

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
FAKULTA LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ

**PROTIPOŽÁRNÍ ODOLNOST ROSTLÉHO AKÁTOVÉHO
DŘEVA A DŘEVA TEPELNĚ UPRAVENÉHO
(THERMOWOODU) OŠETŘENÉHO SYNTETICKÝM
ANTIPYRÉNEM**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program:

Dřevařské inženýrství

Pracoviště (katedra/ústav):

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

2019

Bc. Martin Staněk

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Martin Staněk

Dřevařské inženýrství

Název práce

Protipožární odolnost rostlého akátového dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného syntetickým antipyrénem.

Název anglicky

Fire Resistance of solid wood acacia and wood heat-treated (Thermowood) with synthetic retarder

Cíle práce

Základním cílem práce je ze-sumarizovat poznatky o vybraných požárních charakteristikách a jejich vlivu na rostlé a tepelně upravené dřevo ošetřené pomocí antipyrénu na syntetické bázi.

Metodika

1. Úvod
2. Analýza problematiky:
 - vliv stupně termické modifikace na změny požárních vlastností různých druhů termicky modifikovaných dřevin,
 - vliv aplikace syntetického antipyrénu na požární vlastnosti termicky modifikovaného dřeva.
3. Přínosy a doporučení
4. Závěr

Doporučený rozsah práce

80 stran

Klíčová slova

požární charakteristiky, antipyrén, thermowood

Doporučené zdroje informací

Park, J.S., et al. 2006.: Fire performance of laminated veneer lumber (LVL) with glued-in steel rod connections

Terzi, E. et al. 2011.: Fire performance and decay resistance of solid wood and plywood treated with quaternary ammonia compounds and common fire retardants

Předběžný termín obhajoby

2017/18 LS – FLD

Vedoucí práce

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Protipožární odolnost rostlého akátového dřeva a dřeva tepelně upraveného (thermowoodu) ošetřeného syntetickým antipyrénem; vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze, dne 2019

.....

Martin Staněk

Poděkování

Diplomová práce vznikla pod vedením doc. Ing. Milana Gaffa, PhD. Tímto bych chtěl poděkovat za veškeré připomínky a odbornou pomoc při vypracování této práce.

Abstrakt ve státním jazyce

Diplomová práce předkládá ucelený přehled o problematice týkající se požární odolnosti dřeva a dřevěných materiálů. Práce obsahuje dvě části. První část diplomové práce se zabývá analýzou a ze-sumarizací literárních poznatků o vlastnostech dřevěného materiálu jak rostlého, tak také tepelně modifikovaného. V této části je dřevo popsáno z pohledu hořlavého materiálu a procesu hoření. Dále je zde rozebrán plamen jako takový a jeho vlastnosti. Neméně důležitou částí je část, zabývající se tepelnou modifikací dřeva a možnostmi ochrany dřeva před účinky požáru. Druhá část diplomové práce je zaměřena na experimentální výzkum, ve kterém byly shrnuty poznatky o vlivu jednotlivých faktorů jako je teplota termické modifikace a účinek syntetického antipyrénu na sledované charakteristiky hoření (úbytek hmotnosti, rychlost hoření, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření, doba dosažení maximální rychlosti hoření). Sledovala se i interakce uvedených faktorů na zmíněné charakteristiky. V rámci této zkuškové metody byla vybrána dřevina akát. Celkově proběhlo měření na 40 vzorcích, ty byly rozděleny do dvou podsouborů po 20 vzorcích, jeden podsoubor s ochranou syntetickým antipyrénem a druhý bez jakékoliv ochrany. Každý z podsouboru navíc obsahoval 5 vzorků podle teploty jejich termické úpravy (20 °C, 160 °C, 180 °C, 210 °C). Ze zkuškové metody měření bylo zjištěno, že na požární charakteristiku rychlost hoření a dobu dosažení maximální rychlosti hoření nemá výrazný vliv termická modifikace a kombinace retardéru a termické modifikace. V případě požární charakteristiky poměr maximální rychlosti hoření se ukázalo, že nemá výrazný vliv kombinace retardéru a termické modifikace. V ostatních případech nasvědčují výsledky, zhotovené pomocí statické analýzy, že je potvrzena spojitost vlivu retardéru, termické modifikace a kombinace termické modifikace a retardéru na úbytek hmotnosti a maximální rychlost hoření.

Klíčová slova: požární charakteristiky, antipyrén, thermowood

Abstrakt v cizím jazyce

The thesis presents an overview of the issues related to fire resistance of wood and wood materials. The thesis contains two parts. The first part of the thesis deals with the analysis and summarization of the literary knowledge about the properties of wood material as well as thermally modified. In this part, wood is described from the perspective of combustible material and the burning process. Furthermore, is there analyse the flame as such and its properties. No less important part is the part dealing with the thermal modification of wood and the possibilities of wood protection against the effects of fire. The second part of the thesis is focused on experimental research, in which was summarized the knowledge of the influence of individual factors like is thermal modification temperature and the effect of synthetic antipyrene on the observed burning characteristics (weight loss, burning rate, maximum burning rate, ratio of maximum burning rate, time of reaching maximum burning rate). The interaction of these factors was also monitored. Within this test method was selected the wood species acacia. A total of 40 samples were measured, these were divided into two subsets of 20 samples, one subset with synthetic antipyrene protection and the other without any protection. Each subset contained 5 samples according to their thermal treatment temperature (20°C, 160 °C, 180 °C, 210 °C). From the test method of measurement it was found that the fire characteristics the burning rate and the time to reach the maximum burning rate are not significantly affected by thermal modification and the combination of retarder and thermal modification. In the case of fire characteristics, the ratio of maximum burning rate has been shown to haven't significant effect on the combination of retarder and thermal modification. In other cases, the results obtained help by static analysis is confirmed of retarder influence, thermal modification and combination of thermal modification and retarder on weight loss and maximum burning rate.

The keywords: fire characteristics, antipyrene, thermowood

Obsah

Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Seznam zkratk	13
1 Úvod	14
2 Cíle práce	16
3 Dřevo jako hořlavý materiál	17
3.1 Tepelné vlastnosti dřeva	18
3.2 Vliv struktury dřeva k jeho trvanlivosti.....	18
3.3 Proces hoření	19
3.3.1 Faktory ovlivňující proces hoření	22
3.4 Termická degradace dřeva.....	23
4 Plamen a jeho vlastnosti	25
4.1 Rozdělení plamene	25
4.2 Hoření a jeho druhy	25
4.3 Teplota plamene	26
4.4 Průběh hoření.....	26
4.5 Šíření plamene	28
4.6 Uvolňování oxidu dusíku při hoření dřeva	28
5 Zapálení a hoření dřeva	29
5.1 Hloubka zuhelnatění	30
5.2 Požární odolnost dřeva v konstrukci	31
5.2.1 Návrhové hodnoty pro požární odolnost materiálu	32
5.2.2 Požární odolnost spojů chráněných a nechráněných	33
6 Požární vlastnosti materiálů na bázi dřeva	35
7 Tepelná modifikace dřeva	37
7.1 Druhy termicky upraveného dřeva	38
7.1.1 ThermoWood	38
7.1.2 PLATO proces	39
7.1.3 OHT proces	39
7.1.4 Royal proces.....	40
7.1.5 Retifikační proces	40
7.2 Požární vlastnosti termicky upraveného dřeva.....	40

8	Ochrana dřeva proti ohni.....	41
8.1	Ochrana dřeva antipyrény.....	42
8.1.1	Anorganické retardéry hoření	45
8.1.2	Zpěňující nátěry a nástřiky.....	46
8.1.3	Protipožární pásy, fólie a obklady	47
8.2	Způsoby impregnace	48
8.2.1	Beztlaková technologie.....	49
8.2.2	Tlaková technologie.....	50
8.2.3	Speciální druhy impregnace.....	50
8.3	Konstrukční ochrana dřeva.....	50
9	Přípravky na ochranu dřeva proti ohni.....	52
9.1	Dexaryl B a Dexaryl B Transparent	52
9.2	Flamgard a Flamgard Transparent.....	52
9.3	Plamor OK V 2026.....	53
9.4	Interdens Typ 5, 15 a 36	53
9.5	Plamostop D	54
9.6	Pragokor Pyronit 15.....	54
10	Metody zjišťování hořlavosti dřevěného materiálu.....	55
10.1	Testování dřeva vůči abiotickým činitelům	55
10.2	Stupně hořlavosti a třídy reakcí na oheň	55
11	Metodika experimentální části.....	57
11.1	Materiál vzorků	57
11.1.1	Postup přípravy vzorků před měřením odolnosti proti ohni	58
11.1.2	Tepelná modifikace vzorků.....	59
11.1.3	Syntetický retardér hoření.....	61
11.2	Metoda postupu měření	62
11.3	Výpočty a hodnocení	66
12	Výsledky a diskuze	68
12.1	Úbytek hmotnosti	70
12.2	Rychlost hoření.....	71
12.3	Maximální rychlost hoření	73
12.4	Poměr maximální rychlosti hoření	74
12.5	Doba dosažení maximální rychlosti hoření	76
13	Závěr.....	78

14 Seznam použité literatury.....	80
--	-----------

Seznam obrázků

Obr. č. 1 Trojúhelník hoření	20
Obr. č. 2 Schéma jednotlivých fází požáru	21
Obr. č. 3 Rychlost odhořívání nechráněného dřeva při konstantní teplotě 800 °C	28
Obr. č. 4 Změna dřeva v průřezu prvku při požáru.....	29
Obr. č. 5 Nátěrové systémy a jejich prioritní možnosti použití	43
Obr. č. 6 Princip zpěňujících nátěrů	46
Obr. č. 7 Vážení vzorků.....	58
Obr. č. 8 Trvání a průběh termické modifikace.....	60
Obr. č. 9 Termicky upravené vzorky akátového dřeva.....	60
Obr. č. 10 Syntetický nátěr Flamgard	61
Obr. č. 11 Měření úbytku hmotnosti termicky modifikovaného vzorku bez syntetické ochrany	63
Obr. č. 12 Měření úbytku hmotnosti termicky modifikovaného vzorku s protipožárním nátěrem	63
Obr. č. 13 OHAUS typ Scout, model STX2201 s rozhraním USB	64
Obr. č. 14 Soubor zařízení pro měření.....	65
Obr. č. 15 Vizuální rozdíl mezi neošetřenými a ošetřenými vzorky	67
Obr. č. 16 Vizuální porovnání termické degradace mezi skupinami vzorků.....	69
Obr. č. 17 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na úbytek hmotnosti	71
Obr. č. 18 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na rychlost hoření	72
Obr. č. 19 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na maximální rychlost hoření	74
Obr. č. 20 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na poměr maximální rychlosti hoření	75
Obr. č. 21 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na době dosažení maximální rychlosti hoření	77

Seznam tabulek

Tab. č. 1 Teploty plamene	26
Tab. č. 2 Hmotnostní rychlost hoření	27
Tab. č. 3 Rychlost zuhelnatění pro dřevo	31
Tab. č. 4 Anorganické retardéry hoření	45
Tab. č. 5 Zpěňující retardéry hoření	47
Tab. č. 6 Protipožární fólie a pásy	47
Tab. č. 7 Maximální nánosy beztlakové technologie.....	49
Tab. č. 8 Vztah mezi stupni hořlavosti a třídami reakce na oheň	56
Tab. č. 9 Trvání tepelné úpravy	59
Tab. č. 10 Charakteristiky hoření nemodifikovaného a tepelně modifikovaného akátového dřeva	68
Tab. č. 11 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na úbytek hmotnosti	70
Tab. č. 12 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na rychlost hoření	72
Tab. č. 13 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na maximální rychlost hoření	73
Tab. č. 14 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na poměr maximální rychlosti hoření	75
Tab. č. 15 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na době dosažení maximální rychlosti hoření	76

Seznam zkratk

d_{char} – hloubka zuhelnatění (mm),

f_{20} – 20% kvantil pevnostní vlastnosti při běžné teplotě,

$f_{d,fi}$ – návrhová pevnost při požáru,

$k_{\text{mod},fi}$ – modifikační součinitel požáru,

m_0 – hmotnost vzorku před zkouškou (g),

m_1 – hmotnost vzorku v určitém časovém intervalu (po 10 sekundách) (g),

m_t – hmotnost (g) v čase t ,

m_{t+10} – hmotnost (g) vzorku o 10 sekund více,

m_{t0} – hmotnost (g) vzorku v čase 0 (s),

P – poměr maximální rychlosti hoření (%),

S_{20} – 20% kvantil tuhostní vlastnosti při běžné teplotě,

$S_{d,fi}$ – návrhová tuhostní vlastnost při požáru,

t – čas (min),

T_{max} – maximální čas pro dosažení maximální rychlosti hoření (s).

v – rychlost hoření (%/s),

V_{max} – maximální rychlost hoření (% s⁻¹),

WL – ztráta hmotnosti (%),

β_0 – rychlost zuhelnatění (mm/min),

$\gamma_{M,fi}$ – dílčí součinitel spolehlivosti při požáru,

1 Úvod

Dřevo patří v lidské historii od nepaměti k nejpoužívanějšímu materiálu a je nezastupitelným materiálem i dnes. Jedná se stále o jeden z nejvíce používaných materiálů pro konstrukční účely, výrobu nábytku, hudebních nástrojů, stavebně truhlářských výrobků (dveře, okna, schody atd.), sportovních potřeb, hraček a spousty dalších. Patří mezi technicky a technologicky nejznámější a nejrozšířenější materiály, které mají mnoho kladných vlastností, ale i některé záporné.

Mezi nejvýznamnější výhody patří jeho dostupnost a obnovitelnost zdrojů, dále dobrá opracovatelnost a manipulace s čímž souvisí i snadná spojitelnost s ostatními materiály, dobré izolační schopnosti a velmi dobrý poměr pevnosti oproti hmotnosti prvku. V případě negativních vlastností dřeva se jedná o nehomogenost (různorodá struktura), anizotropie (rozdílné vlastnosti dřeva v jiných směrech), sesychání a bobtnání a špatná odolnost proti biotickým činitelům. Proto je nezbytné uvažovat při zpracování a umístění dřeva v prostředí s těmito zápornými vlastnostmi a snažit se dřevo dostatečně ať už konstrukčně nebo chemicky ochránit. V této práci nás bude ale nejvíce zajímat odolnost dřeva vůči abiotickému činiteli, kterým je termická degradace.

Pro dřevo zabudované v konstrukci je základní negativní vlastnost hořlavost, která je vůči organickému složení dřeva přirozená. Nicméně i tato negativní vlastnost má své světlé stránky, dřevo se totiž při požáru chová předvídatelně oproti jiným materiálům např. u oceli, kde je únosnost v důsledku náhlé ztráty pevnosti vyčerpána při teplotách daleko nižších než u dřeva. Při požáru u dřeva vznikne na jeho povrchu ohořelý a zuhelnatělý povrch, který má izolační vlastnosti a tím zpomaluje hoření. Dřevo pod touto izolační vrstvou neztrácí své mechanické vlastnosti.

A právě porozumění této problematice nám umožňuje navrhnout optimální řešení při zabudování a zpracování dřeva. V tomto případě nás tedy nejvíce zajímá snížení zápalnosti dřeva, a pokud k zapálení dojde, tak zpomalení procesu hoření. U nás i ve světě roste trend dřevostaveb a nyní již ne jenom v podobě malých rodinných domků, ale i v podobě vícepodlažních budov a rozsáhlých velkoplošných staveb. Tím ale rostou i požadavky na protipožární vlastnosti a odolnost materiálu proti ohni z důvodu zamezení tragických nehod v důsledku požáru. V této práci se otázkou protipožární odolnosti věnujeme dřevu rostlému i dřevu tepelně modifikovanému, které díky jeho úpravě potlačuje některé negativní vlastnosti (je odolnější proti biotickým škůdcům a povětrnostním vlivům). Práce se věnuje shrnutí poznatků o procesu hoření,

problematice hoření a požáru. V samotném závěru porovnání protipožární odolnosti dřeva rostlého a dřeva termicky modifikovaného s použitím syntetického antipyrénu (retardéru hoření) a bez něj.

2 Cíle práce

Hlavním cílem diplomové práce je ze-sumarizovat poznatky o vybraných požárních charakteristikách a jejich vlivu na rostlé a tepelně upravené dřevo ošetřené pomocí antipyrénu (retardéru hoření) na syntetické bázi.

K dosažení hlavního cíle diplomové práce je nutné analyzovat a ze-sumarizovat literární poznatky o vlastnostech dřevěného materiálu jak rostlého, tak také tepelně modifikovaného. Získat poznatky o syntetických antipyrénech, jejich vlastnostech, druzích, způsobu aplikace a použití, následně i rozšíření o poznatky získané vlastním experimentálním výzkumem, kdy rostlé a termicky modifikované dřevo upravené syntetickým antipyrénem je porovnáváno s dřevem rostlým a termicky modifikovaným bez aplikace antipyrénu. Experimentální část práce je zaměřena na posouzení vlivu jednotlivých faktorů jako je teplota termické modifikace a účinek syntetického antipyrénu na sledované charakteristiky hoření (úbytek hmotnosti, rychlost hoření, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření, doba dosažení maximální rychlosti hoření) akátového dřeva. Sledovala se i interakce uvedených faktorů na zmíněné charakteristiky.

3 Dřevo jako hořlavý materiál

V lidské historii je dřevo ze všech stavebních materiálů nejrozšířenější, technologicky i technicky nejznámější i z hlediska optického zřejmě nejoblíbenější. Jedná se o organický materiál a jako takový je dřevo i více ohroženo hnilobnými procesy, napadení hmyzem a spalitelností. Má však i pozitivní vlastnosti, které předčí tyto nevýhody. Jeho největší výhodou je relativní dostupnost a hlavně obnovitelnost zdroje, příznivý poměr váhy k pevnosti, snadná zpracovatelnost, opticky zajímavý vzhled (škála barevností, struktur a textur) a jeho snadná likvidace např. dožitých konstrukcí.

Různými procesy tepelné a chemické modifikace či impregnace je možné potlačit záporné vlastnosti dřevěného materiálu a zachovat většinu pozitivních. Protože dřevo je materiál s relativně nízkou životností, vyžaduje pro zajištění dlouhodobé životnosti zvláštní péči (Sandak a kol., 2017).

Dřevo díky svým vlastnostem od nepaměti sloužilo pro výrobu nábytku, dveří, podlahových krytin, oken, obkladů stropů a stěn, výrobu hudebních a sportovních nástrojů, zbraní atd. (Šefců a kol., 2000).

V přírodním koloběhu na dřevo působí celá řada vlivů, které dřevo poškozují, rozkládají a snižují jeho životnost. Jedná se o biotické a abiotické činitele. Biotičtí škůdci jsou rostlinné i živočišné organizmy, hlavně houby a dřevokazný hmyz. Z abiotických činitelů to jsou nejvíce povětrnostní vlivy (střídání teplot, působení světla, vody, větru a termické degradace dřeva, která přechází až k hoření dřeva) (Žák a Reinprecht, 1998).

A právě termickou degradací (abiotickým činitelem) se budeme v této práci zabývat. Co se týká dřeva jako hořlavého materiálu, dřevo je hořlavé, není však snadno zápalné. Při požáru masivní dřevo vzdoruje déle než nehořlavé látky např. jako je ocel, která při vysokých teplotách náhle ztrácí svou pevnost. Naopak hašení u dřevěných konstrukcí je obtížnější, doutnající dřevo často může znovu vzplanout. Případný požár je pro dřevěnou konstrukci většinou zničující a ohořelé části se musí vyměnit.

Vlastnosti ohořelého dřeva se mění:

- dřevěný prvek ohořením zmenší svůj profil, pod zuhelnatělou vrstvou má stále stejné mechanické vlastnosti,
- ohořelý povrch dřeva tvoří ochranu před vlhkostí a napadením,
- spálený povrch chrání dřevo proti dalšímu zapálení, ohořelé dřevo je nesnadno zápalné (Šefců a kol., 2000).

3.1 Tepelné vlastnosti dřeva

Dřevo disponuje relativně dobrými tepelně izolačními vlastnostmi. Jedná se o hořlavý materiál, proto je jeho namáhání teplem omezeno jen do určité míry, což je často považováno z hlediska ochrany proti požáru za nevýhodu. I když je dřevo materiál hořlavý, při požáru si uchovává dlouho svoji formu a pevnost. Kdežto například plasty se rychle roztaví a často hoří, kovy rychleji zvyšují svůj objem a deformují se.

Proto při akceptování platných pravidel požární ochrany, může být dřevo v různých typech staveb s úspěchem trvale použito (Žák a Reinprecht, 1998).

3.2 Vliv struktury dřeva k jeho trvanlivosti

Přirozená trvanlivost dřeva lze charakterizovat jako schopnost dřeva zachovat si původní strukturu a vlastnosti v podmínkách, které jsou příznivé pro aktivitu činitelů, kteří dřevo znehodnocují (Reinprecht a Štefko, 2000).

Důležitým poznatkem je, že struktura dřeva se dá rozdělit do čtyř hladin:

- molekulární (chemická),
- anatomická (submikroskopická),
- morfologická (mikroskopická),
- makroskopická (geometrická), která je viditelná pouhým okem.

Makroskopická (geometrická) strukturální hladina je velmi důležitá pro protipožární ochranu, například trhliny (většinou výsušné) ovlivňují rychlost vstupu degradačního činitele, v tomto případě plamene.

Kromě rozdílů v těchto hladinách v rámci jedné dřeviny je velmi důležitá i druhová rozmanitost (rozdíl mezi jehličnatými a listnatými dřevinami). Listnaté dřeviny mají mezi skupinou kruhovitě pórovitých a roztroušeně pórovitých dřevin také hodně odlišností. Velkým a výrazným faktorem, který ovlivňuje trvanlivost a možnost ochrany dřeva je jak u jehličnatých, tak listnatých dřevin přítomnost jádra, které se liší obsahem extraktivních látek (třísloviny, pryskyřice atd.). U jádrového dřeva je také velkou komplikací odlišná propustnost, špatná propustnost komplikuje a někdy až znemožňuje napouštění dřeva chemickými látkami používanými na modifikaci nebo chemickou ochranu.

Z hlediska přirozené trvanlivosti dřeva je velmi důležitý vliv extraktivních látek. Dále je obsah extraktivních látek důležitý i z hlediska ochrany dřeva různými chemickými nebo modifikačními prostředky i nátěry. Tyto extraktivní látky jsou buď zásadité, nebo kyselé povahy a mohou způsobit negativní reakci s použitým ochranným prostředkem. Proto musíme dbát na vhodné použití různých ochranných prostředků u dřevin s vyšším obsahem extraktivních látek (Reinprecht a Pánek, 2016).

Dřevo obsahuje průměrně 49,5 % uhlíku, 44,2 % kyslíku a 6,3 % vodíku. Hlavními složky dřeva je celulóza, hemicelulóza a lignin, zbytek tvoří extraktivní látky. Celulóza tvoří průměrně 43 % až 52 %, je základní složkou buněčných stěn dřeva. Obsah hemicelulózy ve dřevě tvoří průměrně 20 % až 35 % a lignin 20 % až 30 % (Požgaj a kol., 1993).

Organické hmoty (dřevo) tvoří makromolekuly, které obsahují uhlík, vodík a kyslík. Při normální teplotě a tlaku mezi nimi existují pevné vazby odolávající vzdušnému kyslíku. Pokud dřevo začneme zahřívat, dojde u makromolekul k rozkmitání a narušení těchto vazeb. Makromolekuly se následně rozpadnou na menší částice (nakonec až na monomery), které se vyskytují hlavně ve skupenství plynném. V tomto skupenství následně snadno reagují se vzdušným kyslíkem. Postupně dochází k reakcím:

- endotermické reakci, při níž se teplo absorbuje do dřeva a dochází tak k sušení,
- exotermická reakce, při tomto jevu se velké množství tepla uvolňuje a probíhá oxidace rozkladných produktů.

Pokud probíhá oxidační proces pomalu, uniká uvolněné teplo do prostředí. Když dosáhne oxidační proces určité rychlosti a uvolněné teplo se nestačí rozptýlovat do okolí, začne docházet k samozahřívání dřeva a následně k samovznícení. K tepelnému rozkladu dřeva může docházet i bez přístupu vzdušného kyslíku tzv. suchá destilace (Kupilík, 2006).

3.3 Proces hoření

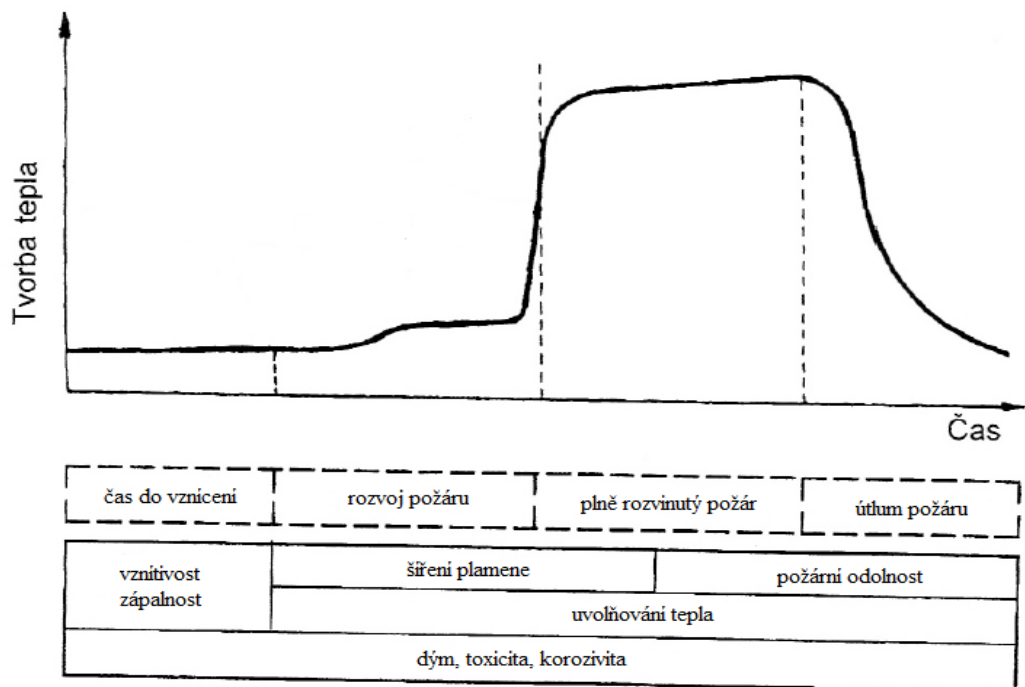
Jednou z největších nevýhod dřeva je jeho hořlavost, pokud neuvažujeme využití dřeva jako palivo a zdroj tepelné energie. U dřeva dojde k zapálení vlivem dodání energie formou plamene nebo dodáním energie formou sálavého tepla. U sálavého tepla je zápalná teplota dřeva vyšší než při vlivu plamenem (Reinprecht a Pánek, 2016).

Při narušení trojúhelníku hoření různými chemickými a fyzikálními metodami se výrazně zpomalí plamenné hoření a začne se vytvářet dřevěné uhlí, které působí jako přirozená bariéra (retardér) dalšího hoření dřevěného materiálu.

Proces hoření u dřeva a dřevěných materiálů má tři etapy:

- iniciace – zapálení (vznícení, vzplanutí),
- propagace – plamen se šíří po povrchu dřeva, děje se intenzivní termický rozklad dřeva a vlastní hoření hořlavých plynů, které vznikly termickým rozkladem dřeva (termooxidační reakcí hořlavých plynů s kyslíkem se uvolňuje světelná a tepelná energie),
- terminace – po ústupu plamenného hoření (předchozí stupeň) nastává žhavení a nakonec úplný útlum žhavení (Reinprecht, 2008).

Na obr. č. 2 jsou schematicky znázorněny jednotlivé fáze požáru.



Obr. č. 2 Schéma jednotlivých fází požáru

Zdroj: (Reinprecht, 2008)

Průběh hoření (členění podle prostorových komponentů):

- bod – dochází ke vzplanutí v bodovém rozsahu,
- plocha – plamen se rozšíří po ploše povrchu dřeva,
- prostor – oheň vniká do materiálu (Svatoň, 2000).

3.3.1 Faktory ovlivňující proces hoření

Faktory, které ovlivňují proces hoření lze rozdělit na primární a sekundární (Svatoň, 2000).

Mezi primární faktory patří:

- anatomická stavba dřeva,
- fyzikální vlastnosti dřeva,
- chemické složení dřeva.

Sekundární faktory:

- okolí objektu,
- atmosférické vlivy,
- zdroj tepla.

Anatomická struktura má na hoření vliv spočívající v unikání zápalných plynů přes vodící elementy a kapilární systém do dřeva. Těmito systémy také proniká kyslík. U různých druhů dřevin jsou vodící elementy rozličných velikostí a také jejich uspořádání se liší. Ale i tak není vliv anatomické struktury nejpodstatnější. Co se týká hustoty dřeva, z pravidla se dá říci, že čím je hustota dřeva vyšší, tím se hořlavost snižuje.

Chemické složení dřeva má velký vliv na proces hoření. Záleží na poměrném zastoupení hlavních složek dřeva (celulózy, hemicelulózy a ligninu). Jednotlivá procenta zastoupení těchto látek se liší podle druhu dřeviny. Také teplotní odolnost jednotlivých složek (celulóza, hemicelulóza a lignin) se liší.

Celulózové a hemicelulózové polymery degradují působením vysoké teploty mnohem dříve než složky ligninu. Ligninové složky přispívají k tvorbě zuhelnatělé

vrstvy, které následně vytváří izolační vrstvu, která tlumí rychlost tepelné degradace (Rowell, 2007).

V případě hemicelulózy se jedná o nejméně odolnou složku dřeva, ta se rozkládá již při teplotách 150 - 240 °C. Celulóza je v porovnání s hemicelulózou odolnější, její mírný rozklad nastává při teplotách 200 - 250 °C. Následně dochází k intenzivnímu rozkladu, a to až při 250 - 350 °C. Stavební složka lignin je nejodolnější, jeho rozklad probíhá při teplotách 300 - 400 °C. Z tohoto vyplývá, že druhy s vyšším obsahem hemicelulózy jsou snadněji zápalné, vyšší podíl této složky je u listnatých dřevin (topol, buk, bříza).

Vliv fyzikálních vlastností na proces hoření spočívá v kvalitě a způsobu opracování povrchu dřeva. Dle způsobu opracování dřeva (řezání, broušení, frézování atd.) je závislá drsnost povrchu (kvalita), která má vliv na součinitel prostupu tepla. Čím hladší a kvalitnější povrch, tím lépe se odráží energie plamenného a sálavého zdroje. To znamená, že je hůře zápalný než materiál s drsným povrchem za působení stejných podmínek. Plamen se šíří pomaleji na hladkém povrchu. Také geometrický tvar materiálu je velmi podstatná fyzikální vlastnost, která ovlivňuje proces hoření. S větším průměrem a tloušťkou získává materiál větší odolnost (u dýhy bude větší intenzita hoření než u hranolu či fošny). Krom tloušťky se dá zmínit i počet hran, velikost jejich úhlů, zaoblení atd. Vlhkost dřeva také ovlivňuje hořlavost. Určité množství tepla je vstřebáno na přeměnu vody v páru, která se následně mísí se zápalnými plyny ve dřevě a snižuje tak zápalnost (Svatoň, 2000).

3.4 Termická degradace dřeva

Dřevo dosahuje výraznější degradace při teplotách nad 110 °C. Do hranice této teploty dochází jen k minimálním chemickým změnám. Při nižších teplotách může dojít k výraznějšímu poškození dřeva pouze v případě rychlého odpařování vody, při kterém vznikají výsušné trhliny (Reinprecht a Pánek, 2016).

Termická degradace dřeva je iniciovaná ohřevem (tepelnou energií), jedná se o soubor chemických reakcí (dehydratace, depolymerizace atd.). K nejvýraznějšímu termickému narušení stavebních složek dřeva dochází při teplotách až nad 150 °C. Při této tepelné hranici se nejprve rozkládají hemicelulózy, následuje celulóza a nakonec nejstabilnější složka dřeva, kterou je lignin.

- hemicelulózy – rozklad už při teplotách 200 °C,
- celulóza – výrazná depolymerizace při teplotách nad 300 °C,
- lignin – výrazný exotermický rozklad až při teplotách 300 až 400 °C.

Významnou úlohu při termickém rozkladu dřeva má kyslík. Kyslík reaguje s termicky aktivovanými složkami dřeva. Dřevo se takto ještě více přehřívá (Reinprecht, 2008).

Při termické degradaci dřeva dochází k tvorbě a úniku hořlavých plynů, které působí na povrchu dřeva při vzniku plamene, což urychluje i jeho šíření. Pro hoření je nutný přísun kyslíku, při jeho nedostatku, dochází k pyrolýze dřeva. Během pyrolýzního procesu vzniká těkavý, kapalný podíl (dřevní dehet) a tuhý zbytek v podobě dřevěného uhlí (Reinprecht a Pánek, 2016).

Tepečný rozklad dřeva jde podle Kupilík, (2006) rozdělit na následující etapy:

- teplota pod 100 °C, dřevo se začíná vysušovat, dochází ke ztrátě vlhkosti volné;
- při dlouhodobém působení teplot od 100 - 150 °C dojde k celkové ztrátě volné vlhkosti;
- při teplotách od 150 - 200 °C nastává ztráta vlhkosti vázané a vyvíjí se vodní pára;
- od teploty 200 - 280 °C narůstá vývoj vodní páry a uvolňují se látky těkavé;
- v intervalu 280 - 400 °C dochází k exotermické reakci, při níž teplota rychle stoupá (vznik směsi lehce zápalných plynů);
- od teploty 400 - 500 °C uvolnění maximálního množství hořlavých plynů;
- nad teplotou 500 °C se redukuje vývin plynů.

4 Plamen a jeho vlastnosti

Plamen je při hoření dřeva za přístupu vzdušného kyslíku různě velký. Na začátku hoření je plamen největší, z povrchu dřeva totiž odcházejí těkavé produkty (pryskyřice, tuky, éterické oleje). Bod vzplanutí těchto látek má nižší hodnotu než je bod vzplanutí rozkladných produktů. V další fázi dochází k utlumení plamene, to má za následek nedostatečná rychlost zahřátí těkavých látek v hlubších vrstvách dřeva na požadovanou teplotu vlivem horší vodivosti dřeva. Jakmile je ale dosaženo požadované teploty, dochází znovu ke zvětšení plamene (k rozkladu celulózy a k přímé reakci mezi kyslíkem a uhlíkem). Tuto fázi doprovází snížení původní pevnosti dřeva (Kupilík, 2006).

4.1 Rozdělení plamene

Rozdělení podle velikosti ploch hoření:

- laminární plamen,
- turbulentní plamen.

U malých ploch hoření (svíčka, hořák) se jedná o laminární plamen. Turbulentní plamen vzniká u větších rychlostí hořlavých plynů, pulzuje, rovina povrchu se mění a tím se zvětšuje povrch plamene a hoření se urychluje.

Rozdělení plamene podle viditelnosti:

- svítivý – v plamenu je volný uhlík při menším obsahu kyslíku;
- nesvítivý – uhlík shoří a plamen je nesvítivý, pokud obsahuje hořlavina více než 50% kyslíku;
- čadivý – čadivý plamen vzniká při velkém množství uhlíku a nepatrném množství kyslíku, uhlík nestačí shořet a je vyloučen ve formě sazí (Svatoň, 2000).

4.2 Hoření a jeho druhy

Rozlišujeme dva druhy hoření, jedná se o hoření homogenní a heterogenní.

O homogenní hoření se jedná, pokud je hořlavina i oxidovadlo v plynné fázi. Látky, které se mezi sebou vzájemně mísí, nemají při hoření povrchové rozhraní. Pro homogenní hoření je charakteristický plamen tzv. plamenné hoření.

V případě heterogenního hoření se jedná o kombinaci pevné hořlaviny (dřevěné uhlí) s plynným kyslíkem. Hoření probíhá na povrchu pevné hořlaviny. Oproti homogennímu hoření se heterogenní vyznačuje nepřítomností plamene, tuhá hořlavina pouze žhne (světélkuje). Intenzita žhnutí je závislá na teplotě, při teplotě 400 °C je barva šedá, tmavě červená při 700 °C a světle červená při 900 °C.

Kromě druhu hoření rozeznáváme dále i oblast hoření, a to kinetickou a difuzní. Kinetická oblast hoření je závislá na rychlosti chemické reakce při čase spalování. Difuzní oblast hoření je závislá na vytváření hořlavé směsi při čase hoření (Svatoň, 2000).

4.3 Teplota plamene

Teploty plamene jsou různé, pohybují se od 500 °C až do více než 5000 °C. V následující tab. č. 1 jsou uvedeny příklady teplot plamene u různých látek.

Tab. č. 1 Teploty plamene

Látka	Teplota plamene
Cigareta	450 - 600 °C
Svíčka	850 - 940 °C
Zápalka	650 - 800 °C
Plynový hořák	1700 - 1975 °C
Acetylén	kolem 2 200 °C

Zdroj: (Svatoň, 2000)

Teplota plamene není všude stejná (objem i výška plamene), dochází zde k různému rozložení reagujících látek. V dolní části plamene je směs nejvýchvěvnější, avšak teplota zde nedosahuje maxima, jelikož je teplo částečně spotřebováváno na ohřev a rozklad oxidovadla (Svatoň, 2000).

4.4 Průběh hoření

U dřeva jakožto tuhého paliva dochází při zahřátí k pyrolýze, rozkladu a zároveň k tvorbě plynných, prchavých látek a uhlíkového zbytku. Plamenem hoří plynné produkty

a uhlíkové zbytky po uvolnění prchavých látek oxidují kyslíkem, který se dostává difuzí na povrch pevné látky.

Rozdělujeme dva druhy rychlosti hoření u pevných látek. Hmotnostní rychlost hoření ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) a lineární rychlost hoření ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$).

Rychlost hoření je závislé na různých faktorech, jako je závislost poměru povrchu k objemu (dřeva), hustotě, vlhkosti, rychlosti větru, přístupu vzduchu, množství hořlaviny na jednotku plochy a dalších (Svatoň, 2000).

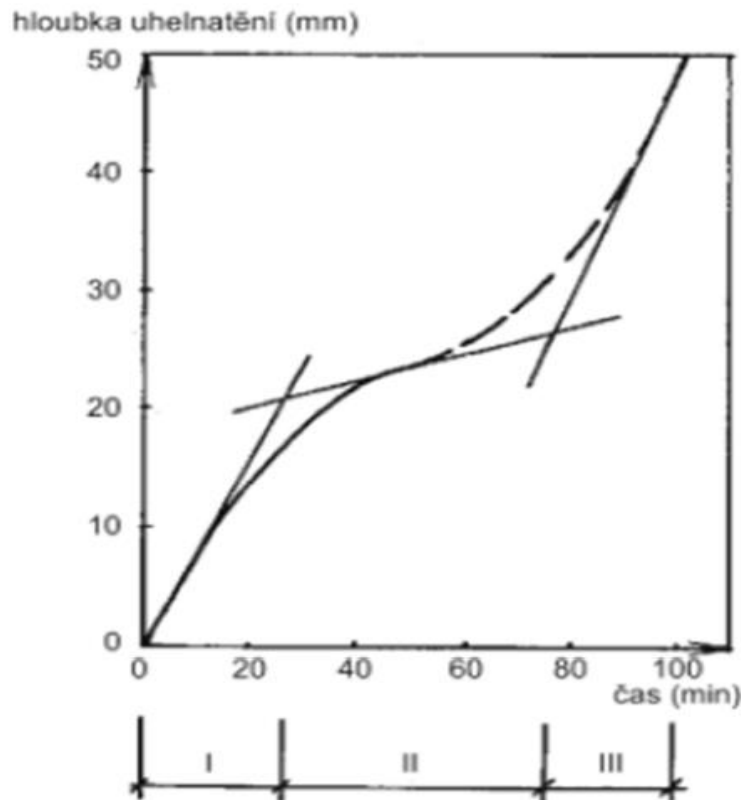
V tab. č. 2 je znázorněno několik hodnot hmotnostní rychlosti hoření pro různé materiály.

Tab. č. 2 Hmotnostní rychlost hoření

Materiál	Hmotnostní rychlost hoření ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)
Dřevo (w 14%)	50
Bavlna (w 6 - 8%)	8,5
Papír	24
Vlna (w 6%)	21,6

Zdroj: (Svatoň, 2000)

Rychlost odhořívání je rozdílná v jednotlivých fázích odhořívání, nemá tudíž lineární závislost. Na obr. č. 3 je znázorněn průběh odhořívání nechráněného dřeva při zahřívání konstantní teplotou 800 °C.



Obr. č. 3 Rychlost odhořívání nechráněného dřeva při konstantní teplotě 800 °C

Zdroj: (Kupilík, 2006)

4.5 Šíření plamene

Šíření plamene po povrchu závisí dle prostorového uspořádání dřevní hmoty (podlahy, stěny, stropní podhledy). Nejpomalejší šíření plamene je na podlaze, jedná se asi o třetinu rychlosti šíření plamene na stěně. Nejrychlejší šíření plamene je na stropním podhledu a jedná se přibližně o pětinasobek rychlosti šíření plamene na stěně (Kupilík, 2004).

4.6 Uvolňování oxidu dusíku při hoření dřeva

V rostlém dřevu se nachází obsah dusíku v rozmezí od 0,04 % do 0,5 %, pro bukové a borovicové dřevo může být tento obsah i vyšší. Obsah dusíku je závislý na typu dřeva, místě výskytu, roční době dokonce i části kmene. Při spalování přírodního dřeva se vytvářejí oxidy dusíku, z nichž největší podíl má oxid dusitý 95%, zbývající část je hlavně oxid dusičitý a oxid dusnatý (Chuděj, 2008).

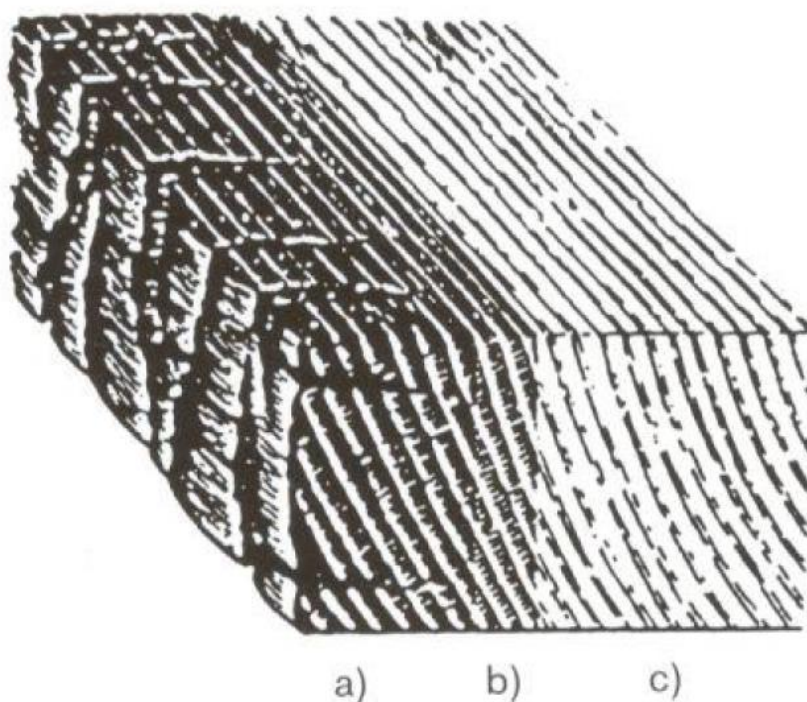
5 Zapálení a hoření dřeva

Požární odolnost dřeva a materiálu na bázi dřeva je charakterizována rychlostí zuhelnatění. Při požáru dřevo ani materiály na bázi dřeva nepraskají a příliš nesychají, na povrchu se netvoří trhliny a je spíše uzavřený (Kuklík, 2005).

Při vystavení dřeva či materiálu na jeho bázi požáru dojde na jeho povrchu k vzplanutí. Od vzplanutí přejde požár k silnému hoření do doby, než se na povrchu začne vytvářet zuhelnatělá vrstva. Tato zuhelnatělá vrstva dřevní hmoty brání v přístupu vzduchu do vnitřní části a tím tlumí hoření. Poskytuje také poměrně dobré tepelně izolační vlastnosti (Barber a Gerard, 2015).

Z toho vyplývá, že teplota ve zbytkovém průřezu zasaženého prvku požárem zůstává již v malé vzdálenosti od povrchu nezměněna. Ve zbytkovém průřezu také nedochází ke změně mechanických a fyzikálních vlastností dřeva a materiálu na bázi dřeva (Lineham a kol., 2016).

To znamená, že úbytek únosnosti prvků je dán pouze redukcí průřezu vlivem požáru. Vliv požáru na změnu dřeva v průřezu je znázorněn na obr. č. 4.



Obr. č. 4 Změna dřeva v průřezu prvku při požáru

Poznámky: a) vrstva dřevěného uhlí, b) vrstva pyrolýzy, c) tepelně nezměněné dřevo

Zdroj: (Kučera a kol., 2010)

Tepelná vodivost vrstvy dřevěného uhlí (zuhelnatělé vrstvy) je pouze cca jedna šestina tepelné vodivosti rostlého dřeva. Rozklad dřeva pod touto izolační vrstvou dřevěného uhlí probíhá zpomalně. Teplota uprostřed průřezu tudíž zůstává mnohem nižší oproti povrchu díky nízké tepelné vodivosti dřeva. Dřevěné konstrukce proto disponují vyšší požární odolností, než se všeobecně předpokládá (Kuklík a Kuklíková, 2010).

Rostlé dřevo lze považovat za tříkomponentní disperzní systém. V tepelné vodivosti rostlého dřeva je uplatněna vodivost jednotlivých komponentů: úplně suchého dřeva, vody a inertního plynu. Tepelná vodivost dřeva charakterizuje intenzitu šíření tepla a vyjadřuje ji koeficient tepelné vodivosti. Závisí na teplotě, hustotě, vlhkosti a směru tepelného toku vzhledem k orientaci dřevních vláken. Z čehož vyplývá, že čím vyšší je hustota a vlhkost dřeva, tím vyšší je tepelná vodivost (Trebula a Klement, 2002).

Odolnost proti vzplanutí a hoření dřeva je udáváno v minutách nebo sekundách. Čas se začne započítávat od počátku působení určité teploty na dřevo až do jeho vzplanutí či hoření (Kupilík, 2006).

5.1 Hloubka zuhelnatění

Hloubka zuhelnatění je určena vzdáleností mezi vnějším povrchem původního prvku a polohou čáry zuhelnatění. Určuje odolnost dřeva proti požáru. Hloubku zuhelnatění lze posuzovat z průřezu prvku vystaveného účinkům požáru a je určena dobou, po kterou je daný prvek vystaven účinkům požáru a příslušné rychlosti zuhelnatění. Rychlost zuhelnatění rozdělujeme podle způsobu ochrany povrchu:

- nechráněný povrch během doby vystavení požáru,
- chráněný povrch, u kterého dochází k zuhelnatění ještě předtím, než je porušen plášť požární ochrany,
- chráněný povrch, který je vystaven účinkům požáru až po porušení pláště požární ochrany (Kuklík a Kuklíková, 2010).

Byla zjištěna lineární závislost mezi zuhelnatěním a dobou požáru. Při určení požární odolnosti daného průřezu se z důvodu lineární závislosti může předpokládat stálá rychlost zuhelnatění. Při jednoduchém posouzení prvků na účinky požáru (neuvažujeme

zaoblení hran) může být použita rychlost zuhelnatění β_0 . Hloubka zuhelnatění se určí dle Štefko a kol. (2006) ze vztahu:

$$d_{\text{char}} = \beta_0 \cdot t \quad (1)$$

kde:

d_{char} – hloubka zuhelnatění (mm),

β_0 – rychlost zuhelnatění (mm/min),

t – čas (min).

V tab. č. 3 jsou uvedeny hodnoty pro rostlé a lepené lamelové dřevo.

Tab. č. 3 Rychlost zuhelnatění pro dřevo

Druh dřeva	β_0 (mm/min)
Rostlé dřevo (o hustotě nejméně 290 kg/m ³)	0,8
Lepené lamelové dřevo (o hustotě nejméně 290 kg/m ³)	0,7

Zdroj: (Štefko a kol, 2006)

5.2 Požární odolnost dřeva v konstrukci

Požární odolnost v konstrukci je doba v minutách, po kterou nosné a požárně dělící konstrukce jako stěny, stropy, sloupy, vazníky, podhledy apod. odolávají účinkům požáru, aniž by u nich došlo k porušení požadované funkce tzv. k dosažení meznímu stavu jednotlivých funkcí. Mezi základní funkce patří zejména nosnost, celistvost a izolační schopnost (Pokorný a Hejtmánek, 2018).

Chování prvků ze dřeva a materiálů na bázi dřeva odlišujeme při rozhořívání a při plně rozvinutém požáru. Při rozhořívání se uplatňuje hlavně hořlavost materiálu, stupeň jeho zápalnosti, rychlost šíření ohně na jeho povrchu a míra předávání tepla. Pokud jsou všechny hořlavé materiály zachváceny ohněm, jedná se o fázi po vzplanutí tzv. plně rozvinutý požár. Požadavky na materiály během této fáze jsou zaměřeny na jejich schopnost zachovat si své mechanické vlastnosti a omezovat oheň na oblast jeho vzniku, aby nedošlo k rozšíření ohně a působení příliš vysokých teplot na straně odvrácené ohni,

kteřé by vedli k nepřímému přenosu požáru na sousední části konstrukce. Požární odolnost je označení pro schopnost odolávat plnému požáru (Kuklík a Kuklíková, 2010).

Dřevo disponuje nízkou vodivostí tepla a při působení se prakticky nemění jeho rozměry. Z těchto důvodů nejsou konstrukční spoje při působení požáru namáhány tepelnou roztažností jako u konstrukcí ocelových. V zajištění odolnosti dřevěného nosníku proti sálavému teplu a přístupu plamenů hraje velkou roli jeho uložení. Odolnost nosníku podstatně ovlivníme, pokud bude alespoň z jedné strany ve styku se stropem. Naopak pokud bude ze všech stran zpřístupněn účinkům požáru, jeho odolnost se snižuje. Proto se při navrhování nosníků k potřebným dimenzím přidává i přídavek na odhoření. Tímto se zajistí, že při vzniku požáru nosník ohoří o přidaný přídavek, ze kterého se stane zuhelnatělá vrstva (izolační) a zbytková část profilu, která je navrhována pro dané zatížení je tvořena ze zdravého dřeva (Svatoň, 2000).

Požární odolnost u nosných dřevěných prvků je ovlivněna:

- tvarem a rozměry průřezu (u sloupu se jedná o jeho štíhlost, u nosníku je odolnost dána poměrem výšky k šířce průřezu),
- velikostí napětí v průřezu,
- rychlostí odhořívání povrchových vrstev (Kupilík, 2004).

Zvolením větších rozměrů průřezů lze zajistit vyšší požární odolnost dřevěných prvků použitých v konstrukci (Barber a Gerard, 2015).

5.2.1 Návrhové hodnoty pro požární odolnost materiálu

Metoda návrhu dřevěných konstrukcí na účinky požáru je uplatněna u konstrukcí pozemních staveb. U těchto konstrukcí je požadováno splnění některých funkcí při namáhání požárem, hlavně zamezení předčasného zborcení konstrukce a omezení šíření požáru mimo danou oblast (požárně dělicí funkce). Mechanická odolnost prvků vystavených účinkům požáru se určuje dle Kučera (2010) ze vztahů:

$$f_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{f_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (2)$$

$$S_{d,fi} = k_{mod,fi} \frac{S_{20}}{\gamma_{M,fi}} \quad (3)$$

kde:

$f_{d,fi}$ – návrhová pevnost při požáru (mm/min),

$S_{d,fi}$ – návrhová tuhostní vlastnost při požáru (mm/min),

f_{20} – 20% kvantil pevnostní vlastnosti při běžné teplotě,

S_{20} – 20% kvantil tuhostní vlastnosti při běžné teplotě,

$k_{mod,fi}$ – modifikační součinitel požáru,

$\gamma_{M,fi}$ – dílčí součinitel spolehlivosti při požáru.

Modifikační součinitel pro požár $k_{mod,fi}$ zohledňuje redukci pevnostních a tuhostních vlastností za zvýšené teploty a nahrazuje modifikační součinitel pro navrhování při běžné teplotě k_{mod} . Hodnota dílčího součinitele spolehlivosti při požáru je doporučena $\gamma_{M,fi} = 1$ (Kuklík a Kuklíková, 2010).

Výpočet požární odolnosti dřevěných prvků zakládáme na dimenzaci zbytkového průřezu. Ten se stanoví na základě jednotlivých návrhových postupů pro určení hloubky zuhelnatění. Mezi zjednodušené metody návrhu patří metoda redukovaného průřezu a metoda redukovaných vlastností. V případě zdokonalené metody výpočtu vycházíme z tepelných vlastností dřeva a pro výpočet je vhodné použít výpočetních programů. Obecně pro všechny druhy konstrukcí lze požární odolnost ověřit z hlediska únosnosti, času a teploty. Výjimkou je požární odolnost dřevěných staveb, které z hlediska teploty nelze ověřit, jelikož dřevo nemá oproti jiným materiálům kritickou teplotu. Ověřením z hlediska času posoudíme, zda návrhová doba odolnosti konstrukce proti požáru je větší nebo rovna požadované době požární odolnosti. Touto metodou zjistíme přímo rezervy spolehlivosti konstrukce při požáru (Kučera, 2010).

5.2.2 Požární odolnost spojů chráněných a nechráněných

Spoje dřevěných konstrukcí musí také splňovat požární odolnost. Jednotlivé dřevěné prvky jsou spojeny ocelovými či dřevěnými spojovacími prvky nebo lepidly. V případě ocelových spojovacích prvků se jejich únosnost účinkem vysoké teploty výrazně snižuje. Jelikož je ocel oproti dřevu vynikajícím teplotním vodičem, může vést teplo z povrchu spoje až do středu dřevěného materiálu, ve kterém je ocelový spojovací prvek umístěn (Kučera, 2010).

Proto se při požáru chovají lépe ocelové spojovací prvky, jejichž plocha vystavená účinkům požáru je menší jako např. u hřebíků, vrutů apod., než u upevňovacích a spojovacích kovových desek. Čím větší je ocelová plocha, která je vystavena účinkům požáru, tím je jejich požární odolnost menší a tím pádem mají tendenci selhat rychleji (Barber a Gerard, 2015).

Požární odolnost u spojů dřevo - dřevo s nechráněnými hřebíky, vruty či kolíky lze předpokládat 15 minut. O chráněné spoje se jedná v případě, že jsou spojovací prostředky kryty ochrannými zátkami či obložení ochrannými deskami. V takovém případě se předpokládá požární odolnost 60 minut (Štefko a kol., 2006).

6 Požární vlastnosti materiálů na bázi dřeva

Podstatným kritériem při posuzování požárních vlastností materiálů z aglomerovaného dřeva (dřevotřískové a dřevovláknité desky, překližky atd.) je jejich hustota. Dýhované desky a laťovky s hustotou v rozmezí 450 - 550 kg/m³, mají hořlavost odpovídající rostlému dřevu o stejné objemové hmotnosti, což znamená, že jsou středně hořlavé. V případě vláknitých desek tvoří jejich strukturu vlákna, což má za následek, že jsou lehce hořlavá. U tvrzených vláknitých desek, které jsou vytvrzené hořlavými oleji nebo sloučeninami parafinu dochází ke zvýšení jejich hořlavosti. Další faktor, který hraje důležitou roli, hlavně u překližek, je tloušťka. Překližky o tloušťce nad 10 mm se považují za materiál středně hořlavý, naopak čím je překližka tenčí, tím je hořlavější.

U lepidel, které jsou použity k výrobě desek na bázi dřeva je reakce na požár rozdílná. Nejhuře odolávají termoplastická lepidla používaná při montážních spojkách. Již při nízkých teplotách ztrácejí svoji kohezi. Kaseinová a močovinoformaldehydová lepidla při zvýšené teplotě způsobují rozpojení materiálu. Extrémně zvýšeným teplotám, které se pohybují při uhelnatění dřeva, odolávají lepidla fenolformaldehydová. Epoxidové pryskyřice lze ovlivnit dle potřeby v podobě termoplastické nebo teplem tvrditelné.

Ochrana proti požáru materiálů z aglomerovaného dřeva:

- u dýhy či dřevotřísky impregnací před vlastním lepením,
- do nanášeného lepidla se přidávají nehořlavé látky,
- v případě hotových desek, impregnací či protipožárním nátěrem (Kupilík, 2004).

Jak již bylo zmíněno výše v textu, lze ochranné prostředky aplikovat do materiálů na bázi dřeva přímo ve fázi technologického procesu jeho výroby. Zejména při výrobě OSB, třískových nebo dřevovláknitých desek je to možné provést při:

- homogenizaci dřevních částic a aditiv v nanášecím bubnu,
- vrstvení koberce,
- lisování.

Ochranné prostředky se aplikují při výrobě materiálů na bázi dřeva v kapalném či tuhém skupenství. V některých případech i ve formě speciálních fólií, které jsou následně zalisovány do mezivrstev nebo na povrch materiálu na bázi dřeva (hlavně u překližek).

Homogenizace ochranného prostředku v nanášecím bubnu se uplatňuje hlavně při výrobě třískových a OSB desek. Používají se především retardéry hoření jako dihydrogenfosforečnan amonný a jiné. Retardér hoření se na třísky a velkoplošné třísky pro výrobu OSB desek dávkuje v nanášecím bubnu. Dávkování je možné buď před, v průběhu, anebo až po nanesení lepidla na dřevěné částice. Při aplikaci ochranné látky v práškové podobě dochází k problému dokonalého rozvrstvení v materiálu na bázi dřeva. Jedním z důvodů je propad těžších práškovitých částic prostředku na ochranu proti požáru do nižších vrstev vrstveného koberce. Tato nevýhoda při nanášení ochranné látky v této výrobní fázi se musí kompenzovat vyšším příjmem ochranné látky do aglomerovaného materiálu, a to až v rozmezí 30 – 60 %. Ale i tak je tato metoda ekonomicky výhodná, jelikož nevyžaduje dodatečné sušení předem impregnovaných částic dřeva a také zcela eliminuje potřebu cenově nákladných organických rozpouštědel atd.

Další zmíněnou metodou je zalisování tavitelného ochranného prostředku do povrchových vrstev aglomerovaného materiálu, tato metoda se používá o poznání méně. Důvodem je nutnost předúpravy vstupní vlhkosti povrchových vrstev materiálu na bázi dřeva a nutnost časté optimalizace lisovacích režimů (teplota, čas, lisovací tlak), která je nákladově i časově náročnější (Reinprecht, 2008).

7 Tepelná modifikace dřeva

Modifikace dřeva může probíhat i jiným způsobem než za účinku zvýšené teploty a to chemicky. Při chemické modifikaci jsou v procesu úpravy použity chemické látky, které působí a reagují se složkami dřeva a tím se vytváří nové chemické vazby (Rowell, 2007).

Naopak tepelná modifikace dřeva probíhá při zvýšené teplotě (okolo 180 - 230 °C). Způsobuje zvýšenou přirozenou trvanlivost dřeva. Naopak nevýhodou je snížená pevnost, hlavně v ohybu (Reinprecht a Pánek, 2016).

Použitím tepelné modifikace snižujeme potřebu aplikace toxické chemické ochrany, která je jinak nutná pro požadované zvýšení odolnosti a rozměrové stability dřeva (Todaro a kol., 2017).

Tepelná modifikace dřeva je definována jako proces, který zlepšuje vlastnosti dřeva a vytváří tak nový materiál, který není při likvidaci na konci svého životního cyklu nebezpečný pro životní prostředí (Esteves a Pereira, 2009).

Dochází tedy ke zlepšení hygroskopicity, rozměrové stability a biologické odolnosti lignocelulóзовých materiálů bez kontaminace životního prostředí (Yang a kol. 2017).

Zvýšení trvanlivosti dřeva teplem bylo používáno i v dřívějších dobách, kdy byly například opalovány konce kůlů, které byly následně zabudovány do země. V současnosti se termodřevo vyrábí za zvýšených teplot po dobu 15 minut až po 24 hodin, cílem této úpravy je dosažení lepších vlastností oproti dřevu rostlému a neupravenému. Dochází zejména ke zvýšení odolnosti proti biotickým škůdcům (dřevokazné houby, hmyz, plísňe atd.), zlepšení tvarové stálosti a hlavně možnosti využití místních dřevin v exteriéru na místo trvanlivějších a exotických dřevin (Ptáček, 2009).

Produkty termicky upraveného dřeva se běžně používají pro různé venkovní aplikace (podlahy, venkovní obklady budov, zahradní nábytek atd.). Modifikace vede k chemickým a morfologickým změnám dřeva a ztmavnutí jeho barvy. Chemické změny, ke kterým při procesu termické modifikace dochází, mají za následek ztrátu hmotnosti v důsledku odpaření vody, degradačních produktů a jiných těkavých látek (Källbom, 2018).

Jedná se o proces tepelné úpravy dřeva, při kterém je záměrně zvýšena jeho teplota. Při hydrotermické úpravě působí na dřevo kromě teploty i voda. Rozsah a typ změn ve

strukturu a vlastnostech modifikovaného dřeva termicky je ovlivněn kromě působící teploty i celkovými podmínkami prostředí tzv. zda se termická modifikace uskuteční v oxidační atmosféře nebo bez přítomnosti vzduchu (vnitřní prostředí). Dále je také ovlivněn druhem vstupního materiálu a jeho vlhkostí. Již při teplotě 110 °C se dřevo stává rozměrově stabilnější (Reinprecht, 2008).

Vlastnosti termicky upraveného dřeva:

- termicky upravené dřevo se lépe opracovává než dřevo neupravené, je ale možné uvolňování prchavých látek a tvorba jemného prachu při broušení,
- co se týká povrchové úpravy, je lepší používat nátěrové hmoty alkydové na bázi oleje nebo organických rozpouštědel. Použití akrylátových nátěrových hmot, které jsou vodou ředitelné, nejsou vhodné z hlediska migrací tuků, pryskyřic a jiných látek na povrchu dřeva,
- lepení pomocí lepidel na bázi PVAC není vhodné, vhodnější variantou jsou lepidla polyuretanová či fenolická (Ptáček, 2009).

Lze tedy předpokládat, že obrábění tepelně modifikovaného dřeva vede k lepší hladkosti povrchu v porovnání s neošetřeným dřevem (Sandak a kol. 2017).

7.1 Druhy termicky upraveného dřeva

V současnosti lze termodřevo vyrábět několika technologickými procesy. Nejpoužívanějšími procesy jsou: ThermoWood proces, PLATO proces, OHT proces, Royal Proces a Retifikační proces. Všechny zmíněné procesy používají řezané dřevo a teploty pro modifikaci dřeva v rozmezí 160 °C až 260 °C. Liší se v podmínkách výrobního procesu (různá teplota, doba trvání a podmínky procesu), některé využívají přítomnost plynů jako je dusík nebo pára a u některých je výrobní proces založen na použití olejů (Esteves a Pereira, 2009).

7.1.1 ThermoWood

Výrobní proces ThermoWood se skládá ze tří etap:

- zvýšení teploty a sušení: nejprve se dosahuje rychlého zvýšení teploty v sušárně na 100 °C, po dosažení této hranice začne teplota pozvolna stoupat na hodnotu

okolo 130 °C, sušícím médiem je v tomto případě horký vzduch nebo pára (v rámci této etapy dochází k vysušení dřeva na nulovou vlhkost),

- tepelná úprava: během druhé etapy se teplota zvýší na 185 až 215 °C po dobu 2 až 3 hodin, konkrétní čas působení a velikost teploty je dán požadavkem na kvalifikační třídu termodřeva,
- chladnutí a úprava vlhkosti: v rámci třetí etapy dochází k postupnému ochlazení tepelně upraveného dřeva, důležité je při teplotě cca 80 - 90 °C dřevo zvlhčit, ke zvlhčení dochází tak, aby se dosáhlo konečné vlhkosti materiálu 4 – 7 % (Källbom, 2018).

7.1.2 PLATO proces

Technologie PLATO (Providing Lasting Advanced Timber Option) se skládá ze 4 etap, které jsou prováděny při normálním a zvýšeném tlaku. Celková doba trvání této technologie je závislá na druhu dřeva, jeho tloušťce a geometrii.

- hydrotermolýza: první etapa probíhá při teplotě 160 °C až 190 °C a při zvýšeném tlaku 0,6 - 1 MPa (sušícím médiem je v tomto případě pára nebo horký vzduch, délka první etapy je cca 4 až 5 hodin),
- sušení: další etapou je sušení, které probíhá po dobu 3 až 5 dní na cca 8 – 10 % vlhkosti,
- vytvrzování: v této etapě dochází ke stabilizaci dřeva (vytvrzování) po dobu 14 až 16 hodin za teploty 150 °C až 190 °C za omezeného přístupu vzduchu a tlaku 0,1 MPa, při této fázi klesá vlhkost dřeva pod 1 %,
- kondicionování: na závěr se dřevo v sušárně opětovně zvlhčuje na vlhkost 4 – 6 %, délka této etapy jsou 3 dny (Esteves a Pereira, 2009; Reinprecht, 2008).

7.1.3 OHT proces

Při procesu OHT (Oil Heat Treatment) se provádí termická úprava pomocí horkého oleje v impregnačních kotlích. Impregnační kotel je napuštěn rostlinným olejem (lněný), který je zahřátý na teplotu 200 °C až 220 °C. Do oleje se vkládá dřevo, do kterého olej postupně proniká a ohřívá. Klíčové při této metodě je ohřát střed materiálu na teplotu

180 °C až 200 °C a udržet ji po dobu 2 až 4 hodin. V závěrečné fázi probíhá ochlazování dřeva, což má za následek rozměrové ustálení (Esteves a Pereira, 2009; Reinprecht 2008).

7.1.4 Royal proces

Tento proces termické úpravy dřeva patří k méně používaným. Probíhá při nízké teplotě 60 °C až 90 °C za sníženého tlaku v oleji. Olej neproniká do buněk stěn dřeva. Po ukončení procesu se použitý olej odsává z impregnačního kotle pomocí vakua (Reinprecht 2008).

7.1.5 Retifikační proces

Retifikační proces je založen na principu postupného zvyšování teploty dřeva na 210 °C až 260 °C v inertním prostředí dusíku. Dochází k mírné pyrolýze dřeva a před retifikačním procesem je potřeba vysušit dřevo na 12% vlhkost (Esteves a Pereira, 2009; Reinprecht 2008).

7.2 Požární vlastnosti termicky upraveného dřeva

Požární vlastnosti původního a termicky upraveného dřeva se nijak zvlášť neliší. Jen u dřeva, které je termicky upravené pomocí metody OHT dochází ke snížení jeho vlastnosti proti požáru. Je tomu tak díky zvýšenému obsahu oleje a vosku ve dřevě (Reinprecht, 2008).

8 Ochrana dřeva proti ohni

Ochrana dřeva proti ohni má velký význam hlavně ve stavebnictví. Spočívá v preventivní ochraně nových konstrukcí ze dřeva, také se využívá při údržbě a obnově stávajících konstrukcí. Použitím chemických prostředků můžeme snížit hořlavost dřeva, prodloužit požární odolnost nebo omezit rychlost šíření ohně po povrchu dřevěného prvku. Musíme si však uvědomit, že nelze dosáhnout toho, aby bylo dřevo naprosto nehořlavé a dlouhodobě odolné proti tepelnému namáhání. Snížit hořlavost dřeva použitím vhodného ochranného prostředku lze až o dva stupně (dosažení třídy hořlavosti B, nechráněné dřevo má třídu hořlavosti C2), Šíření ohně po povrchu lze také dost výrazně ovlivnit spolu s prodloužením požární odolnosti až o 10 - 15 minut.

Snížení hořlavosti, zpomalení rychlosti hoření a šíření plamene se dá dosáhnout několika způsoby (ochranným obalem, zředěním vznikajících hořlavých plynů, podpořením tvorby zuhelnatělé izolační vrstvy, účelným upravením povrchu a spojů dřeva).

Ochranným obalem ochráníme dřevo před vysokou teplotou a tím oddálíme jeho zahřátí (obložení případně zasypaní nehořlavými hmotami, které mají nízkou teplotou vodivost - písek, škvára, atd., omítnutí vápennou maltou, obalením minerální plstí nebo omazání sádrou či hlinou). Na tomto principu fungují i zpenitelné nátěrové hmoty, které na povrchu při zvýšené teplotě vytvářejí vrstvu nehořlavé a izolující pěny. Zpenitelný způsob ochrany představuje nejsnazší ochranu a relativně nejúčinnější, má však i nedostatky. Tento způsob ochrany se nedá použít ve všech případech (estetické či konstrukční hledisko). Dále také hrozí riziko oddělení silné ochranné vrstvy od podkladu (stárnutí materiálu, mechanické poškození).

Zředěním vznikajících hořlavých plynů až do té míry, že se stanou nezápalnými lze docílit impregnací či nátěrem dřeva. Nátěr se provádí chemickými látkami, které se při zvýšené teplotě rozkládají na nehořlavé plynné sloučeniny, jenž zředí hořlavé plyny a stávají se z nich nehořlavé směsi. Pro tento účel jsou používány hlavně amonné soli a sloučeniny obsahující krystalickou vodu.

Podpořením tvorby zuhelnatělé izolační vrstvy a následné zamezení žhnutí zuhelnatělé vrstvy. Izolační vrstva má tu vlastnost, že zpomaluje hoření, a dokonce v některých případech u silnějších dimenzí může způsobit i samouhašení. Zamezení žhnutí zuhelnatělé vrstvy podporují především chloridy, octany, fosforečnany a boritany (Vitvar, 2003).

Protipožární nátěrové systémy rozeznáváme na základě své funkce a účelu:

- zábranové,
- intumescentní (zpěnitelné),
- sublimující (Kupilík, 2004).

Zajištění ochrany proti požáru lze také dosáhnout účelným upravením povrchu a spojů dřeva (spoje bez skulin ve spárách). Použitím kvalitního dřeva bez trhlín a prasklin lze zamezit rozšiřování ohně.

V praxi se používá kombinace těchto ochranných systémů pro dosažení nejefektivnější účinnosti (ochrany). Důležité je znát, který retardér je pro použití nejvhodnější u konkrétního materiálu, konstrukce a prostředí (u prostředí musíme znát požadovaný stupeň ochrany proti ohni a podle toho zvolit retardér hoření). Také je důležité dodržet správný postup aplikace retardéru hoření přesně dle pokynů výrobce (počet nánosů, životnost ochrany a další parametry) (Vitvar, 2003).

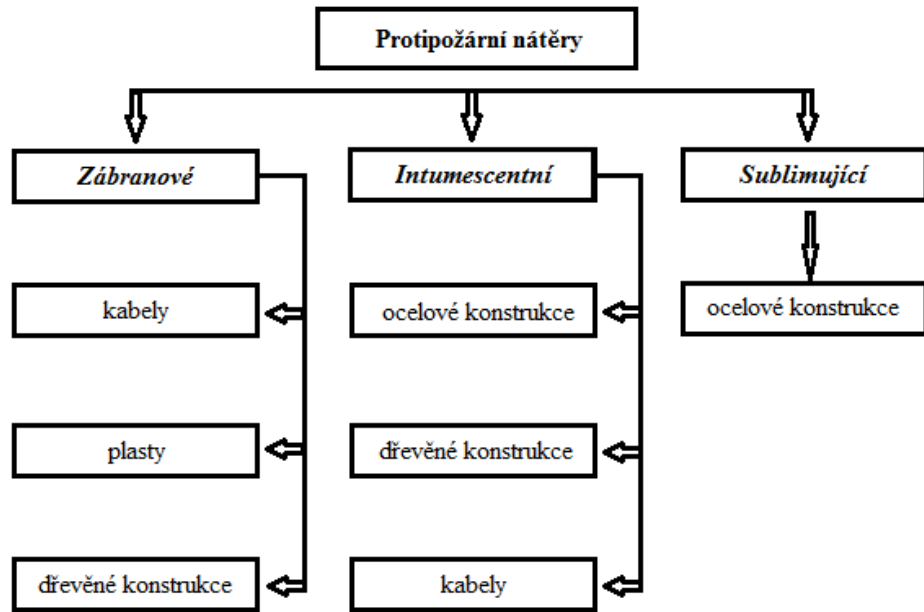
Musíme mít na paměti i vhodnost použití ochranných systémů a jejich vlivu na životní prostředí. Povrchovými nátěry může dojít k znečištění ovzduší v prostorách, která jsou hojně obývána. Koncentrace toxických látek v interiéru závisí kromě složení nátěru také na jeho tloušťce, podmínkách provádění a druhu podkladu (Jiránek a kol., 1999).

8.1 Ochrana dřeva antipyrény

Ochranu dřeva a dřevěných konstrukcí proti ohni lze zajistit retardéry hoření. Retardéry hoření jsou látky, které při působení sálavého nebo plamenného termického zdroje v přítomnosti kyslíku dokáží usměrnit přenosové a reakční děje ve dřevě, což potlačí i jeho termický rozklad (Štefko a kol., 2006).

Dřevo a výrobky ze dřeva jsou obvykle materiály lehce nebo středně hořlavé. Úkolem retardérů hoření je udělat z těchto lehce nebo středně hořlavých materiálů materiály těžce hořlavé. Tyto látky disponují ohnivzdornými vlastnostmi, které zlepšují požárně-technické vlastnosti chráněného materiálu (Reinprecht, 2008).

Schématické rozdělení protipožárních nátěrů a příklady jejich použití jsou znázorněny na obr. č. 5.



Obr. č. 5 Nátěrové systémy a jejich prioritní možnosti použití

Zdroj: (Netopilová a spol., 2010)

Následující přehled podle Netopilová a kol. (2010) uvádí nejvýznamnější výhody a nevýhody protipožárních nátěrových systémů:

Výhody:

- nízká hmotnost, která vyplývá z malé tloušťky nánosu,
- jednoduchá technologie aplikace,
- disponují velkou škálou barev pro splnění estetických nároků viditelných konstrukcí.

Nevýhody:

- plamen přistupuje až k ošetřenému prvku (bez obkladu, podhledu),
- nátěr je po čase nutný obnovit (je potřeba zajistit přístup),
- snížení účinnosti při zvětšení tloušťky krycí vrstvy při fázi obnovy,
- citlivost na vlhkost,
- citlivost na agresivní prostředí.

Ochrana retardéry hoření je nutná, pokud dřevo nebo materiál na bázi dřeva (jejich požárně-technické vlastnosti) nesplňuje požadavky dané požárním zatížením v daném případě použití. Funkci těchto retardérů hoření plní hlavně anorganické sloučeniny bóru (kyselina boritá, borax), hydrogen a dihydrogen fosforečnan amonný a pěnotvorné systémy (Reinprecht a Štefko, 2000).

Retardéry hoření ovlivňují termický rozklad a hoření dřeva podle Reinprecht, (2008) těmito fyzikálními a chemickými způsoby:

- zabraňují přístupu kyslíku,
- tepelně izolují dřevní substanci (vytvořením tuhé izolační vrstvy),
- zředěním hořlavých plynů,
- snížením koncentrace kyslíku (potlačení termooxidačních reakcí),
- aktivizací endotermických reakcí,
- brání oxidaci uhlíku ve vrstvě dřevěného uhlí až na oxid uhličitý (brání zhavení dřevěného uhlí, které je často zdrojem opětovného zapálení dřeva).

S těmito fyzikálními a chemickými způsoby ovlivnění termického rozkladu dřeva souvisí i požadavky, které klademe na retardéry hoření. Přehled požadavků rozdělujeme dle Svatoň, (2000) na základní a vedlejší:

Základní požadavky na retardéry hoření:

- odolnost vůči ohni,
- zpomalování hoření,
- zhášení ohně,
- zabránění pozdějšímu zhavení zuhelnatělé vrstvy.

Vedlejší požadavky na retardéry hoření:

- dlouhá trvanlivost ochranného systému na dřevě,
- kvalitní přilnavost (adheze) nebo impregnace do dřeva,
- všestranné použití,
- relativně jednoduchá technologie přípravy a použití,

- bez korozivních účinků,
- nesmí snižovat příznivé vlastnosti dřeva (zejména mechanické),
- u některých typů možnost následné povrchové úpravy,
- nesmí negativně ovlivnit pevnost lepených spojů,
- dostupnost a příznivá cena,
- zdravotní nezávadnost.

8.1.1 Anorganické retardéry hoření

V případě anorganických retardérů hoření se jedná o vodné roztoky anorganických sloučenin (fosforečnan amonný, síran amonný, chlorid amonný, tetraboritan sodný, chlorid zinečnatý, kyselina boritá, chlorid vápenatý, chlorid hořečnatý atd.). Tyto sloučeniny fungují na principu uvolňování nehořlavých plynů (vodní páry, dusík, amoniak, oxid uhličitý atd.) při jejich zahřátí. Důsledkem je zředění hořlavých plynů pod zápalnou koncentraci, snížení obsahu kyslíku u povrchu dřeva a katalizaci zuhelnatělého povrchu dřeva (fosfátové a sulfátové anionty), čímž dojde k vytvoření relativně nehořlavé izolující vrstvy (dřevěného uhlí) na povrchu dřeva (Terzi a kol, 2011).

Výhodou těchto sloučenin je jejich vysoká rozpustnost ve vodě, snadná penetrace do povrchové vrstvy dřeva a možnost různých způsobů penetrace. Nevýhodou je jejich snadná vyluhovatelnost vodou ze dřeva a korosivní účinky na kovové prvky. U povrchové aplikace je účinnost poměrně nízká a omezená životnost, což znamená, že je nutné často aplikaci obnovovat. Naopak u hloubkové impregnace je účinnost těchto retardérů vysoká (srovnatelná se zpěňujícími nátěry) a prakticky neomezená životnost této ochrany (Vitvar, 2003).

Anorganický retardér hoření je uveden v tab. č. 4.

Tab. č. 4 Anorganické retardéry hoření

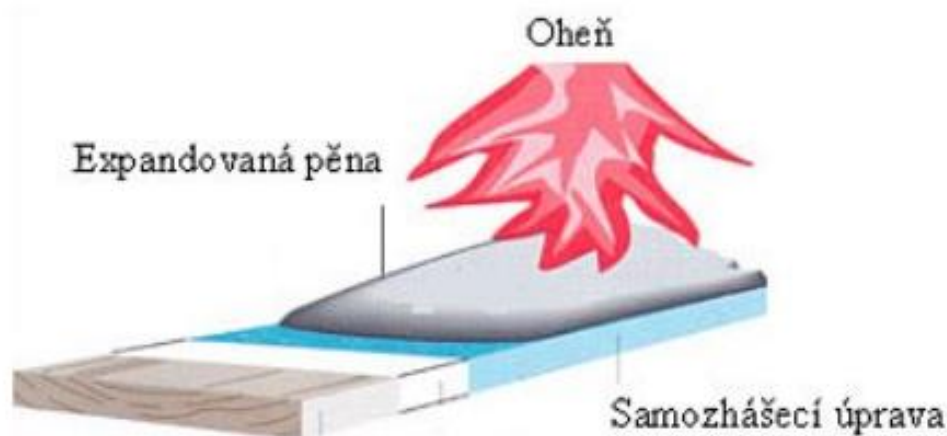
Retardér hoření	Stupeň hořlavosti	Typ retardéru hoření
Pragokor Pyronit 15	C1	vodou rozpustná krystalická hmota

Zdroj: (Vitvar, 2003)

8.1.2 Zpěňující nátěry a nástřiky

Nátěrové hmoty, které jsou pěnotvorné (intumescentní) na bázi disperzí polymerů (PVAC, MF pryskyřice atd.) smíchané s retardéry hoření (fosfáty amonné, DCAM, melamin atd.) a pěnotvornými látkami (pentol, polysacharidy, močovina atd.) (Vitvar, 2003).

Princip zpěňujících protipožárních nátěrů je znázorněn na obr. č. 6.



Obr. č. 6 Princip zpěňujících nátěrů

Zdroj: (Krytiny-střechy, 2019)

Jejich ochranný účinek spočívá v tom, že při působení teploty nad cca 150 °C začne látka vytvářet na povrchu chráněného dřeva tlustou, nehořlavou, tepelně izolující pěnovou vrstvu, která po poměrně dlouhou dobu (až 30 minut) chrání povrch materiálu proti ohni a sálavému teplu. Výhodou těchto přípravků je jejich vysoká účinnost (větší než při použití jednoduchých přípravků na bázi anorganických solí) a dlouhá životnost (obnova se obvykle provádí, až když je ochranná vrstva úplně rozrušena). Nevýhodou u těchto přípravků je nutnost nánosu poměrně tlusté vrstvy, aby bylo dosaženo potřebného ochranného efektu je zapotřebí na povrch materiálu nanést vrstvu o tloušťce až cca 0,5 mm. Tato vrstva však zcela zakryje povrch ošetřeného dřeva, což má za následek znehodnocení přirozeného vzhledu dřeva. Nánosy se snadno mechanicky či vodou poškodí, čímž ztratí ochranný účinek. Nedají se použít pro hloubkovou impregnaci

dřeva a jsou poměrně drahé oproti vodným roztokům anorganických sloučenin (Vitvar, 2003).

Přehled zpěňujících retardérů hoření je uveden v tab. č. 5.

Tab. č. 5 Zpěňující retardéry hoření

Retardér hoření	Stupeň hořlavosti	Typ retardéru hoření
Dexaryl B	C1, B	vodou omezeně ředitelná kapalina
Dexaryl B Transparent	A	vodou omezeně ředitelná kapalina
Flamgard	C1, B	vodou ředitelná šedobílá suspenze
Flamgard Transparent	C1, B	vodou ředitelná viskózní nažloutlá kapalina
Plamor Speciál V 2025	C1	homogenní tixotropní kapalná látka

Zdroj: (Vitvar, 2003)

8.1.3 Protipožární pásy, fólie a obklady

Pásy a fólie určené k protipožární ochraně se používají k ochraně rizikových částí dřevěných konstrukcí. Tyto pásy a fólie fungují na principu vytvoření tuhé pěnové vrstvy při ohřátí nad teplotu okolo 150 °C, čímž se zabrání přenosu tepla od tepelného zdroje ke dřevu (Vitvar, 2003).

Přehled těchto retardérů hoření je uveden v tab. č. 6.

Tab. č. 6 Protipožární fólie a pásy

Retardér hoření	Stupeň hořlavosti	Typ retardéru hoření
Interdens typ 5	B	zpěnitelná fólie
Interdens typ 15	B	zpěnitelná fólie
Interdens typ 36	B	zpěnitelná páska

Zdroj: (Vitvar, 2003)

Obklady z materiálů jako např. eternit, ezalit, minerální a skelná vata, perlit, sádrokartonové desky, vícevrstvé desky z nehořlavých materiálů atd. mají funkci tepelně

izolační. Úlohou těchto obkladových materiálů je brzdit šíření požáru uvnitř konstrukce (Vitvar, 2003).

Protipožární deskové obklady oproti nátěrům a nástřikům, které slouží hlavně pro zvýšení protipožární odolnosti nosných tyčových prvků, mohou být využity víceúčelově. Obklady si svoji protipožární účinnost zachovávají po celou dobu své životnosti a nepotřebují tedy obnovovat (Kupilík, 2009).

8.2 Způsoby impregnace

Způsoby impregnace protipožárních ochranných látek jsou téměř totožné jako způsoby při aplikaci insekticidů a fungicidů. Nejvíce se používá postřik, nátěr nebo tlaková impregnace, záleží na druhu ochranné látky a na druhu expozice dřevěného prvku (interiér nebo exteriér). Pro dřevo, které je určeno na vnitřní použití, je využívána metoda nátěru, postřiku nebo máčení. Naopak při vnějším použití dřevěného prvku se musí tlakově impregnovat (Svatoň, 2000).

Při chemické ochraně dřeva a dřevěných konstrukcí rozeznáváme několik způsobů aplikace ochranné látky. Do dřeva lze aplikovat ochranné látky:

- beztlakově (nátěr, máčení, postřik, polévání ponořování),
- tlakově (vakuotlaková impregnace, vakuová impregnace),
- speciálními druhy impregnace (bandážování, injektáž, impregnace pomocí difuze) (Vitvar, 2003).

V případě ochrany aglomerovaných materiálů je možné ochranné látky přidávat přímo při výrobním procesu. Ochranné látky se mohou přidat do lepidla, či hmoty materiálu ještě před lisováním.

Při zvolení jakéhokoliv způsobu impregnace se musí dbát na dodržení základních pravidel. Ochranné látky se musí nanášet jen na plochy bez nečistot, prachu, mastnoty a předchozích nátěrů (Svatoň, 2000).

8.2.1 Beztlaková technologie

8.2.1.1 Nátěr a postřik

Tento způsob ochrany má uplatnění při aplikaci na polotovarech, hotových či demontovaných prvcích nebo na zabudovaných dřevěných konstrukcích. Postřikem se ošetřují hlavně prvky na těžko dostupných místech, které jsou již zabudované v konstrukci.

Na příjem ochranné látky do dřeva má velký vliv kvalita povrchu, neohoblované dřevo má daleko větší příjem látky na jednotku plochy než dřevo ohoblované, přibližně 2x. Sklon dřeva během ošetření i po ošetření má také velký význam, v poloze vertikální je nános až o 1/3 nižší než v poloze horizontální. Mezi vrstvami nanášení se musí počkat na zaschnutí předchozího nános, jinak dochází k částečnému smývání předchozí vrstvy (Vitvar, 2003).

V tab. č. 7 je uvedeno potřebné množství nános roztoku pro hrubě a hladce opracované dřevo.

Tab. č. 7 Maximální nánosy beztlakové technologie

Kvalita povrchu	Nános roztoku (g/m ²)
hrubě opracované	200 - 250
hladce opracované	100 - 120

Zdroj: (Vitvar, 2003)

8.2.1.2 Ponořování a máčení

Tato technologie spočívá v úplném ponoření dřevěného materiálu do impregnační látky tak, aby bylo dřevo úplně ze všech stran obklopeno ochrannou látkou. Máčení se provádí v máčecích nádržích a vanách, kde je impregnovaný materiál zatížen proti vyplavení (Holan, 2006).

Při cca 1 minutě máčení se dosáhne příjmu ochranné látky stejně jako dvojnásobným nátěrem. Máčením, které trvá 30 minut až několik dnů, se zajistí polohluboká až hluboká impregnace (ochrana) dřeva (Vitvar, 2003).

8.2.2 Tlaková technologie

Největší výhodou této technologie je hloubka průniku impregnační (ochranné) látky vzhledem k času působení. Patří mezi průmyslové způsoby impregnace dřeva, dochází při ní k úplnému proimpregnování běli. U jádra také dochází k proimpregnování do větší hloubky než u ostatních způsobů aplikace impregnačních látek. Principem této technologie je použití vyššího tlaku (0,8 MPa), vakua (0,02 MPa) nebo jejich kombinace. Z důvodu zvýšení hloubky impregnace u velmi těžce impregnovatelných dřevin je nutné navrtávání nebo napichování (Holan, 2006).

8.2.3 Speciální druhy impregnace

V ojedinělých případech lze použít i speciální druhy impregnace jako je bandážování nebo injektáž.

Podstatou této metody je obalení prvku, který má být ošetřen bandáží. Bandáž je porézní látka, která je neustále prosycována ochranou látkou. Z venkovní strany je bandáž zakryta krycí fólií, aby nedocházelo k odvodu látky mimo dřevo. Zároveň fólie brání účinkům vzduchu na látku, čímž nedochází k zasychání impregnační látky. K impregnaci dřeva pak dochází vlivem gradientu koncentrace. Tento způsob impregnace je vhodný zejména v případě, kdy je prvek zapuštěn do země bez dostatečné ochrany.

Injektáž je impregnace spočívající v metodě, při které je ochranná látka vpravována do otvorů vytvořených (vyvrtaných) ve dřevě. Otvory jsou zpravidla o průměru 8 - 10 mm vrtané do hloubky 2/3 tloušťky v řadě za sebou ve vzdálenosti 10 - 20 cm. Nevýhodou této metody je fakt, že je nutné před zhotovením otvorů zvážit zda nedojde vyvrtáním otvorů ke snížení únosnosti dřevěného prvku. Následně je impregnační látka do dřeva vpravována pomocí injekční stříkačky nebo injektážního přístroje, který funguje na principu lékařské kapačky (Holan, 2006).

8.3 Konstrukční ochrana dřeva

Pomocí konstrukční ochrany lze snížit požární riziko. Především jde o použití vhodného materiálu, tvarovými optimalizacemi (hladké povrchy, bez prasklin, zaoblení hran), dodržením zásad protipožární ochrany a důkladným projekčním řešením (Reinprecht a Pánek, 2016).

Dřevo vykazuje při správném dimenzování relativně dobré vlastnosti během požáru. Dřevěné prvky, které jsou vhodně retardičně upraveny, jsou proto i často použity jako obklady kovových konstrukcí, čímž je docíleno zvýšení jejich požární odolnosti (Svatoň, 2000).

Ochrana dřevěné konstrukce proti vysoké teplotě a ohni se realizuje rozdělením objektu na jednotlivé požární úseky. Musí se dbát na to, aby dřevěné konstrukce nebyly umístěny v přímém styku se zdroji vysokých teplot (např. komíny). U konstrukcí stěn a příček je důležité, aby byly (pokud je to možné) bez dutin, tepelně izolační materiál musí být z nehořlavého materiálu. Dřevěné konstrukce v interiéru by měly být ochráněny obklady, které zabrání vzplanutí dřevěných povrchů. Pro nosnou konstrukci by se měly používat celistvé prvky z rostlého, lepeného a vrstveného dřeva se zaoblenými hranami a ohoblovaným povrchem s absencí spár a dutin. Také se musí dbát, aby na konstrukční prvky nebylo použito dřevo, jehož vlhkost je vyšší než vlhkost prostředí, vzniká tak riziko tvorby výsušných trhlin, přes které se plamen dostane hlouběji do dřevěného materiálu (Kuklík, 2005).

U panelových obvodových konstrukcí je požární odolnost dána konstrukcí panelu, jeho průřezy, rozestupy, opláštění. Pokud je pro opláštění použita DTD, jsou její protipožární vlastnosti ovlivněny tloušťkou, způsobem výroby (zda je DTD protipožárně upravována již za výroby, přidáním retardéru hoření), hustotou atd. Pokud jsou desky retardičně upraveny při výrobě, zařazují se do třídy hořlavosti B, neupravené dřevotřískové desky spadají do třídy hořlavosti C3 (C2) (Svatoň, 2000).

Požární odolnost panelů a dřevěných prvků se zvyšuje použitím tepelně-izolačních materiálů jako je nehořlavá izolace nebo sádkartonové desky (Barber a Gerard, 2015).

9 Přípravky na ochranu dřeva proti ohni

9.1 Dexaryl B a Dexaryl B Transparent

Dexaryl B je zpěnitelný nátěrový systém na vnitřní nosné i nenosné dřevěné konstrukce. Nátěr není hygroskopický.

Je dostupný ve dvou variantách, základní Dexaryl B s mléčně zakaleným povlakem, který je určen především na použití v případě, kdy nejsou větší nároky na estetický vzhled. V případě varianty Dexaryl B transparent je vzhled nátěrového systému tvořen funkční čirou, transparentní vrstvou. Dřevo lze pod protipožární nátěr odstínově upravovat výhradně lihovými mořidly, při použití jiných prostředků vzniká riziko nefunkčnosti adheze k pokladu, což má dopad na zkrácení doby funkčnosti.

Po opatření dřeva protipožárním nátěrem látkou Dexaryl B transparent a zaschnutí je nutné nanést ještě předepsaný krycí bezbarvý lak, který je součástí technologického procesu tohoto protipožárního nátěrového systému, bezbarvým lakem je podmíněna životnost a funkčnost retardéru hoření. Krycí lak je dostupný v matné nebo lesklé variantě.

Způsob aplikace je formou nátěru štětcem nebo válečkem na důkladně očištěný povrch bez zbytků starých nátěrů a mořidel (Seidl, 2012).

9.2 Flamgard a Flamgard Transparent

Protipožární nátěr na dřevo Flamgard je dostupný ve dvou variantách, základní s bílým matným povlakem (na vyžádání výrobce zajišťuje i tónování do pastelových odstínů) a ve variantě transparent, při které je nutné jako u předchozího protipožárního nátěru použít i vrchní bezbarvý lak k tomuto nátěru určený. Tento nátěr je určen k ochraně dřevěných konstrukčních prvků, jako jsou sloupy, nosníky atd. před působením sálavého tepla a ohně.

Nátěr musí být proveden na dřevo vysušené do maximální relativní vlhkosti 20 %, používá se výhradně do vnitřního suchého prostředí. Při vystavení povětrnostním podmínkám dochází k vymývání nátěru a dřevo tak ztrácí požadovanou ochranu. Dřevěný prvek, který má být tímto nátěrem ochráněn nesmí být upraven tmelením nebo jakýmkoliv nátěrem, nebyla by zajištěna požadovaná adheze protipožárního nátěru. Přípravek Flamgard není odolný proti mechanickému opotřebení, a to hlavně oděrům.

Funkční krycí vrstva nátěru vytváří bílo šedý matný povlak, v případě základní varianty Flamgardu není možná dodatečná povrchová úprava různými druhy barev. Jedná se o jednosložkovou vodou ředitelnou zpěnitelnou nátěrovou hmotu, která v případě požáru vytváří svým tepelným rozkladem na povrchu ochráněného dřeva silnou nehořlavou tepelně izolující vrstvu (STACHEMA CZ s.r.o., 2017).

9.3 Plamor OK V 2026

Plamor OK V 2026 je pěnotvorný nátěr pro ochranu dřeva, dřevěných konstrukcí a materiálů ze dřeva (dřevotřískových materiálů). Při působení přímého plamene na nátěr se vytvoří tlustá izolační vrstva, která prodlužuje protipožární odolnost ochráněných dřevěných prvků. Jedná se o nátěrový systém s bílým barevným odstínem, který je možné ředit vodou.

Dřevěný podklad před nánosem nátěru musí být čistý, bez mastných skvrn a suchý o maximální vlhkosti 12 %. Před nánosem se doporučuje přídavné ošetření dřevěného materiálu biocidními přípravky, nesmí být, ale napuštěn fermeží nebo rostlinnými oleji. Z hlediska reakce na oheň je tento typ protipožárního nátěru klasifikován do třídy B. Nanášení je možné štětcem, válečkem nebo stříkáním (Chemolak Trade, spol. s r.o., 2012).

9.4 Interdens Typ 5, 15 a 36

V případě Interdens Typ 5 a 15 se jedná o protipožární zpěnitelné fólie, které jsou dodávány ve formě desek (fólií). Snižují působení ohně a sálavého tepla na dřevěný prvek, který je tímto prostředkem ochráněn. Používají se na plošnou protipožární ochranu a ke zlepšení doby prohoření stavebních dílců. V případě, že na fólii působí oheň nebo tepelné záření, začne vytvářet tlustou mikroporézní, nehořlavou a tepelně izolující vrstvu pěny.

Fólie jsou určeny pro použití do interiéru, jsou bílé barvy a nejsou odolné vůči trvalému působení vody. Aplikace se provádí přilepením na povrch dřevěného materiálu, který má být ochráněn. Před lepením musí být dřevěný prvek čistý, hladký povrch se musí zdrsnit a musí být bez znečištění oleji nebo vosky.

Interdens Typ 36 je protipožární zpěnitelná páska, která slouží k ochraně spár stavebních konstrukcí (u dveří atd.) před průnikem hořlavých plynů, ohně a sálavého

tepla. Při působení vysoké teploty nebo ohně začne vytvářet tlustou nehořlavou a tepelně izolující vrstvu pěny. Tento přípravek je také nutné chránit před působením vody, je určen do vnitřních prostor. Jedná se o pásku červené, bílé nebo hnědé barvy, která se aplikuje vlepáním do spár chráněné konstrukce, k dostání je také samolepící varianta (Vitvar, 2003).

9.5 Plamostop D

Plamostop D je transparentní protihořlavá, nátěrová látka určená k ochraně dřeva a dřevěných konstrukcí před účinky požáru. Jedná se o vypěňovací protipožární nátěr pro zvýšení třídy hořlavosti na stupeň B. Zamezuje šíření plamene po povrchu a snižuje hořlavost dřeva.

Nátěr je dodáván ve stavu, který je již určen k použití, v případě nutnosti lze zředit vodou. Nátěr se provádí štětcem nebo válečkem. Před aplikací nátěru musí být dřevo očištěno od prachu, nečistot, starých nátěrů a bez skvrn od mastných olejů. Nátěr není odolný proti působení vody, je vhodný do interiéru, a to i na pohledové dřevěné prvky pro svou vysokou kvalitu transparentního povrchu. Pro dosažení maximální kvality při nánosu na pohledové prvky, musí mít dřevěný prvek vlhkost nižší než 12 %. Mezi jednotlivými nánosy je možné povrch obrousit jemným smirkovým papírem, čímž vznikne hladší finální povrch (Ing. Josef Hruban – IZOSTAV, 2002).

9.6 Pragokor Pyronit 15

Tento chemický prostředek je určen k preventivní ochraně dřeva proti biotickým škůdcům, jako jsou dřevokazné houby, dřevokazný hmyz a zároveň proti sálavému teplu a ohni. Používá se pro ochranu dřevěných stavebních konstrukcí a dřevěných prvků staveb. Není vhodný k ochraně prvků vystavených v exteriéru, zejména prvků, které jsou trvale v kontaktu se zemí a vlhkostí.

Jedná se o šedobílou krystalickou hmotu, která je snadno rozpustná ve vodě. Jako doporučená koncentrace je uvedeno použití ve formě vodného roztoku v minimální koncentraci 30 %. Tento ochranný nátěrový systém je možné nanášet formou postřiku, polévání nebo i máčení (Vitvar, 2003).

10 Metody zjišťování hořlavosti dřevěného materiálu

10.1 Testování dřeva vůči abiotickým činitelům

Dřevo je možné testovat vůči chemickým, atmosférickým a pro nás nejdůležitějším tepelným degradacím.

Pomocí ČSN EN testovacích postupů bývá testována odolnost vůči požáru a termickému poškození dřeva. Odolnost proti požáru a termickému poškození je nejvíce sledována u stavebních konstrukcí, kde je pro posuzování požární odolnosti důležitým faktorem. Testy pro požární odolnost se provádí pomocí požárních zkoušek, které jsou normované (např. ČSN EN 1363, ČSN EN 1365, ČSN EN 1995- 1-2 Eurokód 5). Tyto zkoušky probíhají při předem stanovených podmínkách a postupech ve speciálních pecích, zjišťuje se zde schopnost konstrukce zachovat si mezní stav únosnosti, celistvosti, izolační schopnost a jiné. Během tepelného zatížení se nosné konstrukce vystavují i namáhání mechanickému (na požadované zatížení) prostřednictvím hydraulického lisu. Např. stavební konstrukce, která splňuje tato kritéria po dobu 30 min, se označuje REI 30.

Nenormalizované zkoušky jsou také možné, ty sledují průběh požáru v celé stavební konstrukci (Reinprecht a Pánek, 2016).

Zjišťování ztráty nosnosti a stability se provádí měřením přetvoření zkoušené konstrukce. Základem zjišťovací metody je vyvození namáhání normovým zatížením. Pokud se začnou projevovat trhliny, jedná se o porušení celistvosti, trhlinami mohou pronikat horké plyny nebo plameny. Mezní hodnota je překročena v případě, že na odvrácené straně zkoušené konstrukce dosáhla průměrná teplota hodnoty o 140 °C vyšší, než byla počáteční teplota. Nebo případně je-li na jednom místě teplota vyšší o 180 °C (Kupilík, 1999).

10.2 Stupně hořlavosti a třídy reakcí na oheň

Podle ČSN 33 2312 ed. 2. (2014) určujeme vztah mezi požadavky na stupně hořlavosti a třídami reakcí na oheň. V tabulce č. 8 je znázorněn přehled stupňů hořlavosti a tříd reakcí na oheň.

Tab. č. 8 Vztah mezi stupni hořlavosti a třídami reakce na oheň

Stupeň hořlavosti	Třída reakce na oheň
A	A1
	A2
B	B
C1	C
C2	D
C3	E
	F

Zdroj: (KOPOS Slovakia, s.r.o., 2019)

Mezi stupněm hořlavosti a třídou reakcí na oheň je určitý rozdíl. Stupeň hořlavosti hodnotí samostatně jednotlivé hmoty, kdežto třídou reakcí na oheň se hodnotí celý stavební výrobek, který je v konečném provedení (KOPOS Slovakia, s.r.o., 2019).

11 Metodika experimentální části

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na sledování účinku faktoru velikost tepelné modifikace (20, 160, 180, 210), použití retardéru hoření a jejich vzájemné interakce na hodnoty vybraných charakteristik hoření. Pro tento výzkum byla zvolena dřevina akát (*Robinia pseudoacacia* L.). Sestava celkově 40 vzorků akátového dřeva obsahovala vzorky bez termické úpravy (REF) a vzorky tepelně upravené metodou na principu Thermo Wood® při teplotách 160 °C, 180 °C a 210 °C. Půlka vzorků byla ošetřena syntetickým retardérem hoření Flamgard a druhá půlka byla testována bez jakékoliv následné ochrany. Charakteristikami hoření byly zjištěny účinky tepelné modifikace a použití syntetického retardéru hoření na proces hoření.

Jedná se především o tyto charakteristiky hoření:

- ztráta hmotnosti,
- rychlost hoření,
- maximální rychlost hoření,
- poměr maximální rychlosti hoření,
- doba dosažení maximální rychlosti hoření.

Metodický postup této části diplomové práce je podle vědeckého článku „The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (*Tectona grandis* L. f.) wood“ (Gaff a kol., 2018), který je dostupný z internetového portálu www.researchgate.net.

11.1 Materiál vzorků

Jak již bylo zmíněno v textu výše, sestava vzorků pro tento výzkum je z akátového dřeva. Akát (*Robinia pseudoacacia* L.) je opadavý listnatý strom, který může být až 20 m vysoký. Jeho kůra je šedohnědá až tmavě hnědá, postupem času hluboce rozpraskaná. Listy tohoto stromu jsou dlouhé 20 - 35 cm, úzce klenuté. Dřevnatěním palist vytvářejí pro jejich druh charakteristické trny. Akátové dřevo je žlutohnědě zbarveno, je těžké, tvrdé, pevné a velmi odolné (Cierjacks a kol., 2013).

11.1.1 Postup přípravy vzorků před měřením odolnosti proti ohni

Akátové dřevo určené pro experimentální část této diplomové práce bylo radiálně vyříznuto na jednotlivé vzorky o rozměrech 200 mm x 100 mm x 20 mm (délka x šířka x tloušťka). Následně bylo všech 40 vzorků klimatizováno pro dosažení rovnovážného obsahu vlhkosti 12 %. Klimatizované vzorky byly dále rozděleny do 4 skupin po 10 vzorcích. Jedna skupina s 10 vzorky byla ponechána bez termické modifikace a zbylé tři skupiny (každá po 10 vzorcích) byly určeny pro termickou modifikaci při 160 °C, 180 °C a 210 °C. Pro jednodušší rozeznání byly vzorky po termické úpravě označeny podle stupně termické modifikace a použitého ochranného prostředku ve formátu: AK - H - stupeň termické modifikace (20, 160, 180, 210) - pořadové číslo vzorku (1 - 5) - vzorek ošetřen syntetickým nátěrem (S) nebo bez ochrany nátěrem (BEZ). Následně proběhla ochrana souboru 20 vzorků syntetickým ochranným nátěrem Flamgard, který se aplikoval nátěrem pomocí štětce. Na váze METTLER TOLEDO typ: NewClassic MF, model: MS1602S//M01, která je na obr. č. 7 byly vzorky zváženy před a po nanesení ochranné látky.



Obr. č. 7 Vážení vzorků

Zdroj: (vlastní)

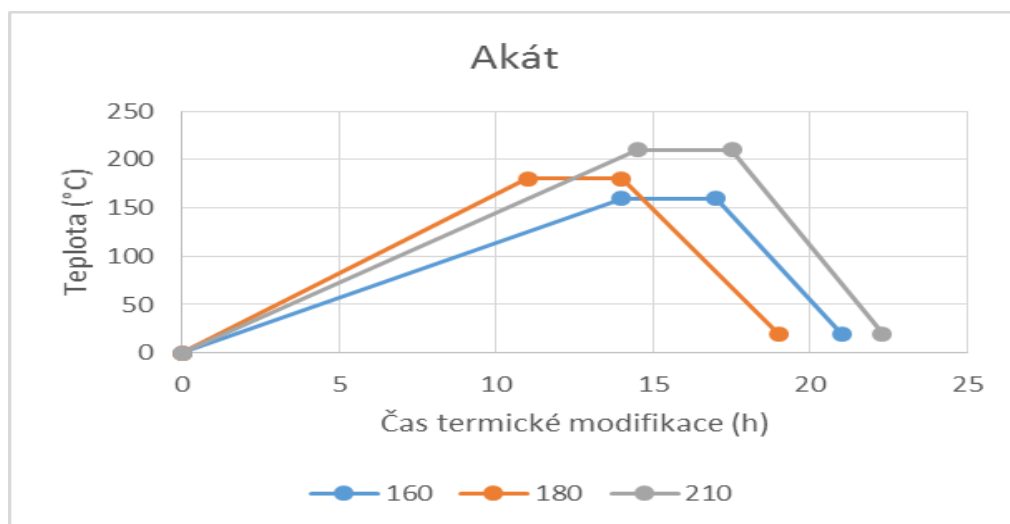
11.1.2 Tepelná modifikace vzorků

Po rozdělení vzorků následovala jejich termická úprava, která byla provedena v termální komoře typu S400/03. Byla použita termická úprava podle metody ThermoWood, která byla vyvinuta ve Finsku. Jak už bylo zmíněno v kapitole č. 7.1.1. ThermoWood se skládá ze tří etap. Prvním krokem této metody je rychlé zvýšení teploty, při které bylo dřevo akátu vysušeno na nulovou vlhkost. Sušícím médiem je při této metodě vzduch. V druhém kroku probíhá samotná tepelná úprava při konečných teplotách 160 °C, 180 °C a 210°C podle jednotlivých skupin vzorků. V třetím kroku dochází k postupnému ochlazení tepelně modifikovaných vzorků a k zvlhčení, aby se dosáhlo konečné vlhkosti 4 – 7 %. Průběh a trvání tepelné úpravy je uvedeno v tab. č. 9 a na obr. č. 8. Výsledné termicky modifikované vzorky akátového dřeva jsou vidět na obr. č. 9.

Tab. č. 9 Trvání tepelné úpravy

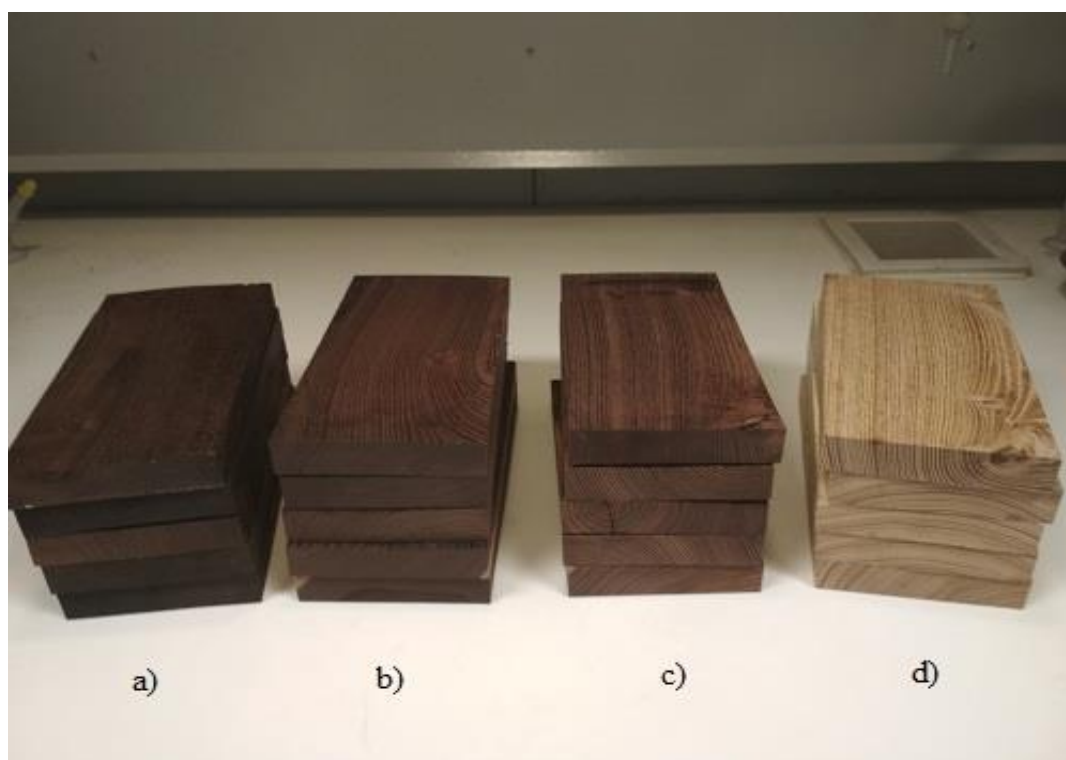
Parametry (hod.)	Teploty termické modifikace (°C)		
	160	180	210
zahřívání	14	11	14,5
tepelná úprava	3	3	3
ochlazení	3	5	4,8
celkový čas termické modifikace	20	19	22,3

Zdroj: (vlastní)



Obr. č. 8 Trvání a průběh termické modifikace

Zdroj: (vlastní)



Obr. č. 9 Termicky upravené vzorky akátového dřeva

Poznámky: a) AK - 210, b) AK - 180, c) AK - 160, d) AK - 20

Zdroj: (vlastní)

11.1.3 Syntetický retardér hoření

Pro ochranu vzorků před působením ohně byl vybrán syntetický nátěr Flamgard (STACHEMA CZ s.r.o., 2019), který je zobrazen na obr. č. 10.

Flamgard je protipožární nátěr, který je určený k ochraně dřevěných konstrukcí před účinky požáru. Jeho použití je výhradně určeno do interiérů a suchého prostředí, chrání dřevo proti působení ohně a sálavého tepla. Jedná se o jednosložkovou vodou ředitelnou zpěnitelnou nátěrovou hmotu. Ochranná nátěrová hmota je tvořena koksotvornou složkou, složkou minerální kyseliny, napěňující složkou, pojivem, plnivem, aditivem a pomocnými látkami upravující užité vlastnosti nátěru. Neobsahuje azbest, chlorované přísady ani toxické pigmenty. Při vystavení účinkům požáru vytváří syntetická nátěrová hmota na povrchu chráněného materiálu nehořlavou tepelně izolující vrstvu, která po určitou dobu brání ošetřený materiál proti působení ohně a sálavého tepla. Ochranná vrstva se nanáší buď štětcem, nebo válečkem. Nanesená vrstva vytváří šedo-bílý matný povlak. Ochranný nátěr by měl být aplikován ve dvou vrstvách po cca 250g/m^2 , což odpovídá celkové spotřebě 500g/m^2 . Doba zasychání nátěru uvedena výrobcem při $20\text{ }^\circ\text{C}$ je 40 minut (zaschlé na dotyk), 12 hodin (přetíratelný mezi jednotlivými vrstvami) a 24 hodin (celkové vytvrzení) (STACHEMA CZ s.r.o., 2017).



Obr. č. 10 Syntetický nátěr Flamgard

Zdroj: (STACHEMA CZ s.r.o., 2019)

11.2 Metoda postupu měření

Po přípravě zkušebních vzorků následuje samotná metoda zjištění účinků hoření na připravené vzorky akátového dřeva. Zkoušková metoda spočívá v přímém působení plamene z propanového hořáku na vzorek dřeva po určitý čas. Tato metoda je simulací přirozeného hoření dřeva s působením plamenného zdroje, volným prouděním spalin a trvalým přístupem kyslíku. Zkušební vzorek je umístěn na stojanu, který zabezpečí požadovaný sklon 45° zkušebního tělesa vůči působícímu plamenu z hořáku. Plamenný zdroj je umístěn pod středem zkušebního vzorku ve vzdálenosti 10 cm od ústí hořáku ke středu vzorku. Zkušební metoda pro jeden vzorek trvá 10 minut, při níž je každých 10 sekund zaznamenán úbytek hmotnosti pomocí speciální váhy, která tyto výsledky automaticky zapisuje na paměťové zařízení USB. Z každé skupiny 5 vzorků byly 4 vzorky zkoumány po dobu 10 minut a poslední vzorek č. 5 byl po 10 minutách testování dále měřen po dobu dalších 5 minut. V tomto časovém úseku je odebrán plamenný zdroj (plynový hořák) a zaznamenávají se úbytky hmotností bez účinku přímého působení plamenného zdroje, společně s vizuální kontrolou zda nedochází ke zpětnému samovznícení, protože se dá předpokládat, že termická degradace dřeva bude dále pokračovat i ve žhavé vrstvě dřeva.

Na obr. č. 11 a č. 12 je znázorněn průběh měření úbytku hmotnosti termicky modifikovaných vzorků. Na obr. č. 11 je vidět testovaný vzorek bez ochrany syntetickým antipyrénem a na obr. č. 12 testovaný vzorek s protipožárním syntetickým nátěrem.



Obr. č. 11 Měření úbytku hmotnosti termicky modifikovaného vzorku bez syntetické ochrany

Zdroj: (vlastní)



Obr. č. 12 Měření úbytku hmotnosti termicky modifikovaného vzorku s protipožárním nátěrem

Zdroj: (vlastní)

Jako zdroj plamene byl použit plynový kahan typu USBEC 1011/1 propan, dále se zkušební zařízení skládá z propanové nádrže, držáku, úbytek hmotnosti byl zjišťován na laboratorní váze OHAUS typ Scout, model STX2201 s rozhraní USB, přes které na paměťové zařízení USB byly zapsány úbytky hmotnosti dle nastaveného časového intervalu (v našem případě zmíněných 10 sekund), s pomocí stopek pak byl odměřen čas (10 minut) k výměně jednotlivých vzorků. Zmíněná laboratorní váha OHAUS typ Scout je znázorněna na obr. č. 13.



Obr. č. 13 OHAUS typ Scout, model STX2201 s rozhraním USB

Zdroj: (vlastní)

Pomocí zmíněných zkušebních zařízení, které jsou jako jednotný soubor zobrazeny na obr. č. 14, byl stanoven základní parametr měření a to úbytek hmotnosti po dobu trvání 10 minut, krom toho byly zjišťovány i další charakteristiky hoření jako je rychlost hoření, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření a doba dosažení maximální rychlosti hoření. Tyto charakteristiky jsou získány výpočty pomocí jednotlivých rovnic, které jsou uvedeny v další podkapitole.



Obr. č. 14 Soubor zařízení pro měření

Zdroj: (vlastní)

11.3 Výpočty a hodnocení

Pomocí matematických výpočetních operací byly získány i další zmíněné charakteristiky hoření. Úbytek hmotnosti dřevěných vzorků z akátového dřeva byl vypočten pomocí rovnice č. 4:

$$WL = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100 \quad (4)$$

kde:

WL – ztráta hmotnosti (%),

m_0 – hmotnost vzorku před zkouškou (g),

m_1 – hmotnost vzorku v určitém časovém intervalu (po 10 sekundách) (g).

Rychlost hoření byla vypočítána pomocí rovnice č.5:

$$v = \frac{m_t - m_{t+10}}{m_{t0} \cdot 10} \cdot 100 \quad (5)$$

kde:

v – rychlost hoření (%/s),

m_t – hmotnost (g) v čase t,

m_{t+10} – hmotnost (g) vzorku o 10 sekund více,

m_{t0} – hmotnost (g) vzorku v čase 0 (s).

Poměr maximální rychlosti hoření byl vypočítán pomocí rovnice č.6:

$$P = \frac{V_{max}}{T_{max}} \cdot 100 \quad (6)$$

kde:

P – poměr maximální rychlosti hoření (%),

V_{max} – maximální rychlost hoření (% s⁻¹),

T_{max} – maximální čas pro dosažení maximální rychlosti hoření (s).

Po procesu měření byla provedeno i vizuální kontrola a zhodnocení úbytku hmotnosti a celkové termické degradace vzorků akátového dřeva. Z obr. č. 15 je rozpoznatelné, že požární účinky měly větší vliv na vzorky bez ochranného syntetického nátěru.



Obr. č. 15 Vizuální rozdíl mezi neošetřenými a ošetřenými vzorky

Zdroj: (vlastní)

12 Výsledky a diskuze

V tab. č. 10 jsou uvedeny průměrné hodnoty zjišťovaných charakteristik hoření společně s variačními koeficienty (uvedené v závorkách v %), získané pomocí výpočtu rovnic, které jsou uvedeny v kapitole 14.3. Již na první pohled je patrné, že hodnoty vzorků, které jsou ošetřeny syntetickým antipyrénem Flamgard dosahují lepších výsledků.

Tab. č. 10 Charakteristiky hoření nemodifikovaného a tepelně modifikovaného akátového dřeva

Faktory		Charakteristiky hoření				
Retardér hoření	Tepelná modifikace vzorků (°C)	Úbytek hmotnosti (%)	Rychlost hoření (% s ⁻¹ × 10 ⁻⁵)	Maximální rychlost hoření (% s ⁻¹ × 10 ⁻⁵)	Poměr maximální rychlosti hoření (%)	Doba dosažení maximální rychlosti hoření (s)
Bez protipožárního nátěru	nemodifikované (20)	9 (6,1)	0,008 (42,4)	0,030 (0,030)	30 (31,9)	104 (22,1)
	160	16 (18,1)	0,015 (56,5)	0,050 (0,050)	47 (21,3)	110 (20,3)
	180	15 (14,7)	0,016 (42,2)	0,053 (0,053)	48 (19,5)	112 (16,0)
	210	12 (23,4)	0,014 (35,2)	0,042 (0,042)	56 (18,3)	76 (31,7)
Syntetický protipožární nátěr	nemodifikované (20)	1 (33,7)	0,001(37,0)	0,003 (0,003)	13 (82,9)	36 (50,5)
	160	2 (34,9)	0,004 (38,9)	0,003 (0,003)	15 (73,3)	34 (61,0)
	180	2 (23,8)	0,001 (36,9)	0,003 (0,003)	18 (59,3)	24 (47,5)
	210	1 (50,2)	0,001 (23,6)	0,004 (0,004)	18 (71,7)	32 (71,3)

Zdroj: (vlastní)

To potvrzuje i pořízená fotodokumentace spálených vzorků na obr. č. 16, ze které je patrná daleko větší termická degradace neošetřeného akátového dřeva oproti vzorkům s ochranou protipožárním nátěrem Flamgard. U obou sestav se dle vizuální kontroly jevíly jako nejméně odolné vzorky ty s termickou úpravou při konečné teplotě 160 °C, což potvrzují i uvedené tabulkové hodnoty.



Obr. č. 16 Vizuální porovnání termické degradace mezi skupinami vzorků

Zdroj: (vlastní)

V nadcházejících podkapitolách jsou detailněji popsány jednotlivé charakteristiky hoření jako je úbytek hmotnosti, rychlost hoření, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření a doba dosažení maximální rychlosti hoření.

12.1 Úbytek hmotnosti

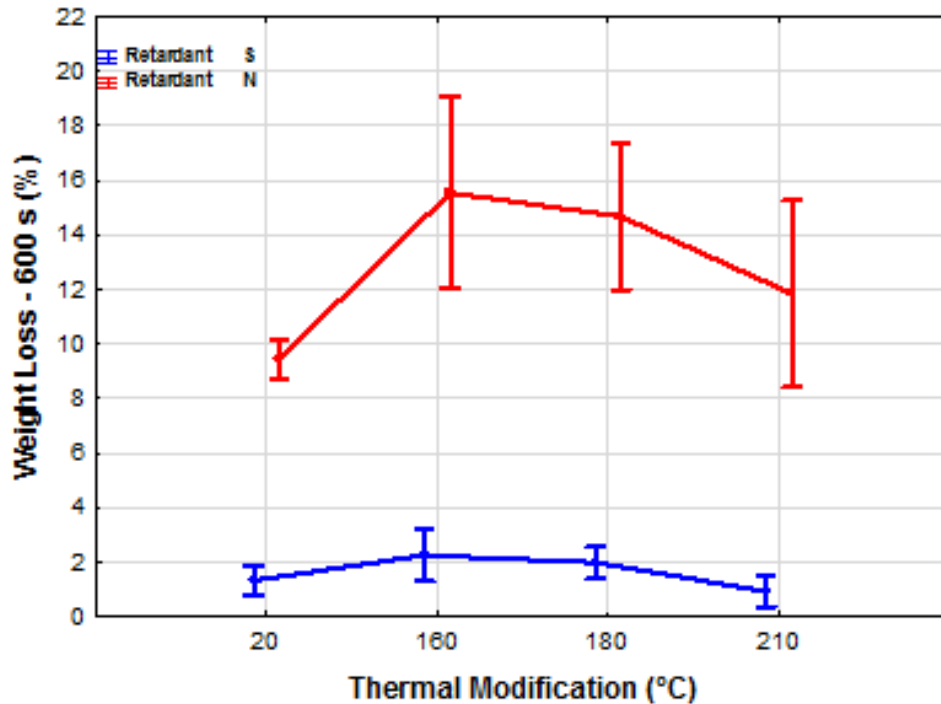
Z tab. č. 11 je patrné, že všechny sledované vlivy, které jsou v ní uvedeny mají hladinu významnosti P pod hodnotou 0,05. Pokud jsou hodnoty hladiny významnosti P pod touto hodnotou, znamená to, že se jedná o statisticky velmi významné vlivy. Proto se dá říci, že na úbytek hmotnosti mají dopad všechny uvedené vlivy z tabulky č. 11.

Tab. č. 11 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na úbytek hmotnosti

Úbytek hmotnosti (%)					
Sledované vlivy	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	2099,456	1	2099,456	768,2348	0
Retardér hoření	1266,188	1	1266,188	463,3245	0
Tepelná modifikace	81,24	3	27,08	9,9092	0,00009
Ret. hoř. x Tepel. modif.	40,153	3	13,384	4,8976	0,006508
Chyba	87,451	32	2,733		

Zdroj: (vlastní)

Na obr. č. 17 jsou znázorněny dva grafy, které jsou od sebe barevně odlišeny. Červenou barvou je zvýrazněna křivka pro závislost úbytku hmotnosti neošetřených vzorků na velikosti tepelné modifikace (20, 160, 180, 210). Naopak modrou barvou je zvýrazněna křivka, která zobrazuje závislost úbytku hmotnosti ošetřených vzorků syntetickým nátěrem Flamgard na velikosti tepelné modifikace (20, 160, 180, 210). Toto barevné rozlišení platí i pro uvedené grafy v následujících podkapitolách. K největšímu úbytku hmotnosti, přibližně 19 % za dobu 600 sekund, došlo v případě neošetřených vzorků s termickou úpravou při 160 °C.



Obr. č. 17 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na úbytek hmotnosti

Zdroj: (vlastní)

12.2 Rychlost hoření

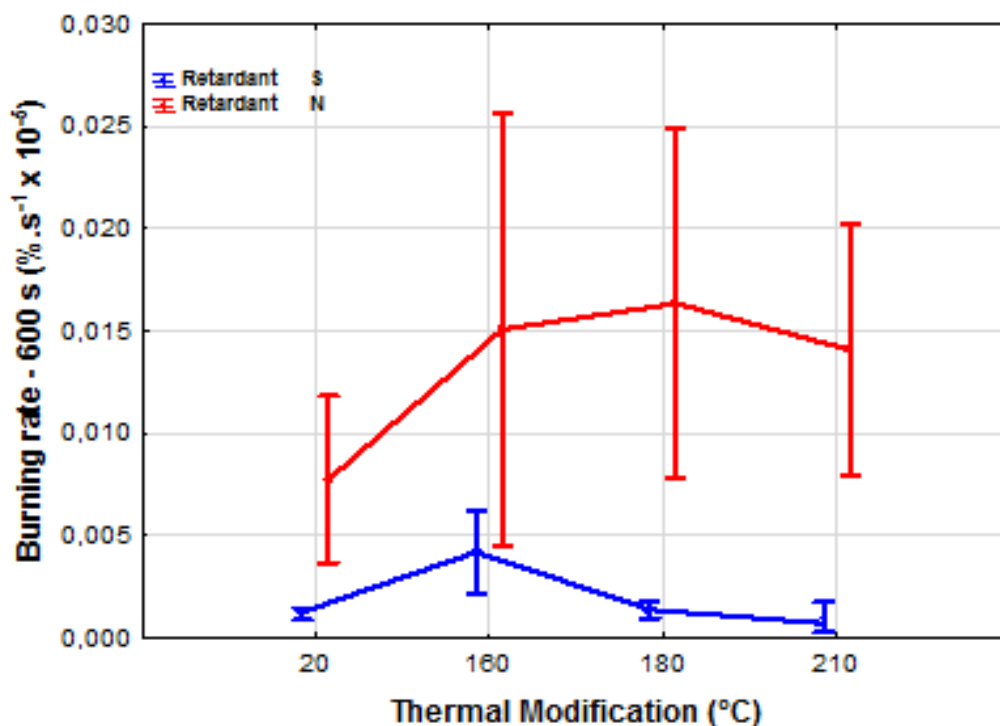
Z tab. č. 12 na základě hodnot hladiny významnosti P, lze konstatovat, že sledované vlivy intercepce a retardér hoření jsou statisticky významné vlivy. Naopak u hodnot hladiny významnosti P, které jsou vyšší, než 0,05 lze říci, že sledované vlivy jako je tepelná modifikace a retardér hoření x tepelná modifikace nejsou statisticky významné vlivy. To znamená, že na rychlost hoření mají dopad vlivy intercepce a retardér hoření, naopak tepelná modifikace a kombinace retardéru hoření s tepelnou modifikací na rychlost hoření dopad nemají.

Tab. č. 12 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na rychlost hoření

Rychlost hoření (% s ⁻¹ × 10 ⁻⁵)					
Sledované vlivy	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	0,002315	1	0,002315	110,6514	0
Retardér hoření	0,001303	1	0,001303	62,261	0
Tepelná modifikace	0,000153	3	0,000051	2,441	0,082308
Ret. hoř. x Tepel. modif.	0,000103	3	0,000034	1,633	0,201161
Chyba	0,00067	32	0,000021		

Zdroj: (vlastní)

Na obr. č. 18 můžeme vidět účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na rychlost hoření. Největší rychlosti hoření dosahovaly vzorky termicky modifikovaného dřeva při 160 °C bez syntetické ochrany.



Obr. č. 18 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na rychlost hoření

Zdroj: (vlastní)

12.3 Maximální rychlost hoření

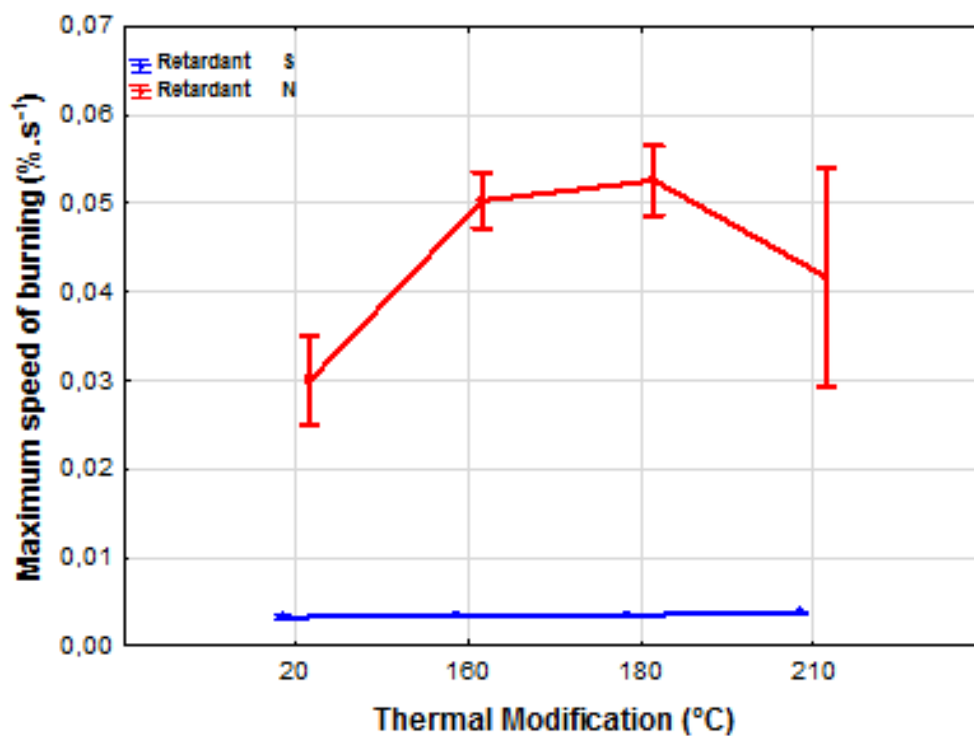
V případě maximální rychlosti hoření byly všechny sledované vlivy uvedené v tab. č. 13 pod hodnotou 0,05 hladiny významnosti P, z čehož vyplývá, že se jedná o statisticky významné vlivy. Dá se tedy říci, že na maximální rychlost hoření mají dopad všechny sledované vlivy (intercepce, retardér hoření, tepelná modifikace a retardér hoření x tepelná modifikace).

Tab. č. 13 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na maximální rychlost hoření

Maximální rychlost hoření (% s ⁻¹ × 10 ⁻⁵)					
Sledované vlivy	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	0,022208	1	0,022208	1338,672	0
Retardér hoření	0,016107	1	0,016107	970,95	0
Tepelná modifikace	0,000804	3	0,000268	16,152	0,000001
Ret. hoř. x Tepel. modif.	0,000778	3	0,000259	15,636	0,000002
Chyba	0,000531	32	0,000017		

Zdroj: (vlastní)

Na obr. č. 19 můžeme vidět účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na maximální rychlost hoření, nejvyšších hodnot maximální rychlosti hoření dosahovaly vzorky termicky modifikované při konečné teplotě 180 °C bez syntetické ochrany.



Obr. č. 19 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na maximální rychlost hoření

Zdroj: (vlastní)

12.4 Poměr maximální rychlosti hoření

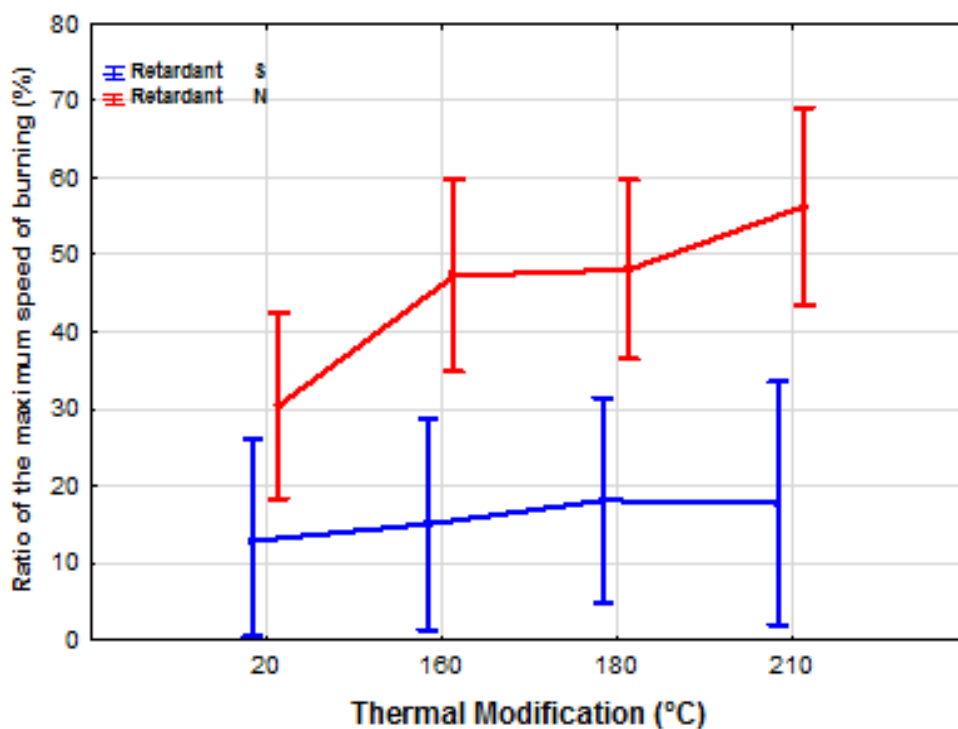
Z hodnot, které jsou uvedené v tab. č. 14 je patrné, že kromě sledovaného vlivu retardér hoření x tepelná modifikace jsou zbývající vlivy pod hladinou významnosti $P = 0,05$. Takže se dá říci, že se jedná o statisticky významné vlivy. Naopak retardér hoření v kombinaci s tepelnou modifikací nemá na poměr maximální rychlosti hoření dopad.

Tab. č. 14 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na poměr maximální rychlosti hoření

Poměr maximální rychlosti hoření (%)					
Sledované vlivy	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	37748,87	1	37748,87	335,1109	0
Retardér hoření	8751,88	1	8751,88	77,6937	0
Tepelná modifikace	1281,13	3	427,04	3,791	0,019636
Ret. hoř. x Tepel. modif.	583,9	3	194,63	1,7278	0,181007
Chyba	3604,67	32	112,65		

Zdroj: (vlastní)

Na obr. č. 20 můžeme vidět účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na poměr maximální rychlosti hoření, kde dosahovaly nejvyšších hodnot vzorky termicky modifikované při konečné teplotě 210 °C bez syntetické ochrany.



Obr. č. 20 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na poměr maximální rychlosti hoření

Zdroj: (vlastní)

12.5 Doba dosažení maximální rychlosti hoření

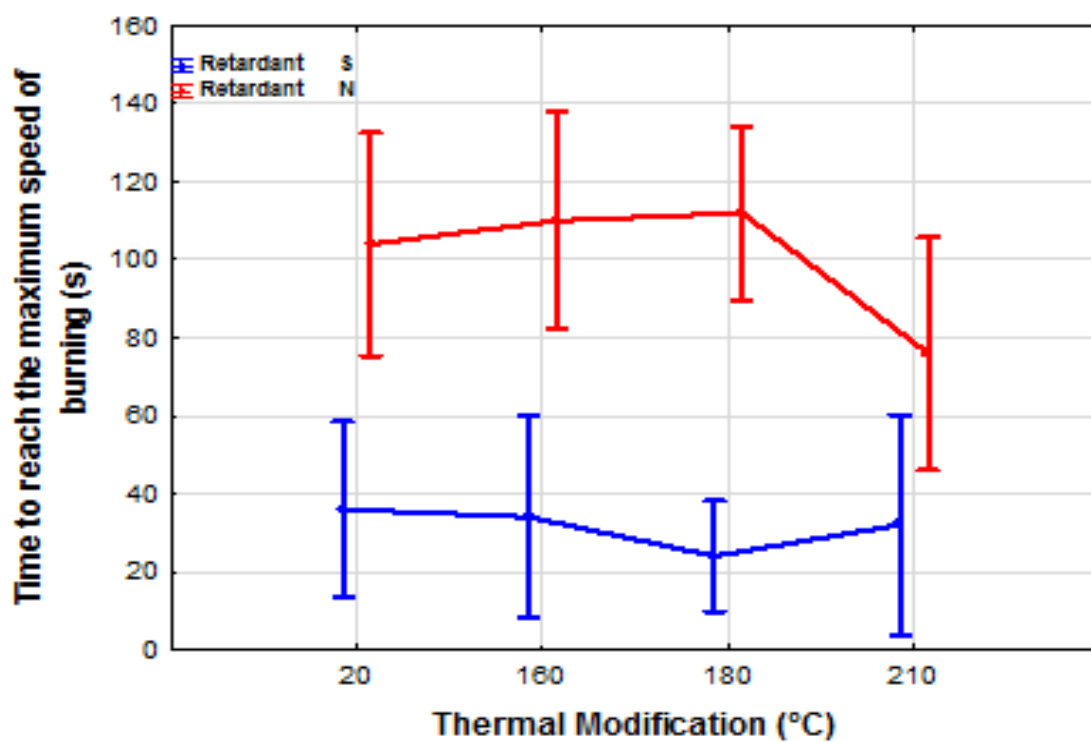
Z hodnot, které jsou uvedeny v tab. č. 15 je patrné, že sledované vlivy tepelná modifikace a kombinace retardéru hoření s tepelnou modifikací jsou statisticky nevýznamné na základě úrovně významnosti P, jelikož jejich hodnoty jsou vyšší než 0,05. Z uvedeného se dá říci, že na dobu dosažení maximální rychlosti hoření mají dopad sledované vlivy intercepce a retardér hoření.

Tab. č. 15 Statistické hodnocení vlivu tepelné úpravy a retardéru hoření na době dosažení maximální rychlosti hoření

Doba dosažení maximální rychlosti hoření (s)					
Sledované vlivy	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozdíl	Fisherův F - test	Hladina významnosti P
Intercepce	174240	1	174240	417,3413	0
Retardér hoření	47610	1	47610	114,0359	0
Tepelná modifikace	2000	3	666,7	1,5968	0,209445
Ret. hoř. x Tepel. modif.	2590	3	863,3	2,0679	0,124085
Chyba	13360	32	417,5		

Zdroj: (vlastní)

Na obr. č. 21 můžeme vidět účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na době dosažení maximální rychlosti hoření, kde dosahovaly nejvyšších hodnot vzorky termicky modifikované při konečné teplotě 160 °C bez syntetické ochrany.



Obr. č. 21 Účinek syntetického retardéru hoření a tepelné modifikace na době dosažení maximální rychlosti hoření

Zdroj: (vlastní)

13 Závěr

V práci jsou shrnuty důležité poznatky o problematice týkající se požární odolnosti dřeva a dřevěných materiálů. Dřevo je zde popsáno z pohledu hořlavého materiálu a procesu hoření. Dále je zde rozebrán plamen jako takový a jeho vlastnosti. Jsou zde zmíněny druhy a postup tepelné modifikace dřeva a možnosti ochrany dřeva před účinky požáru. Tyto poznatky jsou důležité i pro zpracování experimentální části, kde jsem se těmito faktory dále zabýval.

Hlavním cílem této práce je podat ucelené poznatky o vybraných požárních charakteristikách a jejich vlivu na rostlé a tepelně upravené dřevo ošetřené pomocí antipyrénu Flamgard na syntetické bázi. Tyto poznatky se podařilo zjistit na základě zkouškové metody, při níž byl sledován vliv jednotlivých faktorů jako je teplota termické modifikace (20 °C, 160 °C, 180 °C, 210 °C) a účinek syntetického antipyrénu Flamgardu na jednotlivé charakteristiky hoření (úbytek hmotnosti, rychlost hoření, maximální rychlost hoření, poměr maximální rychlosti hoření, doba dosažení maximální rychlosti hoření). Sledovala se i interakce uvedených faktorů na zmíněné charakteristiky. Samotná zkušební metoda spočívala v měření úbytku hmotnosti všech zkušebních vzorků z akátového dřeva za určitý celkový čas. Z každé skupiny 5 vzorků byly 4 vzorky zkoumány po dobu 10 minut, u posledního vzorku č. 5 byl odstraněn plamenný zdroj a měření probíhalo dalších 5 minut, v tomto časovém úseku byl úbytek hmotnosti minimální a nedošlo k samovznícení. Z těchto a dalších hodnot získaných vážením před a po nátěru syntetickým nátěrem se získaly hodnoty dalších charakteristik hoření pomocí fyzikálních rovnic. Tato zkušební metoda je lehce zhotovitelná a potvrdila se jako přesná a dostačující pro zjištění sledovaných charakteristik a faktorů.

Stejně jako u všech sledovaných charakteristik bylo prokázáno výrazné snížení jejich hodnot použitím syntetického antipyrénu Flamgard ve srovnání se vzorky bez ochrany syntetickým antipyrénem. Pod účinkem tepelné modifikace se u vzorků bez syntetické ochrany výrazně zvýšily hodnoty úbytku hmotnosti, rychlosti hoření, maximální rychlosti hoření a poměru maximální rychlosti hoření, naopak u charakteristiky doby dosažení maximální rychlosti hoření jsou tyto hodnoty vyšší u nemodifikovaných vzorků. U vzorků se syntetickou ochranou účinek tepelné modifikace není tak výrazný. Z těchto výsledků je patrné, že tepelně modifikované akátové dřevo má při všech teplotách vyšší míru hoření než neupravené akátové dřevo. Tepelná úprava akátového dřeva výrazně zvýšila jeho schopnost vznícení a intenzitu

hoření. Nejvyšší hodnoty úbytku hmotnosti a rychlosti hoření dosahovaly vzorky termicky upravené při konečné teplotě 160 °C.

Ze zkouškové metody měření bylo zjištěno, že na požární charakteristiku rychlost hoření a dobu dosažení maximální rychlosti hoření nemá výrazný vliv termická modifikace a kombinace retardéru s termickou modifikací. V případě požární charakteristiky poměr maximální rychlosti hoření se ukázalo, že nemá výrazný vliv kombinace retardéru a termické modifikace. V ostatních případech nasvědčují výsledky, zhotovené pomocí statistické analýzy, že je potvrzena spojitost vlivu retardéru, termické modifikace a kombinace termické modifikace a retardéru na úbytek hmotnosti a maximální rychlost hoření.

Přínosem této práce pro vědu a praxi je zjištění, že je potřebné použití syntetických antipyrénů při expozici termicky upraveného dřeva v prostorách, kde je požadována vyšší požární odolnost. Také je třeba brát v úvahu rozdílnou požární odolnost termicky upraveného dřeva při rozdílných konečných teplotách v případě, že při expozici nebude dodatečně ochráněno syntetickým antipyrénem. V takovém případě je termicky modifikované akátové dřevo při 160 °C vhodné do prostředí, kde je riziko vypuknutí požáru minimální. Z vědeckého hlediska je možné použití získaných výsledků z měření pro další zkoumání, případně k porovnání s jinými druhy dřevin.

14 Seznam použité literatury

HOLAN, J. *Dřevo v domácnosti: ochrana, údržba, renovace*. Brno: ERA, 2006. Stavíme. 108 s. ISBN 80-7366-049-0.

CHUDĚJ, F. *Nové systémy v požární ochraně*. Praha: České vysoké učení technické v Praze; Profesionální komora požární ochrany, 2008. 221 s. ISBN 978-80-01-03944-1.

JIRÁNEK, M.; WASSERBAUER, R.; KUPILÍK, V. *Zdravotní nezávadnost staveb*. Praha: ŠEL, 1999. Technická knihovna autorizovaného inženýra a technika. 172 s. ISBN 80-902697-3-7.

KUČERA, P.; ČESELKÁ, T.; MATEČKOVÁ, P. *Požární odolnost stavebních konstrukcí*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. 176 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-094-4.

KUKLÍK, P. *Dřevěné konstrukce*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Technická knihovna autorizovaného inženýra a technika. 172 s. ISBN 80-86769-72-0.

KUKLÍK, P.; KUKLÍKOVÁ, A. *Navrhování dřevěných konstrukcí: příručka k ČSN EN 1995-1*. Praha: Pro Ministerstvo pro místní rozvoj a Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2010. 140 s. ISBN 978-80-87093-88-7.

KUPILÍK, V. *Konstrukce pozemních staveb 80: požární bezpečnost staveb*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. 111 s. ISBN 80-01-03056-3.

KUPILÍK, V. *Konstrukce pozemních staveb: požární bezpečnost staveb*. Praha: České vysoké učení technické, 2009. 195 s. ISBN 978-80-01-04291-5.

KUPILÍK, V. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Praha: Grada, 2006. Stavitel. 262 s. ISBN 80-247-1329-2.

KUPILÍK, V. *Závady a životnost staveb*. Praha: Grada, 1999. 288 s. ISBN 80-7169-581-5.

NETOPILOVÁ, M.; KAČÍKOVÁ, D.; OSVALD, A. *Reakce stavebních výrobků na oheň*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. 126 s. Spektrum (Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství). ISBN 978-80-7385-093-7.

- POKORNÝ, M.; HEJTMÁNEK, P. *Požární bezpečnost staveb: sylabus pro praktickou výuku*. 2. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. 126 s. ISBN 978-80-01-06394-1.
- POŽGAJ, A.; CHOVANEC, D.; KURJATKO S.; BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
- PTÁČEK, P. *Ochrana dřeva*. Praha: Grada, 2009. 96 s. ISBN 8024723263.
- REINPRECHT, L. *Ochrana dreva: vysokoškolská učebnica*. Vo Zvolene: Technická univerzita, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.
- REINPRECHT, L.; PÁNEK, M. *Trvanlivost a ochrana dřeva*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2016. 132 s. ISBN 978-80-213-2660-6.
- REINPRECHT, L.; ŠTEFKO, J. *Dřevěné stropy a krovy: typy, poruchy, průzkumy a rekonstrukce*. Praha: ARCH, 2000. 242 s. ISBN 80-86165-29-9.
- SVATOŇ, J. *Ochrana dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2000. 203 s. ISBN 80-7157-435-X.
- ŠEFCŮ, O.; VINAŘ, J.; PACÁKOVÁ, M. *Metodika ochrany dřeva*. Praha: Jalna, 2000. Odborné a metodické publikace (Státní ústav památkové péče). ISBN 80-86234-14-2.
- ŠTEFKO, J.; REINPRECHT, L.; KUKLÍK, P. *Dřevěné stavby: konstrukce, ochrana a údržba*. 2., české vyd. Bratislava: Jaga, 2006. 204 s. ISBN 80-8076-043-8
- TREBULA, P.; KLEMENT, I. *Sušenie a hydrotermická úprava dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2002. 449 s. ISBN 80-228-1182-3.
- VITVAR, P. *Přehled a charakteristika chemických prostředků na ochranu dřeva proti biotickým škůdcům, ohni a povětrnostním vlivům*. Praha: Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 2003. 305 s.
- ŽÁK, J.; REINPRECHT, L. *Ochrana dřeva ve stavbě: odborná příručka pro stavebníky, investory, projektanty a architekty*. Praha: ABF, 1998. 95 s. ISBN 80-86165-00-0.

Elektronické publikace

BARBER, D.; GERARD, R. *Summary of the fire protection foundation report - fire safety challenges of tall wood buildings* [online]. 2015 [cit. 2019-03-01]. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40038-015-0009-3>. Dostupné z: <https://firesciencereviews.springeropen.com/articles/10.1186/s40038-015-0009-3>

CIERJACKS, A.; KOWARIK, I.; JOSHI, J.; HEMPEL, S.; RISTOW, M.; LIPPE, M.; WEBER, E. *Biological Flora of the British Isles: Robinia pseudoacacia*. *Journal of Ecology* [online]. 03 October 2013 [cit. 2019-02-28]. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12162>. Dostupné z: [https://besjournals-onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.techlib.cz/doi/abs/10.1111/1365-2745.12162](https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1365-2745.12162)

ESTEVEZ, B.; PEREIRA, H. *Wood modification by heat treatment: A review*. *BioResources* 4(1), 370-404 [online]. 2009 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/279900105_Wood_modification_by_heat_treatment_A_review

GAFF, M.; KAČÍK, F.; GAŠPARÍK, M.; TODARO, L.; JONES, D.; CORLETO, R.; OSVALDOVÁ, M. L.; ČEKOVSÁ, H. *The effect of synthetic and natural fire-retardants on burning and chemical characteristics of thermally modified teak (Tectona grandis L. f.) wood* [online]. 2018 [cit. 2019-03-17]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.106. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/329983770_The_effect_of_synthetic_and_natural_fire-retardants_on_burning_and_chemical_characteristics_of_thermally_modified_teak_Tectona_grandis_L_f_wood

CHEMOLAK Trade, spol. s r.o.. *Farba penotvorná protipožiarna vodou riediteľná PLAMOR OK V 2026*. www.chemolak.sk [online]. 2012 [cit. 2019-02-23]. Dostupné z: <https://www.chemolak.sk/wp-content/uploads/2017/10/tl-plamor-ok-v-2026.pdf>

IZOSTAV - Ing. Josef Hruban. *Protipožární nátěry na dřevo: Plamostop D*. www.izostav.cz [online]. 2002 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <http://www.izostav.cz/cz/produkty/plamostop-d-na-drevo/>

KÄLLBOM, S. *Characterisation of thermally modified wood for use as component in biobased building materials*. www.diva-portal.org [online]. KTH Royal Institute of Technology, 2018 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1241790/FULLTEXT01.pdf>

KOPOS Slovakia, s.r.o. *Triedy reakcie na oheň*. www.kopos.sk [online]. 2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: <https://www.kopos.sk/sk/technicke-informacie/triedy-reakcie-na-ohen>

Krytiny-střechy. *Protipožární nátěry krovů*. www.krytiny-strechy.cz [online]. 2012 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <https://www.krytiny-strechy.cz/aktuality/9114-protipozarni-natery-krovu-a.html#.XHgmK8BKjIV>

LINEHAM, S. A.; THOMSON, D.; BARTLETT, A. I.; BISBY, L. A.; HADDEN, R. M. *Structural response of fire-exposed cross-laminated timber beams under sustained loads*. Fire Safety Journal [online]. 2016 [cit. 2019-03-05]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.08.002>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711216301035>

ROWELL, R. M. *Chemical modification of wood: A short review*. Wood Material Science and Engineering [online]. 2007 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.1080/17480270600670923. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228868971_Chemical_modification_of_wood_A_short_review

SANDAK, J.; GOLI, G.; CETERA, P.; SANDAK, A.; CAVALLI A.; TODARO, L. *Machinability of Minor Wooden Species before and after Modification with Thermo-Vacuum Technology* [online]. 2017 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.3390/ma10020121. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5459161/>

Seidl J. & spol., s.r.o. *Protipožární ochrana staveb*. www.seidl.cz [online]. © J. Seidl & spol., 2012 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.seidl.cz/cz/katalog/ostatni/02101-protipozarni-nater-na-drevene-konstrukce-dexaryl-b-transparent-534.html>

STACHEMA CZ s.r.o. *Aplikační návody protipožárních nátěrů na dřevo*. www.stachema.cz [online]. 2017 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.stachema.cz/files/files/Reseni-protipozarniho-nateru-manual.pdf>

TERZI, E.; KARTAL, S.N.; WHITE, R. H.; SHINODA, K.; IMAMURA, Y. *Fire performance and decay resistance of solid wood and plywood treated with quaternary ammonia compounds and common fire retardants* [online]. 2011 [cit. 2019-03-04]. DOI: 10.1007/s00107-009-0395-0. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/226562210_Fire_performance_and_decay_resistance_of_solid_wood_and_plywood_treated_with_quaternary_ammonia_compounds_and_common_fire_retardants

TODARO, L.; RUSSOB, D.; CETERAA, P.; MILELLAB, L. *Effects of thermo-vacuum treatment on secondary metabolite content and antioxidant activity of poplar (Populus nigra L.) wood extracts*. *Industrial Crops and Products* 109:384-390 [online]. 2017 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.08.052. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319901712_Effects_of_thermo-vacuum_treatment_on_secondary_metabolite_content_and_antioxidant_activity_of_poplar_Populus_nigra_L_wood_extracts

YANG, T.-C.; CHIEN, Y.-C.; WU, T.-L.; HUNG, K.-C.; WU, J.-H. *Effects of Heat-Treated Wood Particles on the Physico-Mechanical Properties and Extended Creep Behavior of Wood/Recycled-HDPE Composites Using the Time–Temperature Superposition Principle* [online]. 2017 [cit. 2019-03-03]. DOI: 10.3390/ma10040365. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5506928/>

Normy

ČSN 33 2312 ed. 2 - *Elektrické instalace nízkého napětí - Elektrická zařízení v hořlavých látkách a na nich*, 2014. 12 s.