

Česká zemědělská univerzita v Praze

**Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva v závislosti
na teplotně-vlhkostním zatížení**

2020

Matěj Bečvář

Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva v závislosti
na teplotně-vlhkostním zatížení**

Bakalářská práce

Studijní program:

Podnikání ve dřevozpracujícím a
nábytkářském průmyslu

Pracoviště (katedra/ústav):

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Praha 2020

Matěj Bečvář

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Matěj Bečvář

Dřevařství

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva v závislosti na teplotně-vlhkostním zatížení

Název anglicky

Physical and mechanical properties of wood depending on temperature-humidity effect

Cíle práce

Hlavním cílem práce je popis vlivu střídání nízkých a vysokých teplot na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva v závislosti na jeho vlhkosti.

Metodika

1. Teoretická analýza vlastností dřeva v závislosti na změně teploty a vlhkosti.
2. Porovnání fyzikálních vlastností dřeva ovlivněných působením nízkých teplot s vlastnostmi dřeva po působení vysokých teplot.
3. Porovnání mechanických a technologických vlastností dřeva ovlivněných působením nízkých teplot s vlastnostmi dřeva po působení vysokých teplot.
4. Ochrana dřeva vůči vlivu působení teplot a vlhkosti u dřevěných konstrukcí.

Doporučený rozsah práce

40-50 stran textu

Klíčová slova

nízké teploty, vysoké teploty, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti

Doporučené zdroje informací

DINWOODIE, J. M. Timber: Its nature and behavior, 2nd ed., EFN Spon: London, New York, 2000, 257 s. ISBN: 0-419-23580-9

HORÁČEK, P. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I., Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998, 126 s.

KOLLMANN, F. F. P., COTE, W. A. Jr. Principles of Wood Science and Technology: I. Solid Wood. Springer Science & Business Media, 2012, 592 s. ISBN: 978-3-64287-928-9

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání, Bratislava: Príroda a. s., 1997, 485 s. ISBN: 80-07-00960-4

SKAAR, Ch. Wood-Water Relations, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988, 283 s. ISBN: 978-3-642-73685-8

SMITH, I., LANDIS, E., GONG, M. Fracture and Fatigue in Wood. John Wiley & Sons Ltd., 2003, 234 s. ISBN: 978-0-471-48708-1

Předběžný termín obhajoby

2019/20 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 27. 4. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 22. 2. 2020

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 27. 05. 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva v závislosti na teplotně-vlhkostním zatížení“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské 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 10.6.2020

.....
Matěj Bečvář

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Miroslavovi Gašparíkovi, PhD. za odborné a užitečné rady při tvorbě bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni a podporovali mě, zejména svému strýci doc. Ing. Zdeňkovi Volkovi, PhD.

Abstrakt ve státním jazyce

Práce se zabývá vlivem teplotně-vlhkostního zatížení na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Cílem práce je ukázat, jak teplota společně s ostatními faktory ovlivňuje vlastnosti dřeva. Se změnami teplot i vlhkosti se setkáváme v reálném životě velmi často. Při vlivu teplot byl zjištěn významný pokles mechanických vlastností. Dále byly změněny fyzikální vlastnosti a barva. Z literatury je zřejmé, že změny teplot a vlhkosti mají na vlastnosti dřeva významný vliv. Změna barev u dřeva je důležitá zejména při využití dřeva jako estetického prvku, a naopak pevnost a modul pružnosti je důležité zkoumat u dřeva, které je využíváno jako konstrukční materiál.

Klíčová slova

nízké teploty, vysoké teploty, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti

Abstrakt v cizím jazyce

The bachelor's thesis deals with the impact of heat and moisture on physical and mechanical properties of wood. The main aim is to show how temperature, together with other factors, is influencing its features. We can see the changes of temperature and moistures in a real life very often. Under the influence of temperatures, a significant decrease in mechanical properties was found. Furthermore, the physical properties and color were changed. The literature shows that the changes of temperature and moisture have significant impact on the features of wood. The colour changes of wood are important when we use it as an aesthetic element. On the other hand, if we use it as a constructional material, it is very important to explore the toughness and the module of flexibility.

Key words

Low temperatures, high temperatures, mechanical features, physical features

Obsah

1. Úvod	11
2. Cíle práce	12
3. Teoretický rozbor problematiky	13
3.1 Stavba dřeva a jeho chemické složení	13
3.2 Vlastnosti dřeva.....	14
3.2.1 Fyzikální vlastnosti dřeva.....	14
3.2.1.1 Vlhkost.....	15
3.2.1.2 Hustota.....	18
3.2.1.3 Tepelné vlastnosti dřeva	20
3.2.2 Mechanické vlastnosti dřeva.....	21
3.2.2.1 Tah.....	23
3.2.2.2 Tlak.....	27
3.2.2.3 Smyk.....	30
3.2.2.4 Ohyb	31
3.2.2.5 Houževnatost dřeva	32
3.2.2.6 Tvrdost dřeva	34
3.3 Vliv vysokých teplot.....	36
3.3.1 Fyzikální vlastnosti	37
3.3.1.1 Vlhkost.....	37
3.3.1.2 Změny v chemické struktuře.....	38
3.3.1.3 Ostatní vlastnosti	38
3.3.2 Mechanické vlastnosti	40
3.3.2.1 Tlak.....	40
3.3.2.2 Tah.....	41
3.3.2.3 Ohyb	41
3.4 Vliv nízkých teplot.....	43
3.4.1 Fyzikální vlastnosti	44
3.4.1.1 Vlhkost.....	44

3.4.1.2	Buněčná struktura.....	44
3.4.1.3	Ostatní vlastnosti	45
3.4.2	Mechanické vlastnosti	46
3.4.2.1	Tlak.....	46
3.4.2.2	Tah.....	47
3.4.2.3	Ohyb	48
3.5	Ochrana dřeva vůči působení teplot a vlhkosti	50
4.	Závěr	56
5.	Literatura	57

Seznam obrázků

Obr. 1 Zastoupení hlavních složek dřeva u jehličnanů a listnáčů.....	13
Obr. 2 Nomogram na přepočet absolutní a relativní vlhkosti dřeva	15
Obr. 3 Uložení vázané a volné vody ve dřevě	17
Obr. 4 Diagram anizotropie modulu pružnosti E	22
Obr. 5 Pracovní diagram.....	26
Obr. 6 Charakter porušení dřeva v ohybu.....	31
Obr. 7 Změna světlosti v závislosti na teplotě	39
Obr. 8 Změna světlosti v závislosti na čase	39
Obr. 9 Pevnost v tahu v závislosti na teplotě.....	41
Obr. 10 Pokles modulu pružnosti v závislosti na teplotě	42
Obr. 11 Účinky na mez pevnosti (teplota, rychlost zahřívání, vlhkost)	43
Obr. 12 Obsah vlhkosti sledovaných vzorků	44
Obr. 13 Mikroskopická trhlina vzniklá na příčném řezu po nepřetržitém zmrazování při teplotě - 35 °C po dobu 24 hodin.....	45
Obr. 14 Změny mechanických vlastností za nízkých teplot	47
Obr. 15 Mikroskopické porovnání zmražených vzorků sušeného v sušárně (vlevo) a nasyceného vodou.....	49
Obr. 16 Vliv nízké teploty na modul pružnosti.....	49
Obr. 17 Vliv nízké teploty na mez pevnosti	50
Obr. 18 Typy skládky (a. přeložená kulatina, b. křížové uspořádání v řadách)	52
Obr. 19 Proces ThermoWood	55

Seznam tabulek

Tab. 1 Hustota dřevní substance některých našich dřevin.....	19
Tab. 2 Pevnost dřeva v tahu kolmo na vlákna u vybraných dřev	25
Tab. 3 Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken pro dřevo některých dřevin	28
Tab. 4 Hodnoty statické tvrdosti vybraných dřevin	35
Tab. 5 Pevnost v tlaku v závislosti na teplotě.....	40
Tab. 6 Hodnoty pevnosti v tlaku ve směru vláken.....	46
Tab. 7 Zvyšování trvanlivosti dřeva.....	51

1. Úvod

Jedním z nejdůležitějších materiálů na světě je pro člověka dřevo. Už od dávných dob se dřevo využívá na mnoho různých funkcí, a to například jako prvek na výrobu nástrojů, zbraní, obydlí a také hlavně jako zdroj tepla (palivo). Jednoduchá opracovatelnost a vysoce dostupný materiál přispěl také k oboru umění, kde je dřevo hojně využíváno.

Jelikož je význam dřeva pro člověka velký, měl by s ním tedy zacházet tak, aby přepis těžby za určité období tzv. etát nepřekročil přírůstek. Nejčastějšími dřevinami v českých lesích jsou smrk, borovice, buk, dub, modřín a bříza.

Dřevo je a bylo jedním z nejvyhledávanějších materiálů pro každodenní život. Je využíváno v oborech stavebnictví, nábytkářství, hornictví a také v hudbě. Díky mnoha vědeckým poznáním o chemických, fyzikálních a mechanických vlastnostech dřeva se zdokonalila technika a technologie jeho zpracování a také rozšířila možnost jeho využití.

Vliv teploty a vlhkosti má u dřeva velký význam, který se následně projevuje na jeho mechanických a fyzikálních vlastnostech. Odolnost dřeva vůči dřevokaznému hmyzu a houbám také není moc velká. Tepelná modifikace dřeva, anebo úprava chemickými látkami tyto nedostatky minimalizuje.

Bakalářská práce se zabývá mechanickými a fyzikálními vlastnostmi dřeva v závislosti na teplotně-vlhkostním zatížení. Tedy porovnáním působení nízkých a vysokých teplot a následných změn vlastností dřeva.

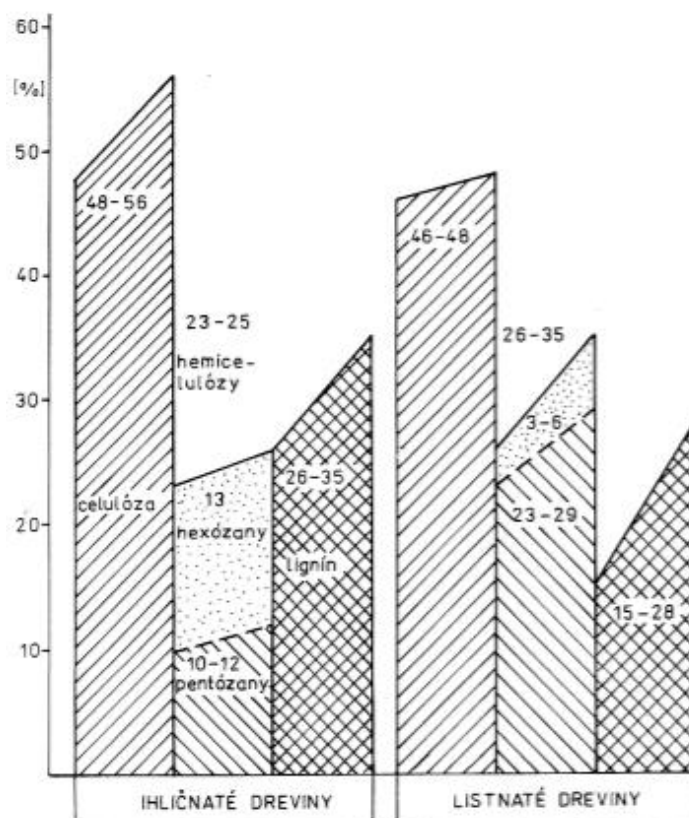
2. Cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je popis vlivu střídání nízkých a vysokých teplot na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva v závislosti na jeho vlhkosti. Dalším cílem je rozebrat ochranu dřeva vůči vystavení teplotně-vlhkostnímu zatížení. K určování změn ve vlastnostech dřeva budou použity odborné vědecké články a literatura.

3. Teoretický rozbor problematiky

3.1 Stavba dřeva a jeho chemické složení

Dřevo je složitý soubor chemických látek. Hlavní složky dřeva jsou polysacharidická složka (celulóza, hemicelulóza) a polyfenolická složka (lignin). Za doprovodné složky dřeva považujeme anorganické a organické látky. Na obrázku 1 je znázorněno zastoupení hlavních složek u jehličnatých a listnatých dřevin.



Obr. 1 Zastoupení hlavních složek dřeva u jehličnanů a listnáčů (Požgaj et al., 1993)

Celulóza

Celulóza je nejrozšířenější organická látka na zemi a tvoří kostru buněčných stěn rostlinných organismů. V průměru tvoří celulóza 43 až 52 % hmotnosti jehličnatého a listnatého dřeva (u jehličnanů větší zastoupení). Řetězce celulózy navzájem po straně drží sekundární vodíkové vazby. Pokud se mezi tyto řetězce dostane molekula vody, začnou se od sebe oddalovat, čímž nastává děj zvaný bobtnání. Celulóza není ve vodě rozpustná, ale lze ji rozpustit silnými kyselinami, jako například kyselina sírová nebo

fosforečná. Z celulózy se vyrábí papír, kartony, lepenky, hydrolýzou glukosa, hydrogenací vitamín C.

Hemicelulóza

Při porovnání s celulózou jsou to polysacharidy s menší relativní molekulovou hmotností a kratšími řetězci. Hemicelulóza ovlivňuje chemické a fyzikální vlastnosti dřeva. Toto se nejvíce projevuje při technologických procesech sušení, vaření, páření a lisování dřeva. Dřevo obsahuje 20 až 35 % hemicelulóz a větší zastoupení je u listnatého dřeva.

Lignin

Lignin představuje 20 až 30 % hmotnosti dřeva a zabezpečuje dřevnatění buněčných stěn. Jehličnaté dřevo má vyšší obsah ligninu než listnaté. Je uložen v celé tloušťce buněčných stěn. Lignin je termoplastický a má velkou absorpci světla. Má v buněčných stěnách hydrofobní funkci. Řada experimentů potvrdila, že po odstranění ligninu ze struktury dřeva významně klesne pevnost mokrého dřeva (Požgaj et al., 1993).

3.2 Vlastnosti dřeva

Dřevo je zejména technologickým předmětem, tudíž lepší znalosti umožňují vhodnější využití a opracování dřeva. Znalosti vlastností dřeva přispívají k správnému předpokladu pro zpracování a obrábění dřeva. Znalosti vlastností jsou také důležité pro použití na dřevěné prvky staveb, dřevostaveb anebo při výrobě nábytku. Vlastnosti dřeva jsou rozděleny na fyzikální vlastnosti (například: hustota, vlhkost, dielektrické vlastnosti) a mechanické vlastnosti (například: pružnost, pevnost, reologické vlastnosti).

3.2.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

Fyzikální vlastnosti jsou vlastnosti, které můžeme zkoumat bez narušení chemického složení a také celistvosti materiálů. Dřevo má v různých směrech velice odlišné vlastnosti = je anizotropní materiál.

3.2.1.1 Vlhkost

Vlhkostí se nazývá obsah vody ve dřevě. Je vyjadřována podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu (vyjadřuje se absolutní vlhkost – w_{abs}) nebo podílem hmotnosti vody ke hmotnosti mokrého dřeva (vyjadřuje se relativní vlhkost – w_{rel}). Obě vlhkosti se nejčastěji vyjadřují v %.

Vyjádření absolutní a relativní vlhkosti podle Horáčka (1998):

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 \quad (1)$$

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100 \quad (2)$$

m_0 - hmotnost absolutně suchého dřeva (kg, g)

m_v - hmotnost vody (kg, g)

m_w - hmotnost vlhkého dřeva (kg, g)

Přepočet podle Horáčka (1998) relativní vlhkosti dřeva na vlhkost dřeva absolutní (obr.2) je možný těmito rovnicemi:

$$w_{abs} = \frac{100 \cdot w_{rel}}{100 - w_{rel}} \quad (3)$$

$$w_{rel} = \frac{100 \cdot w_{abs}}{100 + w_{abs}} \quad (4)$$



Obr. 2 Nomogram na přepočet absolutní a relativní vlhkosti dřeva (Požgaj et al., 1993)

Pro charakteristiku mechanických a fyzikálních vlastností se využívá vlhkost absolutní, a naopak relativní vlhkost využíváme například při prodeji nebo nákupu dřeva podle jeho hmotnosti, protože je třeba znát zastoupení vody v celkové hmotnosti mokrého dřeva.

Na základě podílu vody ve dřevě ve vztahu k sušině dřeva určíme hodnoty:

a) Vlhkost suchého dřeva

- vyjadřuje se vlhkostí absolutně suchého dřeva ($w_0 = 0$ %).

- znamená to, že ve dřevě není žádná vázaná ani volná voda.

b) Vlhkost při nasycení buněčných stěn

- vyjadřuje se mezi nasycení buněčných stěn anebo také mezi hygroskopicity ($MNBS \approx MH = 22 \dots 35 \%$).

- mikrokapilární systém v buněčné stěně je zcela zaplněn vodou.

c) Vlhkost při nasycení dřeva

- ve dřevě je maximální obsazení vody. Mikrokapilární i makrokapilární systém jsou maximálně nasyceny vodou.

- vyjadřuje se maximální vlhkostí dřeva ($w_{\max} = 80 \dots 400 \%$) (Horáček, 1998).

Rozdělení vody ve dřevě

Podle uložení vody (obr. 3) ve dřevě se dělí voda na:

1) Chemicky vázanou

Voda chemicky vázaná se ze dřeva neodstraní sušením, jen spálením. Zjišťuje se při chemických analýzách a celkové její množství je mezi jedním až dvěma procenty sušiny dřeva. Při charakteristice mechanických a fyzikálních vlastností nemá vůbec žádný vliv.

2) Voda vázaná (hygroskopická)

Tato voda je pro charakteristiku mechanických a fyzikálních vlastností dřeva nejzásadnější a nejdůležitější. Vyskytuje se ve dřevě při vlhkostech 0 – 30 % a nachází se v buněčných stěnách. Voda vázaná je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny OH amorfní části celulózy a hemicelulózy.

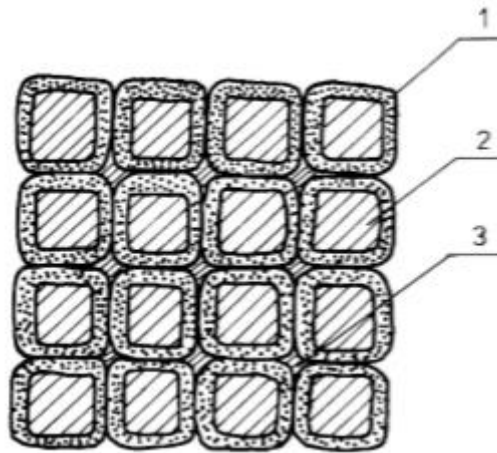
3) Voda volná (kapilární)

Ve dřevě se vyskytuje v lumenech buněk a v mezibuněčných prostorech. Voda volná má mnohem menší význam než voda vázaná. Vyskytuje se pouze za předpokladu obsahu vody vázané (pokud je vlhkost dřeva od 30 % až do maximální vlhkosti okolo 150 – 200 %).

Podle obsahu vody ve dřevě (vlhkosti) se dřevo dělí do těchto skupin:

- a) dřevo mokré, po delší dobu uložené ve vodě (kdy je vlhkost větší než 100 %)
- b) dřevo právě skáceného stromu (vlhkost je 50 – 100 %)
- c) dřevo vysoušené na vzduchu (vlhkost 15 – 22 %)
- d) dřevo vysoušené na pokojovou teplotu (vlhkost 8 – 15 %)

e) Dřevo vysoušené do absolutně suchého stavu (vlhkost je 0 %, vysoušené při teplotě 103 ± 2 °C) (Gandelová et al., 2009).



Obr. 3 Uložení vázané a volné vody ve dřevě (Požgaj et al, 1993)
(1. voda vázaná v buněčné stěně, 2. voda volná v lumenu, 3. voda volná v mezibuněčném prostoru)

Nasákivost dřeva

Nasákivostí dřeva se rozumí schopnost dřeva díky své pórovité stavbě přijmout vodu v kapalně formě. Používá se při zkoumání maximální vlhkosti dřeva. Pokud se dřevo úplně nasatí vodou vázanou a obsahuje maximální množství volné vody, je maximálně nasáklé vodou (maximální vlhkost). Objem pórů ve dřevě ovlivňuje množství vody v něm obsažené (Horáček, 1998).

Pohyb vody ve dřevě

Sušení dřeva je názorný příklad, u kterého se využívá znalostí o rozloze a rychlosti pohybu vody ve dřevě. Pomalé sušení dřeva je sice kvalitnější, ale zase naopak energeticky náročnější. Při rychlém sušení se šetří energie, ale snižuje kvalita sušeného dřeva. Abychom se správně rozhodli, je třeba znalosti pohybu vody ve dřevě, protože je funkcí prostorových souřadnic a také času. Vlhké dřevo se považuje za prostředí spojitě, ale rozděluje se na dva pohyby. Prvním pohybem je pohyb vody vázané (difuze) a druhý pohyb je pohyb vody volné (kapilární elevace a propustnost) (Gandelová et al., 2009).

Difúze

Všeobecně difúze znamená: Pronikání částic jedné látky do částic druhé látky. U dřeva se difúzí rozumí pohyb vody vázané. Pokud obsahuje dřevo nerovnoměrně rozloženou vlhkost, vyvolá se pohyb vody (difúze). Tento pohyb vede k vyrovnání

rozdílů vlhkosti. Fickův zákon říká, že hustota toku vody (hmotnost, která proteče jednotkovou plochou za jednotku času) je přímo úměrná gradientu koncentrace. Jako uvádí Požgaj et al. (1993):

$$\bar{i} = -D \cdot \text{grad } c \quad (5)$$

Kde D [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] je koeficient difúze a c [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] koncentrace vody ve dřevě.

Pohyb vody volné

Vodou volnou se rozumí voda v kapilární struktuře, tedy v pórech, které mají větší rozměr jak 10^{-7} m. Tato voda se může pohybovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je vztlínání po stěnách kapilár dřeva (kapilární elevace) a druhým hydrodynamický pohyb vody, který je vyvolán gradientem vnějšího tlaku (propustnost).

Propustnost

Jedná se o fyzikální vlastnost, kdy se pohybuje kapalina ve dřevě (voda volná) v důsledku gradientu vnějšího tlaku. Pórovitost se může využívat jako měřítko propustnosti, určující snadné nebo obtížné procházení toku látkou (dřevem) za přítomnosti gradientu tlaku. Nedílnou podmínkou je také spojení volných prostorů do kapilárního systému. Jedná se o propojení lumenů buněk perforovanými přehrádkami cév, ztenčeninami buněčných stěn nebo křížovými poli dřevňových paprsků. V porovnání propustnosti dřeva mezi listnáči a jehličnany je propustnost větší u listnáčů.

3.2.1.2 Hustota

Jelikož je dřevo hygroskopický materiál, je hustota obtížněji určitelná než u jiných materiálů. Vyjadřuje se jako podíl hmotnosti dřeva a jeho objemu. Obě tyto veličiny jsou ovlivňovány vlhkostí dřeva. Jednotkou hustoty je $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, anebo $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. I přes obtížnější určování hustoty dřeva je tato charakteristika jednou z nejvýznamnějších. Hustota dřeva ovlivňuje mnoho fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Dřevo je pórovitý materiál, a tak objem pórů (lumeny, mezibuněčné prostory) často převyšuje objem buněčných stěn. Kvůli tomuto poměru se používá často hustota dřevní substance, kterou se rozumí hustota buněčných stěn bez pórů. Hustota dřevní substance se mění zřídka, je téměř stálá. Mění se pouze tak, jak se mění chemické složení. Pohybuje se v rozmezí od 1490 do 1560 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a průměrná hodnota je 1540 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Výpočet dřevní substance se

používá k výpočtům pórovitosti, maximální nasáklivosti při použití impregnací a jiných. V tabulce 1 je zaznamenána hustota dřevní substance u vybraných dřevin (borovice, smrk, dub, bříza, osika) (Požgaj et al., 1993).

Tab. 1 Hustota dřevní substance některých našich dřevin (Požgaj et al., 1993)

Dřevina	Hustota dřevní substance [kg. m ⁻³]
Borovice – jádro	1535
Borovice – běl	1550
Smrk	1540
Dub – jádro	1560
Dub – běl	1550
Bříza	1560
Osika	1560

Podle Horáčka (1998) se využívají při charakterizování hustoty dřeva tyto vlhkostní stavy:

- 1) hustota dřeva v absolutně suchém stavu ($w = 0 \%$),
- 2) hustota dřeva s vlhkostí 12 %,
- 3) hustota vlhkého dřeva ($w > 0 \%$) .

Při vlhkosti dřeva $w = 0 \%$, tedy hustota v absolutně suchém stavu, se používá pro porovnávání výsledků a použití při teoretických výpočtech. Tato hustota je větší než hustota dřevní substance, protože obsahuje i lumeny a mezibuněčné prostory vyplněné vzduchem.

Hustota dřeva při vlhkosti $w = 12 \%$ je udávána normami, a to z důvodu, že vlhkost 12 % vzniká při delším vystavování dřeva podmínkám v běžném interiéru ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $w_{\text{rel}} = 65 \%$).

Podílem hmotnosti a objemu dřeva při určité vlhkosti ($w > 0$) se počítá hustota vlhkého dřeva.

Redukovaná hustota dřeva

Redukovaná hustota je definována podílem hmotnosti dřeva absolutně suchého a objemu při určité vlhkosti. Určuje, jaké množství sušiny obsahuje nabobtnalý objem dřeva. Čím je vyšší vlhkost, tím se hodnota redukované hustoty snižuje, ale pouze do

meze hygroskopie (Gandelová et al., 2009). Protože při těžbě, pěstování a odběratelsko-dodavatelských vztazích se uvažuje s objemem dřeva v čerstvém stavu, roste význam redukované hustoty dřeva ve stavu čerstvém. Díky této hustotě se zjišťuje, kolik sušiny se nachází v maximálně nabobtnalém objemu dřeva a podle Požgaj et al. (1993) se udává vzorcem:

$$\rho_{rw} = \frac{m_0}{V_{max}} \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad (6)$$

m_0 – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu

V_{max} – maximálně nabobtnaný objem dřeva

3.2.1.3 Tepelné vlastnosti dřeva

Tato vlastnost dřeva je důležitá hlavně při řešení praktických problémů, které jsou spojeny se sušením dřeva. Prakticky jsou to nejvíce problémy typu: Kolik je třeba dodat tepla a jaká je teplota v daném bodě. Nepříliš často se setkáváme ještě s problémem, jak se změny rozměry tělesa při změně jeho teploty.

Tepelná roztažnost dřeva

Při zvyšování teploty tělesa dochází k zvyšování energie jeho molekul, a tedy i jejich rychlosti. Díky této skutečnosti dochází v konečném důsledku ke zvětšení rozměrů tělesa. Je popisována koeficientem tepelné roztažnosti značeným α . Tento koeficient je definovaný jako blízký bobtnání nebo sesychání (podílem změny rozměru a rozměru počátečního při lineární závislosti na teplotě (Horáček, 1998).

Měrné teplo

Všechny látky jsou schopné akumulovat teplo, ani dřevo tedy není výjimkou. Tato vlastnost má veličinu měrné teplo. Měrné teplo určuje četnost tepla potřebného na ohřátí jednotkové hmotnosti dřeva o 1 K.

Přenos tepla ve dřevě

Tato vlastnost může ve dřevě probíhat třemi možnými způsoby – Vedením tepla, prouděním tepla a sáláním. Vedení a sálání se na kompletním přenosu obvykle podílejí zřídka, a tak se celkovému procesu říká vedení tepla. Významu nabývá hlavně při určování režimů sušení a posuzování tepelně-izolačních vlastností dřeva (Gandelová et al., 2009).

Vedení tepla

Přenos tepla vedením je nejčastějším přenosem u látek pevných. Při vedení tepla částice látky v zóně s vyšší teplotou předávají kus své střední energie pomocí srážení částic v místech, kde je teplota nižší (mají nižší střední energii). Částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh a nepřemísťují se.

Sálání tepla

Zakládá se na vysílání záření k látce, která záření přijímá a tím zvyšuje svou vnitřní energii, a tedy dochází ke zvýšení teploty.

Proudění tepla

Proudění tepla je možné pouze pomocí kapalin anebo plynů. Jde o přenášení tepla hmotným prostředím, jehož objemové elementy vykonávají translační pohyb (Jurečka, 2011).

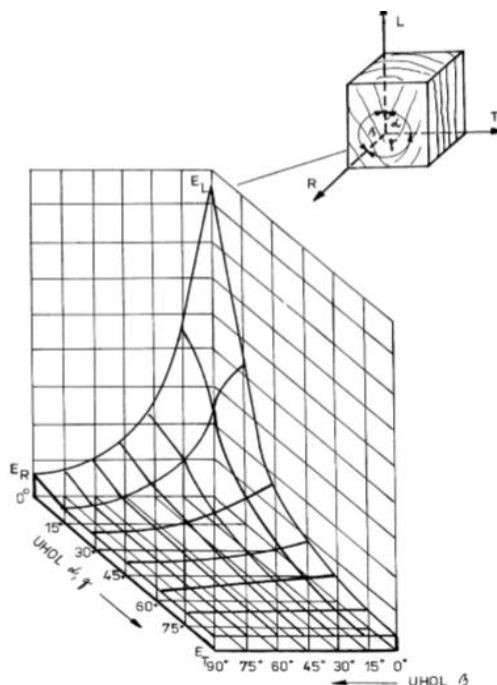
Tepelná vodivost

Ve fyzice označuje tepelná vodivost schopnost daného kusu látky vést teplo. Uvádí, jak rychle se teplo šíří z jedné (zahřáté) části látky do částí jiných a chladnějších. Dřevo je špatný vodič tepla. Konkrétně záleží, o jakou jde dřevinu a tepelná vodivost roste s navyšující se hustotou, vlhkostí a teplotou dřeva. (Lysý, 1954)

3.2.2 Mechanické vlastnosti dřeva

Dřevo má v praxi díky svým nenahraditelným vlastnostem obrovský význam. Mechanické vlastnosti tomuto významu vřele přispívají. Mezi základní mechanické vlastnosti dřeva patří pružnost a pevnost. I přes relativně nízkou hmotnost má dřevo dobrou pevnost a tato vlastnost je základem pro kvalitní konstrukční materiál. Při technologickém zpracování dřeva mají mechanické vlastnosti také svou roli, a to například při: řezání, lisování, ohýbání a jiných. Aby se mohlo dřevo správně opracovat, je nutné i z toho hlediska znát chování dřeva. Mechanické vlastnosti se rozdělují do dvou skupin: Základní (pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost) a odvozené (tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu). Rozdílnost mechanických vlastností u dřeva záleží na směru. Tomu se říká anizotropie mechanických vlastností. Aby bylo možné definovat mechanické vlastnosti dřeva, stačí

zavést tři roviny pružné symetrie, a to: Příčnou (RT), radiální (LR) a tangenciální (LT). Pružnostní a pevnostní vlastnosti jsou odlišné především podélně a kolmo na vlákna dřeva. Mimo to se liší v radiálním a tangenciálním směru. Ve směru podélném jsou více namáhané kovalentní vazby a ve směru kolmém vodíkové (Požgaj et al., 1993).



Obr. 4 Diagram anizotropie modulu pružnosti E (Aškenazi-Ganov, 1972)

Mechanické namáhání

Mechanické namáhání je proces, kdy dochází k vzájemnému působení mezi mechanickými silami (nebo jinými činiteli namáhání) a dřevem, v jehož důsledku dochází k dočasným anebo trvalým změnám tvaru dřeva. Namáhání dřeva (podle fyzikální podstaty sil) je možné rozdělit na mechanické, vlhkostní, tepelné, chemické a jejich kombinace. Při využití dřeva u různých nosných konstrukcích působí hlavně mechanicko-vlhkostní zatížení. Při takovém způsobu zatížení má svou roli také faktor času. Při mechanickém namáhání dřevo reaguje na podstatě vazeb mezi chemickými složkami, anatomické stavby a také geometrie tělesa. Mezi základní druhy mechanického namáhání patří: tah a tlak, smyk, ohyb a kroucení (Požgaj et al., 1993).

Napětí a deformace

Napětí se charakterizuje jako velikost vnitřních sil. Tyto síly jsou výsledkem působení vnějších mechanických sil. Ve dřevě, jelikož je hygroskopický materiál, vzniká

vlhkostní napětí, a to díky pronikání vody do jeho buněk (hlavně buněčných stěn). Pokud jsou síly F na plochu S stejnoměrně rozloženy, vyjadřuje se napětí podle Gandelová et al. (2009) podílem:

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (7)$$

Pokud působí síly mechanické síly na dřevo a svým působením změní jeho tvar nebo rozměry, nazývá se tento děj deformací. U dřeva je vyvolávána i vlhkostním napětím. Po jakostní stránce se dělí do tří možných deformací: pružná deformace, deformace pružná v čase a plastická deformace. Deformace způsobená mechanickými silami je součtem těchto tří deformací. Pokud se hovoří o pružné deformaci, jedná se o změnu dřeva, která se po působení sil vrátí do původního stavu. Pružná deformace v čase je také návratná po odstranění působících sil, ale až po nějakém čase (není okamžitá). Při deformaci trvalé se mění tvar a rozměry tělesa nenávratně. Jako pružnou deformaci můžeme hodnotit například bobtnání dřeva (Gandelová et al., 2009).

Vztah mezi napětím a deformací

Díky vztahu mezi napětím a deformací vzniká objektivní předpoklad pro výběr konstrukčních materiálů (dřevo a dřevěné kompozity) na různé typy nosných konstrukcí. Z tohoto vztahu se berou v potaz také informace vhodné pro technologické zpracování dřeva, jako například lisování překližek. V 17. století zjistil Hook, že do určité hranice působení zatížení je deformace úměrná působící síle. Podle tohoto zjištění byl určen vztah, který uvádí Požgaj et al. (1993):

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\sigma} \quad (8)$$

α – změna délky jednotky tyče na jednotku napětí

ε – poměrná pružná deformace

σ – napětí

3.2.2.1 Tah

Pokud na těleso působí dvě stejně velké síly opačné orientace na stejné nositelce (ta je k rovině řezu kolmá) a míří směrem od tělesa, jde o namáhání tahové. U tohoto namáhání je také možné jeden konec tělesa upnout a na konec druhý umístit zatížení. Pak

je reakce rovna zátěžné síle. Jelikož je dřevo anizotropní materiál, dělí se pevnost v tahu na: a) pevnost v tahu ve směru vláken (σ_{\parallel}) b) pevnost v tahu kolmo na vlákna – tuto pevnost ještě dělíme podle směru (směr radiální – $\sigma_{\perp R}$ a směr tangenciální – $\sigma_{\perp T}$).

Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken

Spojením pevnost dřeva se všeobecně rozumí odolnost dřeva proti trvalému poškození. Ve směru vláken při porovnání s ostatními pevnostmi je pevnost v tahu největší. Pro tuto pevnost je u našich dřevin udávána průměrná hodnota 120 MPa. Při namáhání v tahu dochází k přetržení buněk dřeva v pracovní části tělesa. Dřevo má velkou pevnost ve směru vláken díky vláknitému tvaru buněk a struktuře buněčných stěn. Letní tracheidy a libriformní vlákna zajišťují mechanickou funkci, jejich buněčná stěna je zdřevnatělá a je tvořena více než padesáti procenty makromolekulami celulózy. Orientace buněčné stěny je takřka rovnoběžná s podélnou osou buněk. Jelikož jsou kovalentní vazby orientované ve směru podélném, mohla by teoreticky pevnost v tahu nabýt hodnoty až do 8000 MPa. V molekulách celulózy se ale vytváří také amorfni části, a tak je tahová pevnost redukována o její podíl.

Dřevo, které má větší pevnost, má roztrženou část vláknitou, nebo třískovitou. Roztržená část u dřeva s nižší pevností je schodovitá až takřka hladká. Pokud je dřevo zatíženo v tahu ve směru vláken, má podobné chování jako křehký materiál s malou deformací a bez předešlých očividných plastických deformací. Mez úměrnosti při tomto zatížení činí u jehličnatých dřevin až 80 % a u dřevin listnatých 70 %. Dřevo má v tomto směru vysokou pevnost v tahu, ale i tak jí není možné využít v plné míře, protože se často poruší smykem nebo otláčením v místech upevnění konstrukčních dílů (Gandelová et al., 2009).

Pevnost dřeva ve směru vláken není lehké určit z důvodu nesnadného vytvoření zařízení, do kterého by bylo dřevo upevněno (Lysý, 1954).

Pevnost dřeva v tahu kolmo na vlákna

Na pevnosti ve směru kolmo na vlákna se ve velkém rozsahu podílejí vodíkové vazby, popřípadě vazby Van der Waalsovy, které jsou slabší než vazby kovalentní. Tato skutečnost je jednou ze zásadních příčin, proč je rozdíl mezi pevností ve směru vláken a kolmo na vlákna až patnáctinásobný. Pevnost v tahu kolmo na vlákna je také zmenšena nehomogeností ročního přírůstku dřeva, tzn. výskytem jarního a letního dřeva. Obsah dřevných paprsků ve dřevě ovlivňuje pevnost dřeva v tahu tak, že s větším množstvím

paprsků roste pevnost dřeva v tahu kolmo na vlákna v radiálním směru. Průměrná pevnost v tahu kolmo na vlákna se pohybuje v rozmezí od 1,5 do 5 MPa (Tab. 2). Oproti tlakové nebo tahové pevnosti ve směru vláken je mnohem menší, a proto je při použití dřeva na nosné konstrukce dobré se tomuto namáhání vyhnout.

Avšak tato pevnost se nesmí zanedbávat například u sušení dřeva. U tvrdého režimu sušení dřeva vznikají nežádoucí vlhkostní spády a ty způsobují tahové napětí kolmo na vlákna. Pokud je toto napětí větší než pevnost v tahu kolmo na vlákna, struktura dřeva se poruší (Požgaj et al., 1993).

Tab. 2 Pevnost dřeva v tahu kolmo na vlákna u vybraných dřev (Požgaj et al, 1993)

Druh dřeva	Mez pevnosti v tahu kolmo na vlákna podle směru (MPa)	
	Radiální směr w = 12 %	Tangenciální při vlhkosti 12 %
Smrk	2,2	1,7
Dub	5,8	-
Buk	4,4	3,4
Habr	4,6	3,8

Modul pružnosti

Zobrazuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Pokud je velký modul pružnosti, pak je potřebné napětí na způsobení deformací také velké. Moduly pružnosti se dělí na: Youngovy moduly pružnosti (normálové namáhání čili v tahu, tlaku a ohybu) – značené E_i a smykové moduly (při tangenciálních namáháních – smyk, krut), které jsou značené G_{ij} . U statických výpočtů dřevěných konstrukcí mají tyto hodnoty velký význam. Čím je ve dřevě větší vlhkost, tím je modul pružnosti menší. Modul pružnosti tedy klesá s nárůstem vlhkosti, a to až do meze hygroscopicity (Gandelová et al., 2009).

Pracovní diagram

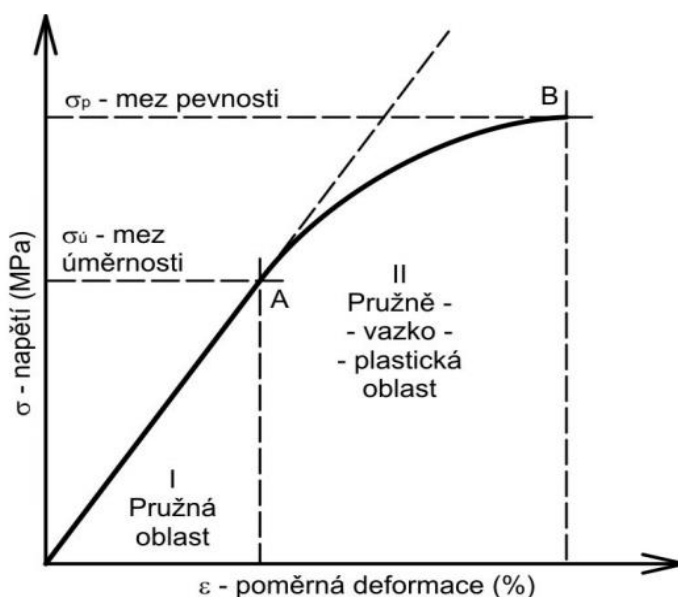
Většina materiálů nemá do dnes teoreticky odvozené rovnice, a proto jsou moduly pružnosti určovány pouze na základě experimentů. Tyto parametry se určují na

zkušebních strojích. Na těchto strojích se měří současně jak deformace, tak síla, která na materiál působí. Křivka, která určuje vztah mezi deformací a napětím, se jmenuje pracovní diagram.

Pracovní diagram dřeva se dělí na dvě části. První část se nazývá lineární a je až po mez úměrnosti (σ_u) a druhá nelineární, která je od meze úměrnosti po mez pevnosti (σ_p) (Obr. 5). Mezi úměrnosti se značí takové napětí, které je možné vyvinout, aby vznikaly pouze pružné deformace, popřípadě deformace pružné v čase. Pokud se působící síla odstraní, deformace zmizí a těleso se vrací do počátečního tvaru.

Při dalším nárůstu napětí nad mez úměrnosti deformace nepřestávají růst, avšak napětí v tělese je rozloženo nerovnoměrně a deformační čára se mění v křivku. Po působení sil nad mezi úměrnosti vznikají deformace plastické a po jejich odstranění nemizí, ale zůstávají. Pokud je vyvinuto napětí, které ke konci materiál poruší, nazýváme ho mezi pevnosti. Mezi pevnosti se tedy nazývá nejvyšší možné napětí, kterým je na dřevo možné působit, aby jeho celistvost nebyla narušena. Jak je přímka od 0 do meze úměrnosti skloněna, určuje poměr mezi napětím a deformací (Gandelová et al., 2009).

Pokud napětí přesahuje mez úměrnosti a blíží se k mezi pevnosti, pak dosahuje napětí takové hodnoty, že jsou porušeny nejen vodíkové vazby, ale také vzniká porušení mezi vazbami kovalentními. Zlomy na úrovni těchto vazeb jsou nenávratné a porušení se stává trvalým. Deformace u smrkového dřeva při vlhkosti 12 % jsou průměrně zastoupeny takto: pružná deformace 67 %, plastická deformace 30 % a deformace pružná v čase 3 % (Požgaj et al., 1993).



Obr. 5 Pracovní diagram (Požgaj et al., 1993)

Poissonova čísla

Tato čísla se využívají zejména při objemových změnách, které způsobuje mechanické zatížení. Jsou velice důležitými charakteristikami pružnosti dřeva. Při namáhání dřeva tahem nebo tlakem vznikají deformace ve směru působení sil a také deformace kolmo na působení sil. Nazývají se příčnými deformacemi (Požgaj et al., 1993).

Poměr příčné deformace k podélné se nazývá Poissonovo číslo a Dinwoodie (2000) uvádí, že se počítá tímto vzorcem:

$$\mu = - \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (9)$$

Kde ε_y a ε_x jsou deformace ve směru y a x z důsledku působení sil ve směru x. Znaménko mínus znamená, že pokud je těleso namáháno tahem, jsou příčné deformace záporné, a pokud tlakem, tak kladné. Díky anizotropii dřeva se určuje 6 Poissonových čísel (Dinwoodie, 2000).

3.2.2.2 Tlak

Tlakové namáhání vzniká, pokud vnější síla tlačí na přířez. Při pohledu na orientaci vláken, letokruhů dřeva a působící síle na ně, rozlišují se tyto pevnosti: a) pevnost v tlaku ve směru vláken (σ_{pl}) b) pevnost dřeva v tlaku kolmo na vlákna – ta se dále dělí na pevnost dřeva kolmo na vlákna v radiálním směru (σ_{pLR}) a ve směru tangenciálním (σ_{pLT}).

Při určování meze pevnosti v tlaku kolmo na vlákna se používá grafické stanovení, a to z pracovního diagramu. Pro určení meze pevnosti v tlaku ve směru vláken se používá podle Gandelová et al. (2009) vzorec:

$$\sigma_p = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \quad (10)$$

F_{max} – síla na mezi pevnosti v Newtonech
a, b – příčné rozměry tělesa

Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken

Při porovnání pevnosti dřeva v tlaku je pevnost ve směru vláken nejvýznamnější. Díky poměrně vysoké pevnosti v tlaku ve směru vláken má dřevo velké uplatnění například jako kůly a různé části prvků nosníků (Požgaj et al., 1993).

Pokud na těleso působí tlak ve směru vláken, nastane deformace, při které se mění délka tělesa. Vlastnosti deformace jsou ovlivňovány jakostí dřeva a jeho stavbou. Činiteli, kteří jsou pro deformaci důležití, jsou hustota a vlhkost. Dřevo suché, které má vysokou hustotu a tím pádem i vysokou pevnost, se po zatížení poruší, a to ve formě smyku jedné části tělesa vzhledem k druhé po linii, která na ploše tangenciální probíhá v úhlu 60° k podélné ose tělesa. Dřevo vlhké a s nízkou vlhkostí (malá pevnost) se chová po zatížení tak, že otláčí vlákna čelních ploch a dochází k vybočení stěn zatěžovaných těles. Patrná porušení jsou již z počátku zatížení, a to jako příčné rysky na tracheidách jehličnanů. Nazývají se skluzové čáry a uzavírají s osou tracheid 70° úhel. Při vlhkosti 12 % a tomto způsobu zatížení je průměrná mez pevnosti okolo 50 MPa.

Mez úměrnosti v tlaku je uváděna pro tvrdé listnaté 56 %, měkké listnaté 60 %, jehličnaté 68 % meze pevnosti. Průměrná mez úměrnosti je tedy okolo 60 %. Díky pravidelnější stavbě jehličnanů je jejich mez úměrnosti větší. Napětí, které vzniká v tělese, se přenáší hlavně elementy s větší tloušťkou buněčných stěn, což jsou u jehličnanů letní tracheidy a u listnáčů libriformní vlákna. Napětí se přenáší v buněčných stěnách přes makromolekuly celulózy a hemicelulóz na amorfni výplň celulózní kostry buněčné stěny. Pokud tedy po zatížení vznikne plastická deformace, je to projev trvalé změny ve struktuře ligninu, anebo porušení spojů lignino-sacharidového komplexu (Gandelová et al., 2009).

Tab. 3 Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken pro dřevo některých dřevin (Požgaj et al., 1993)

Druh dřeva	σ_{pl} (MPa)		Druh dřeva	σ_{pl} (MPa)	
	w =12 %	w \geq 30 %		w =12 %	w \geq 30 %
Modřín	64,5	25,5	Akát	75,5	41,5
Borovice	48,5	21,0	Buk	55,5	26,0
Smrk	44,4	19,5	Dub	57,5	30,4
Habr	60,0	26,5	Topol	39,0	18,0

Pevnost dřeva v tlaku kolmo na vlákna

Deformace dřeva po působení tlaku v tomto směru má svoji neobyčejnost, díky obsazení jarního a letního dřeva v ročním přírůstku, ale také díky vláknité stavbě. Dřevo se neporuší tak, že se oddělují jednotlivé části, ale postupně se deformuje a zhušťuje struktura dřeva. Kvůli této vlastnosti není možné přesně stanovit mez pevnosti, a proto se pracuje pouze s mezí úměrnosti (σ_u). Případně se určuje napětí při předepsaném procentu stlačení původní tloušťky (například 2 %) (Požgaj et al., 1993).

Při pohledu na makroskopickou stavbu letokruhu připadají v úvahu dva průběhy závislosti napětí-deformace: a) deformace dvoufázová b) deformace třífázová.

Pokud se jedná o deformaci dvoufázovou, na diagramu se projeví jako lineární část probíhající takřka do maximálního pružného zatížení. Nad mezí úměrnosti se začíná postupně narušovat soudržnost tělesa a to se projeví na hranicích letokruhů, které se postupně ohýbají, oddělují se od sebe a rozvíjí se plastická deformace. Tato deformace je typická pro jehličnaté dřeviny a listnaté s kruhovitě pórovitou stavbou, pokud působí tlak v tangenciálním směru (při tomto působení dochází ke stlačování elementů jarního i letního dřeva současně). Dub, i přestože patří do dřevin listnatých s kruhovitě pórovitou stavbou, tvoří výjimku.

Třífázová deformace při zatížení v tlaku kolmo na vlákna ve směru radiálním je charakteristická pro všechna naše dřeva opět s výjimkou dubu. V případě, že je dřevo zatěžováno v tlaku kolmo na vlákna ve směru tangenciálním, je tato deformace typická pro dřeva listnatá s roztroušeně pórovitou stavbou, zde dub také projevuje určitou náchylnost. Prvotní fáze deformace je opět lineární část, která je zapříčiněna stlačováním jarního dřeva v letokruzích. U konce této fáze se nachází mez úměrnosti. Až dojde k porušení stability anatomických elementů dřeva, začnou se stlačovat, což probíhá za působení stejného nebo jen trochu zvětšujícího se napětí a dochází k postupnému rozvíjení plastických deformací. Na pracovním diagramu vypadá tento proces jako téměř vodorovná část křivky. Po postupné deformaci obou vrstev letokruhu dochází k přechodu z druhé fáze do třetí, která probíhá při značném zatížení a dochází k zhušťování dřeva, ale nekončí úplným porušením.

Dřevo vystavené zatížení v tlaku kolmo na vlákna není ve většině případů celkově porušeno, proto se pevnost určuje z meze úměrnosti. Jelikož není jednoduché určit vlastní mez úměrnosti, zjišťuje se mez úměrnosti na základě stanovených kritérií. Mez úměrnosti určená podle těchto kritérií se nazývá konvenční mez pevnosti ($\sigma_u = \sigma_k$).

Jsou tři pevnosti v tlaku kolmo na vlákna:

- a) tlak na celou plochu,
- b) tlak na část délky,
- c) tlak na část délky a šířky.

Při porovnání hodnot tlaku na celou plochu a na část délky jsou hodnoty na část délky v průměru o 20–25 % vyšší. Toto je zapříčiněno dodatečným odporem vláken při ohybu na hranách tlačného tělesa. Jehličnany mají větší konvenční mez pevnosti ve směru tangenciálním z důvodu působení tlaku na jarní i letní dřevo zároveň. U dřevin se širokými dřeňovými paprsky, jako jsou dub, buk a javor, je zase větší konvenční mez pevnosti v radiálním směru. Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken je asi desetkrát vyšší než konvenční mez pevnosti v tlaku kolmo na vlákna (Gandelová et al., 2009).

3.2.2.3 Smyk

Smykovou pevností se rozumí schopnost dřeva odolávat síle, která vyvolává klouzáni nebo sklouznutí jedné části materiálu po části sousední. Smyková pevnost se dělí do tří druhů. První je smyková pevnost ve směru vláken, druhá smyková pevnost kolmo na vlákna a třetí je takzvaná stříhová pevnost (Wangaard, 1950).

Smyková pevnost ve směru vláken

V tomto směru je u dřeva pevnost celkem malá, u listnatých dřevin je téměř 1,5krát větší než u dřevin jehličnatých. Při porovnání smykové pevnosti v rovinách je zřejmé, že v rovině tangenciální je pevnost o 10 – 30 % vyšší než v radiální. Rozdíl v těchto rovinách se zvyšuje s větší četností dřeňových paprsků např. buk, habr. U jehličnanů je tato pevnost v radiální i tangenciální rovině takřka stejná.

Mez v pevnosti ve smyku ve směru vláken v porovnání s mezí v tlaku ve směru vláken je asi $\frac{1}{5}$ meze v tlaku ve směru vláken. Při vlhkosti dřeva 12 % jsou průměrné hodnoty okolo 10 - 12 MPa. I přesto, že má dřevo ve smyku malou pevnost je takto v praxi často namáháno (například spoje krovů) (Gandelová et al., 2009).

Smyková pevnost kolmo na vlákna

Tato pevnost je v rovinách tangenciální a radiální téměř 2krát menší než pevnost smyková ve směru vláken (3 – 8 MPa). V rovinách je zde malý rozdíl. V praxi se

setkáváme s touto pevností při namáhání dřevěných klínů, vložených pér a také při loupání nebo krájení dých.

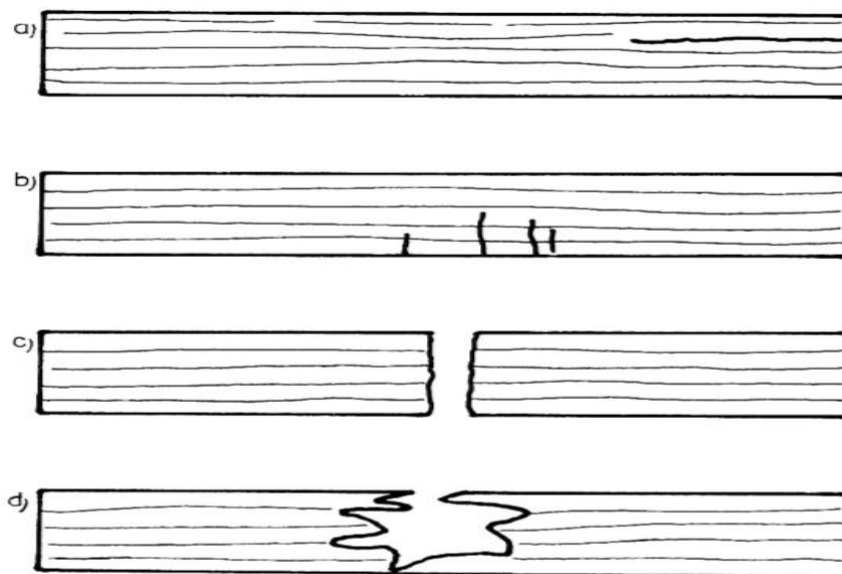
Stříhová pevnost

Stříhovou pevností nazýváme smykovou pevnost dřeva kolmo na vlákna v rovině příčné. Když se porovná tato pevnost s pevností smykovou ve směru vláken, je stříhová pevnost 40krát větší než ve směru vláken (cca 40 MPa). Objevuje se například pod kovovými spoji dřevěných konstrukcí nebo kolíkových spojů (Gandelová et al., 2009).

3.2.2.4 Ohyb

Pevnost dřeva v ohybu se dělí s ohledem na průběh vláken a ročních kruhů takto: a) pevnost dřeva v ohybu kolmo na vlákna v radiálním anebo tangenciálním směru b) pevnost dřeva v ohybu s průběhem vláken příčně na osu tělesa c) pevnost dřeva v ohybu s průběhem vláken rovnoběžně se zatěžujícím břemenem.

Při překročení meze úměrnosti a rostoucího napětí k mezi pevnosti se začínají deformovat okrajová vlákna v tlakové zóně, a to tak, že nastávají trvalé plastické deformace a následně se dřevo poruší. Deformační proces s narůstajícím napětím postihuje i další vlákna směrem k neutrální vrstvě. Na tahové straně narůstá napětí současně jako na tlakové straně a vznikají zde také deformace vláken, až se těleso zlomí (obr. 6).



Obr. 6 Charakter porušení dřeva v ohybu (Požgaj et al., 1993)

Pro výpočet napětí (včetně meze pevnosti) se používá vzorec Naviera, jak uvádí Gandelová et al. (2009):

$$\sigma_{Lmax} = \frac{3 \cdot F \cdot l_0}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (11)$$

F – působící síla
l₀ – vzdálenost mezi podpěrami
h – výška nosníku
b – šířka nosníku

Poškození dřeva po zatížení kolmo v ohybu kolmo na vlákna může být různé a odvíjí se od rozložení vnějších působících sil, štíhlosti, tvaru, ale také struktury dřeva. Někdy se může stát, že se poruší ve střední zóně po okrajích tělesa, je to důsledkem vlivu smykového napětí.

V praxi má pevnost v ohybu kolmo na vlákna vysoké uplatnění, a to zejména jako nosníky příznivých délek, trámy nebo lamelové prvky. Pevnost v ohybu s průběhem vláken příčně na osu tělesa a pevnost v ohybu s průběhem vláken rovnoběžně se zatěžujícím břemenem jsou velice malé. V porovnání s mezí pevnost v ohybu kolmo na vlákna tvoří mez pevnosti v ohybu těchto dvou pevností pouze 5-10 % z meze pevnosti v ohybu kolmo na vlákna. V praxi nepřicházejí tyto dvě možnosti zatížení téměř v úvahu. Po zatížení nosníku v ohybu se začne nosník deformovat, přičemž na vnitřní straně vzniká napětí tlakové a na straně vnější napětí tahové (Požgaj et al., 1993).

Rozdíl mezi křehkým, málo pevným a houževnatým, pevným dřevem je ve zlomu. A to takový, že dřevo křehké má zlom spíše hladký a dřevo houževnaté naopak třískovitý nebo vláknitý. Mez pevnosti v ohybu kolmo na vlákna je v průměru okolo 100 MPa. Variační koeficient je 16 %. Při ohybu kolmo na vlákna je mez úměrnosti v průměru 70 % z meze pevnosti. Ohybová pevnost dřeva je někde mezi tahovou a tlakovou pevností dřeva. Pevnost dřeva v ohybu je relativně vysoká, a proto je dřevo využíváno na různé konstrukční prvky, které jsou namáhány ohybem (nosníky, nábytek atd.) (Gandelová et al., 2009).

3.2.2.5 Houževnatost dřeva

Dřevo je houževnatý materiál a kromě toho má také mírnou až vysokou tvrdost a pevnost. Dřevo je upřednostňovaný přírodní materiál díky kombinaci svých

mechanických vlastností. Houževnatostí se rozumí odolnost dřeva vůči šíření trhlin. Pro porovnání materiálů se obvykle vyjadřuje houževnatost z hlediska lomové práce, což znamená míru energie potřebné k šíření trhlin. U dřeva je lomová práce, tedy energie potřebná pro vznik (šíření) trhlin ve směru kolmo na vlákna, 10^4 J/m^2 . Tato hodnota je řádově menší než například u kovů, ale je srovnatelná například s umělými kompozity (Dinwoodie, 2000).

Statická houževnatost dřeva

Jedná se o mechanickou vlastnost dřeva, která udává potřebnou energii ke vzniku plastické deformace. Houževnatost poroste se spotřebou práce potřebné ke vzniku plastických deformací. Pokud je dřevo zatíženo krátce, vznikají na něm kromě pružných deformací a plastických deformací také deformace pružné v čase. Houževnatost dřeva je obraz struktury dřeva a vazbových energií se zřetelem na daný způsob zatížení. Houževnatost je proměnlivá a závisí na množství vody v buněčných stěnách, teplotě, rychlosti zatížení atd.

Pokud má dřevo malou houževnatost a dobrou plastičnost, může se lépe tvárnit, ohýbat a lisovat. Tedy abychom zdeformovali dřevo méně houževnaté, vynaloží se méně energie než na dřevo s vyšší houževnatostí. Dřevo v tlaku kolmo na vlákna nad mezi jejich nasycení má několikanásobně nižší houževnatost, ale také má nižší plastičnost. Dá se říct, že se vynaloží méně potřebné energie, ale zase nedosáhne žádané tvárnitelnosti. Zvýšení tvárnitelnosti se dosahuje například vyššími teplotami.

Když je u materiálu malá deformační činnost a plastická deformace takřka nepatrná, hovoří se o křehkém materiálu.

Rázová houževnatost

Touto houževnatostí se vyznačuje schopnost dřeva vstřebávat práci rázovým ohybem. Cílem je zjistit, jak velká práce se spotřebovala na zlomení dřeva za určitých podmínek. Udává se většinou v J/cm^2 . Pokud dřevo odolává vůči rázové síle, znamená to, že je houževnaté. Po přeražení je možné určovat kvalitu dřeva ve zlomu. Když je zlom spíše vláknitý, „rozcuchaný“, má dřevo vysokou houževnatost. Průměrné dřevo má na tahové straně také vláknitý zlom a dřevo křehké má typický tupý zlom (Požgaj et al., 1993).

3.2.2.6 Tvrdost dřeva

Tvrdost ve spojení se dřevem znamená schopnost dřeva odolat proti vtlačení (vnik jiného tělesa do struktury). Také se tento termín používá k schopnosti dřeva odolávat poškrábání. Tvrdost kombinovaná s houževnatostí je důležitým měřítkem při opotřebitelnosti dřeva a využívá se například při použití dřeva na podlahy. I přesto, že odolnost proti vtlačení je závislá hlavně na hustotě, mohou ji ovlivnit i jiné faktory, a to například houževnatost, velikost, soudržnost anebo uspořádání vláken (Wangaard, 1950).

Statická tvrdost

Stanovení této tvrdosti je založeno na vtlačování ocelové kuličky, která má daný průměr, statickým zatížením, a to na čelních, radiálních nebo tangenciálních plochách. Statickou tvrdost je možné určovat dvěma metodami, a to buď metodou podle Brinella, anebo Janky.

a) Brinellova tvrdost

V této metodě je používána kulička o průměru 10 mm a je vtlačována silou, která závisí na tvrdosti dřeva. Tato síla je u velmi měkkých dřev 100 N, u dřev, která jsou středně tvrdá, je to 500 N a u dřev tvrdých 1000 N. Plocha otláčení se následně vypočte z průměru otláčené plochy a kuličky. Tvrdost (H_B) je potom udána vztahem, který uvádí Gandelová et al. (2009):

$$H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \text{ [MPa]} \quad (12)$$

F – působící síla na kuličku

D – průměr kuličky

d – průměr otláčené plochy ve dřevě

b) Jankova tvrdost

Tato metoda se liší již v zatlačovaném předmětu. U této metody se jedná o polokuličku, která má průměr 11,28 mm. Polokulička je zatlačována do hloubky 5,64 mm a tímto zatlačením vznikne na povrchu dřeva plocha $S = 100 \text{ mm}^2$. Síla F , která je spotřebována na zatlačení polokuličky, udává tvrdost H_j , kterou udává vzorec taktéž podle Gandelová et al. (2009):

$$H_j = \frac{F}{S} \text{ [MPa]} \quad (13)$$

F – síla potřebná na zatlačení kuličky
S – plocha

Z tabulky 4 je zřejmé, že statická tvrdost je obecně vyšší v rovině příčné než v rovinách podélných. Jehličnaté dřeviny mají tento rozdíl okolo 40 % a dřeviny listnaté cca 30 %. U dubu a buku je radiální tvrdost o něco větší (okolo 5–10 %) než tangenciální. Je to z důvodu, že jejich dřeňové paprsky jsou dobře vyvinuty. Ostatní dřeviny mají radiální a tangenciální tvrdost téměř stejnou.

Statická tvrdost je závislá na hustotě a vlhkosti, jestliže se změní vlhkost o 1 %, změní se statická tvrdost o procenta 3 %.

Podle tvrdosti (při vlhkosti 12 %) se dělí dřeva do 5 skupin:

- a) měkká (< 40 MPa) – smrk, lípa,
- b) středně tvrdá (41 - 80 MPa) – buk, dub, modřín,
- c) tvrdá (81 - 100 MPa) – habr,
- d) velmi tvrdá (101 - 150 MPa) – zimostřez,
- e) super tvrdá (> 150 MPa) – eben.

Tab. 4 Hodnoty statické tvrdosti vybraných dřevin (Matovič, 1993)

Druh dřeva	Tvrdost dřeva na ploše (MPa)					
	Čelní		Radiální		Tangenciální	
	12 %	>30 %	12 %	>30 %	12 %	>30 %
Modřín	43,5	20,5	29,0	13,5	29,0	14,0
Borovice	28,5	13,5	24,0	11,0	25,0	11,5
Smrk	26,0	12,0	18,0	8,5	18,5	8,5
Akát	97,0	57,7	68,0	40,5	78,0	46,5
Jasan	80,0	48,0	59,0	35,0	67,0	39,5
Dub	67,5	40,0	56,0	33,5	49,0	29,0
Buk	61,0	36,5	44,5	26,5	43,5	25,5
Habr	90,5	54,0	77,0	45,5	78,5	47,0
Lípa	26,0	15,5	17,5	10,0	18,0	10,5

Dynamická tvrdost

Jedná se o podíl potenciální energie kuličky, která padá volným pádem ze stanovené výšky, a plochy, kterou při dopadu kulička zanechá na materiálu. Podle Gandelová et al. (2009) se vypočítá dynamická tvrdost tímto vzorcem:

$$H_w = \frac{4m \cdot g \cdot h}{\pi \cdot d_1 \cdot d_2} \text{ [J/cm}^2\text{]} \quad (14)$$

m – hmotnost kuličky

g – gravitační zrychlení

h – výška pádu kuličky

d₁, d₂ – rozměry otlačků v základních anatomických směrech napříč a podél vláken

Do meze hygroskopicity se mění i dynamická tvrdost, a to tak, že pokud se změní vlhkost o 1 %, změní se dynamická tvrdost o 2 % (Gandelová et al., 2009).

3.3 Vliv vysokých teplot

Dřevo si drží mezi atraktivními stavebními materiály své místo díky svým vlastnostem, včetně nízkého tepelného roztažení, nízké hustoty a také dostatečně vysoké mechanické pevnosti. U dřeva využitého jako dekorační materiál nebo nábytek hraje velkou roli i jeho barva. Během zpracování (zejména sušení dřeva) může dřevo podléhat změnám barvy a mechanických vlastností, avšak průběh těchto změn a jejich rychlost se podle druhu dřeva liší. V dnešní době je trendem vysokoteplotní sušení dřeva, což je motivováno nižší spotřebou energie, větší rychlostí a také pravděpodobně menším počtem deformací. V některých studiích se ukázalo, že po působení vysokých teplot byla snížena ohybová pevnost, ale na modul pružnosti to žádný účinek nemělo (MacLean 1953; Rusche 1973; Huffmann 1977). Naopak u studie jiné Teischinger (1992) nebyla ohybová pevnost po tepelném zatížení změněna, ale došlo k mírnému zvýšení modulu pružnosti (Bekhta –Niemz, 2003).

U procesů, které přeměňují dřevo na výrobek, je důležité brát zřetel kromě teploty také na vlhkost. Vzájemné působení teploty a vlhkosti má výraznější vliv na mechanické vlastnosti, než když působí jednotlivě. Modul pružnosti v krutu (G) na změny teplot reaguje velmi. Snížení modulu pružnosti G je dáváno za příčinu fyzikálním a chemickým změnám ligninu, hemicelulózy, popřípadě amorfni celulózy. K blízkým výsledkům se došlo i při zkoumání modulu pružnosti E (Požgaj et al., 1993).

Existuje několik druhů tepelně upravovaného dřeva: Ve Finsku je to Thermowood, v Nizozemsku Plato wood a ve Francii Bois Perdure a další. Metody jsou stále vyvíjeny například v Dánsku a Rakousku. Teploty při tepelném zpracování těchto dřev jsou okolo 160–260 °C. Dřevo takto upravené má příznivější podmínky jak pro použití v interiéru, tak pro použití v exteriéru. Má například vyšší rozměrovou stabilitu a trvanlivost. U tepelně zpracovaného dřeva je zásadní nevýhodou zhoršení mechanických vlastností, tudíž je omezeno jeho využití například při konstrukčního materiálu. Pravděpodobně nejdůležitější faktor, který ovlivňuje mechanické vlastnosti, je degradace hemicelulózy (zejména pevnost v ohybu a tahu). Mechanické vlastnosti tepelně upraveného dřeva jsou výrazně ovlivňovány změnami v krystalickém a amorfním podílu celulózy (Čekovská et al., 2017).

3.3.1 Fyzikální vlastnosti

3.3.1.1 Vlhkost

Masivní dřevo je široce používáno v různých aplikacích. Ovšem má nežádoucí vlastnosti, a to vzhledem ke své hygroskopické povaze. Tyto vlastnosti jsou například špatná odolnost proti biologickému napadení houbami a hmyzem a praskliny, které vznikají díky příbytku nebo úbytku vody ve dřevě. Aby se zabránilo toxickým účinkům způsobeným chemickým ošetřením, jsou používány na úpravu vlastností dřeva vysoké teploty. Jedná se o velice slibnou alternativu.

Tepelné zpracování dřeva snižuje jeho hydrofilní chování. Během tepelné úpravy se snižuje počet hydrofilních OH skupin a jsou nahrazeny hydrofobními kyslík-acetylovými skupinami. Díky tomu dochází k zesílení mezi dřevními vlákny, což výrazně snižuje schopnost vody pronikat do dřeva. Snižování schopnosti vody pronikat do dřeva zabraňuje bobtnání a tím se zlepšuje rozměrová stabilita dřeva. Aby se zlepšila rozměrová stabilita a prodloužila trvanlivost, je velice důležité, aby byla snížena hygroskopičnost dřeva. Výzkumy ukazují, že hygroskopičnost může být snížena až na 60 % oproti neošetřenému dřevu (Time, 1998).

Kollman (1961) ve svém výzkumu ukazuje sorpční izotermy smrku po tepelné úpravě. Dřevo bylo vystaveno teplotám 24 hodin a byly použity teploty od 70 do 200 °C. Rozdíl rovnovážného obsahu vlhkosti u dřeva vystaveného teplotám 70 až 100 °C není tak velký jako rozdíl u dřeva vystaveného teplotám mezi 100–200 °C.

3.3.1.2 Změny v chemické struktuře

Je dokázáno, že oproti ostatním makromolekulárním složkám je v největší míře degradována po tepelném zatížení hemicelulóza. Ztráta tohoto polysacharidu je nejvýznamnější při teplotách vyšších než 180 °C, ale záleží na podmínkách ošetření. Ačkoli chemie tepelné modifikace je složitá a zdaleka zcela nepochopitelná, lze snadno ocenit, že při zvyšování teploty dochází ke změnám v povaze reakcí. Co je méně jisté, jsou přesné body, ve kterých se různé reakce stanou dominantními.

Hemicelulóza

Pokud je dřevo zahříváno, začnou nejvíce tepelně labilní polymerní složky (hemicelulóza) degradovat, což vede k produkci methanolu, kyseliny octové a různých těkavých heterocyklických sloučenin. Se zvyšující se teplotou a dobou vystavení teplu roste i degradace hemicelulózy. Chemická analýza ukazuje, že dobrá chemická stabilita je až do 100 °C, a to při 48hodinovém zatížení. Při porovnání tvrdých a měkkých dřev vykazují měkká dřeva vyšší tepelnou stabilitu, a to z důvodu hemicelulóзовého obsahu a složení.

Celulóza

U celulózy dochází k degradaci až po vystavení vyšším teplotám než u hemicelulózy. Celulóza degraduje v teplotním rozmezí mezi 300–340 °C. Ke snížení rychlosti degradace celulózy dochází, pokud je přítomna voda, která způsobuje vznik tepelně stabilnějších krystalických oblastí.

Lignin

Lignin je tepelně nejstabilnější složkou dřeva. K jeho rozkladu dochází při teplotách nad 300–400 °C (Hill, 2006).

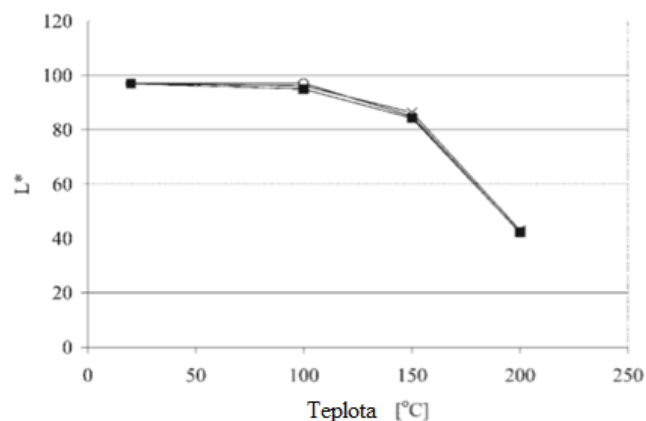
3.3.1.3 Ostatní vlastnosti

Barva

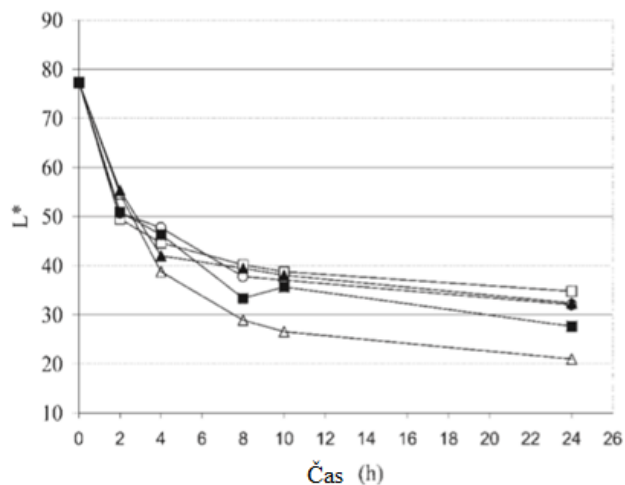
Důležitým faktorem při určování ceny dřeva je také jeho barva. Existuje několik studií o změnách barvy při tepelném zatížení. Barva dřeva je ovlivňována mnoha faktory, jako je například světlo, teplo, vlhkost a další. K barevným změnám na povrchu dochází

během sušení z důvodu chemických změn primárních dřevěných složek. Například pokud je dřevo sušeno v těžkých podmínkách, což je teplota nad 60 °C a relativní vlhkost 65 %, dochází ke změně barvy povrchu dřeva kvůli chemické změně ve struktuře ligninu a hemicelulóz. Jasně změny barev u dřeva začínají při teplotě nad 60 °C u tvrdého dřeva a při teplotě nad 90 °C u měkkého (Aydin a Colakoglu, 2005).

Ve své studii také testoval změny barev Bekhta (2003), kde byla barva testována na smrkovém dřevu a všechny testované vzorky byly před zahájením zahřívání uzavřeny v klimatické komoře o relativní vlhkosti 65 % a teplotě 20 °C. Teplota zahřívání byla 200 °C a bylo střídáno 5 relativních vlhkostí (50, 65, 80, 95 % a vzorky dřeva zcela nasycené vodou). Změny barvy byly zaznamenávány před a po tepelném zpracování pomocí kolorimetru. Bekhta (2003) došel k závěru, že dřevo po tepelném zatížení 200 °C změní svou barvu drasticky. K největšímu snížení světlosti (L^*) došlo u dřeva zcela nasyceného vodou, což je zaznamenáno na obrázcích 7 a 8.



Obr. 7 Změna světlosti v závislosti na teplotě (Bekhta, 2003)



Obr. 8 Změna světlosti v závislosti na čase (Bekhta, 2003)

3.3.2 Mechanické vlastnosti

Po tepelném zpracování se mechanické vlastnosti snižují, a to o 10 až 30 %. Modul pružnosti jakožto základní charakteristika pro tuhost dřeva (odolnost dřeva proti deformaci), je pro vědce velice zajímavá vlastnost, a proto je na toto téma zaměřeno mnoho vědeckých článků. Modul pružnosti jako jiné mechanické vlastnosti je ovlivňován teplotou. Je velmi důležitý u použití dřeva zejména na konstrukční prvky, které jsou v prostředí, kde dochází ke změnám teplotních podmínek.

3.3.2.1 Tlak

Při testování změny odolnosti proti tlaku po vystavení dřeva vysokým teplotám bylo použito dubové dřevo, které mělo obsah vlhkosti 12,8 %. Vzorky byly vystavené teplotám od 23 °C po 220 °C. Po zvýšení teploty se pevnost nejdříve snížila, poté zvýšila a následně zase snížila. Obsah vlhkosti ve dřevě klesal se zvyšující se teplotou a u 170 °C byl téměř nulový. Pevnost v tlaku silně závisí na ligninu umístěném na vnější straně dřevního vlákna, která byla změkčena při teplotě 110 °C. S narůstající teplotou klesala i pevnost dřeva v tlaku, to zapříčinila degradace celulózy a hemicelulózy. Tato degradace byla se vši pravděpodobností důvodem, že pevnost dřeva v tlaku byla při teplotě 220 °C nejnižší. V tabulce 5 jsou zaznamenány pevnosti v tlaku po zatížení teplotami od 23 °C po 220 °C. Z tabulky vyplývá, že s narůstající teplotou klesá pevnost v tlaku i vlhkost dřeva (Jiang et al, 2014).

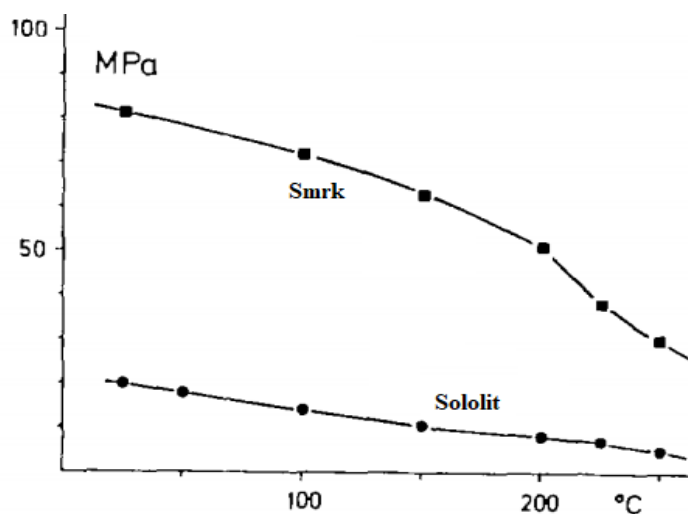
Tab. 5 Pevnost v tlaku v závislosti na teplotě (Jiang et al, 2014)

Teplota	23 °C	50 °C	80 °C	110 °C	140 °C	170 °C	200 °C	220 °C
Pevnost v tlaku (MPa)	57,17	44,89	34,16	33,47	44,36	36,86	28,86	18,86
Vlhkost (%)	12,16	9,71	8,32	5,17	1,81	0,59	0,02	0,00

3.3.2.2 Tah

Ve studii, která se zaměřovala na pevnost v tahu za vysokých teplot bylo použito smrkové dřevo. Vlhké vzorky měli nejvyšší vlhkost 30 %, toho se dosáhlo skladováním vzorků v exsikátoru nad nasyceným roztokem. Suché vzorky byly sušeny ve vakuové peci při pokojové teplotě přibližně 70 hodin a následně dány do suchého dusíku. Obsah vlhkosti suchých vzorků byl 1 – 2 %. Pro každou kombinaci vlhkosti a teploty bylo použito 10 vzorků pro zkoušku tahem. Při teplotě do 100 °C se mírně zvyšuje pevnost v tahu s narůstající vlhkostí.

Jak obsah vlhkosti, tak teplota mají velký vliv na pevnost v tahu. Zkoušky ukazují, že pevnost v tahu při obsahu vlhkosti 30 % a 90 °C je poloviční než pevnost v tahu dřeva o vlhkosti 10 % a 25 °C. Účinky vlhkosti jsou vyšší při vyšších teplotách. Nejvyšší pokles byl vyzorován při obsahu vlhkosti mezi 12 – 22 % a teplotě nad 200 °C. Účinky vlhkosti a teploty jsou hlavně návratné, to znamená, že po ochlazení se vlastnosti zase zlepšují, ovšem samozřejmě zůstávají i některé trvalé. Na obrázku 9 je vidět jak pevnost v tahu u smrku s narůstající teplotou klesá a také porovnání se sololitem za stejných podmínek.



Obr. 9 Pevnost v tahu v závislosti na teplotě (Östman, 1985)

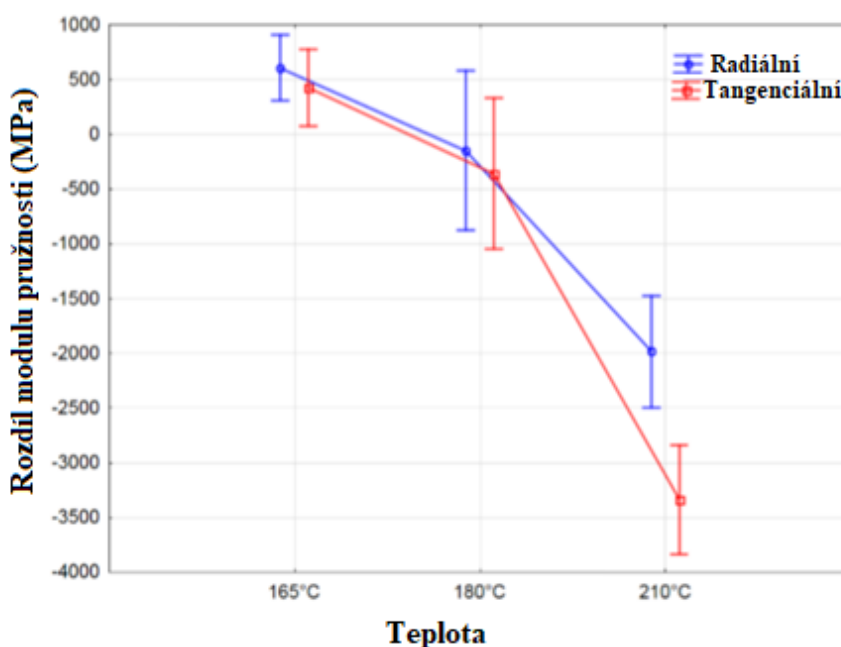
3.3.2.3 Ohyb

Modul pružnosti

Modul pružnosti se nejčastěji měří nedestruktivními metodami pomocí ultrazvukové a rezonanční metody. Mnoho studií používá právě tyto metody ve svých experimentech.

Ve své studii použili tyto metody i Holeček et al. (2017), kde bylo použito smrkové dřevo při různých teplotách (160 °C, 180 °C a 210 °C). Vzorky byly upraveny na rozměr 20 x 20 x 650 mm. Poté byla jejich vlhkost ve vlhkostní komoře upravena na 12 %. K vyhodnocení účinku tepelného zatížení se použilo porovnání původních (neošetřených) vzorků se vzorky, které byly tepelně ošetřené. Tepelné zpracování se skládalo ze tří fází – dosažení požadované teploty, udržování teploty po dobu 3 hodin a poté opět ochlazení na původní teplotu 20 °C.

Při teplotě 180 °C již došlo k viditelnému snížení modulu pružnosti o 1,1 % na ploše radiální a až o 3 % na ploše tangenciální. Toto bylo způsobeno chemickými změnami ve dřevě, čímž byla narušena jeho celistvost. Při teplotě 210 °C byl tento pokles již významný, a to o 13,9 % na ploše radiální a na ploše tangenciální o 21,6 % (obr.10).



Obr. 10 Pokles modulu pružnosti v závislosti na teplotě (Holeček et al., 2017)

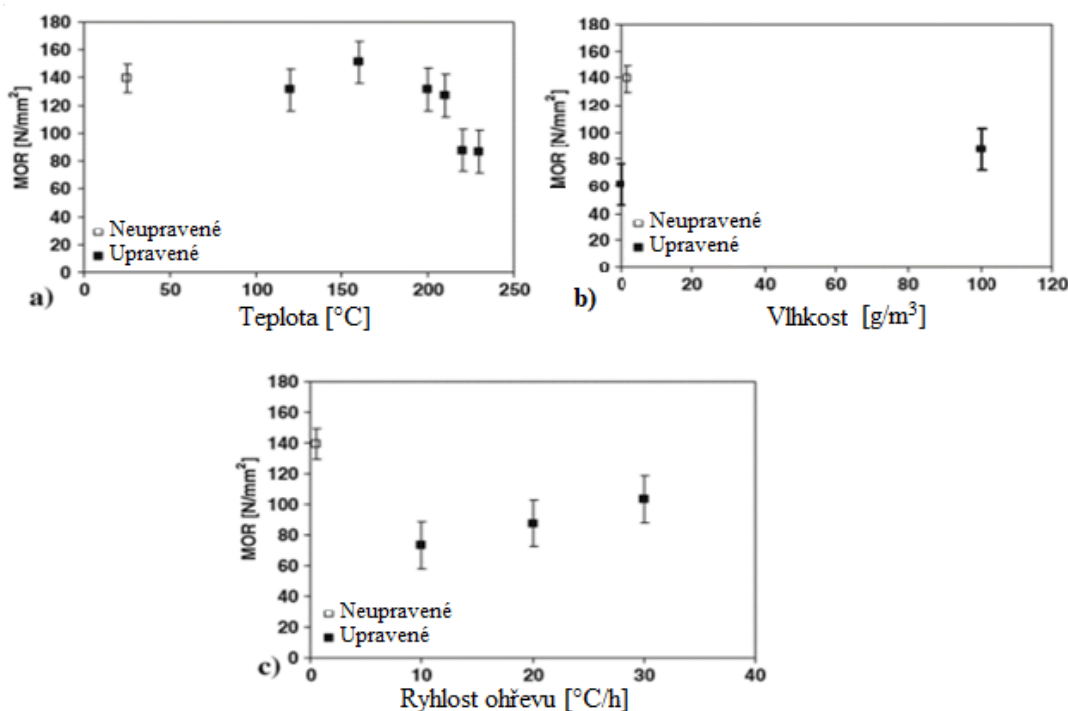
Mez pevnosti

Stejně jako u modulu pružnosti, i mez pevnosti se po vystavení vysokým teplotám snižuje. Modulem pružnosti se zabývá mnoho studií, stejně tak mez pevnosti je pro vědce atraktivní vlastnosti, a proto je také zkoumána v odborných člancích.

Mez pevnosti byla zkoušena na bříze o rozměrech 35 x 35 x 200 mm. Jejich vlhkost byla upravena na 5–12 %. Vzorky byly zahřívány na maximální teplotu 220 °C. Modul pružnosti byl zkoušen pomocí tříbodového statického ohybu. Výsledky ukazují, že čím více je bříza vystavována vysokým teplotám, její mez pevnosti se snižuje. Toto je pravděpodobně způsobeno rozpadem hemicelulózy a celulózy. Na obrázku 11 je

demonstrován vliv na mez pevnosti, a to za a) účinku maximálních teplot b) rychlosti ohřevu c) vlhkosti vzduchu. Z obrázku je patrné, že rychlost ohřevu a vlhkost mají na mez pevnosti také významný vliv (Poncsák et al., 2006)

K podobným výsledkům ve svých studiích došli například Sözbir et al. (2019) a Sinha (2013).



Obr. 11 Účinky na mez pevnosti (teplota, rychlost zahřívání, vlhkost) (Poncsák et al., 2006)

3.4 Vliv nízkých teplot

Studií o chování dřeva při nízkých teplotách již není tolik co při vysokých teplotách, avšak někteří vědci se zabývají i touto otázkou. Mražení dřeva bylo používáno k zabránění smršťování a vznikům vad při sušení, nebo například pro zvýšení difúze a propustnosti dřeva. Tato technika však nebyla důkladně prozkoumána. Vliv nízkých teplot na dřevo je důležité zkoumat i z hlediska přirozeného sušení, kdy je dřevo vystaveno těmto teplotám (Missio et al., 2016).

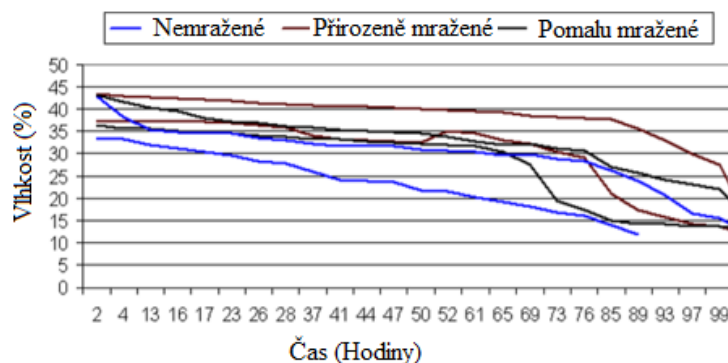
3.4.1 Fyzikální vlastnosti

3.4.1.1 Vlhkost

U nízkých teplot dochází k zamrznání vody ve dřevě. Tlak, který je vyvíjen ve dřevě díky ledu, dokáže přerušit některé spojení mezi molekulami vody a dřevní hmotou, což způsobuje s největší pravděpodobností mikrotrhliny v buněčné stěně. Nejdůležitější otázkou je v tomto případě, zda tyto mikrotrhliny způsobují nebo nezpůsobují významnou změnu mechanických vlastností dřeva. Druhou otázkou je, jestli tyto trhliny vznikají při přirozených nízkých teplotách, nebo nižších (Szmутku et al., 2013a).

U zmrzlého dřeva se musí dále počítat s vyšší dobou sušení, a tím pádem i s vyšší spotřebou energie. K tomu prodloužení dochází kvůli přeměně ledu na kapalinu. Co se týče vysušování, není mnoho výzkumů, (Marinescu 1980, Cividini 2001) uvádějí, že teplota během zahřívání by měla být spíše nižší, a to okolo 30 °C.

Ve studii Szmутku et al. (2013b) byl zkoumán vliv zmrazování smrkového dřeva na jeho sušení. Byly zvoleny dvě metody zmrazování. První metodou bylo vystavení vzorků na otevřeném prostranství po dobu 3 zimních měsíců. Druhá metoda byla krátkodobá, kde bylo dřevo pomalu zmrazeno na teplotu -25 °C a poté udržováno po dobu 3 dnů. Bylo odhaleno, že zmrznutí vody ve dřevě má významný vliv na jeho sušení, a to takový, že se prodlužuje až o 15 % a konečný obsah vlhkosti je nerovnoměrnější. Na obrázku 12 je znázorněn obsah vlhkosti u smrkového dřeva.



Obr. 12 Obsah vlhkosti sledovaných vzorků (Szmутku et al. 2013b)

3.4.1.2 Buněčná struktura

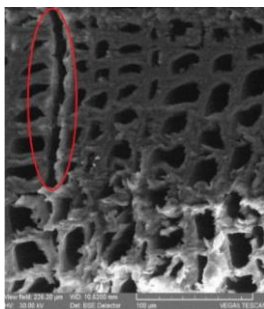
V dalším výzkumu Szmутku et al. (2011) se zaměřovali autoři na změny v buněčné struktuře dřeva po zasažení nízkými teplotami. Buněčná struktura byla pozorována na smrkovém dřevě, které bylo rozřezáno na 25 vzorků o velikosti 10 x 10 x 40 mm. Vzorky

měly vlhkost 65 % a byly podrobeny různým zmrazovacím zkouškám v klimatických komorách.

První zkouška spočívala v nepřetržitém zmrazování při teplotě $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 24 hodin. Druhá zkouška probíhala opět v nepřetržitém zmrazování při teplotě $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, avšak již po dobu 7 dnů. U třetí zkoušky trval celý průběh dva týdny, kdy v první fázi bylo dřevo zmrazováno při teplotě $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ a poté bylo cyklicky zmrazováno na teplotu $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 12 hodin a zahříváno na teplotu $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ také po dobu 12 hodin (tento proces trval druhý týden).

Po skončení procesu zmrazování byly vzorky vloženy na rozmrazení do vody o teplotě $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, dále byly nakrájeny na mikroskopické vzorky, které měly rozměry $3 \times 3 \times 3\text{ mm}$. Po rozřezání byly ještě dehydratovány ponořením do různých lázní (50 % ethylalkohol, ethylalkohol 70%, ethylalkohol 80%, absolutní alkohol a aceton).

Ve výsledcích bylo vypořizováno, že doba, po kterou byly vzorky zmrazovány neměla na vzniklé trhliny významný vliv. Mikrotrhliny se začaly vytvářet již při namáhání 24 hodin a jejich závažnost se s narůstajícím časem nezvyšovala. Nejvýznamnější výsledky byly vypořizovány na příčném řezu, kde k trhlinám docházelo nejčastěji mezi přechodem jarního a letního dřeva. U vzorků podrobených třetí zkouškou byla velikost prasklin největší, a to až $800\text{ }\mu\text{m}$ dlouhá. U vzorků podrobených zkoušce prvními dvěma způsoby byly praskliny poloviční přibližně, $200\text{--}500\text{ }\mu\text{m}$. Obrázek 13 zobrazuje prasklinu na příčném řezu po nepřetržitém zmrazování při teplotě $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 24 hodin (Szmotku et al. 2011).



Obr. 13 Mikroskopická trhliny vzniklá na příčném řezu po nepřetržitém zmrazování při teplotě $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 24 hodin (Szmotku et al. 2011)

3.4.1.3 Ostatní vlastnosti

Barva

Barvou dřeva se zabýval ve své studii například Liu et al. (2015), kde byly testovány vzorky eukalyptu po přemražení na $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. K měření barevných parametrů byl

použit barevný systém CIELAB, což je trojrozměrný barevný prostor k měření světlosti (*L) a barevných souřadnic (*a a *b). Zvýšení hodnoty *L znamená buď její zesvětlení, anebo ztmavnutí. Tyto hodnoty se určují podle znaménka, které je před deltou *L. Pokud je delta L* záporná, dochází k ztmavnutí vzorku, a pokud kladná, tak k jeho zesvětlení.

Dřevo bylo po předmrazení sušeno a výsledkem byl menší pokles světlosti než u vzorků, které nebyly takto ošetřeny. Toto bylo přisuzováno blokaci oxidačních reakcí po zmenšení pohyblivosti vody v lumenu.

3.4.2 Mechanické vlastnosti

Jak již bylo zmíněno, modul pružnosti je základní charakteristikou pro odolnost dřeva proti deformaci a je ovlivňován působením teplot. Proto se o modul pružnosti a další mechanické vlastnosti zajímají vědci i u dřeva, které je vystavené nízkým teplotám.

3.4.2.1 Tlak

Při zkoumání změn odolnosti vůči působení v tlaku bylo použito dubové dřevo o vlhkosti 12,8 %. Dubové dřevo bylo vystaveno těmto teplotním hladinám: - 170 °C, -150 °C, -130 °C, -110 °C, - 90 °C, - 70 °C, -50 °C, -30 °C, -10 °C, 0 °C, 23 °C. Průměrná hodnota pevnosti v tlaku ve směru vláken při teplotě 23 °C byla okolo 57,17 MPa. Tato hodnota při teplotě -170 °C byla 219,49 MPa. Dá se říct, že s klesající teplotou narůstala pevnost v tlaku. V tabulce 6 jsou zaznamenány jednotlivé hodnoty u teplotních hladin. Několik vědců uvedlo podobné zvýšení pevnosti v tlaku u nízkých teplot (Jiang et al, 2014).

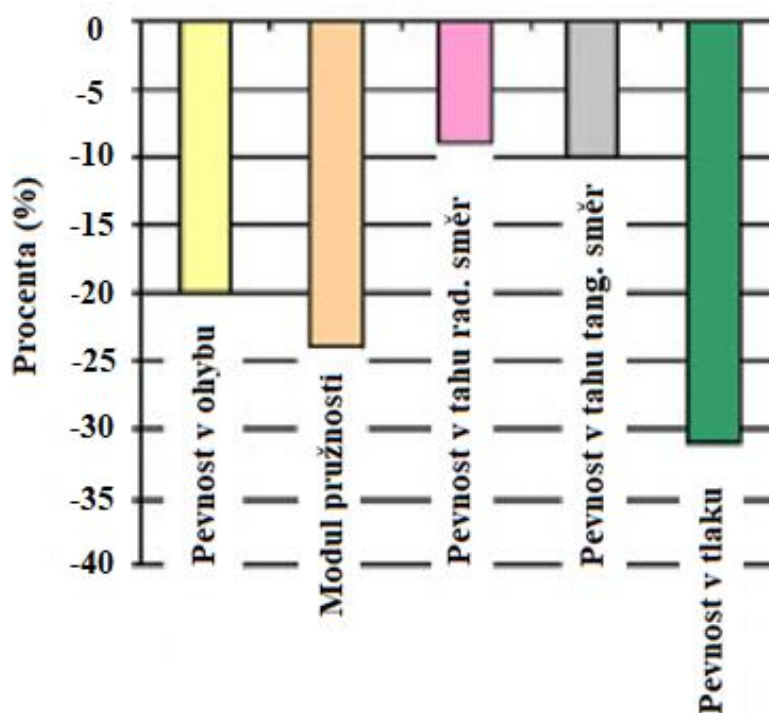
Tab. 6 Hodnoty pevnosti v tlaku ve směru vláken (Jiang et al, 2014).

Teplota (°C)	23	0	-10	-30	-50	-70	-90	-110	-130	-150	-170	-196
Pevnost v tlaku (MPa)	57,2	75,9	74,3	91,9	100	122	144,1	159,9	187,8	213,1	200,8	219,5

Důležitou otázkou u nízkých teplot a pevnosti v tlaku je také vlhkost dřeva vystaveného nízkým teplotám. Podle Zhao et al. (2015) dochází při nízkých teplotách ke zvyšování mechanických vlastností, a to i pevnosti v tlaku, díky obsahu vody, která ve dřevě zamrzá. Při stále nízké teplotě je pevnost v tlaku stále vysoká díky zamrzlé vodě, ovšem po opětovném rozmrazení pevnost v tlaku klesá z důvodu trhlin v buněčné struktuře.

3.4.2.2 Tah

Na zkoušku pevnosti v tahu za nízkých teplot bylo použito smrkové dřevo o vlhkosti 12 % a rychlost zmrazování byla 1 °C/h. Bylo zjištěno, že pevnost v tahu stejně jako ostatní mechanické vlastnosti s klesající teplotou klesala. Bylo to zapříčiněné vznikáním větších ledových krystalků, které poškodily buněčnou strukturu. Pevnost v tahu při teplotě – 25 °C klesla o 10 % ve směru tangenciálním a v radiální o 9 %. Dále bylo zjištěno, že pevnost v tahu klesá více při pomalém zmrazení než při rychlém. Rychlé zmrazování (10 °C/h) nemělo na pevnost v tahu téměř žádný vliv. Avšak při porovnání s ostatními mechanickými vlastnostmi pevnost v tahu s klesající teplotou byla nejméně poškozena (obr.14) (Szmütku et al. 2013b).



Obr. 14 Změny mechanických vlastností za nízkých teplot (Szmütku et al. 2013b)

3.4.2.3 Ohyb

Modul pružnosti

Szmutku et al (2013b) uvádějí, že zmrazení na 15–45 minut v teplotním rozmezí -140 °C do -20 °C mají na snížení modulu pružnosti jen malý vliv. Jedním z důležitých faktorů u působení na modul pružnosti je rychlost zmrazování, kterou je důležité vzít v úvahu kvůli vytváření ledových krystalků, kde rychlost zmrazování určuje jejich velikost. Při pomalém zmrazování vznikají větší krystalky, což způsobuje poškození buněčné struktury a tím pádem i poškození pevnosti dřeva.

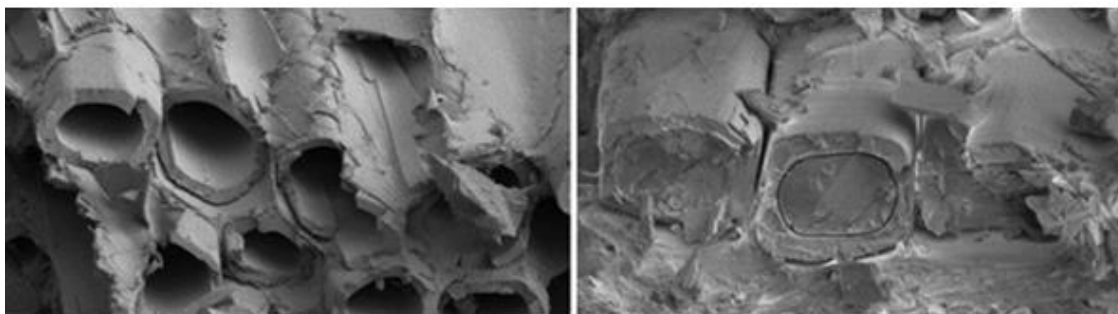
Szmutku et al (2013b) dospěli ve své studii k závěru, že rychlé zmrazování dřeva (10 °C/hodinu) neovlivnilo nijak pevnost dřeva. Při pomalém zmrazování (1 °C/hodinu) byl naměřen pokles téměř všech mechanických vlastností modulu pružnosti o 24 %, pevnost v ohybu o 20 %, pevnost v tlaku o 31 % a v tahu asi o 10 %. Obě zkoušky probíhaly v klimatické komoře, kde byly mrazeny na -25 °C, poté týden drženy ve zmrazeném stavu a následně sušeny na vlhkost 12 %.

Ohybové vlastnosti

Teplota a vlhkost dřeva jsou dva faktory, které vysoce ovlivňují pevnost dřeva. V předchozích studiích byla ovšem pevnost dřeva při extrémně nízkých teplotách (-100 °C až -196 °C). Zhao et al. (2015) se ve své studii zabývá ohybovými vlastnostmi dřeva s pěti různými úrovněmi vlhkosti (nasyčené vodou, neupravované, s nasycenými vlákny, sušené na vzduchu a sušené uměle v sušárnách). Vzorky byly zkoumány mezi teplotami +20 °C až -196 °C za účelem zjištění změn ohybových vlastností. Na vzorky byla použita bříza o průměrné vlhkosti 67 %. Pět vzorků bylo označeno značkami GW – dřevo neupravované (vlhkost 67 %), WS – dřevo nasycené vodou (vlhkost 136 %), FSP – s nasycenými vlákny (vlhkost 29 %), AD – sušené na vzduchu (vlhkost 12 %), OD – vzorky, které byly sušeny v sušárně (vlhkost cca 0 %). Na vzorky bylo použito 7 teplotních hladin: 20 °C, 0 °C, -30 °C, -70 °C, -110 °C, -160 °C, -196 °C.

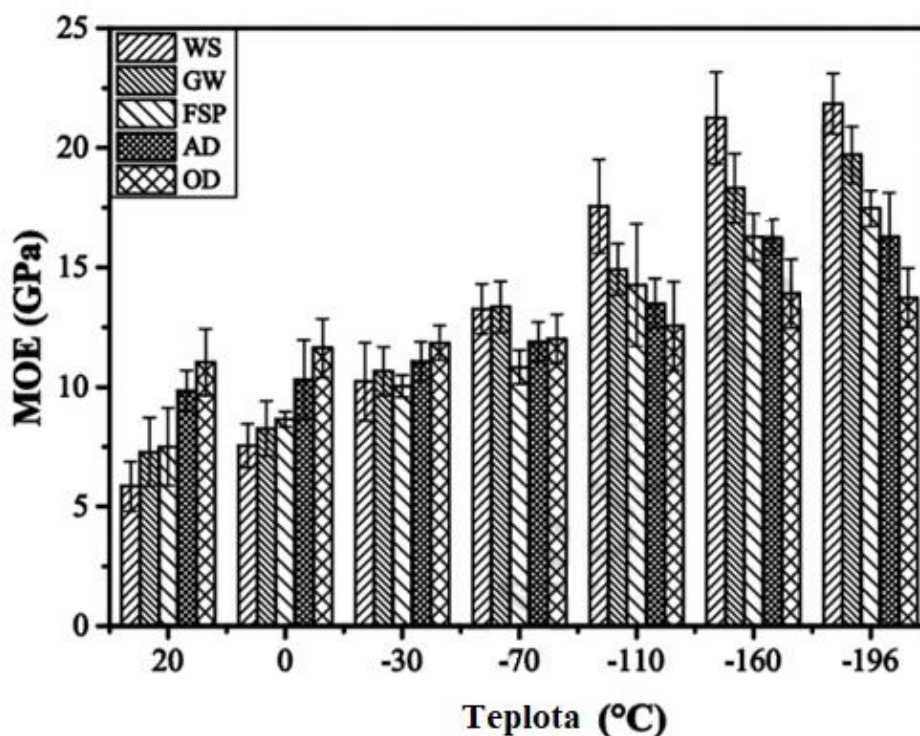
Vzorky vystavené nízkým teplotám byly následně porovnávány se vzorky, které byly vystaveny pokojové teplotě (20 °C). Ohybová pevnost a modul pružnosti se začaly s klesající teplotou zvyšovat. Po snížení teploty z 20 °C na -196 °C byl největší nárůst ohybové pevnosti zpozorován u dřeva nasyceného vodou. Dá se říct, že čím byla vyšší vlhkost dřeva, tím více a rychleji vzrostla při nízkých teplotách pevnost v ohybu a modul pružnosti.

Když byla vlhkost nad nasycením vláken, zmrzlá volná voda v lumenech způsobila velký nárůst ohybové pevnosti a modulu pružnosti (obr.15).



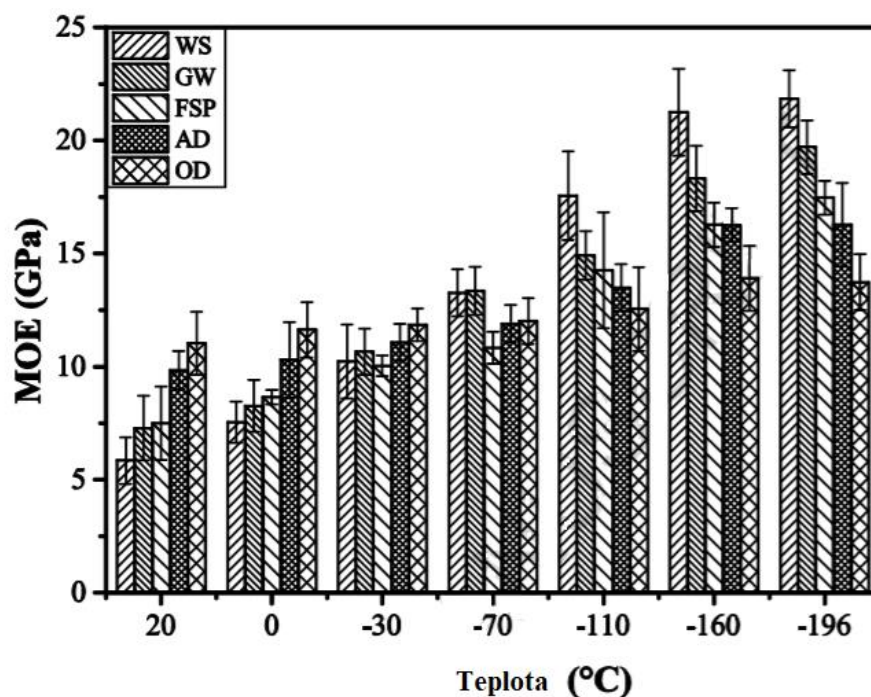
Obr. 15 Mikroskopické porovnání zmražených vzorků sušeného v sušárně (vlevo) a nasyceného vodou (Zhao et al., 2015)

Na obrázku 16 jsou opět vyobrazeny všechny typy vzorků při různých teplotách, ovšem se změnou modulu pružnosti. Z obrázku je patrné, že vyšší vlhkost při nižších teplotách zvyšovala ohybovou pevnost.



Obr. 16 Vliv nízké teploty na modul pružnosti (Zhao et al., 2015)

Stejný princip je vidět na obrázku 17, kde je zobrazena změna meze pevnosti u vzorků za různých teplot.



Obr. 17 Vliv nízké teploty na mez pevnosti (Zhao et al., 2015)

3.5 Ochrana dřeva vůči působení teplot a vlhkosti

Hlavním cílem ochrany dřeva je omezení vlivu vnějších podmínek na jeho minimum. Dřevo musí být ochráněno zejména vůči kolísání teplot, vlhkosti a napadením biologickými škůdci. Dále je to ochrana proti slunečnímu záření nebo extrémně nízkým teplotám. Pro ochranu dřeva se používají tři základní metody ochrany: 1) Suchá ochrana – Tato metoda spočívá v udržování okolních podmínek vhodných pro použité dřevo. Okolní podmínky by neměly přesahovat kritické podmínky pro napadení biologickými škůdci. Dřevo, které má svou vlhkost pod 12 %, má vůči biologickým škůdcům přirozenou ochranu. 2) Konstrukční ochrana – Při této metodě je použitý dřevěný materiál (např. při konstrukci staveb) uložen tak, aby mohl volně proudit vzduch a probíhala výměna vzduchu. Při konstrukci musí být zajištěno větrání a platí to i při rekonstrukcích 3) Třetí metodou je ochrana chemická, při které jsou na dřevo použité různé chemické roztoky (Šefců et al., 2000).

Zvyšování trvanlivosti dřeva

Trvanlivost dřeva se zvyšuje fyzikálními, chemickými anebo biologickými metodami (tab. 7). Správné trvanlivost dřeva je třeba dosáhnout takovou metodou, která

nezatěžuje životní prostředí a upravené dřevo není zdraví škodlivé. Realizují se formou fyzikální, konstrukční, chemické anebo modifikační ochrany dřeva.

Tab. 7 Zvyšování trvanlivosti dřeva (Reinprecht, 2008).

Princip ochrany dřeva	Podstata technologie
Přírozená trvanlivost	Aplikace odolnějšího druhu dřeva (dub)
Expoziční zatížení	Trvale suchý stav, trvale mokrá stav, bariéra vůči degradačním vlivům, Atmosféra nevhodná pro život škůdců.
Aplikace chemických látek	Biocidy, feromony, repelenty, retardéry hoření, živice (hydrofobizace dřeva), mineralizace a další.
Modifikace	Chemická úprava, termální úprava, enzymatická úprava
Biokontrola	Antagonistické organismy vůči dřevokazným houbám a hmyzu.

Třídy ohrožení dřeva

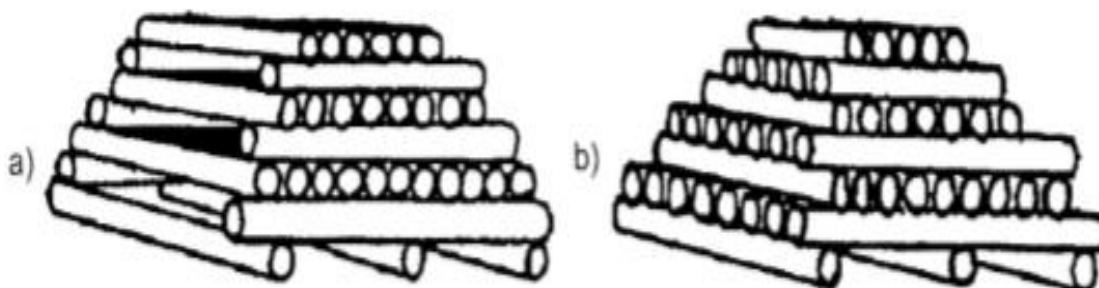
Dále je dřevo děleno podle ohrožení do pěti skupin:

- 1) Třída ohrožení 1 – dřevo je v interiéru, pod střechou, není v kontaktu se zemí a jeho vlhkost je maximálně 20 %,
- 2) Třída ohrožení 2 – dřevo není ve styku se zemí, je chráněno před větrnými vlivy, možné přechodné navlhnutí, jeho vlhkost ojediněle překročí 20 %,
- 3) Třída ohrožení 3 – dřevo není ve styku se zemí, není chráněno před větrnými vlivy, jeho vlhkost často přesahuje 20 %,
- 4) Třída ohrožení 4 – dřevo je ve styku se zemí anebo sladkou vodou, jeho vlhkost je trvale vyšší jak 20 %,
- 5) Třída ohrožení 5 – tato třída znamená, že je dřevo ve stálém styku se slanou vodou.

Suchá ochrana

Suchá ochrana vychází z toho, že škůdci ve dřevě potřebují k životu vodu. Je založena na poznacích o životních podmínkách dřevokazných hub, plísní a dřevokazného hmyzu. Suchá ochrana je složena ze 3 částí: těžba, přeprava a skladování.

To je nejlepší provádět v těžkých ročních obdobích, které jsou méně vhodné až nevhodné pro aktivitu biologických škůdců. Intenzita vysušení závisí také na typu skládky (obr. 18). Kulatina by se měla skladovat ve stínu, aby sluneční paprsky nezpůsobovali vlhkostní napětí a trhliny (Reinprecht, 2008).



Obr. 18 Typy skládky (a. přeložená kulatina, b. křížové uspořádání v řadách)
(Reinprecht, 2008)

Mokrý ochrana

Principem mokré ochrany je udržování vlhkosti ve dřevě na hranici maximální kritické vlhkosti nebo nad ní. Při této vlhkosti neobsahuje dřevo potřebný kyslík pro život dřevokazného hmyzu a hub. Například aktivita hub se zastavuje při snížení objemového podílu kyslíku ve dřevě pod hranici 5 – 20 %. To znamená, že u dřevin s vyšší hustotou se tato podmínka splní již při nižší vlhkosti než u dřevin pórovitějších. Nejčastěji se ve dřevozpracujících závodech používá metoda postřiku vodou anebo ponoření pod hladinu vody. Dále jsou dnes již méně využívané speciální metody jako je uložení do vlhkých pilin, uložení do země, zmrazování, nátěry čel čerstvé kulatiny. Zajímavou technologií je uložení kulatiny do folií (Reinprecht, 2008).

Aplikace ochranných prostředků

Třída ohrožení určuje, jaký typ ochrany musí být na dřevo použit. Dalšími faktory jsou vlhkost a použitý druh dřeva. Při vybírání způsobu aplikace se dbá na nejmenší zatížení životního prostředí. Pro první třídu lze použít jakoukoli aplikaci, pokud není uvedené žádné omezení pro daný prostředek. Stejně tak pro druhou třídu je možný jakýkoliv způsob aplikace. U třetí třídy závisí na druhu dřeva. Při této třídě je doporučována vakuotlaková impregnace nebo dlouhodobé máčení (až několik dnů). Při

třídě ohrožení čtyři se využívá podtlakových a přetlakových způsobů impregnace (Šefců et al., 2000).

Metody impregnace dřeva

Impregnace znamená dostání co nejvíce ochranných prostředků. Existuje mnoho způsobů impregnace dřeva. Dřevo může být impregnováno přirozeným pohybem kapalin, anebo tlakovým gradientem. Při impregnaci přirozeným pohybem se používá dřevo, které je čerstvé anebo plně nasycené vodou. Tlakový gradient funguje na principu snížení nebo zvýšení tlaku, což urychluje pohyb kapalin v porézním systému dřeva. Materiál musí být před impregnací řádně očištěn. Dále je impregnace dělena na metody podle účinnosti ochrany na povrchovou, polohloubkovou (ponořením a máčením na 1 – 48 hodin) nebo hloubkovou (vakuová a vakuotlaková).

a) Povrchová impregnace

Tady metoda se provádí buď nátěrem, anebo nástřikem. Není příliš účinná, proto se používá spíše jako pomocná k ostatním.

b) Infúzní metoda

Při této metodě jsou použité injekční stříkačky, které jsou propojené hadičkou s nádobou, ve které je impregnační kapalina. Není třeba složité technické vybavení, impregnační kapalina stéká přímo do vyvrtaného otvoru ve dřevě. Nedochozí zde k odpařování díky přímému vstupu kapaliny do dřeva. Tato metoda je časově náročná a používá se při menších objektech.

c) Máčení

Spočívá v ponoření do kapaliny za atmosférického tlaku v impregnační kapalině. Metoda je dlouhá, vyžaduje dlouhé ponoření a je zde omezený příjem kapaliny kvůli vzduchu obsaženému v dutinách dřeva. Nevýhodami je bobtnání a sesychání dřeva a také vysoké odpařování rozpouštědel. Nepoužívá se u estetických předmětů.

d) Vakuová impregnace

Dřevo je ponořeno za sníženého tlaku. Nevyžaduje tolik času pro maximální příjem impregnačních látek jako máčení. Díky odsávání vzduchu vzniklému rozdílem mezi sníženým tlakem a atmosférického tlaku kapalina lépe proniká do dřeva. Z hygienického

hlediska je tento způsob lepší, kvůli neodpařování rozpouštědel do okolí. Nevýhodou je, že není často tak velká potřebná nádoba.

e) Impregnace za sníženého tlaku v plastovém obalu

Předmět není umístěn ve vakuové nádobě, ale v zatavené fólii. Účinnost je podobná jako u impregnace vakuové. Metoda se využívá na předměty, které jsou objemné a tvarově specifické. Spotřeba impregnační kapaliny je menší než u vakuové impregnace (Šefců et al., 2000).

Další metody ochrany dřeva

a) Pomocí insekticidů a fungicidů ve formě aerosolů

Jsou využívány různé chemické látky (v dnešní době především pyrethroidy), ale nehubí larvy dřevokazného hmyzu a mají pouze okamžitý účinek. Netvoří preventivní ochranu, proto musí být doprovázeny jinými metodami.

b) Pomocí toxických plynů

Tato metoda také nemá preventivní účinky a je zde nutná doprovodná další chemická preventivní ochrana. Používá se již na napadený kus dřeva a za pomoci jedovatých plynů hubí dřevokazný hmyz a houby. Při ní je těžký výběr toxického plynu, a to z důvodu, že některé jsou pro člověka velice nebezpečné (např. kyanovodík) (Šefců et al., 2000).

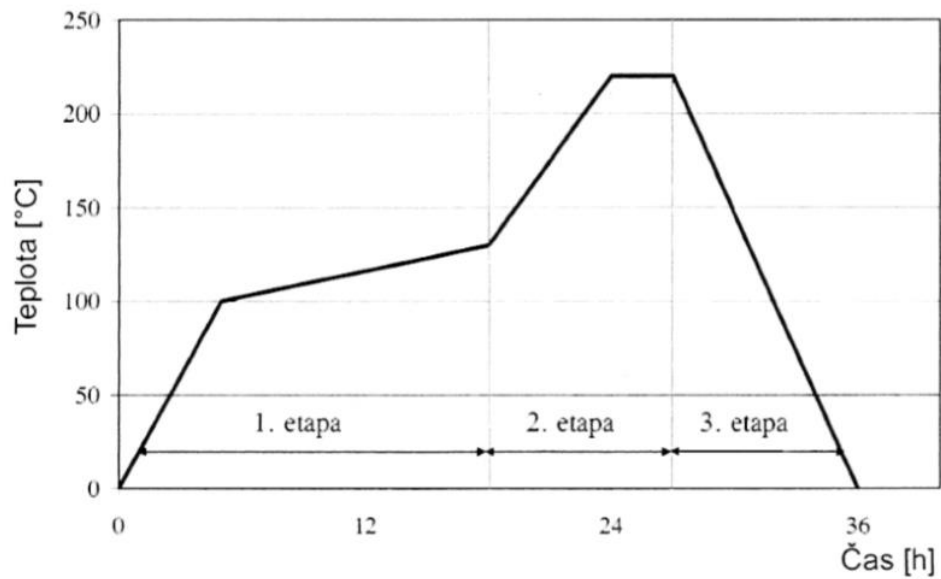
c) Tepelná ochrana

Tento proces probíhá v peci za vysokých teplot. Provádí se pomocí páry s méně než 3 – 5 % kyslíku, bez tlaku a rychlostí vzduchu nejméně 10 m/s. Tepelné zpracování mění chemické složení dřeva, což vede ke snížení hmotnosti. Snižuje se prostupnost vlhkosti a zvyšuje rozměrová stabilita. Zvyšuje se ochrana proti hnilobě a škůdcům. Nevýhodou je snížení mechanických vlastností a změna barvy (Esteves a Pereira, 2009).

Evropě se používají hlavně následující technologie pro výrobu termodřeva: ThermoWood proces, Plato proces, OHT proces, Royal proces, retifikační proces.

Thermowood proces je složen ze 3 etap (obr. 19). V první etapě se teplota v sušárně rychle zvyšuje na 100 °C a poté pozvolna stoupá do 130 °C. Jako sušící prostředek se používá horký vzduch nebo pára. V této etapě je dřevo vysoušeno do nulové vlhkosti. V druhé etapě je teplota zvýšena až na 230 °C v rozmezí 2 – 3 hodin. Výška teploty a čas

závisí na požadovaném druhu termodřeva. V poslední etapě je dřevo ochlazováno a při teplotě 80 °C – 90 °C se dřevo ještě zvlhčuje a to tak aby výsledná vlhkost byla 4 – 7 % (Reinprecht, 2008).



Obr. 19 Proces ThermoWood (Reinprecht, 2008)

4. Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala chováním mechanických a fyzikálních vlastností při vlivu vlhkosti a vystavování vysokým a nízkým teplotám.

U fyzikálních vlastností za vysokých teplot byl vůči vlhkosti zaznamenán významný vliv, a to zejména z pohledu bobtnání a sesychání, díky čemu byla zlepšena rozměrová stabilita. U nízkých teplot bylo vyzorováno, kvůli obsahu vlhkosti, porušení buněčné struktury. U chemické struktury dřeva docházelo v obou typech namáhání teplem k degradaci, avšak voda zmrzlá ve dřevě stále, mechanické vlastnosti zvyšuje. Jako další odvozená vlastnost byla u dřeva zkoumána barva, dřevo nejvíce nasycené vodou tmavlo nejintenzivněji. U předmrazeného a následně sušeného dřeva došlo k mírnému snížení světlosti.

Dále se práce zabývala mechanickými vlastnostmi. Po vystavení ve vysokých teplotách klesaly, avšak bylo zjištěno, že velký vliv na ně mají i rychlost ohřevu a vlhkost. Při větší vlhkosti u dřeva vystaveného tepelnému zatížení docházelo k menšímu poškození mechanických vlastností než u menší vlhkosti. Při vystavení teplotám přes 200 °C docházelo k významným změnám na modulu pružnosti. Mechanické vlastnosti při nízkých teplotách se také zhoršují. Vzorky nasycené vodou vykazovaly při nízkých teplotách větší nárůst modulu pružnosti a ohybové pevnosti než vzorky, které měly menší vlhkost. Z toho vyplývá čím více vlhkosti obsahuje dřevo a čím nižší je teplota, tím se mechanické vlastnosti zlepšují.

Přínos pro stavařské odvětví je při umístění konstrukcí, kde je dřevo namáháno vlhkostně teplotními vlivy, jakou jsou například extrémní mrazy nebo naopak horka. Při použití dřeva nasyceného vodou v nízkých teplotách v okolním prostředí je dobré použít dřevo zmrazené, tak aby voda v něm nerozmrzla, protože zvyšuje jeho mechanické vlastnosti.

5. Literatura

AYDIN, I., COLAKOGLU, G. (2005). Effects of surface inactivation, high temperature drying and preservative treatment on surface roughness and colour of alder and beech wood. *Applied Surface Science* 252(2), 430-440 [cit. 2020.04.10] DOI: 10.1016/j.apsusc.2005.01.022. Dostupné z:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016943320500070X>

BEKHTA, P., NIEMZ, P., (2003). Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. *Holzforschung* 57(5), 539-546 [cit. 2020.03.14] DOI: 10.1515/HF.2003.080. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/journals/hfsg/57/5/article-p539.xml>

ČEKOVSÁ, H., GAFF, M., OSVALD, A., KAČÍK, F., KUBŠ, J., KAPLAN, L. (2017). Fire resistance of thermally modified spruce wood, *Bioresources* 12(1), 947-959 [cit. 2020.03.10] DOI: 10.15376/biores.12.1.947-959 Dostupné z:

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/fire-resistance-of-thermally-modified-spruce-wood/>

DINWOODIE, J. (2000). *Timber: Its nature and behaviour*. 3. vyd. New York: Taylor & Francis, 272 s. ISBN 0-419-23580-9.

ESTEVEZ, B. M., PEREIRA, H. M. (2009) Wood modification by heat treatment: a review. *BioResources* 4(1), 370-404 [cit. 22.04.2020] Dostupné z:

https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_04/BioRes_04_1_0370_Esteves_P_Wood_Mod_Heat_Treatment_Rev_367.pdf

GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ J. (2009). *Nauka o dřevě*. 3. vyd, nezměněn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 179 s. ISBN 978-80-7375-312-2

HILL, C. (2006). *Wood modification: Chemical, Thermal and Other Processes*. Chichester: John Wiley & Sons, 260 s. ISBN 0-470-02172-1.

HOLEČEK, T., GAŠPARÍK, M., LAGANA, R., BORŮVKA, V. (2017). Measuring the Modulus of Elasticity of Thermally Treated Spruce Wood using the Ultrasound and Resonance Methods. *BioResources* 12(1), 819-838 [cit. 2020.03.10] DOI: 10.15376/biores.12.1.819-838. Dostupné z:

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/measuring-the-modulus-of-elasticity-of-thermally-treated-spruce-wood-using-the-ultrasound-and-resonance-methods/>

HORÁČEK, P. (1998). Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 128 s. ISBN 80-715-7347-7

JIANG, J., LU, J., ZHOU, Y., ZHAO Y. (2014). Compression Strength and Modulus of Elasticity Parallel to the Grain of Oak Wood at Ultra-low and High Temperatures, *BioResources* 9(2), 3571-3579 [cit 2020.04.28] DOI: 10.15376/biores.9.2.3571-3579 Dostupné z:

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/compression-strength-and-modulus-of-elasticity-parallel-to-the-grain-of-oak-wood-at-ultra-low-and-high-temperatures/>

JUREČKA, P. (2011) *Proudění a sdílení tepla: Cvičení do předmětu „Sdílení tepla a proudění“*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 125 s.

LIU, H., GAO, J., CHEN, Y. (2015). Effects of pre-freezing prior to drying upon some physical and mechanical properties of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* wood, *BioResources* 10(4), 6417-6427 [cit. 2020.04.10] DOI: 10.15376/biores.10.4.6417-6427. Dostupné z:

<https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/effects-of-pre-freezing-prior-to-drying-upon-some-physical-and-mechanical-properties-of-eucalyptus-urophylla-x-eucalyptus-grandis-wood/>

LYSÝ, F., JÍRŮ, P. (1954). *Nauka o dřevě*. 1.vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 758 s.

MATOVIČ, A. (1993). *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*. Brno: Vysoká škola zemědělská, 212 s. ISBN 80-7157-086-9.

MISSIO, A. L., DE CADEMARTORI, P. H. G., MATTOS, B. D., SANTINI, E. J., HASELEIN, C. R., GATTO, D. A. (2016). Physical and mechanical properties of fast-growing wood subjected to freeze-heat treatments, *BioResources* 11(4), 10378-10390 [cit. 2020.04.10] DOI: 10.15376/biores.11.4.10378-10390. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/physical-and-mechanical-properties-of-fast-growing-wood-subjected-to-freeze-heat-treatments/>

PONCSÁK, S., KOCAEFE, D., BOUAZARA, M., PICHETTE, A. (2006). Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch (*Betula papyrifera*). *Wood Sci Technol* 40(8), 647-663 [cit. 2020.03.12] DOI: 10.1007/s00226-006-0082-9. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-006-0082-9>

POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1993). *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd., Bratislava: Príroda. 1993, 486 s. ISBN 80-070-0600-1

-
- REINPRECHT, L. (2008). *Ochrana dřeva*. Zvolen: Technická univerzita ve Zvolenu, 453 s. ISBN: 978-80-228-1863-6
- SINHA, A. (2013). Thermal degradation modeling of flexural strength of wood after exposure to elevated temperatures. *Wood Material Science and Engineering* 8(2), 111-118 [cit.2020.03.12] DOI: doi.org/10.1080/17480272.2012.753950. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17480272.2012.753950?tab=permissions&scroll=top>
- SÖZBIR, G. D., BEKTAS, I., AK, A. K. (2019) Influence of combined heat treatment and densification on mechanical properties of poplar wood. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 21(4), 481-492 [cit. 2020.03.12] DOI: 10.4067/S0718-221X2019005000405 Dostupné z: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0718-221X2019000400481&lng=en&nrm=iso
- SZMUTKU, M. B., CAMPEAN, M., BEDELEAN, B. (2013b) Upon the drying of frozen spruce timber. *PRO LIGNO.*, 9 (4), 700-708.
- SZMUTKU, M. B., CAMPEAN, M., POROJAN, M. (2013a) Strength reduction of spruce wood through slow freezing. *Eur. J. Wood Prod*, 71, 205–210 [cit. 2020.04.12] DOI: 10.1007/s00107-013-0667-6. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Strength-reduction-of-spruce-wood-through-slow-Szmutku-Campean/c67c28dc167ffbe7c3bfad60f39247b8c4f7c3cc>
- SZMUTKU, M. B., CÂMPEAN, M., SANDU, A. V. (2011) Microstructure modifications induced in spruce wood by freezing. *PRO LIGNO.*, 7(4), 26-31.
- ŠEFCŮ, O., VINAŘ, J., PACÁKOVÁ M. (2000) *Metodika ochrany dřeva*. Praha: Nakladatelství Jalna, 68 s. ISBN: 80-86234-14-2
- TIME, B. (1998) *Hygroscopic Moisture Transport in Wood*. Trondheim: Noerwegian University of Science and Technology, 216 s.
- WANGAARD, F. (1950) *The mechanical properties of wood*. New York: John Wiley & Sons, 377 s.
- ZHAO, L., JIANG, J., LU, J., ZHAN, T. (2015) Flexural Property of Wood in Low Temperature Environment. *Cold Regions Science and Technol* 116, 65-69 [cit.2020.04.20] DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.04.001 Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Flexural-property-of-wood-in-low-temperature-Zhao-Jiang/1e3aea673cd0ecc5c8e88d73707cf3195d1c671f>
-