pásmu hoření, dochází ke žhnutí (svícení) uhlíku, což představuje svítivý plamen. Jestliže není přítomen téměř žádný kyslík a koncentrace uhlíku je větší než 60 %, nestihne proběhnout oxidace kyslíku s uhlíkem ani v pásmu hoření. Uhlík odchází v podobě sazí a jedná se o čadivý plamen. [24, 25]

Posledním jevem, který během hoření nastává je produkce zplodin hoření. Nejedná se jen o pevné zuhelnatělé částice, ale i o plynné látky, které mohou být pro lidský organismus velmi nebezpečné a při vyšších koncentracích i smrtelné. Nejběžnějším zástupcem zplodin je oxid uhelnatý (CO), který vždy vzniká při hoření. Jedná se o bezbarvý plyn bez zápachu, který je lehčí než vzduch. Vzniká při nedokonalém spalování. Nebezpečný pro lidský organismus je tím, že se váže snadněji na červené krvinky, než kyslík (ten se poté nemůže vázat). Lidský organismus je proto nedostatečně okysličen a důsledkem toho upadá do bezvědomí. Pokud mu není poskytnut čistý kyslík, dochází během krátké doby k úmrtí. Koncentrace CO ve vzduchu je nebezpečná už od hodnoty 0,05 %. Při překročení hodnoty 1 % může dojít k bezvědomí a následné smrti. Dalším typickým produktem hoření je oxid uhličitý (CO₂). Opět se jedná o bezbarvý plyn bez zápachu, avšak je těžší než vzduch. Vzniká především při dokonalém spalování hořlavých látek obsahující velké množství uhlíku. Používá se pro hašení, jelikož se řadí mezi nehořlavé plyny. Při koncentraci 0,03 % se běžně vyskytuje ve vzduchu. Pokud je koncentrace 5 % a více, stává se nebezpečným pro lidský organismus. Zapříčiní bolest hlavy, závrať a zrychlené dýchání, díky kterému se dostane do organismu větší množství dalších produktů hoření (např. CO). Nejnebezpečnější jsou tzv. ultrajedy. Jedná se o chemicky modifikované látky (např. PVC), které mohou vyvolat už ve velmi malém množství neléčitelné nemoci nebo dokonce smrt. [24, 25]

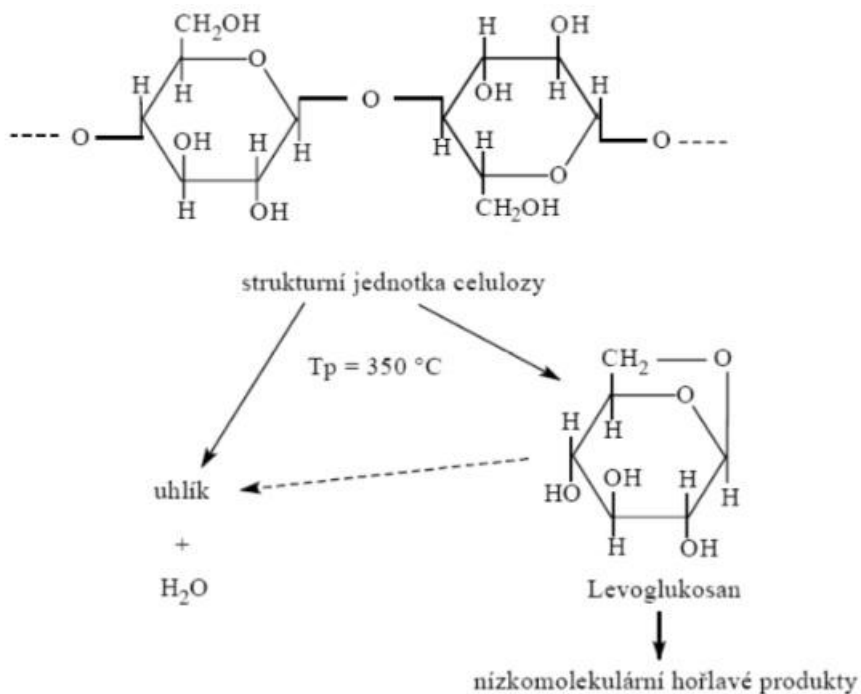
2.3.3 Rozklad celulózy vlivem zvýšené teploty

Jak už bylo zmíněno výše, nejběžnější a nejčastější hořlavou látkou je organický materiál. Přírodní vlákna (zejména rostlinná), ale i vlákna ze syntetických polymerů, která se používají pro výrobu tepelně izolačních materiálů, obsahují ve své struktuře značný podíl celulózy (Obr. 6). [28]

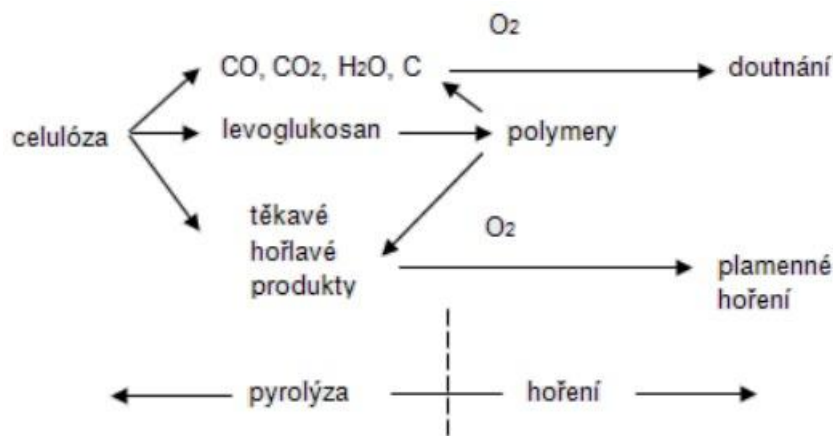


Obr. 6 Schéma strukturního vzorce celulózy

Pokud dochází u materiálu ke zvyšování teploty, tak při teplotě okolo 350 °C nastává rozklad celulózy. Dochází k nevratným změnám, během kterých se vytváří hořlavé těkavé látky (např. alkoholy, aldehydy), která se za přítomnosti kyslíku během spalování oxidují na oxid uhličitý a páru. Dále se vytváří hořlavé plyny (např. CO, metan) a samotný oxid uhličitý s vodní párou (Obr. 7 a 8). [28]

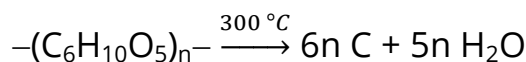


Obr. 7 Schéma 1 tepelného rozkladu celulózy [29]

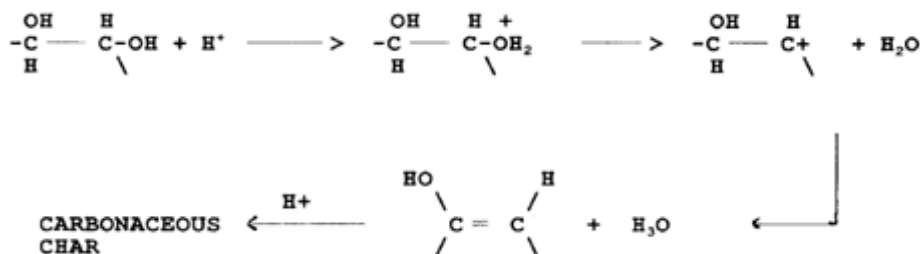


Obr. 8 Schéma 2 tepelného rozkladu celulózy [30]

Během procesu retardace celulóзовých vláken se nejvíce využívá procesu zuhelnatění (zvýšení produkce uhlíku). Jedná se o úplnou dehydrataci celulózy, které se přemění na uhlík a vodu. (Obr. 9 a 10).



Obr. 9 Reakce rozkladu celulózy za vzniku zuhelnatělých částí [30]



Obr. 10 Podrobný mechanismus reakce vzniku zuhelnatělých částí [30]

2.4 Retardéry hoření

Mezi retardéry hoření se řadí všechny látky, které přispívají ke zlepšení tepelné odolnosti materiálu. Jde o sloučeniny organického i anorganického původu. Každý retardační přípravek působí různým způsobem (mechanismem) retardace. Pokud retardér hoření funguje správně, dochází ke zpomalení nebo dokonce k úplnému narušení hoření. Dalším předpokladem je i omezení produkce zplodin a toxických plynů během

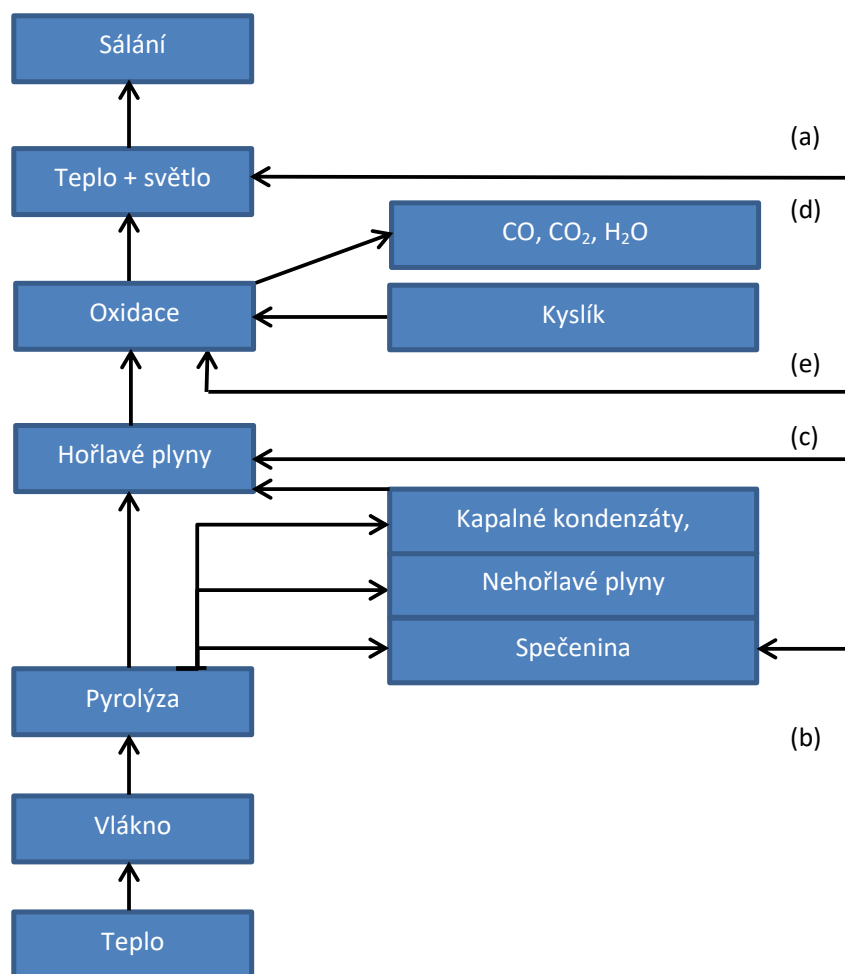
hoření. Při špatně zvoleném typu retardační přísady může nastat i opačný jev, kdy dojde ke zvýšení hořlavosti materiálu. [28, 31, 32, 33]

Používání retardačních přípravků se datuje daleko do minulosti. Už okolo roku 450 př. n. l. používali Egypťané ke snížení hořlavosti dřevěných předmětů materiál kamenec. Později se k nim připojili Římané, kteří k tomu navíc přidali vinný ocet. Až v roce 1821 byl vydán první seznam látek zvyšující tepelnou odolnost materiálů. V druhé polovině 19. století s příchodem polymerních látek došlo k odstartování vývoje nových retardérů hoření. Tyto přípravky lze rozdělit do následujících skupin, konkrétně boritany, fosforečnany, dusičnany a halogenidy. [28, 31, 32, 33]

2.4.1 Mechanismus retardace

Proces hoření je brán jako zpětnovazebný systém, který můžeme na různých místech a různými způsoby pomocí retardérů hoření, narušit (Obr. 11). [28]

- **a)** odvod vyprodukovaného tepla z procesu hoření pryč,
- **b)** zvýšení teploty rozkladu (pyrolýzy),
- **c)** snížení množství vyprodukovaných hořlavých plynů a zvýšení produkce uhlíku (zuhelnatělých částí),
- **d)** zamezení přístupu kyslíku nebo hořlavých plynů k plameni, případně snížení koncentrace pod hranici, kdy dojde k zapálení,
- **e)** zvýšení teploty spalování, ovlivnění oxidačních procesů nebo kombinace obou těchto způsobů. [28]



Obr. 11 Schéma zpětnovazebného systému celulózy a možných způsobů jeho retardace [28]

Ve většině případů retardéry hoření nevyužívají pouze jeden z výše uvedených způsobu. První tři varianty (a, b, c) se uplatňují v kondenzované fázi a zbylé dvě varianty (d, e) se využívají při výparné fázi. Typickým příkladem odvodu tepla (a) je dodání vody nebo solných hydrátů, kdy dojde k uhašení plamene. Zvýšení teploty rozkladu (b) se využívá například u vláken z kevlaru nebo nomexu. Je to způsobeno jejich strukturním uspořádáním, kdy dochází k výraznému zvýšení jejich teploty rozkladu. Zvýšené produkce uhlíku (c) se využívá u celulózových vláken. Zamezení přístupu kyslíku nebo hořlavých plynů (d) využívají některé retardéry na bázi boritanů nebo fosforečnanů tím, že vytvoří sklovitý polymer na povrchu vlákna. Tím je vlákno chráněno před účinky vysoké teploty. Dá se říci, že se jedná o kombinace způsobu (a) a (d). [28]

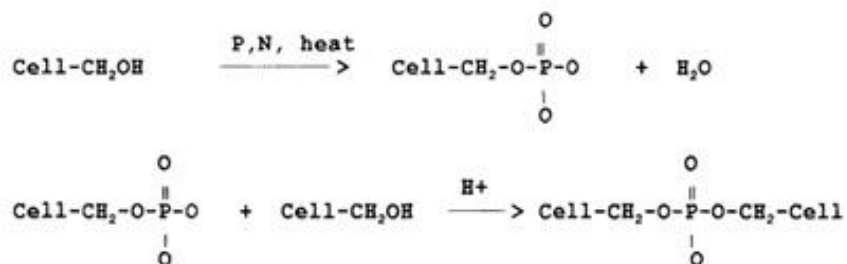
2.4.2 Rozdělení retardérů hoření

Boritany

První skupinou retardérů jsou boritany. Jedná se o krátkodobé (netrvanlivé) sloučeniny bóru, mezi které patří například tetraboritan sodný (borax) nebo kyselina boritá. Efekt retardace probíhá ve zkondenzované fázi, kdy je povrch vlákna materiálu pokryt sklovitým polymerem. Zároveň dochází k odbourávání vody a snižování množství zplodin při hoření. Nejčastější aplikace těchto přípravků je použita u dřevěných materiálů, celulózy a bavlny. [28, 31, 32, 34, 35]

Fosforečnany

Další skupinou jsou fosforečnany. Tato skupina retardérů je stále více používána díky jejich vysoké účinnosti zpomalení procesu hoření a také jako náhrada halogenových retardérů hoření díky tomu, že jsou téměř neškodné vůči životnímu prostředí. Uplatňují se především jako retardéry polymerních materiálů. Jejich mechanismus retardace je založen na zvýšené produkci uhlíku (ochranná vrstva) a zachycení volných radikálů (potlačení exotermní reakce), který probíhá při spalování v plynné i pevné fázi. Dochází i ke snížení aktivační energie, nutné k zahájení dehydratace celulózy, a k zasíťování celulózy (podpora zuhelnatění) vlivem kyselosti některých fosforečnanů. Dále fosforečnany reagují se 6. hydroxilovou skupinou glukózové jednotky a tím snižují tvorbu levoglukosanu. Tato reakce probíhá často v kombinaci s dusičnany za vzniku P-N vazeb (Obr. 12). [28, 31, 32, 34]

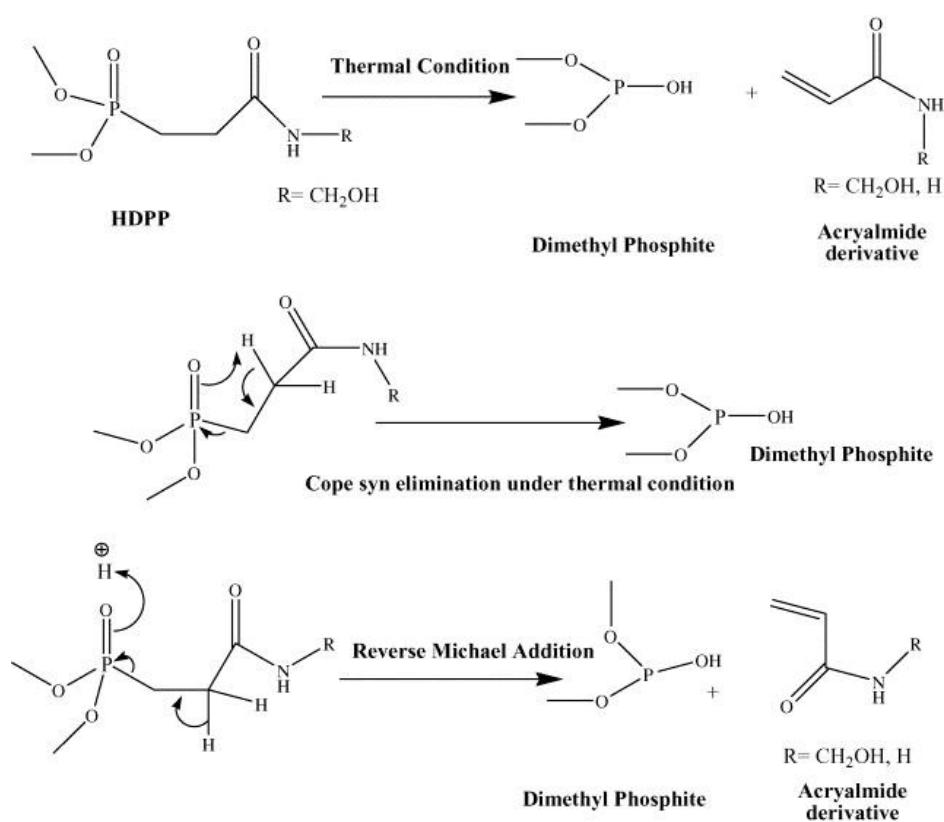


Obr. 12 Schéma reakce sloučeniny fosforu s 6. hydroxilovou skupinou glukózové jednotky [28]

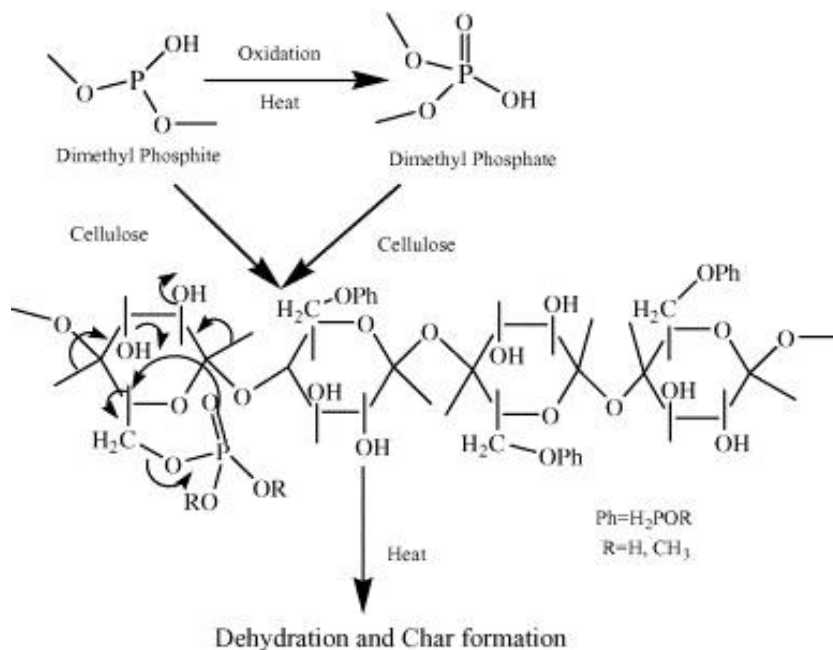
Typickým zástupcem anorganických retardérů na bázi fosforu je červený fosfor nebo fosforečnan amonný, který se velmi často používá pro retardaci materiálů obsahujících celulózu. Nicméně tato skupina fosforových retardérů má nízkou účinnost vlivem špatné kompatibility s matricí, špatnou tepelnou stabilitu a vysokou citlivost vůči vlhkosti. [28, 31, 32, 34, 35]

Mezi organické fosforové retardéry se řadí například fosfáty. Vykazují lepší vlastnosti, ale jsou dražší. Navíc nebyla potvrzena ani vyvrácena jejich zdravotní nezávadnost a neškodnost vůči životnímu prostředí. Mechanismy retardace, které se uvádí u tohoto typu retardérů, nejsou úplně přesvědčivé z hlediska účinnosti a zároveň potlačují vývoj nových ekologicky nezávadných retardérů hoření. Problémem by mohlo být špatné pochopení rozkladných reakcí organických fosforových retardérů během procesu pyrolýzy. Proto byl navržen pokus s cílem pochopit mechanismus reakce u přípravku s vysokou účinností zpomalení hoření, který je již uveden na trhu. Jedná se o velmi efektivní a trvanlivý zpomalovač hoření od firmy CIBA Specialty Chemicals je N-hydroxymethyl-3-dimethylfosfonopropionamid (HDPP) prodáváný jako Pyrovatex CP. Ten byl srovnán s dalšími organickými fosforovými retardéry hoření. Na základě výsledků zkoušek termogravimetrické analýzy (TGA), diferenciální snímací kalorimetrie (DSC) a infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR) byl navržen nový mechanismus zpomalení hoření pro organické fosforové retardéry (Obr. 13). Pyrovatex CP potvrdil svoji účinnost a u těchto zkoušek dopadl

nejlépe. Ten se při teplotě 300 °C rozkládá a tvoří meziprodukty na základě dvou mechanismů. Jeden z nich je eliminační reakce Cope son a druhý je reverzní Michaelův přídavek. Takto vzniklý dimethylfosfit by ještě navíc mohl oxidovat na dimethylfosfát. Vzhledem ke složitosti procesu pyrolýzy a omezené stabilitě meziproduktů, je těžké stanovit skutečný meziprodukt. Následně dochází k fosforylaci celulózy, která je poté kyselé katalyzovaně dehydratována za vzniku zuhelnatělých částí (Obr. 14). [28, 31, 32, 34, 35, 36, 37]



Obr. 13 Schéma navrženého mechanismu tepelného rozkladu Pyrovatexu CP [36]



Obr. 14 Schéma procesu fosforylace a pyrolýzy celulózy [36]

Používání tohoto přípravku je omezeno z důvodu pozdějšího zjištění, kdy při jeho používání dochází k uvolňování formaldehydu. U dalších přípravků, se kterými proběhlo srovnání, bylo zjištěno, že po procesu pyrolýzy nebyly nalezeny žádné stopy meziproductů, které by následně mohly fosforylovat. Je tedy možné, že rozdíl v účinnosti jednotlivých přípravků je na základě schopnosti fosforylace celulózy během počáteční tepelné degradace. [28, 31, 32, 34, 35, 36, 37]

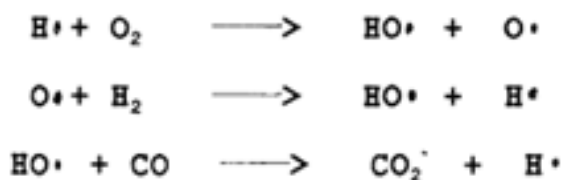
Dusičnany

Dusičnany se nejčastěji využívají v kombinaci s fosforečnany, kdy společně vytváří P-N vazby (např. polyfosforečnan amonný). Tím podporují fosforylační reakci s 6. hydroxilovou skupinou glukózové jednotky, díky čemuž se snižuje tvorba levoglukosanu (Obr. 12). Dalším příkladem jsou retardéry obsahující melamin nebo jeho deriváty. Vlivem vysoké teploty dochází k endotermické reakci melaminu za vzniku amoniaku. Ten následně naředí hořlavé látky a kyslík, čímž dochází k potlačení procesu hoření. Melaminové polyfosfáty fungují na stejném principu, kdy nejprve vlivem tepelného

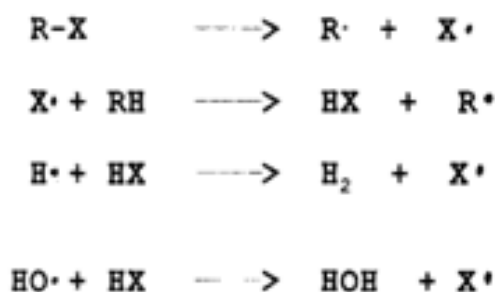
rozkladu dojde ke tvorbě polyfosforečnanu amonného, ze kterého se následně uvolní melamin. Z hlediska ochrany zdraví a životního prostředí je potřeba si dát pozor na melamin. Nebyla zatím prokázána jeho karcinogenost, avšak při vyšších dávkách způsobuje močové kameny, kterou mohou vést k selhání ledvin. [28, 32]

Halogenidy

Retardéry halogenových sloučenin působí v plynné fázi za vzniku radikálů. Dosahují vysoké účinnosti zpomalení hoření vláken obsahujících celulózu. Avšak při tepelném rozkladu dochází ke tvorbě toxických a žíravých látek, proto bylo používání halogenových retardérů v kombinaci s celulóзовými vlákny zakázáno. Samotným mechanismem retardace je tvorba volných radikálů v plynné fázi. Během procesu hoření dochází k řetězovým reakcím (Obr. 15), při kterých se tvoří volné radikály vodíku a hydroxylových zbytků. Ty jsou zachyceny halogenovými volnými radikály a dochází tak k rozpadu řetězové reakce (Obr. 16). [28, 37]



Obr. 15 Řetězové reakce v plynné fázi během procesu hoření [28]



Obr. 16 Reakce halogenových radikálů s vodíkovými a hydroxylovými radikály [28]

Materiály budoucnosti

Vývoj a výzkum nových retardérů hoření probíhá neustále. Kromě výzkumu retardérů na bázi fosforu je snaha hledat i jiné, nové materiály. Jedná se například o organokřemičité sloučeniny (silikony), které uvolňují velmi malé množství toxických plynů během tepelného rozkladu. Dále vykazují vysokou tepelnou odolnost a stabilitu. Jejich mechanismus reakce je takový, že ze silikonových polymerů se vlivem tepelného působení uvolňuje oxid křemičitý, který se hromadí na povrchu materiálu a vytváří tím bariéru. Využití nanočástic by v budoucnu mohlo najít uplatnění i v této oblasti. Zejména pak nanočástice modifikovaného jílu nebo nanotrubičky uhlíkatých vláken. Vlivem tepelné degradace se vytváří na povrchu vrstva (v případě nanotrubiček strukturovaná síť), která tvoří bariéru zpomalující hoření. Avšak zároveň dochází ke zvýšení tepelné vodivosti. [32]

2.4.3 Způsoby aplikací retardérů

Retardéry hoření se vyskytují v kapalně fázi nebo v podobě prášku, který je ve většině případů rozpustný ve vodě. Z hlediska trvanlivosti máme retardéry trvanlivé a netrvanlivé. Netrvanlivé retardéry se aplikují v místech, kde nebude docházet k přímému účinku zvýšené vlhkosti po dobu své životnosti, aby nedocházelo k postupnému odstraňování přípravku. Tyto retardéry se poměrně hojně používají ve stavebnictví. Je možné však použít impregnační přísady, které zvýší odolnost proti působení vlhkosti a přispějí ke zvýšení životnosti protipožárních přípravků. Ve všech ostatních případech je nutné použít trvanlivé retardéry. Samotný způsob aplikace těchto přípravků je namáčení, nástřik a zpětné nanášení. [28, 32, 35]

Při namáčení je materiál ponořen do nádoby, ve které je roztok s přípravkem, v celém svém objemu. Značnou nevýhodou tohoto způsobu,

zejména z hlediska nákladů, je jeho následné vysušení, které je velmi zdlouhavé a energeticky náročné. Další nevýhodou je velká spotřeba roztoku s retardérem hoření. Je nutné namíchat velké množství přípravku, aby mohl být vzorek ponořen v celém svém objemu. Tímto způsobem aplikace nemůžeme přesně stanovit aplikované množství přípravku a jeho výslednou koncentraci uvnitř materiálu. [28, 32, 35]

Aplikace retardérů hoření pomocí nástřiků je další možnou variantou. Zde se jedná o aplikaci na povrch materiálů v případě už hotových rohoží. U rozvlákněného materiálu lze postupně nanášet přípravek na materiál jedoucí po páse nebo ve vznosu (vzdušná síla apod.). Aplikace probíhá pomocí nádobí se stříčkou, ve které se přípravek neustále promíchává. Výhodou tohoto způsobu aplikace je nanesení požadovaného množství. Je tak známá koncentrace přípravku, která je rovnoměrná v celém materiálu. Navíc je tento způsob aplikace rychlejší a snadnější. Není potřeba tak velké množství energie pro následné vysušení, jako tomu je v případě máčení. Jedná se tedy o ekonomičtější variantu, která zároveň šetří čas. Proto byla tato metoda aplikace zvolena pro praktickou část. [28, 32, 35]

V případech, kdy je konzistence retardéru hoření podobná pastě nebo pěně, aplikuje se způsobem tzv. zpětného nanášení. Přípravek je rovnoměrně rozetřen přímo po povrchu materiálu, který se pohybuje na pásovém dopravníku. V místě aplikace je přípravek nanášen na materiál a pro zajištění konstantní tloušťky přípravku je upravován pomocí uhlazovacího nože. [28, 32, 35]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem práce je navrhnout především způsob zlepšení reakce na oheň izolačních materiálů na bázi organických vláken a dosáhnout třídy reakce na oheň alespoň D.

3.1 Metodika práce

Na základě literární rešerše byl vybrán vhodný typ izolačního materiálu na bázi organických vláken. Byla zvolena přírodní a recyklovaná bavlněná vlákna od firmy Retex. Dále byly na základě průzkumu trhu a literární rešerše vybrány následující přípravky pro modifikaci bavlněných vláken. Jedná se o následující přípravky:

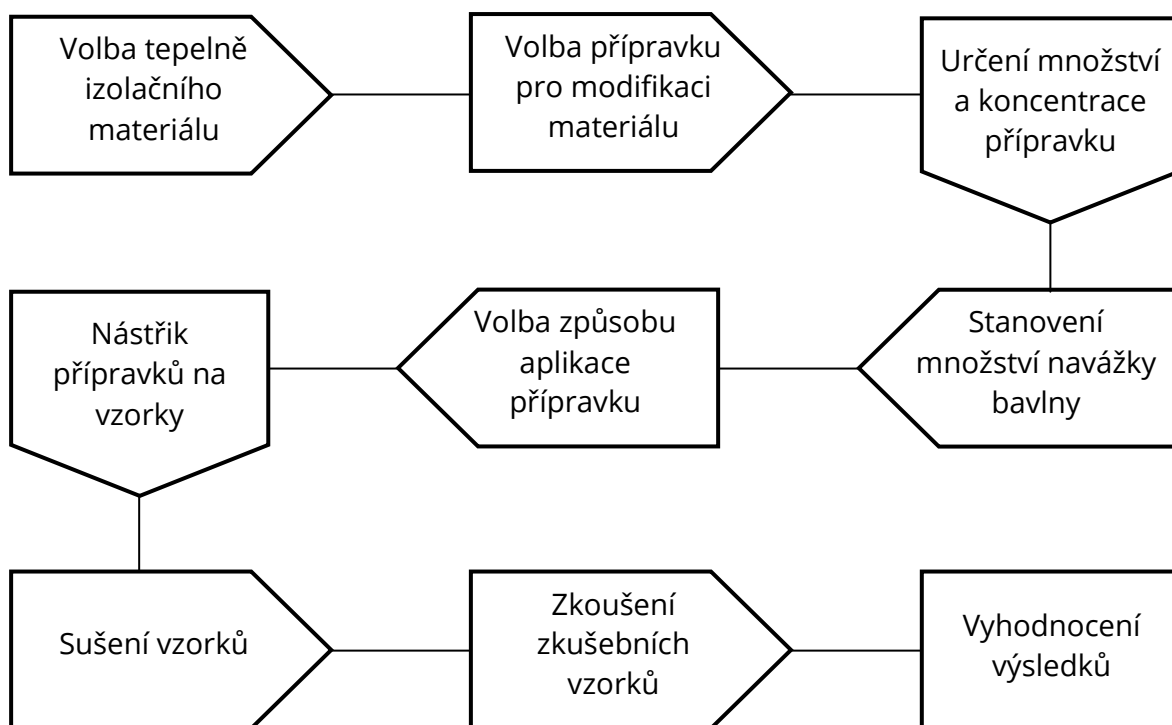
- Tetraboritan sodný dekahydrát (Borax)
- Kyselina boritá
- Uhličitan sodný
- Hydrogenfosforečnan diamonný
- Dihydrogenfosforečnan amonný
- FR CROS 584
- Síran hlinitý

Tyto zvolené přípravky byly dodány v podobě prášku, který byl ve všech případech rozpustný ve vodě. Na základě doporučené rozpustnosti stanovené výrobcem byla určena koncentrace a dávka aplikovaného roztoku. Dále bylo stanoveno množství navážky bavlněných vláken.

Následně byl zvolen způsob aplikace vybraných přípravků na bavlněná vlákna. Za nejvhodnější způsob byla zvolena aplikace nástřikem pomocí nádoby s tryskou. Bylo tak aplikováno požadované množství přípravku rovnoměrně po celém objemu vzorku. Dalším důvodem volby tohoto způsobu aplikace byla zejména úspora času z hlediska provedení aplikace a následného

sušení vzorků. Před provedením zkoušky se nechala bavlněná vlákna vysušit v přirozeném prostředí při teplotě +20°C a relativní vlhkosti 40 %. Před samotným měřením byla provedena kontrola vlhkosti vzorků a zkoušeny byly vzorky po dosažení vlhkosti v intervalu 5 – 7 %.

Po vysušení se bavlněná vlákna zhomogenizovala a poté se naplnila do zkušebních forem v požadovaném množství. Takto vytvořený zkušební vzorek se následně podrobil zkoušce malého plamene. Veškerý výše popsany průběh byl stejný pro všechny přípravy. Po provedení zkoušky malého plamene u všech přípravků došlo k porovnání výsledků. U přípravku, který vykazoval nejlepší odolnost vůči plameni, byla provedena další zkouška, konkrétně SBI test. Na závěr proběhlo vyhodnocení všech výsledků. Na následujícím obrázku č. 17 je popsáno schéma metodiky práce.



Obr. 17 Schéma metodiky práce

3.2 Použité materiály a přípravky

V následující části jsou popsány použité izolační materiály a přípravky pro zlepšení jejich reakce na oheň.

3.2.1 Izolační materiály

Pro praktickou část této práce byla použita rozvlákněná recyklovaná bavlněná vlákna od firmy Retex, a dále čistá vlákna bavlny dodána také firmou Retex. Nejprve byla zkoumána recyklovaná bavlněná vlákna z odpadů textilního průmyslu (Obr. 18). Jednalo se o směs různobarevných, převážně červených vláken. V případě čisté bavlny se jednalo o vlákna bílé barvy (Obr. 19).



Obr. 18 Recyklovaná bavlna



Obr. 19 Přírodní bavlna

3.2.2 Přípravky pro snížení hořlavosti

Pro úpravu přírodních i recyklovaných bavlněných vláken byly použity následující přípravky:

- **Tetraboritan sodný dekahydrát (Borax)**

Jedná se o anorganickou sloučeninu v podobě bílého prášku rozpustného ve vodě. V přírodě se vyskytuje jako minerál. Další uplatnění má v metalurgii nebo v potravinářství. [42]

- **Kyselina boritá**

Bílá krystalická látka rozpustná ve vodě. Patří mezi anorganické kyseliny. Využití v očním lékařství a při impregnaci dřeva proti plísním a houbám. [43]

- **Uhličitan sodný**

Anorganická sloučenina v podobě bílého prášku rozpustná ve vodě. Též nazývána jako soda. Využití při výrobě skla a papíru. [44]

- **Hydrogenfosforečnan diamonný**

Jiným názvem fosforečnan amonný. Bílá pevná a krystalická látka. Použití převážně při výrobě hnojiv nebo jako potravinářské aditivum. [45]

- **Dihydrogenfosforečnan amonný**

Bílá krystalická látka. Používá se jako aditivum. Využití při výrobě hnojiv a v analytické chemii. [46]

- **FR CROS 584**

Též nazýván jako polyfosforečnan amonný. Jedná se o bílý prášek rozpustný ve vodě, který se používá jako protipožární nátěr. [47]

- **Síran hlinitý**

Bílá anorganická sloučenina. Používá se především při čištění pitné vody. Ve stavebnictví jako urychlovač tuhnutí. [48]

3.3 Metodika přípravy zkušebních vzorků a těles

Zkušební vzorky byly vyrobeny z rozvlákněných vláken přírodní a recyklované bavlny. Nejprve byla stanovena jednotná objemová hmotnost, která byla zvolena jednotně 60 kg/m^3 . Následně byla vypočítána z objemu zkušebního drátěného koše navážka bavlny pro jedno zkušební těleso, která byla 42,98 g. Celková navážka vzorku pro vytvoření čtyř zkušebních těles, na kterých byl aplikován stejný přípravek, byla 200 g (Obr 20).



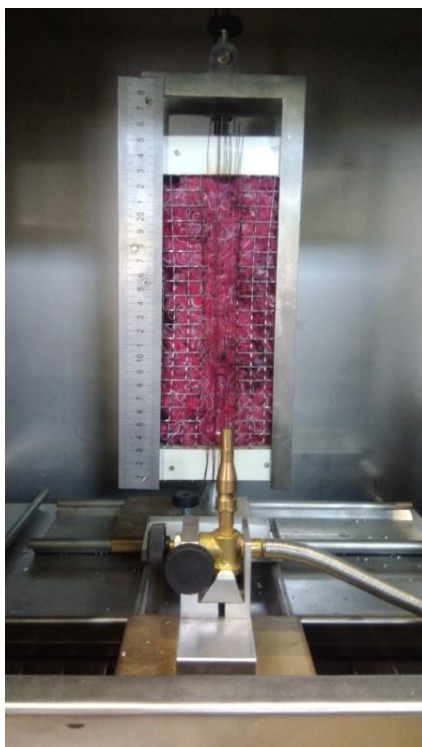
Obr. 20 Příprava vzorků pro zkoušku malého plamene

Po navážení devíti vzorků byla bavlna nastříkána jednotlivými přípravky. Nejprve se však muselo stanovit množství každého přípravku. Dávkování bylo zvoleno pro všechny přípravky jednotné, konkrétně 3 hmot.% (6 g). Jen u přípravku FR CROS 584 byla zvolena navíc koncentrace 1 hmot.% (2 g), z důvodu ceny tohoto přípravku. Na základě hodnot rozpustnosti přípravků, uvedených v tabulkách rozpustnosti látek, bylo poté vypočteno množství vody potřebné pro rozpuštění každého přípravku.

Tab. 1 Dávkování přípravků

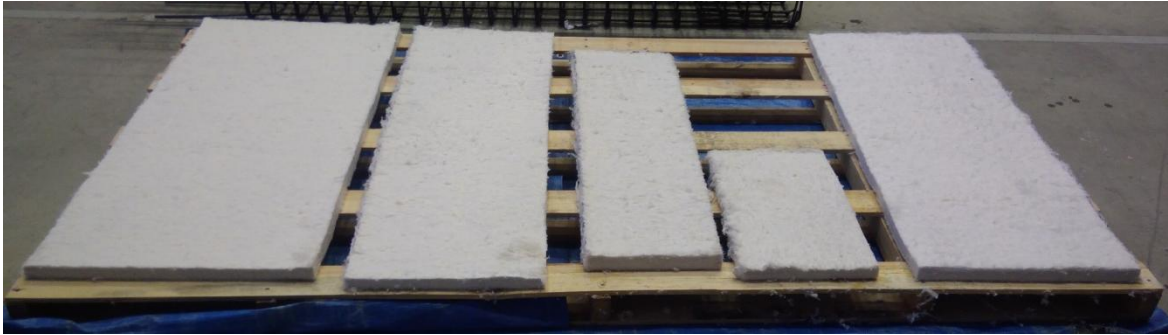
Přípravek	3 hmot.% k sušině vláken [g]	Rozpustnost ve vodě při 20 °C [g / 100 ml]	Množství vody potřebné pro rozpustnost 3 hmot.% chemikálie [g]	Celková hmotnost roztoku [g]
Tetraboritan sodný dekahydrát (Borax)	6	2,50	240,0	246,0
Kyselina boritá	6	5,02	119,5	125,5
Uhličitan sodný	6	21,80	27,5	33,5
Hydrogenfosforečnan diamonný	6	69,00	8,7	14,7
Dihydrogenfosforečnan amonný	6	37,00	16,2	22,2
FR CROS 584 (1 hmot.%)	2	0,50	400,0	402,0
FR CROS 584 (3 hmot.%)	6	0,50	1200,0	1206,0
Síran hlinitý	6	36,4	16,5	22,5

Po provedení výpočtu dávkování byly namíchány roztoky jednotlivých přípravků, které byly následně nastříkány na bavlněná vlákna. Pro aplikaci byla použita nádoba s tryskou. Přípravek byl postupně nastříkán na bavlnu, která byla v průběhu aplikace promíchávána. Takto připravené vzorky se nechaly po dobu jednoho týdne vysušit. Následně byla navážena jednotlivá zkušební tělesa (čtyři tělesa od jednoho vzorku). Celkem bylo připraveno 36 zkušebních těles z přírodní bavlny, z toho čtyři referenční vzorky, a 36 zkušebních těles recyklované bavlny, kde také čtyři vzorky byly referenční. Na těchto 72 zkušebních tělesech byla provedena zkouška malého zdroje plamene (Obr. 21).



Obr. 21 Zkouška malým zdrojem plamene

Pro zkoušku jednotlivým hořícím předmětem (SBI test) byla použita pouze přírodní bavlněná vlákna, konkrétně rohože z přírodních bavlněných vláken (Obr. 22). Ty byly následně nastříkány hydrogenfosforečnanem diamonným. Tento přípravek byl vybrán z toho důvodu, že se řadí mezi retardéry na bázi fosforu. I když nevykazoval nejlepší hodnoty při reakci na oheň, byl vybrán pro ověření další zkouškou. Retardéry na bázi fosforu jsou častým předmětem zkoumání a předpokládá se, že v budoucnu nahradí retardéry obsahující boritany. Bavlněné rohože se nechaly týden vysušit v běžném prostředí. Poté byly připevněny na speciální vozík, který byl následně zavezen do zkušební komory, kde proběhl SBI test.



Obr. 22 Připravené vzorky pro SBI test

3.4 Metodika zkoušek

Pro ověření reakce na oheň byla provedena zkouška zdrojem malého plamene u vzorků ošetřených vybranými přípravky, které by měly snížit jejich hořlavost, a pro srovnání i u vzorků neošetřených přípravky. Zkouška proběhla u vzorků z přírodních a recyklovaných bavlněných vláken. Stanovení reakce na oheň pomocí zkoušky malého zdroje plamene proběhlo na základě normy ČSN EN ISO 11925 – 2. Dále byla provedena zkouška působení jednotlivým hořícím předmětem podle normy ČSN EN 13823 (SBI test).

3.4.1 Zkouška zápalnosti

Základní zkouškou, která se provádí při stanovení reakce na oheň u materiálů, je podle normy ČSN EN ISO 11925 – 2: Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene. Veškerý popis a požadavky, kterými je nutné se v průběhu zkoušky řídit, je popsán v této normě. Pomocí této zkoušky můžeme stanovit, jak jednotlivé výrobky reagují za přítomnosti zdroje malého plamene. Zkušební těleso je umístěno ve zkušební komoře ve svislé poloze a je vystaveno působení plamene na povrch nebo hranu vzorku po dobu 15 nebo 30 s. [40]

Zkušební pomůcky:

Klimatizační komora pro průběh zkoušky, zařízení pro měření rychlosti odtahu v komoře, stojan na uchycení přípravku, zdroj plamene (plynový hořák), kalibr pro nastavení správné výšky plamene, kalibr pro nastavení vzdálenosti kahanu od vzorku, miska s filtračním papírkem, stopky, váhy, přípravek na uchycení vzorku s pravítkem. [40]

Zkušební postup:

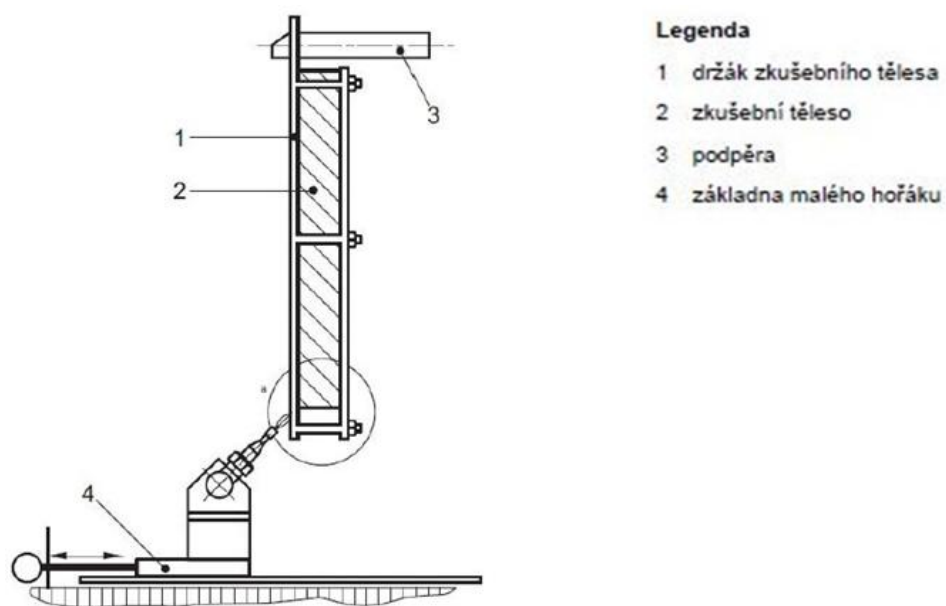
Pro provedení této zkoušky je potřeba zkušební komora (Obr. 23). Ta je mírně zatemnělá a na dvou stranách prosklená pro snadnější pozorování vzorku během působení plamene. Uvnitř zkušební komory je stanovena teplota prostředí 23 ± 5 °C a relativní vlhkost vzduchu 50 ± 20 %. Jedná se tedy o „skříň“ se dvěma vstupními otvory pro vkládání vzorků, které zároveň slouží i jako pozorovací otvory. Ty jsou vyrobeny ze žáruvzdorného skla. Tato „skříň“ nemá dno a je usazena na základové mříži, která kromě nosné funkce zajišťuje i přirozené odvětrávání. V horní části zkušební komory je pak připojeno odvětrávací zařízení s rychlostí proudění vzduchu $0,70 \pm 0,10$ m/s. Uvnitř komory se nachází nastavitelný stojan pro uchycení vzorků. Dále je zde posuvné zařízení, na kterém je připevněn malý plynový kahan, který je nakloněn pod úhlem 45 °. Ten slouží jako zdroj plamene. [40]

Dovnitř zkušební komory se následně připevní zkušební vzorek o rozměrech 250 x 90 x 60 mm (délka x šířka x tloušťka). Na ústí kahanu se připevní kalibrační zařízení pro správné nastavení výšky plamene. Kahan se posune směrem ke vzorku tak, aby se hrot kalibračního zařízení zabodnul do vzorku. Tímto se simuluje dotyk špičky plamene při skutečném hoření po zapálení kahanu. Dojde k zaaretování vzdálenosti a vozík s kahanem se posune zpět, odstraní se kalibrační přípravek a kahan se zapálí. Pomocí dalšího kalibračního zařízení se nastaví výška plamene (20 mm)

a zkušební komora se uzavře. Poté se opět přisune vozík s kahanem směrem ke vzorku na předem nastavenou vzdálenost. V momentě dotyku vzorku zdrojem plamene se spustí stopky (Obr. 24). Plamen se nechá působit po dobu 15 nebo 30 s a následně se opět oddálí. Během této doby se pozoruje chování vzorku, konkrétně zda došlo k zapálení vzorku, zda špička plamene dosáhla výšky 150 mm nad místem působení zdroje plamene a zda došlo ke tvorbě plamenně hořících částí nebo kapek. Pokud špička plamene dosáhne výšky 150 mm, zkouška je okamžitě ukončena a je zaznamenán čas dosažení této výšky. [40]



Obr. 23 Zkušební komora pro zkoušku zápalnosti



Obr. 24 Zkušební zařízení pro zkoušku zápalnosti [40]

3.4.2 Zkouška jednotlivým hořícím předmětem

Další zkouškou pro stanovení reakce na oheň je zkouška jednotlivým hořícím předmětem. Podrobný popis a všechny požadavky, kterými se musí v průběhu zkoušky řídit, se nachází v normě ČSN EN 13823+A1: Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stanovení výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu. Na základě výsledků této zkoušky můžeme říci, jak jednotlivá zkušební tělesa přispívají k rozvoji požáru, pokud je tohle těleso vystaveno účinkům hoření v rohu místnosti. [41]

Zkušební pomůcky:

Zkušební komora, zařízení pro odtažení spalin, hlavní a vedlejší (pomocný) hořák, vozík se stojanem pro upevnění vzorků, počítač s hlavní řídicí jednotkou pro provádění a vyhodnocení zkoušky. [41]

Zkušební postup:

Nejprve je potřeba upevnit zkušební vzorky ke stojanu, umístěném na vozíku (Obr. 25). Běžně se používají materiály v podobě desek, které se připevní na stojan vozíku. Vzorky se umístí na vozík tak, aby tvořily tvar písmene „L“. Delší strana písmene „L“ má rozměr 1,0 x 1,5 m a kratší strana má rozměr 0,5 x 1,5 m (šířka x výška). V případě volně sypaného materiálu je nutné umístit vzorky do připravených kovových klecí. Ty se následně připevní ke stojanu stejným způsobem, tedy aby tvořili písmeno „L“. Rozměry kovových klecí jsou stejné. Takto umístěné vzorky na vozíku se zavezou do zkušební komory (Obr. 26). Jedná se o speciální uzavřenou místnost čtvercového tvaru, někdy nazývána jako požární pec. Má dva vstupy. První slouží k zavezení vozíku se zkušebními vzorky a druhý pro vstup obsluhy. Dále je na dvou stěnách umístěn pozorovací otvor ze žáruvzdorného skla, jelikož v průběhu

zkoušky nesmí být nikdo přítomen uvnitř zkušební komory. Uvnitř komory jsou dále umístěny dva hořáky. Jeden je pomocný a druhý je hlavní hořák. Celá zkušební komora je pak v místě stropu napojena na odsávací vzduchotechniku. Samotný průběh zkoušky je řízen z velína, kde se nachází počítač s řídicí jednotkou pro automatické provádění zkoušky. Po zavezení vozíku do zkušební komory dojde ke kalibraci zařízení. Poté je zapálen pomocný hořák umístěný na protějším rohu tvořeného zkušebními vzorky ve výšce 1,5 m. Dále je zapálen hlavní hořák, který je umístěn ve spodní části rohu tvořeného zkušebními vzorky. Celková doba průběhu zkoušky je 17 minut, kdy je zkušební vzorek vystaven teplotě 2000 ± 100 °C. Během zkoušky je za pomoci soustavy čidel měřena rychlost uvolňování tepla a rychlost produkce zplodin během hoření. Vizuálním pozorováním se sleduje, zda nedochází k bočnímu šíření plamene ve výšce 0,5 – 1 m po povrchu většího křídla. Také se sleduje, zda nedochází ke tvorbě hořlavých kapek nebo částic během prvních 600 s od začátku zkoušky. [41]



Obr. 25 Vozík se stojanem (SBI test)



Obr. 26 Zkušební komora (SBI test)

3.5 Provedení a výsledky zkoušek

Stanovení reakce na oheň recyklované a přírodní bavlny bylo provedeno na základě zkoušky malého plamene a zkoušky jednotlivým hořícím předmětem. Na základě získaných výsledků byla provedena klasifikace třídy reakce na oheň podle normy ČSN EN 13 501 – 1 + A1.

3.5.1 Zkouška malým plamenem

Tato zkouška proběhla na základě normy ČSN EN ISO 11925 – 2. Působení plamene na povrch vzorku bylo po dobu 30 s. Během této doby bylo pozorováno, zda došlo k plamennému hoření, tvorbě hořících kapek nebo částic a zda došlo u špičky plamene k dosažení 150 mm nad místem jejího působení. Pokud nenastal žádný z výše uvedených pozorovaných jevů, zaznamenala se hodnota dosažené výšky plamene do tabulky (Tab. 2 a Tab. 4) a vzorek vyhověl požadavkům třídy reakce na oheň D.

Tab. 2 Recyklovaná bavlna – výška špičky plamene

Přípravek	Vzorek č. 1 [mm]	Vzorek č. 2 [mm]	Vzorek č. 3 [mm]	Vzorek č. 4 [mm]	Ø [mm]
Tetraboritan sodný dekahydrát (Borax)	130	100	60	120	103
Kyselina boritá	150	100	150	120	130
Uhličitan sodný	150	150	150	150	150
Hydrogenfosforečnan diamonný	150	150	150	150	150
Dihydrogenfosforečnan amonný	150	110	150	150	140
FR CROS 584 (1 hmot. %)	150	150	150	150	150
FR CROS 584 (3 hmot. %)	140	110	150	150	138
Síran hlinitý	150	150	150	150	150
Referenční	150	150	150	150	150

Tab. 3 Recyklovaná bavlna – čas dosažení 150 mm špičkou plamene

Přípravek	Vzorek č. 1 [s]	Vzorek č. 2 [s]	Vzorek č. 3 [s]	Vzorek č. 4 [s]
Tetraboritan sodný dekahydrát (Borax)	-	-	-	-
Kyselina boritá	10	-	7	-
Uhličitan sodný	6	5	4	9
Hydrogenfosforečnan diamonný	4	6	4	3
Dihydrogenfosforečnan amonný	4	-	14	4
FR CROS 584 (1 hmot. %)	3	5	4	8
FR CROS 584 (3 hmot. %)	-	-	8	6
Síran hlinitý	4	5	5	6
Referenční	3	4	3	4

Tab. 4 Přírodní bavlna – výška špičky plamene

Přípravek	Vzorek č. 1 [mm]	Vzorek č. 2 [mm]	Vzorek č. 3 [mm]	Vzorek č. 4 [mm]	Ø [mm]
Tetraboritan sodný dekahydrát (Borax)	80	60	50	30	55
Kyselina boritá	60	80	80	90	78
Uhličitan sodný	90	80	100	80	88
Hydrogenfosforečnan diamonný	100	80	110	110	100
Dihydrogenfosforečnan amonný	100	120	150	90	115
FR CROS 584 (1 hmot. %)	150	120	100	150	130
FR CROS 584 (3 hmot. %)	20	150	150	140	115
Síran hlinitý	100	150	110	150	128
Referenční	130	100	110	110	113

Tab. 5 Přírodní bavlna – čas dosažení 150 mm špičkou plamene

Přípravek	Vzorek č. 1 [s]	Vzorek č. 2 [s]	Vzorek č. 3 [s]	Vzorek č. 4 [s]
Tetraboritan sodný dekahydrát (Borax)	-	-	-	-
Kyselina boritá	-	-	-	-
Uhličitan sodný	-	-	-	-
Hydrogenfosforečnan diamonný	-	-	-	-
Dihydrogenfosforečnan amonný	-	-	3	-
FR CROS 584 (1 hmot. %)	4	-	-	4
FR CROS 584 (3 hmot. %)	-	5	4	-
Síran hlinitý	-	3	-	3
Referenční	-	-	-	-

Dílčí závěr:

V tabulce č. 2 můžeme vidět výsledky reakce na oheň pomocí zkoušky malého plamene pro recyklovaná vlákna. Červená barva znázorňuje, že u většiny vzorků došlo k dosažení špičkou plamene výšky 150 mm. U všech vzorků došlo k zapálení a trvalému plamennému hoření. Žádný vzorek nevykazoval tvorbu hořících kapek nebo částic. Na základě průměrných hodnot můžeme říci, že došlo ke zlepšení (zelená barva) reakce na oheň pouze u čtyř vzorků recyklované bavlny (Obr. 25). Jedná se o vzorky obsahující tetraboritan sodný dekahydrát, kyselinu boritou, Dihydrogenfosforečnan amonný a FR CROS 584 (3 hmot.%). Tyto vzorky můžeme podle normy ČSN EN 13 501 – 1 + A1 klasifikovat na základě výsledků zkoušky zápalnosti do třídy reakce na oheň D.

V tabulce č. 4 jsou výsledky reakce na oheň pomocí zkoušky malého plamene pro přírodní vlákna. Zde naopak vidíme výrazné zlepšení reakce na oheň (zelená barva) u většiny vzorků. I v tomto případě u všech vzorků došlo k zapálení a trvalému plamennému hoření. U žádného vzorku nebyla pozorována tvorba hořících částic nebo kapek. Na základě průměrných hodnot můžeme stanovit, že došlo ke zlepšení reakce na oheň v porovnání s referenčním vzorkem u čtyř použitých přípravků na přírodní bavlněná vlákna. U ostatních čtyř vzorků můžeme vidět nepatrné zhoršení reakce na oheň. I přesto všechny vzorky včetně referenčního splňují požadavek zkoušky zápalnosti a mohou být klasifikovány podle normy ČSN EN 13 501 – 1 + A1 do třídy D.

V tabulce č. 3 a č. 5 jsou hodnoty časů, kdy špička plamene dosáhla 150 mm. U recyklované bavlny (Tab. č. 3) můžeme vidět, že této hodnoty dosáhla většina vzorků v čase menším, než je 15 s. To znamená, že tyto vzorky nevyhověly žádným požadavkům zkoušky malého plamene, a jsou zařazeny

do třídy reakce na oheň F. V případě přírodní bavlny (Tab. č. 5) můžeme vidět, že u většiny vzorků nedošlo k dosažení výšky 150 mm špičkou plamene. Avšak i některé vzorky přírodní bavlny dosáhly této hodnoty v čase menším než 15 s a jsou také klasifikovány do třídy reakce na oheň F.

3.5.2 Zkouška jednotlivým hořícím předmětem

Na základě zkoušky dle ČSN EN 13823+A1 proběhlo ověření chování materiálu během působení jednotlivým hořícím předmětem. Pro tuto zkoušku byl vybrán hydrogenfosforečnan diamonný nastříkaný na přírodní bavlněná vlákna, který patří do skupiny retardérů hoření obsahující fosfor. Tato skupina retardérů je v současnosti zkoumána a měla by v budoucnu nahradit přípravky obsahující boritany. Nicméně po zahájení zkoušky musel být pokus v počátku přerušen, jelikož došlo k zahoření vzorku.

Dílčí závěr:

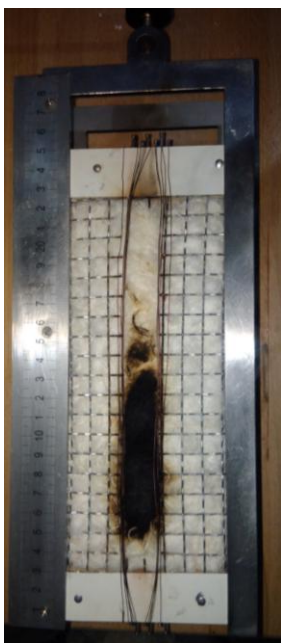
Z důvodu nesplnění požadavků zkoušky dle ČSN EN 13823+A1 nemohla být přírodní bavlněná vlákna upravena nástřikem hydrogenfosforečnanu diamonného klasifikována podle normy ČSN EN 13 501 – 1 + A1 do třídy D, ale pouze do třídy E.

3.6 Diskuze výsledků

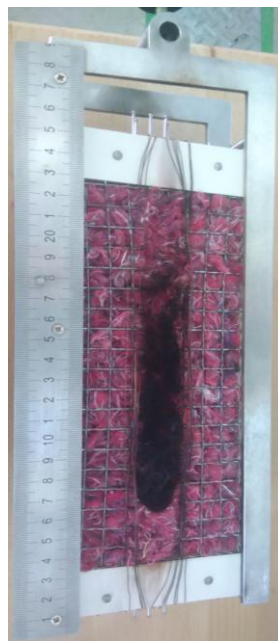
Na základě výsledků zkoušky reakce na oheň můžeme říct, že došlo k výraznějšímu zlepšení u přírodních bavlněných vláken (Obr. 29), než v případě recyklovaných bavlněných vláken (Obr. 30). Podle normy ČSN EN 13 501 – 1 + A1 můžeme všechny vzorky přírodních bavlněných vláken zařadit dle zkoušky malého plamene do třídy reakce na oheň D. Při provádění SBI testu u přírodní bavlny s obsahem hydrogenfosforečnanu diamonného došlo k zahoření vzorku hned v počátku zkoušky. Na základě klasifikace dle normy ČSN EN 13 501 – 1 + A1 musíme zařadit přírodní bavlnu s obsahem

tohoto fosforečnanu do třídy reakce na oheň E z důvodu nesplnění požadavků třídy reakce na oheň D. V případě vzorků z recyklované bavlny můžeme zatřídit do třídy D podle zkoušky malého plamene pouze čtyři vzorky. Ostatní vzorky jsou klasifikovány do třídy reakce na oheň F, protože nevyhověly požadavkům normy ČSN EN ISO 11925 - 2: Zkouška malým zdrojem plamene. Konkrétně došlo k dosažení 150 mm špičkou plamene za dobu menší jak 15 s.

Jedná se o velmi odlišné výsledky v porovnání s přírodními vlákny, kde všechny vzorky spadají dle zkoušky malého plamene do třídy reakce na oheň D. Výrazný rozdíl je vidět i v případě neošetřených (referenčních) vzorků. U neošetřených přírodních bavlněných vláken dosáhla špička plamene 113 mm. V případě recyklované bavlny dosáhla špička plamene 150 mm. U obou typů vláken se ukázal jako nejúčinnější přípravek tetraboritan sodný dekahydrát. V případě přírodní bavlny s boraxem (Obr. 27) byla naměřena hodnota 55 mm a u recyklované bavlny s boraxem (Obr. 28) hodnota 103 mm. To je téměř dvojnásobek.

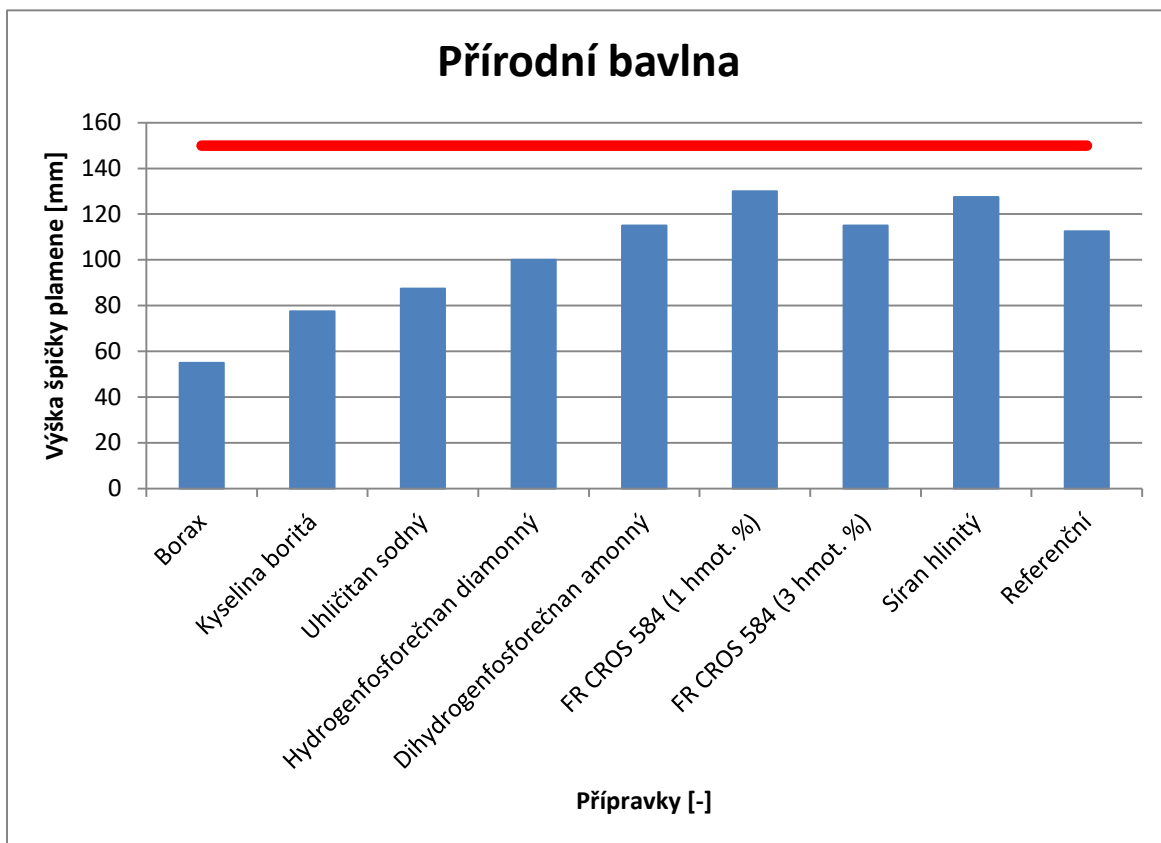


Obr. 27 Přírodní bavlna s boraxem po zkoušce malého plamene

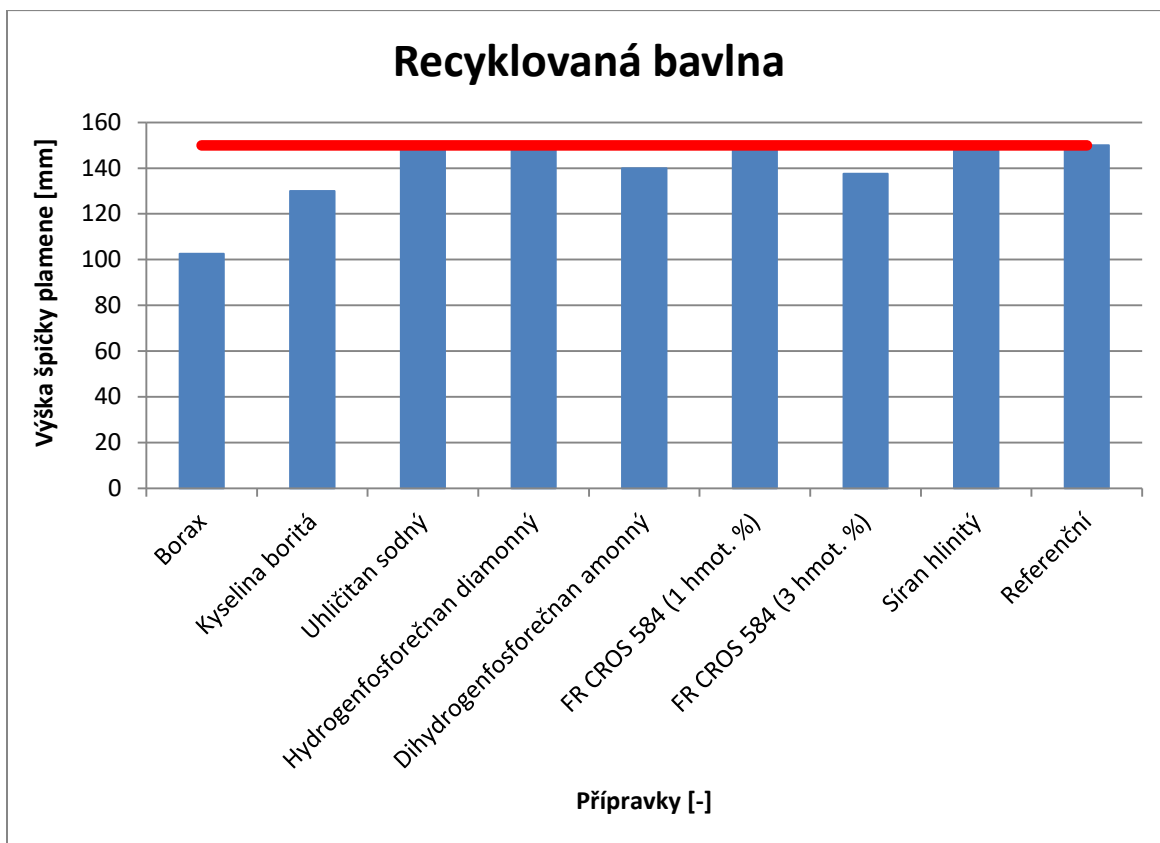


Obr. 28 Recyklovaná bavlna s boraxem po zkoušce malého plamene

Tyto rozdíly mohou být způsobeny kontaminací různých látek obsažených v recyklované bavlně. Jedná se o odpadní bavlnu z textilního průmyslu. Během procesu recyklace a výroby se mohly do vláken dostat látky, které vykazují silnější účinky než aplikované retardační přípravky a způsobují zvýšení hořlavosti.



Obr. 29 Zkouška zápalnosti u přírodních bavlněných vláken



Obr. 30 Zkouška zápalnosti u recyklovaných bavlněných vláken

4 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na studium chování izolačních materiálů na bázi organických vláken. Cílem práce bylo zlepšit jejich reakci na oheň pomocí vhodného způsobu aplikace různých přípravků. Na základě literární rešerše byl nejprve vybrán vhodný materiál pro modifikaci. Konkrétně se jednalo o přírodní bavlněná vlákna, která byla porovnána s recyklovanou bavlnou. Z hlediska modifikace materiálů s cílem zlepšit odolnost vůči působení plamene bylo vybráno sedm přípravků. Mezi vybrané chemické látky patřil tetraboritan sodný dekahydrát, uhličitan sodný, kyselina boritá, hydrogenfosforečnan diamonný, síran hlinitý, FR CROS 584 a dyhydrogefosforečnan amonný. Dále bylo potřeba stanovit způsob aplikace těchto přípravků na bavlněná vlákna. Na základě získaných informací z už uskutečněných pokusů byla zvolena aplikace metodou nástřiku. Po aplikaci přípravků se nechaly vzorky vysušit a následně byly podrobeny zkoušce stanovující reakci na oheň, konkrétně působení zdroje malého plamene. Poté bylo provedeno vyhodnocení získaných výsledků a porovnání přírodní bavlny s recyklovanou.

Přírodní bavlněná vlákna vykazovala lepší odolnost vůči ohni než recyklovaná bavlna. Ke snížení hořlavosti přírodní bavlny došlo u čtyř přípravků. Největšího snížení dosáhly vzorky obsahující tetraboritan sodný dekahydrát, dále pak kyselina boritá, uhličitan sodný a hydrogenfosforečnan diamonný. Ostatní přípravky naopak hořlavost mírně zvýšily v porovnání s referenčním vzorkem. I přesto mohly být všechny vzorky včetně referenčního vzorky klasifikovány podle zkoušky malého plamene do třídy reakce na oheň D.

Snížení hořlavosti recyklované bavlny dosáhly pouze čtyři vzorky, z toho dva z nich jen nepatrně. I v tomto případě dosáhl největšího snížení hořlavosti

tetraboritan sodný dekahydrát (borax) následovaný kyselinou boritou. Nepatrné snížení hořlavosti bylo zaznamenáno u dihydrogenfosforečnanu amonného a přípravku FR CROS 584 při dávce 3 hmot.%. Pouze vzorky obsahující tyto čtyři přípravky mohly být klasifikovány podle zkoušky malého plamene do třídy reakce na oheň D. Ostatní vzorky byly klasifikovány do třídy reakce na oheň F pro nesplnění požadavků zkoušky malého plamene.

U přírodní bavlny ošetřené hydrogenfosforečnanem diamonným byla následně provedena zkouška jednotlivým hořícím předmětem (SBI test). Tento přípravek byl vybrán na základě informací z literatury. Předpokládá se, že by v budoucnu měly retardéry na bázi fosforečnanů nahradit převážnou většinu retardérů, zejména pak na bázi organických fosforečnanů. Nicméně krátce po zahájení zkoušky došlo k zahoření vzorku a zkouška musela být předčasně ukončena. Nebyly tak splněny požadavky SBI testu a vzorek byl klasifikován pouze do třídy reakce na oheň E.

Součástí práce bylo navržení technologického postupu pro výrobu izolačních materiálů se zlepšenou reakcí na oheň a posouzení uplatnění takto modifikovaných výrobků na trhu. Na základě výsledků z jednotlivých zkoušek a průběhu přípravy vzorků lze konstatovat, že zvolený postup aplikace přípravků může být velmi efektivní. Aplikace přípravků metodou nástřiku je z hlediska času úsporná, zejména pak v části sušení. Vzorky jsou znatelně rychleji vysušeny a je možné je dříve vyzkoušet, než kdyby byly přípravky aplikovány máčením. Co se týče volby přípravků, tak na základě hodnot bych doporučil používání přípravků obsahující boritany, které dosáhly mnohem vyšší účinnosti než přípravky na bázi fosforečnanů. Z hlediska materiálu budou mít větší uplatnění ve stavebnictví přírodní bavlněná vlákna než recyklovaná díky dosažení vyšší třídy reakce na oheň D.

5 POUŽITÉ ZDROJE

- [1] Ceny elektřiny a plynu letí vzhůru. Dodavatele letos změnilo nejvíc zákazníků za posledních šest let | iROZHLAS - spolehlivé zprávy. iROZHLAS - spolehlivé a rychlé zprávy [online]. Copyright © 1997 [cit. 07.01.2019]. Dostupné z: <https://www.irozhlas.cz/ekonomika/ceny-elektriny-2018-vyvoj-rostou-ceny-zemniho-plynu_1810031523_ako>
- [2] Novotný, Jiří, Matuška, Tomáš. Emise CO₂ a jejich dopad na hodnocení zdrojů v budovách, In: *tzbinfo.cz* [online]. 19. 03. 2018. [cit. 07. 01. 2019]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/provoz-a-udrzba-vytapeni/17112-emise-co2-a-jejich-dopad-na-hodnoceni-zdroju-v-budovach#english_synopsis>
- [3] ČSN EN 13501-1+A1, Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb – Část 1: Klasifikace podle výsledků zkoušek reakce na oheň, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 48 s.
- [4] ČSN 73 0810, Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 64 s.
- [5] ČSN 73 0540-2, Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 56 s.
- [6] ČSN 73 0540-1, Tepelná ochrana budov – Část 1: Terminologie, Praha: Český normalizační institut, 2005, 68 s.

- [7] Šípková V., Korbelová Š., Labudek J., Kraus M., Stavební tepelné izolace pro svislé konstrukce, Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014, 56 s., ISBN 978-80-248-3661-4
- [8] ZACH, J., Speciální izolace, VUT v Brně, Brno, 2011. Dostupné z: <<http://www.fce.vutbr.cz/thd>>.
- [9] Materiály pro tepelné izolace I, ČVUT v Praze, [online]. Cit. [17. 12. 2018] Dostupné z: <[http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaska_VIII_IZMA\(1\).pdf](http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaska_VIII_IZMA(1).pdf)>.
- [10] Slípková, A., Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken, Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2012.
- [11] Kosturová, A., Studium tepelně vlhkostního chování tepelně izolačních materiálů na bázi přírodních vláken, Bakalářská práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2016.
- [12] CHYBÍK, J. Přírodní stavební materiály. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, a.s., 2009, 272 s. ISBN 978-80-247-2532-1.
- [13] Přikrylová, P., Studium tepelně vlhkostního chování stavebních materiálů na bázi přírodních a syntetických vláken, 55 s., 60 s. příl., Bakalářská práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2015.
- [14] Bavlny - bavlna. Bavlny - bavlna [online]. Copyright © 2011 [Cit. 18. 12. 2018]. Dostupné z: <<http://www.bavlny.cz/>>
- [15] Bavlna, [online]. Cit. [18. 12. 2018]. Dostupné z: <http://wwwold.ekovesnicky.cz/remesla/bavlna_index.html>

- [16] Přikrylová, P., Vývoj tepelně izolačních materiálů na bázi odpadních textilních vláken, 88 s., 93 s. příl., Diplomová práce, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2017.
- [17] Yi Lu, Yaling Jia, Yang Zhou, Jie Zou, Guangxian Zhang, Fengxiu Zhang, Straightforward one-step solvent-free synthesis of the flame retardant for cotton with excellent efficiency and durability, Carbohydrate Polymers, Volume 201, Pages 438-445, 2018, ISSN: 0144-8617.
- [18] ČSN 73 0802, Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 120 s.
- [19] ZVUK BAVLNY ANEB OD BAVLNY K NITI. — Google Arts & Culture. Google Arts & Culture [online]. Cit. [27. 12. 2018]. Dostupné z: <https://artsandculture.google.com/exhibit/zvuk-bavlny-aneb-od-bavlny-k-niti/ARPJarQs?hl=cs>
- [20] Bavlna, [online]. Cit. [27. 12. 2018]. Dostupné z: <http://www.bavlna.info/>
- [21] Hoření, Fakulta bezpečnostního inženýrství — Studijní materiály. [online]. Copyright © 2018 VŠB [Cit. 27. 12. 2018]. Dostupné z: <https://www.fbi.vsb.cz/export/sites/fbi/U3V/cs/materialy/02K-Horeni-a-vybuch.pdf>
- [22] CHEMIE. CHEMIE – Oxidačně redukční reakce [online]. [Cit. 28. 12. 2018]. Dostupné z: http://www.skolni.8u.cz/H8_Oxidacne_redukcn_i_reakce.pdf
- [23] Teorie hoření, www.hasici-vzdelavani.cz. Portál hasici-vzdelavani.cz, www.hasici-vzdelavani.cz [online]. Copyright © 2013 [cit. 28. 12. 2018]. Dostupné z: <https://www.hasici-vzdelavani.cz/content/teorie-horeni>

- [24] Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. Odborná příprava jednotek požární ochrany. Konspekty odborné přípravy. Požární taktika – základy požární taktiky. Proces hoření. [online]. [cit. 02. 01. 2019]. Dostupné z: <<http://metodika.ca hd.cz/konspekty/1-1-01.pdf>>
- [25] Ministerstvo vnitra – generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky. Odborná příprava jednotek požární ochrany. Konspekty odborné přípravy. Požární taktika – základy požární taktiky. Produkty hoření. [online]. [cit. 02. 01. 2019]. Dostupné z: <<http://metodika.ca hd.cz/konspekty/1-1-05.pdf>>
- [26] Podstata, význam a historie polymerů. Publi.cz – platforma pro multimediální eBooky neboli mKnihy [online]. [cit. 03. 01. 2019]. Dostupné z: <<https://publi.cz/books/180/01.html>>
- [27] Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r. o. [online]. Copyright © [cit. 04. 01. 2019]. Dostupné z: <http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/9_vls skna_pdegurodnu_a_syntetickss.pdf>
- [28] Flame Retardant Finishes, Combustion Of Cellulose, Flame Retardant Chemicals. B2B Technical Textiles Business Solution and Marketplace - TechnicalTextile.net [online]. [cit. 04. 01. 2019]. Dostupné z: <<https://www.technicaltextile.net/articles/flame-retardant-finishes-for-cellulose-3098>>

- [29] FINÁLNÍ ÚPRAVY IX. Doc. Ing. Michal Vik, Ph.D. - PDF. Představujeme Vám pohodlné a bezplatné nástroje pro publikování a sdílení informací. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 04. 01. 2019]. Dostupné z: <<https://docplayer.cz/18297865-Finalni-upravy-ix-doc-ing-michal-vik-ph-d.html>>
- [30] Butt, D. Thermochemical processing of agroforestry biomass for furans, phenols, cellulose and essential oils. Rural Industries Research and Development Corporation. Publication, 2006. No. 6/121, 169 p.
- [31] Münster L., Modifikace hořlavosti polymerních materiálů a hodnocení efektivnosti těchto modifikací, Bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín 2011, [online]. Cit. [06. 01. 2019]. Dostupné z: <<http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/17124>>
- [32] Petrová Š., Soudek P., Vaněk T., Retardanty hoření, jejich použití a vliv na životní prostředí, Ústav experimentální botaniky Akademie věd České Republiky v.v.i., Praha 6 2015, [online]. Cit. [06. 01. 2019]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2015_09_679-686.pdf>
- [33] Kuba P., Studium materiálů obsahujících retardéry hoření metodami termické analýzy, Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Zlín 2010, [online]. Cit. [06. 01. 2019]. Dostupné z: <<http://digilib.k.utb.cz/handle/10563/13666>>
- [34] SHEN, Kelvin K.; KOCHESFAHANI, Saied H.; JOUFFRET, Frederic. Fire Retardancy of Polymeric Materials. Second edition. Boca Raton, Fla : CRC Press, 2010. Boron-Based Flame Retardants and Flame Retardancy, 853 s. ISBN 1420083996.

- [35] WOFFOVÁ, H. Teplotní degradace dřeva s aplikací retardérů hoření. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ladislav Šnajdárek.
- [36] Effect of phosphorus and nitrogen on flame retardant cellulose: A study of phosphorus compounds - ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2006 Elsevier B.V. All rights reserved. [cit. 07. 01. 2019]. Dostupné z: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237006001276#fig2>>
- [37] Straightforward one-step solvent-free synthesis of the flame retardant for cotton with excellent efficiency and durability - ScienceDirect. ScienceDirect.com | Science, health and medical journals, full text articles and books. [online]. Copyright © 2018 Published by Elsevier Ltd. [cit. 07. 01. 2019]. Dostupné z: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861718309871#bib0110>>
- [38] Vyhláška č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby, In: Sběrka zákonů, 2009
- [39] Vyhláška č. 23/2008 Sb. o technických podmínkách požární ochrany staveb, In: Sběrka zákonů, 2008
- [40] ČSN EN ISO 11925-2, Zkoušení reakce na oheň – Zápalnost stavebních výrobků vystavených přímému působení plamene – Část 2: Zkouška malým zdrojem plamene, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 32 s.

- [41] ČSN EN 13823+A1, Zkoušení reakce stavebních výrobků na oheň – Stavební výrobky kromě podlahových krytin vystavené tepelnému účinku jednotlivého hořícího předmětu, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015, 102 s.
- [42] Tetraboritan sodný – Wikipedie, otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 10. 01. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tetraboritan_sodn%C3%BD>
- [43] Kyselina boritá – Wikipedie, otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 10. 01. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kyselina_borit%C3%A1>
- [44] Uhličitan sodný – Wikipedie, otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 10. 01. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhli%C4%8Ditan_sodn%C3%BD>
- [45] Fosforečnan amonný – Wikipedie, otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 10. 01. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fosfore%C4%8Dnan_amonn%C3%BD>
- [46] Dihydrogenfosforečnan amonný – Wikipedie, otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 10. 01. 2019]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dihydrogenfosfore%C4%8Dnan_amonn%C3%BD>

- [47] Budenheim at ECS 2015: Unveils FR CROS® 584 Ammonium Polyphosphate for Intumescent Coatings. Coating Chemicals Database | Online Raw Materials Selection [online]. Copyright © SpecialChem 2019 [cit. 10. 01. 2019]. Dostupné z:
<<https://coatings.specialchem.com/news/product-news/budenheim-at-ecs-2015-unveils-fr-cros-584-ammonium-polyphosphates-for-intumescent-coatings>>
- [48] Síran hlinitý - Wikipedie, otevřená encyklopedie. [online]. [cit. 10. 01. 2019]. Dostupné z:
<https://cs.wikipedia.org/wiki/S%C3%ADran_hlinit%C3%BD>