

ODOLNOST DŘEVA VŮČI OHNI V ZÁVISLOSTI NA TLOUŠŤCE MATERIÁLU

J. Holan, L. Merenda

Došlo: 27. února 2008

Abstract

HOLAN J., MERENDA L.: *The fire resistance of wood depending on material's thickness*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2008, LVI, No. 5, pp. 89–96

The paper presents the resistance of wood against a pilot flame. The fire has negative effect on the wood and its properties. The fire and its high temperature cause a degradation of chemical components of wood. Hence the physical properties are changed and strength of the wood is decreased. The combustion velocity and the loss weight depend on the material's thickness. For tests have been chosen groups of samples with thickness of 5, 10, 15 and 20 mm.

The result of submitted work is a time estimation of the fire penetration and an observation of weight losses coupled with visual changes observation of degraded samples. It has been established that with an action of the pilot flame the needed time to fire penetration is rising with rising material's thickness and at the same time the combustion velocity is decreasing.

Picea abies (L.) Karst., thermal wood decomposition, weight loss, rate of fire penetration

Hoření dřeva je chemickou reakcí, při níž dochází k prudké oxidaci hořlavé látky při vysokých teplotách. Přitom dochází k uvolňování tepelné a světelné energie (Dejmal, 1995). Dřevo je lehce zapalitelné a průběh jeho hoření je podmíněn složitou chemickou strukturou dřeva. Termický rozklad vazeb polysacharidických komponentů dřeva a změna jejich chemické struktury má za následek vznik nových produktů. Dřevo podobně jako jiné tuhé materiály nehoří přímou reakcí s kyslíkem. První změny, které předcházejí hoření (tzv. iniciační stupeň), se týkají akumulace tepla dodaného zdrojem a vznikají chemickou a termooxidační reakcí. Při teplotě nad 100 °C dochází k dehydrataci. Rozklad dřeva nastává okolo 130–150 °C. Intenzivní rozklad dřeva s uvolňováním velkého množství hořlavých plynů pozorujeme při teplotách 180–195 °C. Druhá fáze hoření, tzv. propagační stupeň, je dána exotermickým rozkladem dřeva, který nastává při teplotách 270–280 °C. Existuje ještě třetí – terminační stupeň, který je charakteristický bezplamenným hořením dřeva po předcházejícím ústupu plamenného hoření až po úplný útlum hoření (Horáček, 2001).

Hoření dřeva je ovlivněno především jeho chemickými vlastnostmi (chemickým složením, podílem celulózy, hemicelulóz a termicky nejstabilnějšího ligninu) fyzikálními vlastnostmi (vlhkostí, tepelnou

vodivostí a měrnou teplotou) i mechanickými vlastnostmi a také vlastnostmi okolí (množstvím kyslíku a koncentrací hořlavých plynů), tloušťkou tepelně degradovaného dřevěného prvku a jeho úpravou (Reinprecht, 2001).

Průměrná rychlost odhořívání dřeva je 0,7–1 mm.min⁻¹, jak uvedli Žák a Reinprecht (1998). Zjistit, jak tuto rychlost ovlivňuje tloušťka materiálu a jak se prodlužuje doba potřebná k prohoření smrkového dřeva v závislosti na uvedených faktorech, je cílem této práce.

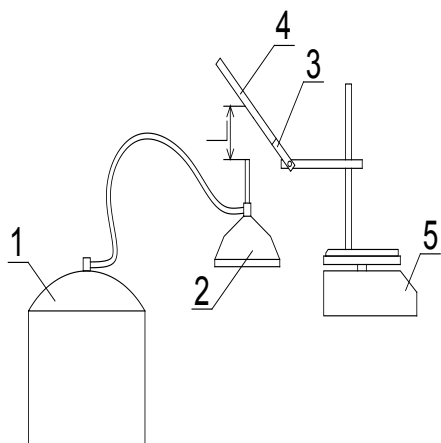
MATERIÁL A METODIKA

Pro posouzení odolnosti dřeva vůči ohni bylo vybráno masivní smrkové dřevo (*Picea abies* (L.) Karst.). Povrch vzorků byl upraven pouze frézováním. Jednotlivé vzorky byly 200 mm dlouhé, 100 mm široké s tloušťkou 5, 10, 15 a 20 mm. Pro každou tloušťku byly vytvořeny skupiny obsahující 30 zkušebních vzorků. Tyto vzorky byly klimatizovány v temperované místnosti při teplotě vzduchu 20 ± 5 °C a relativní vlhkosti vzduchu 60 ± 5 % po dobu čtyř týdnů. Výsledná vlhkost byla v rozsahu 9–10 %. Tato vlhkost byla stanovena gravimetrickou metodou. Vzorky byly zváženy s přesností ± 0,01 g. Z rozměrů a váhy byla zjištěna objemová hmotnost ρ (kg.m⁻³). Stano-

vení hořlavosti smrkového dřeva (rychlosti úbytku hmotnosti) je dána normou ČSN 73 0862. Princip zkoušky spočívá v působení přímého plamene vycházejícího z plynového kahanu po dobu 10 minut na povrch vzorku a sledování rychlosti úbytku hmotnosti. Teplota plamene dosahovala 1 700–1 975 °C. Po této době dochází k odstavení plamene a ukončení zkoušky, jak předepisuje norma. Náš výzkum zahrnoval i sledování a záznam rychlosti úbytku hmotnosti do doby, než dojde k prohoření zkušební vzorku. Za čas prohoření vzorku je považována doba, kdy dojde ke vzniku trhliny na ploše odvrácené přímému působení plamene. Stanovení rychlosti odhořívání dřeva smrku bylo vypočítáno jako podíl celkového času potřebného k prohoření a tloušťky vzorku.

Veškeré zkoušky probíhaly v laboratorním prostoru digestoře s odsáváním při teplotě 20 ± 5 °C a relativní vlhkosti vzduchu 60 ± 5 %. Rychlost odsávání vzduchu z prostoru digestoře byla $0,5 \text{ m.s}^{-1}$. Zkušební vzorek byl umístěn do kovového rámu tak, aby plocha vzorku svírala úhel 45° s vodorovnou rovinou. Následně se váhy vynulovaly a zapálený kahan se umístil pod střed spodní plochy zkušební vzorku. Výška plamene od ústí kahanu byla 100 mm. Vzdálenost mezi ústím kahanu a středem spodní plochy vzorku byla 90 mm (Obr. 1).

Po dobu prvních patnácti minut se zaznamenávaly hmotnostní úbytky po jedné minutě. Po uplynutí této doby se hodnoty hmotnostních úbytků zaznamenávaly každých 5 minut a to do doby, než došlo k prohoření zkušební vzorku. Tento čas se zaznamenal jako poslední a stanovila se hmotnost vzorku. Poté se kahan odstavil do vzdálenosti min. 500 mm od zkušební vzorku. K uhašení zkušebních vzorků docházelo jejich ponořením do vody.



- 1 – zásobník plynu
- 2 – plynový kahan
- 3 – kovový držák vzorku
- 4 – zkušební vzorek
- 5 – laboratorní váha
- L = 90 mm

1: Schéma zkušebního zařízení

VÝSLEDKY

Po umístění hořícího plynového kahanu pod vzorek dojde nejprve k barevné změně v nejbližším okolí plamene, následně dojde k vyschnutí povrchových vrstev materiálu a zapálení dřeva. Plamen se od hořícího dřeva šíří po spodní ploše zkušební vzorku směrem vzhůru. Poté dochází ke tvorbě zuhelnatělé vrstvy na povrchu vzorku a ústupu šíření plamene po ploše vzorku. Další průběh termického rozkladu se projevuje pouze bezplamenným hořením, tzv. žhnutím. Tato fáze probíhá až do prohoření vzorku a ukončení zkoušky.

V Tab. I je uveden přehled hmotnostních úbytků po 10 minutách působení přímého plamene plynového kahanu na spodní plochu zkušební vzorku dle normy ČSN 73 0862. U skupiny vzorků s tloušťkou 5 mm došlo k prohoření vzorků v době kratší než 10 minut, proto zde nejsou uvedeny. Porovnáme-li hodnoty mediánu hmotnostních úbytků u jednotlivých tloušťkových skupin vzorků, zjistíme, že hmotnostní úbytky klesají s rostoucí tloušťkou; tento trend je zobrazen na Obr. 2.

Hodnota mediánu hmotnostního úbytku u materiálu s tloušťkou 10 mm je po 10 minutách působení přímého plamene 15,54 g, u materiálu s tloušťkou 15 mm je tento úbytek 14,05 g a pro skupinu materiálů s tloušťkou 20 mm je medián hmotnostního úbytku 13,06 g.

Tab. II uvádí popisnou statistiku hodnot časů, kdy došlo k prohoření celé tloušťky vzorků u skupin zkušebních vzorků o tloušťkách 5, 10, 15 a 20 mm. Střední hodnoty i mediány vykazují nárůst doby úplného prohoření s rostoucí tloušťkou materiálu, což je graficky znázorněno na Obr. 3. Nárůst hodnot časů, kdy došlo k prohoření vzorků, má exponenciální závislost na tloušťce materiálu. K prohoření vzorků o tloušťce 5 mm došlo za 413 s (6:53 min.) (medián), vzorků o tloušťce 10 mm za dobu 1437 s (23:57 min.), vzorků o tloušťce 15 mm za 2502 s (41:42 min.) a vzorků o tloušťce 20 mm za dobu 3921 s (65:21 min.).

Nárůst tloušťky materiálu způsobuje pokles rychlosti, kterou dochází k odhořívání vzorku v oblasti působení přímého plamene. Tato závislost spolu s hodnotami mediánů rychlosti odhořívání materiálu je znázorněna na Obr. 4. Čím větší je tloušťka materiálu, tím menší je pokles rychlosti odhořívání materiálu. U materiálu o tloušťce 5 mm je průměrná rychlost odhořívání $0,783 \text{ mm.min}^{-1}$, u materiálu o tloušťce 10 mm je $0,424 \text{ mm.min}^{-1}$, u materiálu o tloušťce 15 mm je $0,363 \text{ mm.min}^{-1}$ a u materiálu o tloušťce 20 mm je $0,309 \text{ mm.min}^{-1}$.

Součástí tohoto výzkumu bylo i vizuální pozorování doby, kdy dojde k barevné změně na ploše zkušební vzorku odvrácené od plochy, na kterou působí přímý plamen. Popisná statistika časů těchto barevných změn u různých tloušťek materiálů jsou uvedeny v Tab. III a graficky znázorněny na Obr. 5.

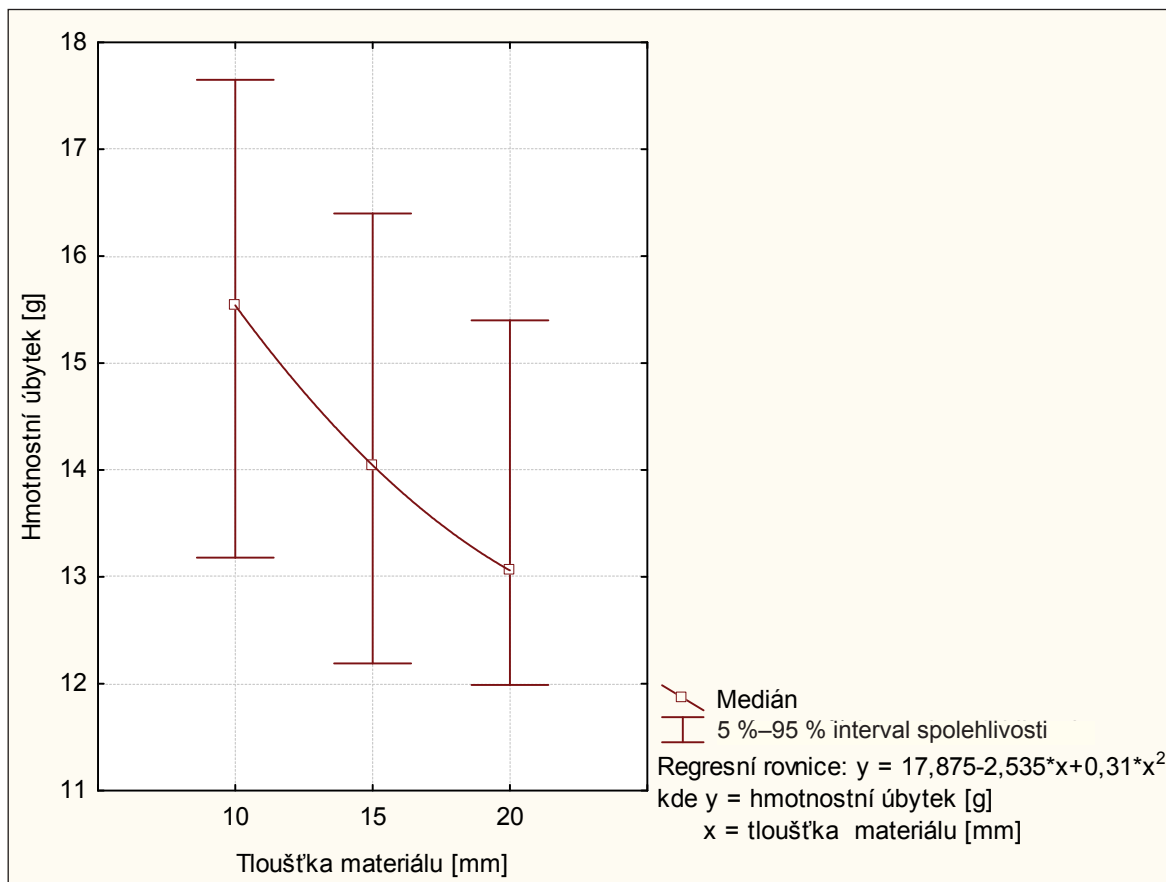
Tab. III navíc uvádí popisnou statistiku časů, kdy došlo k barevné změně vzorků na odvrácené ploše vůči působení přímého plamene. Porovnáním hod-

I: Tabulka popisné statistiky hmotnostních úbytků po 10 minutách (m_{10}) působení přímého plamene na zkušební vzorky různých tloušťek

	Počet vzorků	Střední hodnota [g]	Medián [g]	Min.	Max.	Směrodatná odchylka [g]
Tloušťka materiálu 10 mm Průměrná vlhkost materiálu 9,3 %						
m_0 [g]	30	96,53	95,17	74,23	119,64	12,00
m_{10} [g]	30	81,05	79,81	62,11	102,95	11,42
hmotnostní úbytek [g]	30	15,48	15,54	11,70	18,14	1,36
Tloušťka materiálu 15 mm Průměrná vlhkost materiálu 10 %						
m_0 [g]	30	139,74	138,15	125,93	172,72	10,69
m_{10} [g]	30	125,61	124,58	112,59	156,82	10,06
hmotnostní úbytek [g]	30	14,13	14,05	11,67	16,53	1,38
Tloušťka materiálu 20 mm Průměrná vlhkost materiálu 9 %						
m_0 [g]	30	183,06	184,00	168,82	206,28	10,12
m_{10} [g]	30	169,50	169,77	156,83	192,23	9,72
hmotnostní úbytek [g]	30	13,56	13,06	11,48	16,59	1,34

m_0 hmotnost vzorku před začátkem zkoušky

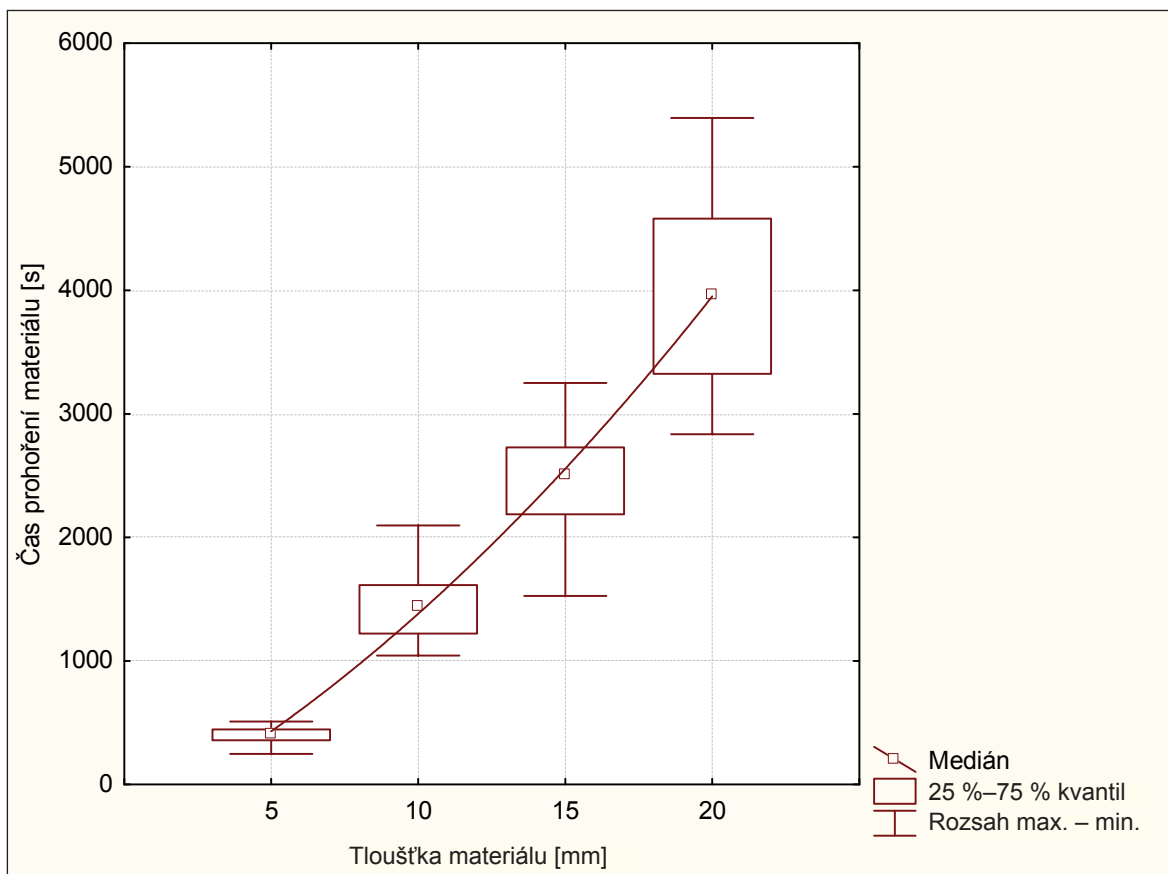
m_{10} hmotnost vzorku po 10 minutách působení přímého plamene



2: Graf ukazující trend klesajícího hmotnostního úbytku s rostoucí tloušťkou materiálu po 10 minutách působení přímého plamene

II: Popisná statistika časů, kdy došlo k úplnému prohoření vzorků čtyř tloušťkových skupin zkušebních vzorků

	Počet vzorků	Střední hodnota [s]	Medián [s]	Min.	Max.	Směrodatná odchylka [s]
Vzorky tloušťky 5 mm	30	391	413	212	509	83,86
Vzorky tloušťky 10 mm	30	1453	1437	1044	2096	269,33
Vzorky tloušťky 15 mm	30	2497	2502	1526	3250	378,89
Vzorky tloušťky 20 mm	30	4044	3921	2836	5396	849,73



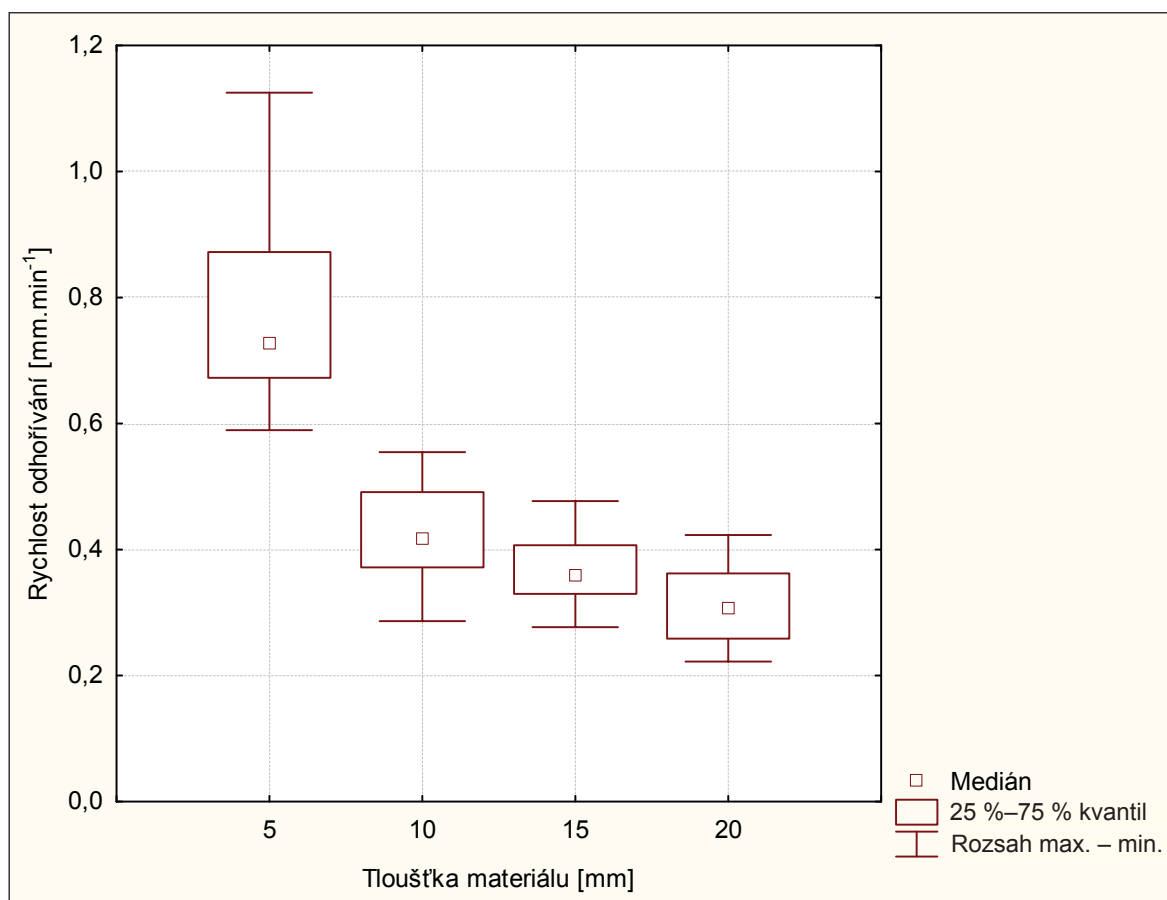
3: Krabicové grafy hodnot časů kdy došlo k prohoření zkušebních vzorků o různých tloušťkách

not časů, kdy došlo k barevné změně a kdy došlo k úplnému prohoření materiálů o různých tloušťkách (Obr. 5) zjistíme, že v závislosti na tloušťce materiálu exponenciálně roste doba jak barevné změny, tak i doby prohoření materiálu. Časový úsek od okamžiku, kdy dojde k barevné změně do okamžiku úplného prohoření materiálu, roste s rostoucí tloušťkou, až do určité hodnoty tloušťky, od které je nadále tento rozdíl konstantní (Obr. 5).

DISKUSE

Při daných podmínkách provedených zkoušek (druh tepelného zdroje, poloha vzorku vůči zdroji, doba zkoušky, tloušťka materiálu, atd.) získaná data odpovídají teoretickým předpokladům. U všech

zkušebních vzorků dochází k poklesu rychlosti odhořívání vrstvy materiálu z $0,783 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ u vzorků tloušťky 5 mm na rychlost $0,309 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ u vzorků o tloušťce 20 mm a k poklesu hmotnostních úbytků. Pokles rychlosti odhořívání se uskutečňuje v závislosti na čase působení přímého plamene a tloušťce materiálu. S rostoucí tloušťkou materiálu roste doba úplného prohoření ze 413 s u vzorků tloušťky 5 mm na 3921 s u vzorků tlustých 20 mm. Po spodní ploše vzorku se šíří žlutě svítící plamen s největší teplotou ve středu horní části plamene. Zpravidla po páté minutě dochází ke tvorbě zuhelnatělé vrstvy spodní plochy vzorku u materiálů o tloušťce 10, 15 a 20 mm. U materiálu o tloušťce 5 mm se zuhelnatělá vrstva nevytvoří. Po prvotním nárůstu rychlosti odhořívání tento nárůst stagnuje a dále postupně klesá.



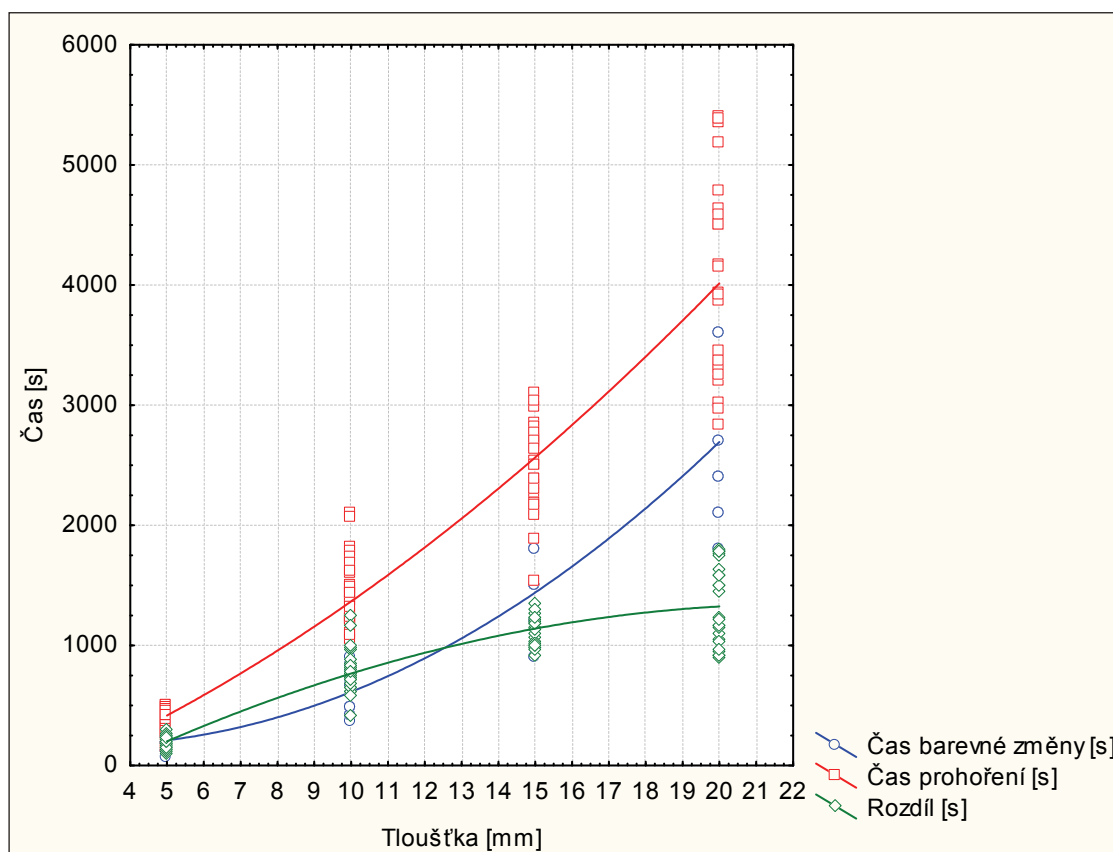
4: Krabicové grafy rychlosti odhořívání materiálu v závislosti na jeho tloušťce

III: Popisná statistika časů, kdy došlo k barevné změně vzorků na odvrácené ploše vůči působení plamene a k úplnému prohoření vzorků čtyř tloušťkových skupin zkušebních vzorků

	Počet vzorků	Střední hodnota [s]		Medián [s]		Minimum [s]		Maximum [s]		Směrodatná odchylka [s]	
	[ks]	Čas barevné změny [s]	Čas prohoření [s]	Čas barevné změny [s]	Čas prohoření [s]	Čas barevné změny [s]	Čas prohoření [s]	Čas barevné změny [s]	Čas prohoření [s]	Čas barevné změny [s]	Čas prohoření [s]
Vzorky tloušťky 5 mm	30	196	391	180	413	60	212	300	509	52	84
Vzorky tloušťky 10 mm	30	660	1453	720	1437	360	1044	900	2096	169	269
Vzorky tloušťky 15 mm	30	1393	2497	1500	2502	900	1526	1800	3250	248	379
Vzorky tloušťky 20 mm	30	2712	4044	2700	3921	1800	2836	3600	5396	572	850

Klesají i hmotnostní úbytky. To se vysvětluje sníženou schopností vzduchu postupovat přes zuhelnatělou vrstvu na povrchu vzorku k jeho vnitřním vrstvám. Po zuhelnatělé vrstvě, která vznikla na povrchu vzorků, se přestává šířit plamen a dochází k pozvol-

nému snižování rychlosti odhořívání zkušebních vzorků. V místě styku plamene a zuhelnatělé vrstvy vzorků dochází pouze ke žhnutí. Po několika minutách v závislosti na tloušťce materiálu dochází k lokální změně barvy na horní straně vzorků. Postu-



5: Čas barevné změny a doby, kdy dojde k úplnému prohoření materiálu v závislosti na tloušťce materiálu s uvedenými rozdíly mezi těmito časy

pem času se toto místo zvětšuje a tmavne. V místě největší barevné změny dojde k vytvoření malé prohlubně, následně dojde k prohoření materiálu, což je charakterizováno vznikem trhliny.

Dá se předpokládat, že chemické složení dřeva, jeho hustota, podíl jarního a letního dřeva spolu s vlhkostí ovlivňují rychlost odhořívání dřeva a velikost hmotnostních úbytků. Testované vzorky byly zhotoveny ze stejného dřeva s přibližně stejnou šířkou letokruhů a klimatizovány na stejnou vlhkost; lze konstatovat, že získaná data jsou dostatečně konzistentní k tomu, aby poskytla statisticky významné hodnoty výběrových souborů. Tyto faktory jsme neposuzovali, avšak v závislosti na tloušťce vzorku klesá velikost hmotnostního úbytku jak v průběhu prvních deseti minut (Obr. 2), tak až do doby, než dojde k úplnému prohoření celé tloušťky materiálu. S poklesem hmotnostního úbytku úměrně roste doba prohoření vzorku (Obr. 3). Nejslabší ma-

teriály podlehnou daleko dříve tepelné degradaci než vzorky s větší tloušťkou, což je způsobeno potřebou menšího množství energie k prohřátí materiálu s menší tloušťkou na teplotu potřebou k zapálení dřeva a také k překonání bariéry představující zuhelnatělou vrstvu vzorků s větší tloušťkou.

Porovnáme-li dobu, při které je patrná vizuální barevná změna na ploše vzorku odvrácené od plochy, na kterou působí přímý plamen a dobu, kdy dojde k úplnému prohoření zkušebního vzorku, zjistíme, že čím větší je tloušťka vzorku, tím větší je rozdíl mezi těmito časy. Rozdíl těchto hodnot časů uvádí, že s rostoucí tloušťkou roste doba mezi prvotní barevnou změnou vzdálenější plochy od plamene a úplným prohořením zkušebního vzorku. Dá se předpokládat, že s rostoucí tloušťkou materiálu nad 20 mm se tato doba příliš nemění a dosahuje hodnoty přibližně 1500 s (Obr. 5).

SOUHRN

Veškeré zkoušky, které byly provedeny, potvrdily skutečnost, že s rostoucí tloušťkou dřevěného materiálu (*Picea abies* (L.) Karst.) roste doba, kdy dojde k úplnému prohoření. Nárůst tloušťky dřevěného materiálu exponenciálně zvyšuje čas úplného prohoření dřeva. Konkrétně k prohoření vzorků o tloušťce 5 mm došlo za 413 s, vzorků o tloušťce 10 mm za dobu 1437 s, vzorků o tloušťce 15 mm za 2502 s a vzorků o tloušťce 20 mm za dobu 3921.

S rostoucí tloušťkou materiálu klesá rychlost jeho odhořívání. U materiálu o tloušťce 5 mm je průměrná rychlost odhořívání $0,783 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, u materiálu o tloušťce 10 mm je $0,424 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, u materiálu o tloušťce 15 mm je $0,363 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a u materiálu o tloušťce 20 mm je $0,309 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Zároveň narůstá časový rozsah mezi dobou, kdy se vizuálně zjistí barevná změna povrchu dřeva odvráceného od povrchu, na který působí přímý plamen a dobou, kdy dojde k úplnému prohoření dřeva. U materiálu o tloušťce 5 mm dojde k barevné změně za 180 s k úplnému prohoření pak dojde za dalších 233 s. U materiálu o tloušťce 10 mm se barevná změna projeví po 720 s; úplné prohoření nastane za dalších 717 s. U materiálu o tloušťce 15 mm se barevná změna projeví po 1500 s a materiál prohoří za dalších 1002 s. U materiálu o tloušťce 20 mm dojde k barevné změně po 2700 s, k úplnému prohoření dojde za dalších 1221 s. Tato doba roste pouze do určité hodnoty. Ke zjištění přesné doby je potřeba provést další experimenty s tloušťkami materiálu většími než 20 mm.

Úbytek hmotnosti po 10 minutách působení přímého plamene plynového kahanu na spodní stranu zkušebního vzorku, jak stanovuje norma ČSN 73 0862, je pro dřevěný materiál tloušťky 10 mm 15,54 g, pro materiál o tloušťce 15 mm je úbytek hmotnosti 14,05 g a pro materiál tloušťky 20 mm je úbytek hmotnosti 13,06 g. Materiál o tloušťce 5 mm prohořel za dobu kratší než 10 minut, proto zde není uveden. Tento trend popisuje regresní rovnice mediánů: $y = 17,875 - 2,535 \cdot x + 0,31 \cdot x^2$, kde y = hmotnostní úbytek v gramech, x = tloušťka materiálu [mm].

Můžeme konstatovat, že s rostoucí tloušťkou smrkového dřeva roste odolnost vůči ohni.

Picea abies (L.) Karst., termolitický rozklad dřeva, hmotnostní úbytek, rychlost prohoření

Práce byla podporována ze zdrojů výzkumného záměru MSM 6215648902.

SUMMARY

Performed research has established the fact that the time of thorough fire penetration is rising with rising wood material's thickness (*Picea abies* (L.) Karst.). Increasing of material thickness causes an exponential increase of time of thorough fire penetration. Concretely the time of fire penetration is 413 s for material which is 5 mm thick, 1437 s for material thick 10 mm, 2502 s for material thick 15 mm and 3921 s for material thick 20 mm.

Increasing of material thickness causes drop in rate of wood combustion losses. Material with thickness 5 mm has average rate of combustion losses $0,783 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, for material thick 10 mm the rate is $0,424 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, for material thick 15 mm the rate is $0,363 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ and for material with thickness 20 mm the rate of wood combustion losses is $0,309 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Simultaneously the difference of time between visual colour change of wood surface on the reverse side of wood from side which is exposed to a naked flame and the time of thorough fire penetration. For material with thickness 5 mm the visual colour changes occur after 180 s, thorough fire penetration occurs after next 233 s. For material 10 mm thick the first visual colour changes are observed after 720 s and thorough fire penetration occurs after next 717 s. For material 15 thick the first visual colour changes are observed after 1500 s and thorough fire penetration occurs after next 1002 s. The first visual colour changes after 2700 s and thorough fire penetration after next 717 s are observed on material 20 mm thick.

The loss weight after 10 minutes of naked flame action to the bottom surface of sample, as provided in ČSN 73 0862, is 15,54 g for material with thickness 10 mm. For material thick 15 mm is the loss 14,05 g and for material thick 20 mm is 13,06 g. The time of thorough fire penetration on the wood thick 5 mm is shorter then 10 minutes, that is why this thickness of material is not state here. This trend is described by regression equation of medians: $y = 17,875 - 2,535 \cdot x + 0,31 \cdot x^2$; where y = loss weight in grams, x = thickness of material [mm].

We are able to tell the fire resistance is rising with rising thickness of spruce wood.

LITERATURA

- DEJMAL, A., 1995: Základy hydrotermické úpravy a ochrany dřeva. Brno: MZLU Brno, 160–165, ISBN 80-7157-163-3
HORÁČEK, P., 2001: Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Brno: MZLU Brno, 128 s. ISBN 80-7157-347-7

- REINPRECHT, L., 2001: Procesy degradácie dreva. Zvolen: TU Zvolen, 162 s, ISBN 80-228-1070-3
ŽÁK, J., REINPRECH, L., 1998: Ochrana dřeva ve stavbě, Praha: ABF-ARCH, ČSN 73 0862 Stanovení stupně hořlavosti stavebních hmot.

Adresa

Ing. Jiří Holan, Ph.D., Ing. Lukáš Merenda, Ústav nauky o dřevě, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

