

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Mechanické vlastnosti dřeva vystaveného
teplotnímu zatížení**

Diplomová práce

Autor: Bc. Jakub Hlaváček

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Jakub Hlaváček

Dřevařské inženýrství

Název práce

Mechanické vlastnosti dřeva vystaveného teplotnímu zatížení

Název anglicky

Mechanical properties of wood exposed to alternating temperatures

Cíle práce

Cílem práce je experimentální zkoumání mechanických vlastností dřeva vystaveného teplotnímu zatěžování (střídání nízkých i vysokých teplot) a následným porovnáním s dřevem bez teplotního zatížení.

Metodika

1. Zpracování literární rešerše o fyzikálních a mechanických vlastnostech dřeva a jejich vztahu k působení nízkých a vysokých teplot, jako i změnách zapříčiněných střídavým působením nízkých a vysokých teplot.
2. Příprava, třídění a značení zkušebních těles.
3. Určení základních fyzikálních vlastností dřeva.
4. Experimentální zjišťování vlivu střídavého působení různých nízkých a vysokých teplot na vybrané mechanické vlastnosti dřeva. Porovnání vybraných mechanických vlastností teplotně zatěžovaného dřeva s vlastnostmi dřeva bez vlivu střídání teplot.
5. Statistické zpracování výsledků v textové, tabulkové a grafické podobě.
6. Diskuze a závěry.

Doporučený rozsah práce

65 – 75

Klíčová slova

nízké teploty, vysoké teploty, teplotní zatížení, mechanické vlastnosti

Doporučené zdroje informací

- BODIG, J., JAYNE, B. A. Mechanics of Wood and Wood Composites. Van Nostrand Reinhold Company New York, Cincinnati, Toronto, London, Melbourne, 1982, 712 s.
- HORÁČEK, P. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I., Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998, 126 s.
- KAFKA, E., COUFAL, R., DRAHOŠ, V. ČERMÁK, J. 1989. Dřevářska Příručka, I. část, Praha, SNTL, 483 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
- NICHOLAS, D. D. Wood Deterioration and Its Prevention by Preservative Treatments: Degradation and Protection of Wood. Syracuse University Press, 1982, 380 s. ISBN: 978-0-81562-285-7
- NOVOTNÝ, J., TOBOLKA, Z. Stavební materiály : určeno pro stud. fak. stavební. Praha: ČVUT, 1991.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva, Bratislava: Príroda a. s., 485 s.
- ROWELL, R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 2. vydání, Boca Raton: CRC Press, 2012, 703 s. ISBN: 978-1-43985-380-1
- 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

2018/19 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 13. 3. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 03. 04. 2019

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma mechanické vlastnosti dřeva vystaveného teplotnímu zatížení vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a použil jsem jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že zveřejněním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V..... dne.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Miroslavovi Gašparíkovi, PhD. za trpělivost, ochotu, spolupráci, a především za cenné rady při psaní této práce. Rovněž bych chtěl poděkovat za podporu a trpělivost při studiu vysoké školy svým rodičům a sourozencům.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem střídání teplot na statický a dynamický ohyb smrkového dřeva. V druhé praktické části se zkoumá vliv střídavé teploty na vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Měření probíhalo na vzorcích, který nebyly teplotně zatížené nebo prošly jedním cyklem (12 hodin mražení při teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ s následným 12hodinovým ohřívání při teplotě $70\text{ }^{\circ}\text{C}$) nebo dvěma cykly (mražení – ohřívání – mražení – ohřívání). Po vystavení vzorků teplotnímu zatížení byl pro každý cyklus teplotního zatížení měřen třibodový statický ohyb a dynamický ohyb (rázovou houževnatost dřeva). Po prvním teplotním cyklu od referenčních vzorků vzrostla ohybová pevnost o 36 %, modul pružnosti o 12,3 % a rázová houževnatost o 26 %. Hodnota průhybu klesla o 14 % oproti referenčním vzorkům. Po druhém teplotním cyklu od referenčních vzorků vzrostla ohybová pevnost o 25,4 %, modul pružnosti o 4,8 % a rázová houževnatost o 5,6 %. Hodnota průhybu klesla o 18,6 % oproti referenčním vzorkům. Při mražení se vlhkost dřeva zvětšila přibližně o 2–3 % a hustota dřeva o 0,5 %. Při ohřívání se vlhkost dřeva zmenšila přibližně o 70 % a hustota dřeva o 4,6 %. Protože začínají být ve světě čím dál více populární stavby ze dřeva, musí všechny tyto stavby splňovat určité hodnoty mechanických vlastností, které se různými faktory mohou měnit. Jedním z těchto faktorů je právě teplota, která mechanické vlastnosti ovlivňuje. Proto je důležité zkoumat vliv teploty na mechanické vlastnosti dřeva.

Klíčová slova

Nízké teploty, vysoké teploty, teplotní zatížení, mechanické vlastnosti

Abstract

This diploma thesis deals with the influence of temperature changes on static and dynamic bending of spruce wood. The second practical part examines the influence of alternating temperature on selected physical and mechanical properties of wood. Measurements were made on samples that were not under any temperature stress or passed through one cycle (12 hours of freezing at -25°C followed by 12 hours of heating at 70°C) or two cycles (freezing - heating - freezing - heating). After subjecting the samples to temperature stress, a three-point static bend and a dynamic bend (impact toughness of wood) were measured for each temperature stress cycle. After the first temperature cycle, the bending strength increased by 36%, the modulus of elasticity by 12.3% and the impact strength by 26%. Deflection value decreased by 14% compared to reference samples. After the second temperature cycle the bending strength increased by 25.4%, the modulus of elasticity by 4.8% and the impact strength by 5.6%. The deflection value decreased by 18.6% compared to the reference samples. When freezing, wood moisture was increased by about 2-3% and wood density by 0.5%. When heating, wood moisture was decreased by about 70% and wood density by 4.6%. As timber structures are becoming more and more popular in the world, all of these structures must meet certain mechanical properties which can change with different factors. One of these factors is the temperature which affects the mechanical properties. Therefore, it is important to examine the effect of temperature on the mechanical properties of wood.

Key words

Low temperatures, high temperatures, temperature stress, mechanical properties

Obsah

1. ÚVOD	13
2. CÍL PRÁCE	14
3. VLASTNOSTI DŘEVA	15
4. MECHANICKÉ VLASTNOSTI	15
4.1. PRUŽNOST A PEVNOST	19
4.1.1. <i>Pružnost</i>	19
4.1.1.1. Poissonovo číslo.....	20
4.1.1.2. Modul pružnosti.....	21
4.1.2. <i>Pevnost</i>	30
4.1.2.1. Pevnost v tlaku.....	32
4.1.2.2. Pevnost v tahu	36
4.1.2.3. Smyková pevnost dřeva.....	40
4.1.2.4. Pevnost v ohybu.....	44
4.2. HOUŽEVNATOST DŘEVA.....	46
4.3. TVRDOST	48
5. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	50
5.1. HUSTOTA	50
5.2. VLHKOST DŘEVA	52
5.3. TEPELNÉ VLASTNOSTI DŘEVA	56
5.3.1. <i>Vliv teploty na vlastnosti dřeva</i>	59
6. METODIKA	67
6.1. PŘÍPRAVA MATERIÁLU.....	67
6.2. TEPLOTNÍ ZATĚŽOVÁNÍ.....	69
6.2.1. <i>Referenční vzorky</i>	69
6.2.2. <i>Jeden cyklus teplotního zatížení</i>	69
6.2.3. <i>Dva cykly teplotního zatížení</i>	70
6.3. MĚŘENÍ OHYBOVÝCH CHARAKTERISTIK	71
6.3.1. <i>Statický ohyb</i>	71

6.3.2. <i>Dynamický ohyb</i>	72
6.4. HODNOCENÍ	73
7. VÝSLEDKY A DISKUZE	74
7.1. FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	74
7.2. MECHANICKÉ VLASTNOSTI	75
7.2.1. <i>Statistické vyhodnocení</i>	75
7.2.2. <i>Statický ohyb</i>	77
7.2.3. <i>Rázová houževnatost</i>	82
8. ZÁVĚR	85
9. SEZNAM LITERATURY	87

Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

Obr. 1 Deformace podélná (ΔL) a příčná (Δb) při působení síly v tlaku, (Matovič, 1993)	17
Obr. 2 Průhyb při zatížení v ohybu (Matovič, 1993).....	17
Obr. 3 Obecný tvar pracovního diagramu (Požgaj a kol., 1993).....	19
Obr. 4 Možnosti přikládání sond při měření ultrazvukem (Kloiber a Kotlínová, 2006)..	24
Obr. 5 Graf inverzní hodnoty rychlosti šíření ultrazvukové vlny ve vztahu k orientaci letokruhů na příčném řezu (Ross a Hunt, 2000).....	25
Obr. 6 Vliv vlhkosti na šíření zvuku rovnoběžně s vlákny (Požgaj a kol., 1993).....	26
Obr. 7 Schéma typické sestavy pro měření rezonanční metodou (Klapálek, 2004).....	27
Obr. 8 Schéma měření obdélníkového vzorku pro příčný (mimo rovinný) ohyb (Klapálek, 2004)	28
Obr. 9 Schéma měření u obdélníkového vzorku pro příčný ohyb v rovině (Klapálek, 2004)	28
Obr. 10 Schéma měření u obdélníkového vzorku pro kroucení (Klapálek, 2004).....	29
Obr. 11 Schéma měření u obdélníkového vzorku pro podélné kmitání (Klapálek, 2004)	29
Obr. 12 Způsoby zatížení tělesa při zkoušce v tlaku napříč vláken. (Matovič, 1993).....	35
Obr. 13 Tvar a rozměry pro zkoušku tahem ve směru vláken.....	37
Obr. 14 Tvar zkušební tělesa na pevnost v tahu napříč vláken.....	39
Obr. 15 Zkušební těleso (ČSN 49 0118, 1980)	42
Obr. 16 Účinek teploty a vlhkosti na pevnost v ohybu při 20 °C (Gerthards, 1982)	61
Obr. 17 Vliv teploty na napětovo – deformační diagram (Bodig a Jayne, 1982)	63
Obr. 18 Vliv teploty na pevnost dřeva (Perelygin, 1965).....	64
Obr. 19 Změna meze hygroskopicity v závislosti na teplotě (Siau, 1984)	66
Obr. 20 Smrkové vzorky.....	67
Obr. 21 Klimatizační komora	68
Obr. 22 Mrazicí box.....	70
Obr. 23 Laboratorní sušárna	71
Obr. 24 Trhací stroj	72

Obr. 25 Charpyho kladivo	73
Obr. 26 Vliv typu zatížení na ohybovou pevnost.....	79
Obr. 27 Vliv typu zatížení na průhyb	80
Obr. 28 Vliv typu zatížení na modul pružnosti v ohybu.....	82
Obr. 29 Vliv typu zatížení na rázovou houževnatost	83

Tabulky

Tab. 1 Poissonova čísla vybraných dřevin (Ugolev, 1975).....	20
Tab. 2 Moduly pružnosti a smykové moduly vybraných dřevin. (Ugolev, 1986)	22
Tab. 3 Průměrná rychlost šíření zvuku v materiálem (Kollman a Coté, 1968).....	23
Tab. 4 Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken pro vybrané dřeviny a vlhkosti 12 % (Ugolev, 1975).....	33
Tab. 5 Konvenční mez pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken (Požgaj a kol., 1993)	35
Tab. 6 Pevnost v tahu ve směru vláken (Ugolev, 1986)	37
Tab. 7 Pevnost dřeva v tahu napříč vláken (Ugolev, 1986)	38
Tab. 8 Mez pevnosti ve smyku (Gandelová a kol., 2009)	41
Tab. 9 Meze pevnosti v ohybu (Ugolev, 1986)	44
Tab. 10 Hodnoty rázové houževnatosti v ohybu (Ugolev, 1986)	47
Tab. 11 Statická a dynamická tvrdost vybraných dřevin (Matovič, 1993)	48
Tab. 12 Rozdělení dřevin podle tvrdosti (Gandelová a kol., 2009)	49
Tab. 13 Rozdělení dřeva podle koeficientu objemového sesychání (Gandelová a kol., 2009)	55
Tab. 14 Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti dřeva (Gandelová a kol., 2009)	56
Tab. 15 Vliv vlhkosti dřeva na měrné teplo (Zejsa a kol., 2014)	57
Tab. 16 Vliv teploty na mechanické vlastnosti dřeva (Gerhards, 1982).....	59
Tab. 17 Vliv teploty na mechanické vlastnosti dřeva (Gerhards, 1982).....	60
Tab. 18 Vlhkost smrkového dřeva	74
Tab. 19 Hustota smrkového dřeva	75
Tab. 20 Statistické vyhodnocení ohybové pevnosti	76
Tab. 21 Statistické vyhodnocení průhybu	76
Tab. 22 Statistické vyhodnocení modulu pružnosti	77

Tab. 23 Statistické vyhodnocení rázové houževnatosti	77
Tab. 24 Průměrné hodnoty ohybové pevnosti.....	79
Tab. 25 Průměrné hodnoty průhybu	80
Tab. 26 Průměrné hodnoty modulu pružnosti v ohybu	82
Tab. 27 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti.....	84

1. Úvod

Dřevo je jedna z nejdůležitějších a nejpoužívanějších přírodních surovin na zemi. Mezi výhody dřeva patří obnovitelnost, estetičnost, rozmanitost textur a barev, akustické vlastnosti, tepelně-izolační vlastnosti a v porovnání hmotnosti s ostatními materiály dobrá pevnost a pružnost. Jako každý jiný materiál má dřevo i své nevýhody, mezi které patří například vyšší schopnost přijímat a odevzdávat vodu, rozměrové změny, nehomogenita, změna mechanických vlastností se změnou vlhkosti a teploty a podléhání abiotickým a biotickým degradacím.

S narůstající oblibou dřevostaveb mezi které patří obytné stavby, altánky, terasy, mosty, dětská hřiště, rozhledny apod. je potřeba, aby všechny tyto konstrukce splňovaly určité hodnoty mechanických vlastností, které se ale vlivem různých faktorů mohou měnit. Jedním z těchto faktorů je právě teplota, při jejíchž změnách dochází, ke změnám mechanických vlastností dřeva. Zkoumání jejího vlivu na mechanické vlastnosti dřeva je proto podstatné a důležité.

Diplomová práce se zabývá tímto vlivem. Velikost vlivu teplotního zatížení na mechanické vlastnosti závisí na hodnotě teploty a vlhkosti, na druhu dřeva a na době působení teplotního zatížení. Při teplotách pod bodem mrazu většina hodnot mechanických vlastností stoupá, po přerušení mražení hodnoty klesají. Nízké teploty způsobují vytváření krystalků ledu v buněčných stěnách. Tyto krystalky tlačí na buněčné stěny, vytvářejí malé trhlinky a způsobují snížení mechanických vlastností dřeva. U teplot do 150 °C dochází díky snížení vlhkosti ke zvýšení mechanických vlastností a u teplot nad 150 °C mechanické vlastnosti trvale klesají a dochází k degradaci dřeva. Při krátkodobém působení vyšších teplot do 150 °C se hodnoty mechanických vlastností po přerušení teplotního zatížení vrací do původních hodnot.

2. Cíl práce

Hlavním cílem této práce je seznámit s problematikou, která se zabývá, jaký má vliv střídavá teplota na fyzikální (vlhkost, hustota) a mechanické vlastnosti (ohybová pevnost, průhyb, modul pružnosti v ohybu a rázová houževnatost) smrkového dřeva. Za účelem zjištění vlivu střídavých teplot na vlastnosti dřeva se budou porovnávat výsledky měřených vzorků po jednom teplotním zatížení a dvou teplotním zatížení se vzorky, které nebyly teplotně zatíženy.

- Teoretický popis zkoumaných vlastností
 - fyzikální vlastnosti (hustota, vlhkost a teplo)
 - mechanické vlastnosti (pružnost, pevnost, houževnatost a tvrdost)
- Zjišťování vlivu střídavých teplot na fyzikální a mechanické vlastnosti smrkového dřeva
 - Příprava a měření vzorku
 - Měření ohybových charakteristik
 - Referenční soubor
 - Jednocyklové teplotní zatížení (mražení (-25 °C), ohřívání (70 °C))
 - Dvouceyklové teplotní zatížení (mražení (-25 °C), ohřívání (70 °C), klimatizování (w 12 %), mražení (-25 °C), ohřívání (70 °C))
 - Porovnání a zhodnocení výsledků

3. Vlastnosti dřeva

Dřevo je jedna z nejpoužívatelnějších přírodních surovin. Je to pevné pletivo stonků dřevin. Jako každý jiný materiál má dřevo své výhody a nevýhody. Mezi výhody patří opracovatelnost, dobré izolační vlastnosti, dobré mechanické vlastnosti atd. Mezi nevýhody patří rozměrová nestálost, vady dřeva, hořlavost, tepelná degradace a další.

Fyzikální a mechanické vlastnosti ovlivňuje především anizotropie, hygroskopicitu, nehomogenitu. Tyto charakteristiky jsou výsledkem chemické a anatomické stavby dřeva.

Anizotropie dřeva: Anizotropie dřeva znamená rozdílnost vlastností materiálu v různých směrech. Je dána orientací buněk ve dřevě a vazbami mezi nimi. U dřeva jsou rozdílné vlastnosti ve směru podélném, radiálním a tangenciálním.

Hygroskopicitu: Hygroskopicitu je schopnost materiálu přijímat a odevzdávat vodu z okolního vzduchu. Způsobuje bobtnání a sesychání a snižování a zvyšování mechanických vlastností dřeva.

Nehomogenita: Neboli nestejnoroďnost znamená, že struktura materiálu není všude stejná. Projevuje se jak na úrovni submikroskopické a mikroskopické (strukturou buněčných stěn a stavbou pletiv), tak i na úrovni makroskopické (jádro, běl, jarní a letní dřevo atd.).

4. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti charakterizují schopnost materiálu odolávat účinku vnějších sil. Mechanické vlastnosti rozdělujeme do tří skupin – základní (pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost dřeva), odvozené (tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu) a technologické (štípatelnost, opotřebovatelnost, impregnovatelnost, ohýbatelnost atd.). Dřevo je anizotropní materiál, tedy podobně jako jeho fyzikální vlastnosti mají i jeho mechanické vlastnosti různé hodnoty v různých směrech. Různé hodnoty mechanických vlastností jsou dány uspořádáním a orientací molekul stavebních látek ve dřevě. Tvar a uspořádání dřevních elementů (tracheid, libriřiformních vláken, směr fibril) a rozdílná orientace kovalentních a

vodíkových vazeb určuje významný rozdíl mechanických vlastností ve směru vláken a ve směru kolmo na vlákna (Gandelová a kol., 2009).

Mechanické namáhání

Mechanické namáhání je děj, při kterém působí mechanické síly nebo jiné činitele namáháním na těleso. Výsledkem tohoto děje jsou dočasné nebo trvalé změny tvaru tělesa. Namáhání rozdělujeme podle fyzikální podstaty na mechanické, vlhkostní, tepelné, elektromagnetické a další, nebo jejich kombinace. Při mechanickém namáhání těleso reaguje na základě vazeb mezi anatomickou stavbou (běl, jádro, jarní, letní dřevo, tracheidy, cévy atd.), chemickou složkami (celulóza, lignin a hemicelulóza) a geometrií tělesa (Požgaj a kol., 1993).

Mechanické namáhání rozdělujeme podle druhu napětí, které v tělese vzniká působením síly na těleso. Lze ho definovat jako velikost vnitřní síly na plochu tělesa (Gandelová a kol., 2009).

- Normálové (kolmé) napětí σ (tah a tlak) – síla působí kolmo na průřezovou plochu tělesa. Je dáno vztahem:

$$\sigma = \frac{F_n}{S} \quad [1]$$

kde: σ – normálové napětí (MPa), F_n – síla, která rovnoměrně působí na plochu tělesa (N), S – plocha tělesa (m^2)

- Tangenciální (tečné) napětí τ (smykové) – síla působí v rovině na průřezovou plochu tělesa. Je dáno vztahem:

$$\tau = \frac{F_t}{S} \quad [2]$$

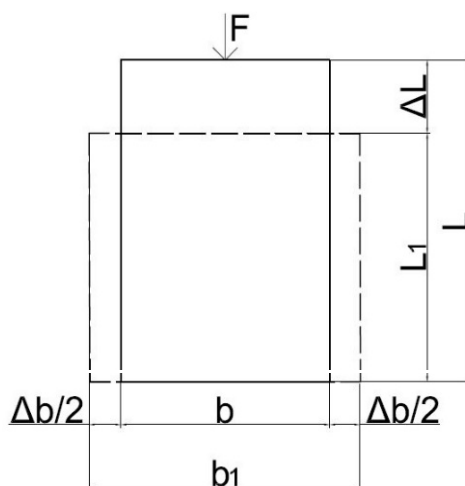
kde: τ – tangenciální napětí (MPa), F_t – síla, která působí rovnoběžně s plochu tělesa (N), S – plocha tělesa (m^2)

- Kombinací (ohyb) – kombinace normálového a tangenciálního napětí
- Ohybový moment (krut)

Deformace

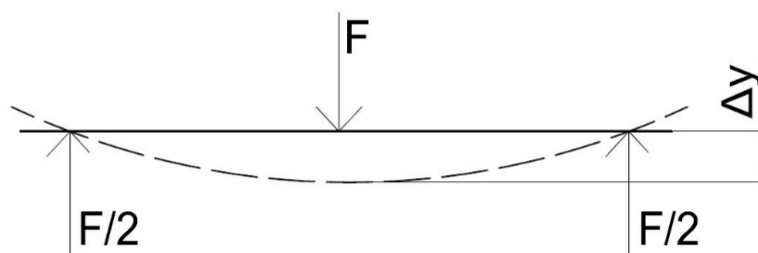
Deformace je změna rozměru, nebo objemu, nebo posunutí rozměru a tím způsobená změna tvaru tělesa, a to díky působení vnějších sil. Prodloužení a zkrácení rozměrů nazýváme normálovou deformací a vzniká při normálovém napětí. Zkosení tělesa nazýváme smykovou deformací a vzniká pomocí tangenciálního napětí.

Rozměrové změny rozdělujeme na podélnou deformaci (rovnoběžně s působící silou) a příčnou deformací (kolmo na působící sílu). Rozdíl mezi původním rozměrem (L/b) a rozměrem po deformaci (L_1/b_1) se nazývá absolutní deformace ($\Delta L/ \Delta b$) (obr.1). To udává, o kolik se těleso zvětšilo/zmenšilo z původních rozměrů. Při tangenciálním napětí dochází k posunu bodu v rovině a ke změně úhlu pomocí působení síly rovnoběžně s plochou tělesa. Při tangenciálním napětí se mění úhly stran, a to je hlavní rozdíl mezi normálovým a tangenciální napětím.



Obr. 1 Deformace podélná (ΔL) a příčná (Δb) při působení síly v tlaku, (Matovič, 1993)

Průhyb – působením silami kolnými na podélnou osu tělesa vzniká odklon od původní vodorovné roviny ve směru síly a označuje se jako průhyb (Δy) (Obr. 2).



Obr. 2 Průhyb při zatížení v ohybu (Matovič, 1993)

Změna objemu – podobně jako změnu rozměru lze vyjádřit i poměrnou změnu objemu (ω) (Matovič, 1993).

Poměrná deformace (ε) je podíl absolutní deformace k původním rozměrům. Poměrnou deformaci dělíme na délkovou a příčnou. Délková deformace je taková, která vzniká rovnoběžně se směrem působící síly. Příčná deformace je taková, která vzniká kolmo na směr působící síly (Matovič, 1993).

Poměrná délková deformace je vyjádřena vztahem:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad [3]$$

Poměrná příčná deformace je vyjádřena vztahem:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta b}{b} \quad [4]$$

kde: ε_1 – poměrná délková deformace, ε_2 – poměrná příčná deformace, ΔL , Δb – absolutní deformace délková/příčná, L , b – původní délkový/příčný rozměry

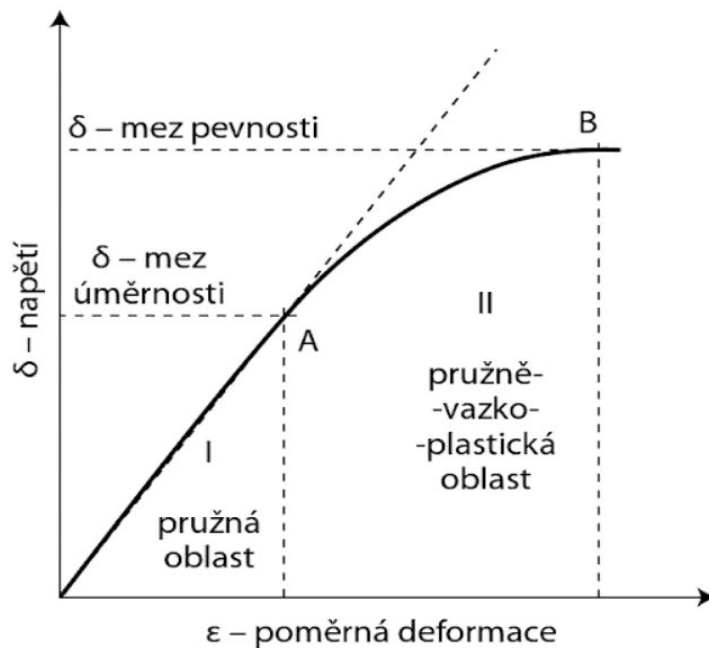
Rozdělení deformací po kvalitativní stránce

- Pružné deformace ε_p
- Deformace pružně v čase $\varepsilon_{\dot{c}}$
- Plastické deformace ε_{pl}

Pružnou deformaci, deformaci pružnou v čase, mez úměrnosti, plastickou deformaci a energii pružné deformace lze nejlépe popsat z obecného tvaru pracovního diagramu (viz Obr. 3).

Pracovní diagram udává vztah mezi napětím a deformací. Diagram se rozděluje na dvě části, a to na lineární část (po mez úměrnosti) a nelineární část (mezi mezí úměrnosti a mezí pevnosti). Mez úměrnosti je takové napětí, do kterého v tělese vznikají pouze deformace pružné a napětí je v tělese rovnoměrně rozloženo, takže po ukončení působení vnější síly deformace zanikají a těleso se vrací do normálního stavu. Deformace pružné v čase jsou takové deformace, které se po uvolnění vnějších sil vrátí do původního stavu. Vrácení do původního stavu však nenastává hned, ale za nějakou dobu. Vzniká i zaniká za nějaký čas působení vnějších sil. Když napětí přesáhne mez úměrnosti, tak deformace dál rostou, ale napětí v tělese není rozloženo rovnoměrně a deformační čára nabývá charakteru křivky. Deformace nad mezí úměrnosti jsou plastické

a po ukončení působení vnějších sil se těleso už nevrací do původního stavu. Stav, při kterém se těleso trvale deformuje a vznikají taky pružné deformace a pružné deformace v čase se nachází v pružněvazkoplastické oblasti. Když napětí přesáhne mez pevnosti, dochází k porušení celistvosti materiálu. Mezi pevnosti můžeme označit nejvyšší hodnotu napětí, kterou materiál snese bez porušení celistvosti tělesa (Požgaj a kol., 1993).



Obr. 3 Obecný tvar pracovního diagramu (Požgaj a kol., 1993)

Zastoupení jednotlivých druhů deformací je různé. Záleží na druhu mechanického namáhání, na druhu dřeviny a na vlhkosti materiálu. Nejvyšší podíl představují deformace pružné kolem 55–90 %. Z diagramu lze díky poměru mezi napětím a deformací vypočítat modul pružnosti (E) a to následujícím vztahem:

$$Tg\alpha = E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [5]$$

kde: E – modul pružnosti (MPa), σ – napětí na mezi úměrnosti (MPa), ε – poměrná deformace na mezi úměrnosti (1) (Gandelová a kol., 2009)

4.1. Pružnost a pevnost

4.1.1. Pružnost

Pružnost je z hlediska konstrukčního použití dřeva jednou z nejdůležitějších mechanických vlastností. Pružnost je schopnost materiálu vykazovat před porušením

pružnou deformaci. Je to vratná deformace – po odlehčení se těleso vrátí do původního tvaru (Gandelová a kol., 2009).

Z fyzikálního pohledu pružnost definujeme tak, že změny vzdáleností mezi atomy jsou vratné, tedy po odlehčení působících sil se vrátí do svých rovnoměrných vzdáleností tak, aby měly nejnižší potenciální energii. Z praktického hlediska vycházíme z pracovního diagramu (viz obr. 3) a budeme určovat všechny charakteristiky, které se vyskytují v lineární části pracovního diagramu. Tedy k vyhodnocení pružnosti používáme modul pružnosti (E, G), Poissonovo číslo (μ), mez úměrnosti (σ), pružnou deformaci (ε) a energii pružné deformace (W) (Požgaj a kol., 1993).

4.1.1.1. Poissonovo číslo

Při normálovém zatížení vznikají poměrné délkové deformace (ε_1) a poměrné příčné deformace (ε_2) a jejich podíl je označován jako Poissonovo číslo. Poissonovo číslo také vyjadřuje pružnou stlačitelnost dřeva, tedy schopnost při tlaku zmenšit, nebo při tahu zvětšit svůj objem. Hodnoty Poissonova čísla u izotropních materiálů dosahují maximálně 0,5. U anizotropních materiálů (dřevo), však vznikají v různých směrech (příčný, radiální a tangenciální směr) jiné hodnoty (viz Tab. 1).

Tab. 1 Poissonova čísla vybraných dřevin (Ugolev, 1975)

dřevo	Poissonova čísla					
	Ve směru vláken		Radiálním směr		Tangenciálním směr	
	μ_{RL}	μ_{TL}	μ_{TR}	μ_{LR}	μ_{RT}	μ_{LT}
smrk	0,490	0,410	0,790	0,030	0,380	0,037
jasan	0,508	0,566	0,830	0,056	0,467	0,044
dub	0,430	0,410	0,830	0,070	0,340	0,090
borovice	0,490	0,410	0,790	0,030	0,380	0,037

S ohledem na různé hodnoty v jednotlivých směrech stanovujeme šest Poissonových čísel, a to po dvou v každém směru vláken. Poissonovo číslo označujeme μ_{ij} , kde první index označuje příčnou deformaci a druhý index označuje podélnou deformaci.

- Ve směru vláken: $\mu_{TL} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}$ $\mu_{RL} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_L}$
- Ve směru radiálním: $\mu_{TR} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_R}$ $\mu_{LR} = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_R}$
- Ve směru tangenciálním: $\mu_{RT} = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_T}$ $\mu_{LT} = \frac{\varepsilon_L}{\varepsilon_T}$

kde: μ – poissonovo číslo, ε_L – poměrná délková deformace ve směru vláken, ε_T – poměrná délková deformace v tangenciálním směru, ε_R – poměrná příčná deformace v radiálním směru (Požgaj a kol., 1993)

4.1.1.2. Modul pružnosti

Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti větší, tím je potřeba větší napětí na deformaci materiálu. Modul pružnosti se mění v závislosti na druhu dřeviny, na vlhkosti (klesá až do meze hygroscopicity), na anizotropii, na vadách dřeva a na objemové hmotnosti dřeva. Jelikož pro většinu materiálu neexistuje jejich teoretická rovnice, zjišťuje se experimentálně podle normy ČSN EN 408 (2011). Většinou je modul pružnosti zjišťován na zkušebních strojích, kde je současně měřena deformace a působící silové zatížení. Podle způsobu měření rozlišujeme statický modul pružnosti a dynamický modul pružnosti. Tyto moduly pružnosti představují důležité hodnoty při statických výpočtech dřevěných konstrukcí. Poissonovo číslo a modul pružnosti charakterizují deformační vlastnosti dřeva v pružné části pracovního diagramu (Lexa a kol., 1952).

4.1.1.2.1. Statický modul pružnosti

Jedná se o destruktivní měření vzorků, kde se významně mění struktura dřeva a jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Při zkoušení daný vzorek zatěžujeme určitou silou a vyvoláváme reálné napětí a deformaci materiálu. Rozlišujeme moduly pružnosti při normálových namáháních (tah, tlak, ohyb) – tzv. Youngovy moduly pružnosti E a

smykové moduly pružnosti G při namáháních tangenciálních (smyk a krut). V tabulce 2 jsou znázorněny moduly pružnosti vybraných dřevin (Horáček, 2008).

Tab. 2 Moduly pružnosti a smykové moduly vybraných dřevin. (Ugolev, 1986)

dřevo	Modul pružnosti (MPa)						
	v tlaku a tahu			v ohybu	ve smyku		
	E_L	E_R	E_T	E_{oh}	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
smrk	14 300	680	470	12 800	1 230	800	55
jasan	15 700	1 875	1 250	13 900	1 325	1 080	255
borovice	12 300	650	540	12 800	1 230	800	-
bříza	17 600	680	515	15 700	1 540	890	230
dub	14 600	1 260	950	15 700	1 410	1 000	470

L – ve směru vláken, R – radiální směr, T – tangenciální směr

4.1.1.2.2. Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti zjišťujeme nedestruktivním měřením vzorku, kde se nemění struktura dřeva a jeho fyzikální a mechanické vlastnosti. Při této metodě využíváme charakteristiku šíření vln, které jsou vázány na fyzikálně mechanické vlastnosti materiálu. Takto zjišťované moduly pružnosti jsou cca o 20–30 % vyšší než statické moduly pružnosti. Nejvíce využívané metody na zjišťování dynamického modulu pružnosti jsou ultrazvukové a rezonanční, přičemž ultrazvukové metody se často využívají přímo na konstrukcích.

Ultrazvuková metoda

Při této metodě využíváme rychlost šíření ultrazvukového vlnění v materiálu, a to s frekvenčním spektrem na hranici slyšitelnosti 20–500 kHz. V pružném prostředí jsou na sebe částice vázány nebo na sebe aspoň působí. Kvůli těmto vazbám se kmitání částic

kontinuálně přenáší a dochází k šíření mechanického vlnění, které je doprovázeno vznikem elastických vln. Pomocí doby průchodu tohoto vlnění přes materiál se určí fyzikálně mechanické vlastnosti, a to pomocí odvozených vztahů mezi časem průchodu a sledovanými vlastnostmi materiálu (Zejsa a kol., 2014).

Rychlost šíření ultrazvukových vln je závislá na vlastnostech materiálu. Vzestupné pořadí rychlostí ultrazvukových vln je následující: plyny, tekutiny, biologické tkaniny a tuhý materiál. Ve vzduchu se ultrazvuková vlna šíří rychlostí zhruba 330 m/s, ve vodě rychlostí 1485 m/s, v kostech rychlostí 3800 m/s a ve dřevě podél vláken je rychlost podobná jako u kovů (železo 5000 m/s, měď 3600 m/s), ale kolmo na vlákna je až 3 x menší. Poměr hodnot rychlostí šíření zvuku v různých směrech (podélný, radiální a tangenciální) dřeva lze vyjádřit jako: $c_P : c_R : c_T = 15 : 5 : 3$

Velikost uvedeného poměru závisí na dřevině a na poměru modulu pružnosti podél vláken a kolmo na vlákna. Rychlost šíření zvuku závisí na hustotě dřeva. S větší hustotou se rychlost zvyšuje. Naopak s rostoucí vlhkostí dřeva rychlost klesá. Průměrná rychlost šíření zvuku materiálem je uvedena v tabulce 3 (Zejsa a kol., 2014).

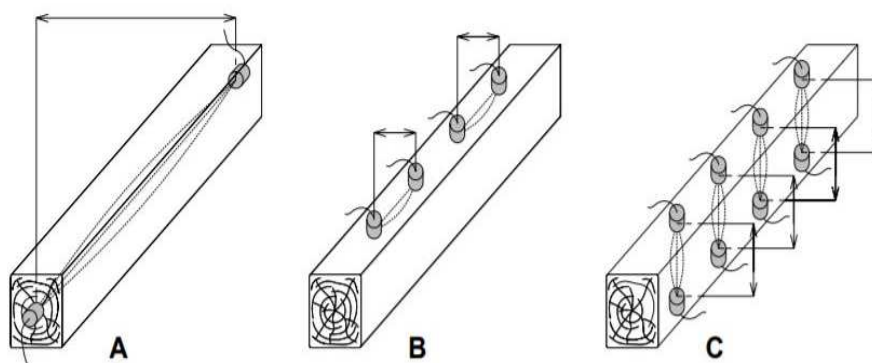
Tab. 3 Průměrná rychlost šíření zvuku v materiálem (Kollman a Coté, 1968)

		Modul pružnosti E (MPa)		Rychlost zvuku v (m/s)		Poměr rychlostí
Druh dřeva	ρ (kg/m ³)	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna	$V_{\text{rovn}}/V_{\text{kolmo}}$
Smrk	470	11 000	550	4 790	1 072	4,47
Jedle	460	11 000	490	4 890	1 033	4,73
Buk	730	16 000	1 500	4 638	1 420	3,27
Dub	690	13 000	1 000	4 304	1 193	3,64

Dále závisí na druhu dřeva, tuhosti, růstových anomáliích a také na vadách dřeva (trhliny, suky, hniloba, odklon vláken a další). Ultrazvukové vlny materiálem prochází

přes nejkvalitnější části vzorku a vyhýbají se vadám. Tím se prodlužuje trajektorie ultrazvukové vlny a zvyšuje se celková doba průchodu vzorkem. Podle rozdílných rychlostí porovnáváme a hodnotíme aktuální stav vzorku (Feio, 2005).

Přístroj na měření ultrazvuku vysílá pomocí budiče opakovaně ultrazvukové impulzy do materiálu. Pomocí snímače zjišťujeme čas průchodu vlny materiálem. Uložení sond může být přímé podél vláken (Obrázek 4 A), kde získáme vlastnosti prvku jako celku, nepřímé podél vláken (Obrázek 4 B), kde získáváme vlastnosti prvku v určité vzdálenosti, anebo přímé napříč vláken (Obrázek 4 C), kde lze získat lokální poruchy, u kterých při podélném měření jenom tušíme výskyt.



Obr. 4 Možnosti přikládání sond při měření ultrazvukem (Kloiber a Kotlínová, 2006)

A – přímé měření podél vláken, B – nepřímé měření podél vláken, C – přímé měření napříč vláken

Z času lze snadno vypočítat rychlost průchodu vlny přes materiál a následně dynamický modul pružnosti materiálu (Horáček, 2008).

Rychlost průchodu vlny je vyjádřena vztahem:

$$v = \frac{l}{t} \quad [6]$$

kde: v – rychlost šíření ultrazvukového impulzu (m/s), l – vzdálenost mezi sondami (m), t – doba průchodu ultrazvukového impulzu (s)

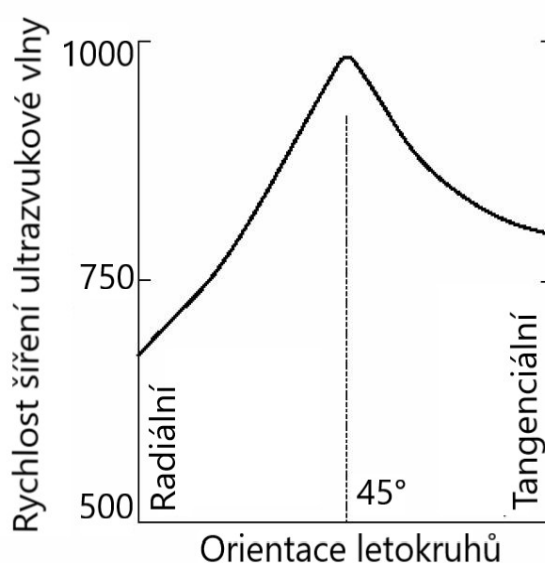
Dynamický modul pružnosti je vyjádřena vztahem:

$$E = v^2 \times \rho \quad [7]$$

kde: E – dynamický modul pružnosti (Pa), v – rychlost šíření ultrazvukového impulzu (m/s), ρ – hustota dřeva (kg/m^3)

Vliv orientace letokruhů, šířky letokruhů, teploty dřeva a vlhkosti dřeva

Průběhy časů průchodu ultrazvukových vln dřevem vykazují kvadratickou závislost na odklonu hranice letokruhů v příčné rovině. Při sklonu 45° vzhledem k letokruhům je čas šíření ultrazvukové vlny nejdelší. V radiálním směru bývá šíření ultrazvuku o 30 % rychlejší. Čas přechodu v tangenciálním směru byl očekáván přibližně uprostřed mezi nimi. V obrázku 5 vidíme průchod zvukových vln dřevem při 12% vlhkosti (Kloiber a Kotlínová, 2006).

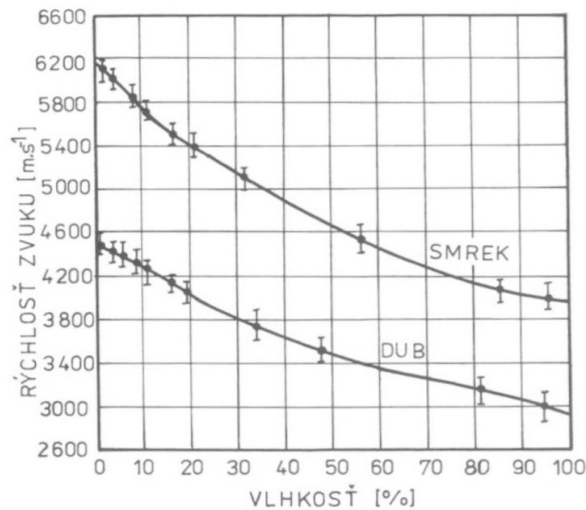


Obr. 5 Graf inverzní hodnoty rychlosti šíření ultrazvukové vlny ve vztahu k orientaci letokruhů na příčném řezu (Ross a Hunt, 2000)

Šířka letokruhů ovlivňuje rychlost šíření ultrazvuku jenom v radiálním směru, a to kvůli makroskopické stavbě dřeva, podílu letních a jarních tracheid a orientaci buněk v letokruhu (Kloiber a Kotlínová, 2006).

Se vzrůstající vlhkostí dřeva se buněčné stěny a následně kapiláry vyplňují vodou a tím klesá rychlost šíření zvuku ve dřevě. V důsledku přibývání vody ve dřevě se zvyšuje odpor prostředí k šíření ultrazvukových vln, protože, jak už víme, rychlost šíření zvuku ve vodě je nižší než ve dřevě. Rychlost šíření zvuku v závislosti na vlhkost dřeva znázorňuje obrázek 6 (Požgaj a kol., 1993).

Teplotou se rychlost šíření zvuku mění naopak jen velmi málo (Kang a Booker, 2002).



Obr. 6 Vliv vlhkosti na šíření zvuku rovnoběžně s vlákny (Požgaj a kol., 1993)

Rezonanční metoda

Rezonancí dřeva nazýváme schopnost dřeva zesilovat zvuk bez zkreslení. Rezonanci vzorku můžeme určit některou z nedestruktivních metod, která měří frekvenci kmitání zkoušeného vzorku, ze které se potom spolu s dalšími veličinami tohoto vzorku dají určit fyzikálně mechanické vlastnosti, a to na základě odvozených stavů.

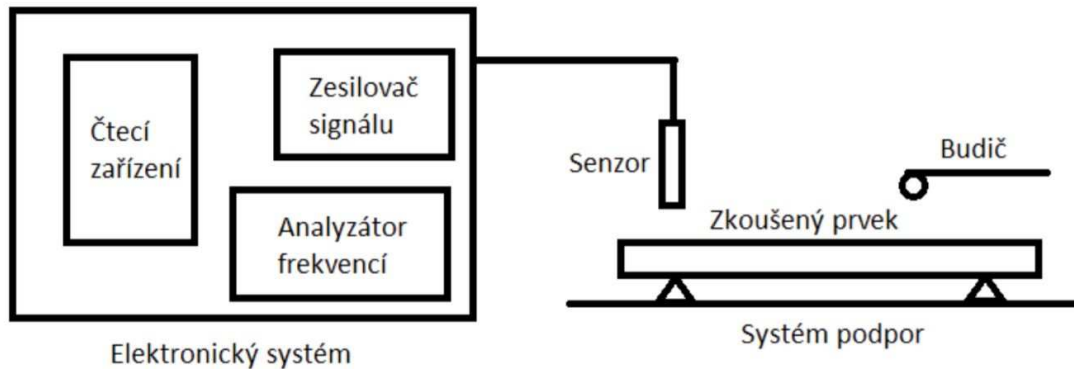
Ve vzorku ve tvaru tyče můžeme vyvolat podélné, příčné nebo torzní kmitání. Pro každou část dřeva existuje odpovídající frekvence kmitání, při které vzniká maximální deformace tělesa. Tyto frekvence vyjadřují závislost mezi hustotou, pružnými vlastnostmi, vlhkostí, teplotou tělesa, a tvarem kmitání.

Z vlastních naměřených frekvencí kmitání vzorku lze určit dynamický modul pružnosti E , akustickou konstantu K , logaritmický dekrement útlumu δ a fázový úhel φ . K výpočtu těchto vlastností nám v případě rezonanční metody stačí znát hodnotu rezonanční frekvence (f_r) a šířku rezonanční křivky (Δf) (Zejsa a kol., 2014).

Oproti ultrazvukové metodě, kde můžeme měřit i zabudovaný vzorek, je rezonanční metoda vhodná pro měření nezabudovaných prvků, které jsou, pokud je to možné, homogenní. Jestliže jsou zkušební vzorky bez trhlin a vnitřních vad, jsou výsledky zkoušek přesné a odpovídají tabulkovým hodnotám. Nejběžněji se používají zkušební vzorky ve tvaru dlouhých hranolu nebo válců.

Měření se provádí pomocí rezonančního přístroje, který má dvě sondy. Schéma přístroje je vidět na obrázku 7. První sonda-budič se používá pro vysílání mechanického

kmitání. Mechanické kmitání se vyvolává lehkými rázy do prvku. Tento nástroj (kladívko, palička) by měl mít většinu své hmotnosti v místě nárazu, dostatečnou hmotu pro vyvolání měřitelných mechanických kmitů a zároveň takové vlastnosti, aby nedošlo k mechanickému poškození zkoušeného prvku. Velikost nástroje by se tedy měla volit dle rozměrů a druhu materiálu zkoušeného prvku.



Obr. 7 Schéma typické sestavy pro měření rezonanční metodou (Klapálek , 2004)

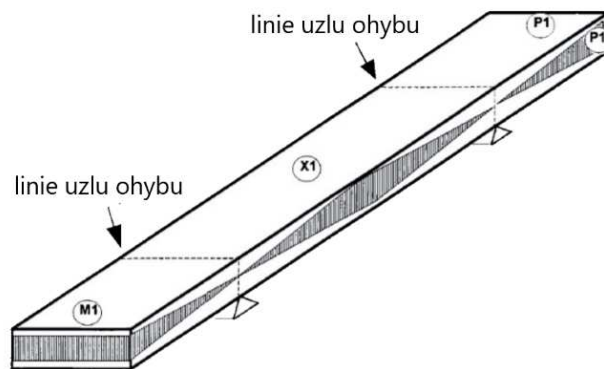
Druhá sonda-senzor mechanické kmitání zachytává. Používají se dva základní typy – kontaktní a bezkontaktní. Kontaktními senzory jsou většinou akcelerometry, které využívají piezoelektrické nebo tenzometrické metody měření vibrací. Bezkontaktními senzory jsou většinou akustické mikrofony.

Elektronický systém tvořený řídicí jednotkou, zahrnuje několik podsystémů. Skládá se především ze zesilovače a analyzátoru signálu. Úkolem zesilovače je napájet senzory a přenášet dostatečně zesílený signál do analyzátoru signálu. Systém podpěr slouží k izolaci zkoušeného prvku od okolního prostředí, nesmí však bránit požadovaným vibracím. Dobré je podpěry umístit ještě na další izolační podložky pro zamezení nežádoucím vibracím (Klapálek, 2004).

Příčné ohybové kmitání

Mimorovinný ohyb

Vzorek se umístí na dvě podpory ve vzdálenosti $0,224 L$ (délky prvku), od obou konců, a senzor se umístí co nejdále od linie uzlu ohybu. Ve středu vzorku se pomocí budící síly vnáší impuls. Měření se provede tak, aby se minimálně pět měření v řadě nelišilo více než o 1 %. Schéma vidíme na obrázku 8 (Klapálek, 2004).

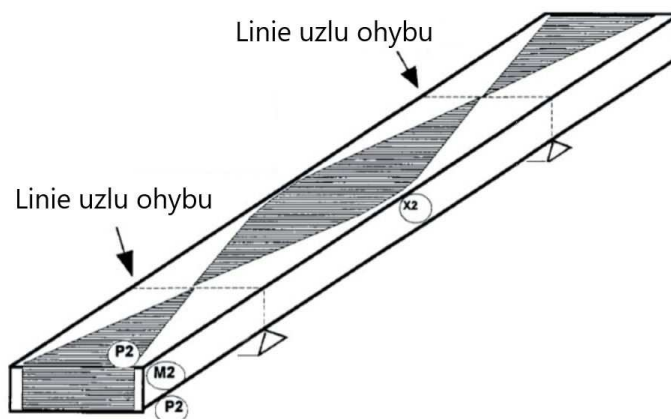


Obr. 8 Schéma měření obdélníkového vzorku pro příčný (mimo rovinný) ohyb (Klapálek, 2004)

X1 – Poloha budící síly, P1 – Poloha kontaktního senzoru, M1 – Poloha nekontaktního senzoru

Rovinný ohyb

Měření a uložení se moc neliší od měření mimorovinného ohybu. Mění se jen směr vibrací v hlavní rovině zkoušeného vzorku. Měření se provádí dvěma způsoby. Prvním způsobem je rozmístění sond podle obrázku 9, kdy můžeme měřit vibrace v hlavní rovině prvku. Druhým způsobem je natočení vzorku o 90° kolem podélné osy. Musíme zaměnit šířkový a výškový rozměr, ale hodnoty výsledných modulů by se měly, zejména u homogenních a izotropních materiálů, shodovat. Měření se provede tak, aby se minimálně pět měření v řadě nelišilo více než o 1 % (Klapálek, 2004).

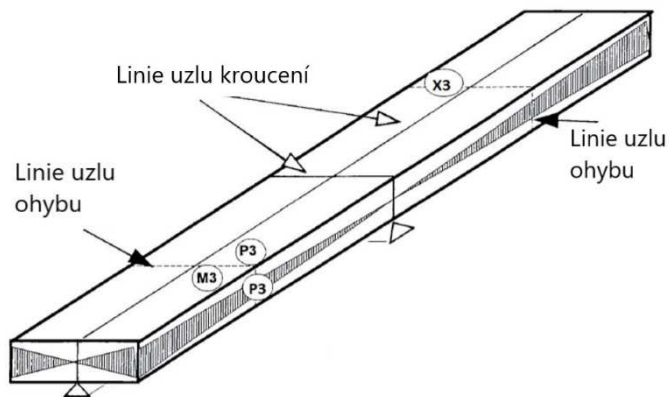


Obr. 9 Schéma měření u obdélníkového vzorku pro příčný ohyb v rovině (Klapálek, 2004)

X2 – Poloha budící síly, P2 – Poloha kontaktního senzoru, M2 – Poloha nekontaktního senzoru

Kroutové kmitání

Podpěření vzorku je v polovině délky a šířky. Sensory se umísťují ve vzdálenosti $0,224 L$ (délka prvku), od konce prvku a při okraji. Budič se nachází diagonálně v protilehlé pozici oproti senzoru (viz obrázek 10). Měření se provede tak, aby se minimálně pět měření v řadě nelišilo více než o 1 % (Klapálek, 2004).

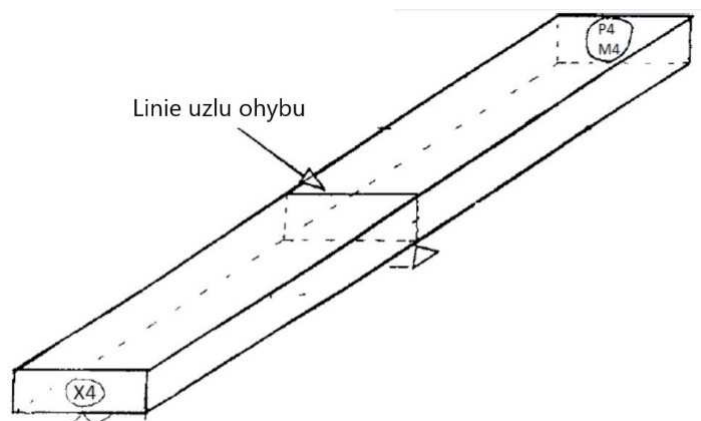


Obr. 10 Schéma měření u obdélníkového vzorku pro kroucení (Klapálek, 2004)

X3 – Poloha budící síly, P3 – Poloha kontaktního senzoru, M3 – Poloha nekontaktního senzoru

Podélné kmitání

Podpěření je stejné jako u měření kroucení, tedy uprostřed délky a šířky. Rozdíl je v rozmístění senzorů. Senzor se umísťuje do středu čela jedné strany a budič do středu druhé strany (viz obrázek 11). Měření se provede tak, aby se minimálně pět měření v řadě nelišilo více než o 1 % (Klapálek, 2004).



Obr. 11 Schéma měření u obdélníkového vzorku pro podélné kmitání (Klapálek, 2004)

X4 – Poloha budící síly, P4 – Poloha kontaktního senzoru, M4 – Poloha nekontaktního senzoru

Dynamický modul pružnosti můžeme vypočítat pomocí příčných ohybových frekvencí. To za předpokladu, že známe Poissonův součinitel. Další možnost, jak vypočítat dynamický modul pružnosti, je pomocí podélných frekvencí. Výsledky by měly být obdobné, jako při výpočtu z příčných ohybových frekvencí (Klapálek, 2004).

Dynamický modul pružnosti pomocí příčných ohybových frekvencí je vyjádřen vztahem:

$$E_d = 0,9465 \times \left(m \times \frac{f_f^2}{b}\right) \times \left(\frac{L^3}{t^3}\right) \times T \quad [8]$$

kde: E_d – youngův modul pružnosti (Pa), m – hmotnost prvku (kg), b – šířka (m), L – délka (m), t – tloušťka (m), f_f – základní vlastní frekvence příslušná k ohybovému kmitání (Hz), T – korekční součinitel (-)

Dynamický modul pružnosti pomocí podélných ohybových frekvencí je vyjádřen vztahem:

$$E_d = 4 \times \left(\frac{L}{b \times t}\right) \times m \times f'^2 \quad [9]$$

kde: E_d – dynamický modul pružnosti (Pa), L – délka prvku (m), b – šířka prvku (m), t – výška prvku (m), m – hmotnost prvku (kg), f' – základní vlastní frekvence podélného kmitání (Hz)

4.1.2. Pevnost

Pevnost dřeva je schopnost odolávat nebo odporovat porušení dřeva, které vzniká mechanickým zatížením. Pevnost vyjadřujeme v napětí, kdy dojde k porušení celistvosti tělesa – mez pevnosti. Podle fyzikálních veličin rozlišujeme tři druhy pevnosti: konvenční, skutečnou a ideální (teoretickou) pevnost. Konvenční pevnost se vyjadřuje jako největší napětí, které se vztahuje na původní průřez vzorku. Při dřevě konvenční pevnost z praktického hlediska nepřichází k úvahu. Skutečná pevnost se vyjadřuje napětím, při kterém dojde k porušení tělesa. Ideální pevnost se vyjadřuje maximální hodnotou pevnosti dřeva pro danou dřevinu a danými podmínkami zatěžování (Požgaj a kol., 1993).

Protože nejde vypočítat teoretickou hodnotu pevnosti dřeva pro žádný způsob zatížení. Stanovuje se ve většině jako skutečná pevnost dřeva, a to prostřednictvím

zkoušek. U pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken se udává konvenční pevnost, protože zde nejde dosáhnout konečného porušení tělesa (Gandelová a kol., 2009).

Údaje o pevnosti dřeva získáváme prostřednictvím praktické zkoušky. V dané zkoušce sledujeme skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa. Zkouška musí dodržovat domluvený zkušební postup, kde jsou přesně dány podmínky zkoušky (velikost tělesa, postup zkoušky a výpočet výsledků) (Gandelová a kol., 2009).

Pevnost dřeva rozdělujeme podle:

- Stavů napjatosti – jednoosý a víceosý
- Způsobu zatížení – tlak, tah, ohyb, krut a smyk
- Časového průběhu zatížení – statické a dynamické
- Účinků zatížení na dřevo – destruktivní a nedestruktivní způsob

Faktory ovlivňující pevnost dřeva

Anisotropie: Neboli směrová nestejnorodost. V každém směru má dřevo jiné vlastnosti, Tedy při měření mechanických vlastností musíme přihlížet ke směru vlákna. U dřeva jsou pro různé namáhání převážně 3 hodnoty, a to ve směru vláken, napříč vláken v radiálním směru a napříč vláken v tangenciálním směru (Lysý a Jírů, 1953).

Vzrůstová rozmanitost dřeva: Příčinou velkých rozdílů výsledků zkoušek je vzrůstová rozmanitost dřeva. V málem zkušebním vzorku jsou vrstvy dřeva, které jsou vytvořeny v různých obdobích. V průběhu těchto období se mohly vzrůstové podmínky stromu úplně změnit. Proto je obtížné mít několik stejných zkušebních vzorků o stejné šířce letokruhů, síle buněčných stěn atd. tak, aby vycházely stejné výsledky. Pro vyjádření vzrůstové rozmanitosti se provádí dva druhy zkoušek: zkouška bezvadného dřeva a užitkového dřeva (Lysý a Jírů, 1953).

Vlhkost: Se zvětšující se vlhkostí se zmenšuje pevnost dřeva, a to až do bodu nasycení vláken. Pak se už pevnost dřeva nemění. Pro lepší porovnání se pevnost dřeva určuje se standardní vlhkostí 12 %. Při jiných vlhkostech se pevnost přepočítává pomocí vlhkostního součinitele pro dané namáhání (Lysý a Jírů, 1953).

Objemová váha: Pevnost dřeva přímo závisí na objemové váze. Při vzrůstající objemové váze roste pevnost dřeva při stejné vlhkosti. To platí pro různé objemové váhy stejné dřeviny, ale i různých dřevin (Lysý a Jírů, 1953).

Teplota: Pevnost dřeva vlivem teploty se liší u každé dřeviny jinak. Tvrdé dřeviny ztrácí pevnost více, než jehličnaté dřeviny. Zvyšujícím se teplem se mezibuněčný tmel (lignin a hemicelulózy) stává plastickým a způsobuje lepší pohyblivost buněk a vláken. Zvětšujícím se teplotou pevnost dřeva klesá, ale naopak s přibývajícím chladem pevnost dřeva roste. V rozmezí teplot -18–65 °C se mění pevnost dřeva přibližně o 0,6–0,9 % při změně teploty o 1 °C od dané pevnosti při teplotě 20 °C (Lysý a Jírů, 1953).

4.1.2.1. Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku je odpor dřeva proti působení síly, která se ho snaží stlačit. Z tlakové zkoušky můžeme snadno zjistit ostatní pevnostní vlastnosti dřeva. Díky této vlastnosti má tato zkouška velký význam pro posouzení únosnosti různých dřevěných konstrukcí. Pevnost v tlaku dosahuje 40 % příslušné tahové pevnosti. S ohledem na směr vláken a působení sil rozdělujeme pevnost v tlaku:

- Pevnost v tlaku ve směru vláken $\sigma_{p\parallel}$
- Pevnost v tlaku napříč vlákny
 - Ve směru radiálním $\sigma_{p\perp R}$
 - ve směru tangenciálním $\sigma_{p\perp T}$

Pevnost v tlaku ve směru vláken

Jedna z nejdůležitějších mechanických vlastností dřeva je pevnost v tlaku ve směru vláken. Díky jednoduchosti zatížení a velké pevnosti má velký význam v konstrukcích (sloupy, části nosníků, piloty atd.). Působením tlakového namáhání ve směru vláken dochází k deformacím, které způsobují zkrácení délky tělesa. Vlastnost deformace závisí na stavbě dřeva a jakosti. Významný vliv na podobu deformace má hustota a vlhkost dřeva. U suchého dřeva s vysokou hustotou nastává porušení dřeva v podobě smyku jedné části tělesa vzhledem k druhé po linii. U vlhkého dřeva s nízkou hustotou dochází k otlacení ploch, na které působí namáhání a dochází k vybočení stěn na tělese. Hodnoty pevnosti v tlaku ve směru vláken u našich dřevin se pohybují v rozmezí 30–70 MPa a

variační koeficient se pohybuje v rozmezí 8–16 %. Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken pro vybrané dřeviny jsou uvedeny v tabulce 4 (Matovič, 1993).

Tab. 4 Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken pro vybrané dřeviny a vlhkosti 12 %
(Ugolev, 1975)

Druh dřeva	Mez pevnosti (MPa)	Druh dřeva	Mez pevnosti (MPa)
smrk	44,4	dub	57,5
modřín	64,4	topol	39
akát	75,5	olše	44

Pro zjišťování pevnosti v tlaku ve směru vláken používáme tělesa, která mají tvar pravoúhlého hranolu se čtvercovým průřezem, přičemž délka stran má být minimálně 20 mm. Délka tělesa má být v rozmezí 1,5–3násobek strany průřezu u výpočtu pevnosti a 3–6násobek u výpočtu pružnosti. Tento poměr musí být tak malý, aby nedošlo k vybočení tělesa. Těleso vložíme do lisu a rovnoměrně ho zatěžujeme. Zatížení vzniká mezi dvěma rovnými deskami. Jedna z desek musí být kulovitě uložená. Toto zatížení se postupně stejnoměrně zvětšuje, a to přibližně o 200–300 kg/cm² za minutu. Doporučuje se taková rychlost zatěžování, kde dojde k porušení tělesa nejdříve za 2 minuty a nejpozději za 5 minut. Při porušení vzorku se odečteme maximální zatížení F_{max} (Lexa a kol., 1952). Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\sigma_{p||} = \frac{F_{max}}{a \times b} \quad [10]$$

kde: $\sigma_{p||}$ – mez pevnosti v tlaku ve směru vláken (MPa), F_{max} – maximální zatížení (N),
 a , b – příčné rozměry tělesa (mm)

Pevnost v tlaku napříč vláken

Při tomto namáhání probíhá postupná deformace, při které dochází k zhušťování dřevní struktury v celém objemu. Tedy nedochází k celkovému porušení tělesa a oddělování jednotlivých částí od tělesa, tedy nejde určit jeho mez pevnosti. Proto hodnotu

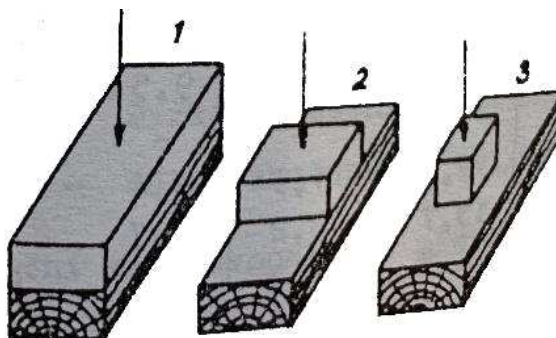
pevnosti v tlaku napříč vláken zjišťujeme z hodnoty mezi úměrnosti podle daných kritérií. Takto zjištěná mez úměrnosti je označována konvenční (dohodnutá) mez pevnosti v tlaku napříč vláken, nebo mez otlacení, a to pro dané namáhání na část délky tělesa. S ohledem na makroskopickou stavbu dřeva (jarní a letní dřevo, dřeňových paprsků, vláknité stavby) jsou možné dva způsoby deformace dřeva – dvoufázová a třífázová (Gandelová a kol., 2009).

Dvoufázová deformace je typická pro dřevo jehličnanů a listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva (kromě dubu) při namáhání v tangenciálním směru. První část je lineární, kde vzrůstá napětí i deformace, která pokračuje do maximálního pružného zatížení. Nad maximem pružného zatížení se začíná těleso postupně porušovat a začíná plastická deformace. Viditelně se to projevuje na hranicích letokruhů, kde se ohýbají a oddělují od sebe (Gandelová a kol., 2009).

Třífázová deformace je typická pro dřevo všech našich dřevin (kromě dubu) v radiálním směru, pro dřeva listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou a dubu v tangenciálním směru. První část je lineární, kde dochází k stlačení jarního dřeva až do meze úměrnosti. Další fáze probíhá při stejném nebo mírném růstu napětí, kde dochází porušení stability anatomických elementů a nastává stlačování a začíná plastická deformace. Poslední fáze probíhá při značném zatížení, kde se začíná deformovat jarní i letní dřevo a dochází ke zhušťování dřeva, při kterém nedochází k úplnému porušení tělesa (Gandelová a kol., 2009).

Máme 3 druhy pevností v tlaku napříč vláken (viz obrázek 12). Na celou plochu tělesa, na celou šířku a část délky tělesa, nebo na část délky a šířky tělesa. Hodnoty pevnosti na část délky jsou průměrně vyšší o 20-25 % než hodnoty pevnosti na celou plochu. To je dáno tím, že při tlaku na část tělesa vzniká ještě odpor vláken při ohybu na hranách tlačného tělesa. Hodnoty v pevnosti napříč vláken v radiálním směru a tangenciálním směru se moc neliší. V radiálním směru mají vyšší hodnoty dřeviny se širokými dřeňovými paprsky a v tangenciálním směru mají vyšší hodnoty jehličnaté dřeviny. Konvenční mez pevnosti napříč vláken je průměrně 10 x menší než hodnoty pevnosti ve směru vláken. Hodnoty konvenční pevnosti v tlaku napříč vláken u našich dřevin se pohybují v rozmezí 2,5–14 MPa a variační koeficient se pohybuje v rozmezí

10–25 %. Hodnoty vybraných dřevin meze pevnosti v tlaku napříč vláken jsou uvedeny v Tabulce 5.



Obr. 12 Způsoby zatížení tělesa při zkoušce v tlaku napříč vláken. (Matovič, 1993)

1- celá plocha tělesa 2- na celou šířku a část délky tělesa 3 na část šířky a délky tělesa

Tab. 5 Konvenční mez pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken (Požgaj a kol., 1993)

Konvenční mez pevnosti v tlaku napříč vláken (MPa)					
dřevo	radiální směr	tangenciální směr	dřevo	radiální směr	tangenciální směr
smrk	3,4	4	buk	12,9	8,5
modřin	4,5	6,1	jilm	5,8	4,8
dub	11	8,5	habr	14	8,5

Pro zjišťování pevnosti v tlaku napříč vláken používáme jako zkušební tělesa kostky nebo hranoly s čtvercovým průřezem.

Zkušební kostky mají nejmenší rozměry 30x30x30 mm a zatěžují se radiálně nebo tangenciálně k letokruhům. Zatěžující síla má být 10 kg/cm² za minutu. Pro zjištění konvenční pevnosti v tlaku napříč vláken použijeme získaný pracovní diagram, kde zjistíme napětí při němž stlačení tělesa dosáhne 1 % (Lexa a kol., 1952).

Zkušební hranoly mají čtvercový průřez a strany mají být nejméně 20 mm a délce 3násobku strany. Jsou zatěžovány radiálně nebo tangenciálně k letokruhům. Zkušební těleso leží na pevné rovné desce a zatížení se přenáší na těleso horní ocelovou deskou, která má hrany zaoblené poloměrem 1,5 mm. Zatěžovací rychlost se používá 10 kg/cm²

za minutu. Z pracovního diagramu se určí napětí, při němž se těleso stlačilo o 1 %. Doporučuje se přesnost na 0,0003 cm (Lexa a kol, 1952). Konvenční mez pevnosti v tlaku napříč vláken na celou plochu se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\sigma_{p\ r/t} = \frac{F}{a \times L} \quad [11]$$

kde: $\sigma_{p\ r/t}$ – konvenční Mez pevnosti v tlaku napříč vláken (MPa), F – zatížení odpovídající dohodnuté mezi pevnosti (N), a , L – rozměry tělesa (mm)

4.1.2.2. Pevnost v tahu

Pevnost v tahu je odpor dřeva proti působení síly, která se ho snaží prodloužit, při překročení meze pevnosti těleso praská. Vliv na toto zatížení má vlhkost dřeva, směr vláken, objemová hmotnost a anatomická stavba tělesa. Stejně jako u pevnosti v tlaku rozdělujeme pevnost v tahu na:

- Pevnost v tahu ve směru vláken $\sigma_{||}$
- Pevnost v tahu napříč vláken
 - Ve směru radiálním σ_{t-R}
 - ve směru tangenciálním σ_{t-T}

Pevnost v tahu ve směru vláken

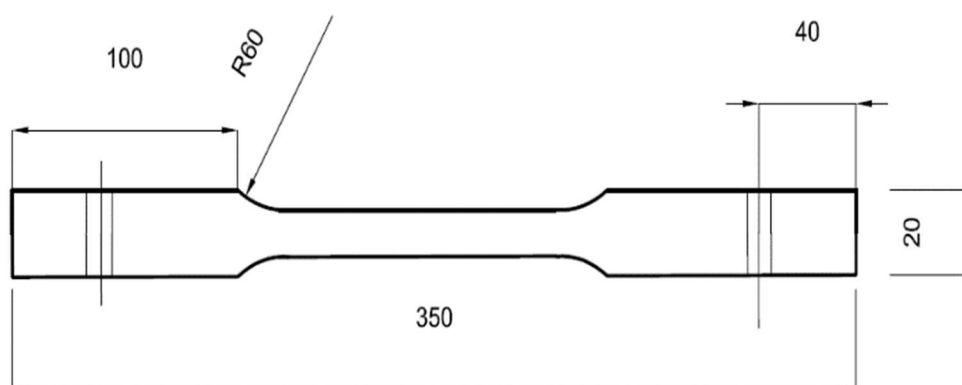
Pevnost v tahu ve směru vláken se řadí mezi nejvyšší hodnoty pevnostních vlastností. Pevnost v tahu ve směru vláken je přibližně 2,5 x větší než pevnost v tlaku ve směru vláken. Dosahuje hodnot pro naše dřeviny kolem 120 MPa. Tuto vysokou pevnost zajišťuje vláknitý tvar buněk a struktura stěn buněk. Při zatížení na tah se těleso deformuje roztrhnutím buněk dřeva v namáhané části bez předchozích deformačních příznaků. Při vysoké pevnosti nastává vláknitý nebo třískovitý zlom a při nízké pevnosti a houževnatosti dřeva nastává hladký nebo schodovitý zlom (Požgaj a kol., 1993).

Ve většině případů k deformaci způsobené tahem ve směru vláken nedojde, protože dříve dojde k deformaci smykem nebo k otláčení úchyťových koncových bodů tělesa. Hodnoty meze pevnosti v tahu ve směru vláken vybraných dřevin jsou uvedeny v Tabulce 6 (Požgaj a kol., 1993).

Tab. 6 Pevnost v tahu ve směru vláken (Ugolev, 1986)

Druh dřeva	Mez pevnosti (MPa)	Druh dřeva	Mez pevnosti (MPa)
smrk	103	dub	132
modřín	125	buk	123
jedle	79	jasan	145

Pro zkoušku pevnosti v tahu ve směru vláken se používají zkušební vzorky ve tvaru plochých tyčí s obdélníkovým průřezem se zesílenými koncovkami. Dřevní vlákna by měla být po celé šířce a délce rovnoběžná s podélnou osou tělesa. Rozměry a tvar zkušebního tělesa jsou znázorněny na Obrázku 13.



Obr. 13 Tvar a rozměry pro zkoušku tahem ve směru vláken

Zkušební vzorek se upne do čelistí trhačického stroje tak, aby bylo zajištěno zatížení ve směru osy a postupně se zatěžuje na tah. Přibližná rychlost zatěžování má být 600 kg/cm² za minutu tak, aby k porušení tělesa došlo v rozmezí 2–5 minut od začátku zkoušky. Při přetržení vzorku odečteme maximální zatížení F_{max} (Lexa a kol., 1952). Mez pevnosti v tahu ve směru vláken vypočítáme podle následujícího vztahu:

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{a \times b} \quad [12]$$

kde: σ_t – mez pevnosti v tahu ve směru vláken (MPa), F_{max} – maximální zatížení (N), a , b – příčné rozměry pracovní části tělesa (mm)

Pevnost v tahu napříč vláken

Na rozdíl od pevnosti v tahu podél vláken, která je jedna z největších pevnostních hodnot, patří pevnost v tahu napříč vláken k druhému extrému a je to jedna z nejmenších pevnostních hodnot. Hodnoty tahové pevnosti napříč vláken se pohybují v rozmezí 1,5–5 MPa. Hodnoty pevnosti v tahu napříč vláken jsou 20 x menší než hodnoty pevnosti v tahu ve směru vláken. Variační koeficient je 25 %. Hodnoty meze pevnosti v tahu napříč vláken jsou uvedeny v tabulce 7

Tab. 7 Pevnost dřeva v tahu napříč vláken (Ugolev, 1986)

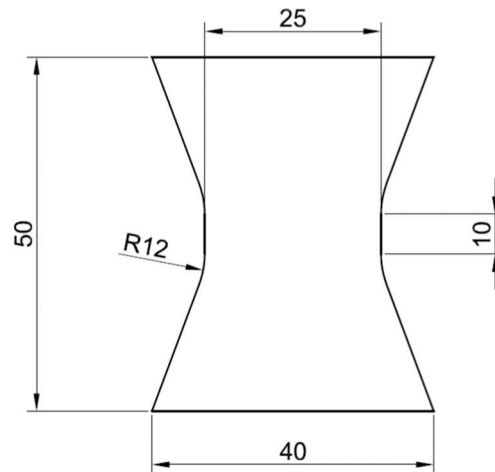
Mez pevnosti v tahu napříč vláken (MPa)		
dřeva	radiální směr	tangenciální směr
smrk	2,2	1,7
buk	4,4	3,4
dub	5,8	-
habr	4,6	3,8

Nízké pevnostní hodnoty převážně způsobuje orientace vazebních sil. Při tomto namáhání drží těleso vcelku převážně vodíkové můstky a Van der Waalsovy vazby, které jsou však slabší, než kovalentní vazby, které působí ve směru vlákna (Gandelová a kol., 2009). V tangenciálním tahu je mez pevnosti nižší než v radiálním, a to u jehličnanu o 10-50 % a u listnatých dřevin o 20-70 %. Nejvyšší hodnoty pevnosti v tahu napříč vláken mají tvrdá dřeva roztroušeně pórovitých listnáčů, a naopak nejnižší jehličnany a měkká dřeva roztroušeně pórovitých listnáčů (Matovič, 1993).

Zkouška pevnosti v tahu napříč vláken se měří podle normy ČSN 490114 (1992). Tvar zkušebního tělesa je znázorněn na obrázku 14. Při porušení vzorku se zjistíme maximální zatížení F_{max} (Matovič, 1993). Mez pevnosti v tahu napříč vláken vypočítáme podle následujícího vztahu:

$$\sigma_{t R/t} = \frac{F_{max}}{a \times b} \quad [13]$$

kde: $\sigma_{i, RT}$ – Mez pevnosti v tahu napříč vláken (MPa), F_{max} – Maximální zatížení (N), a , b – Příčné rozměry pracovní části tělesa (mm)



Obr. 14 Tvar zkušební tělesa na pevnost v tahu napříč vláken

Statický modul pružnosti v tahu a tlaku

Takzvaný Youngův modul pružnosti E (modul pružnosti v tahu/tlaku), lze určit pomocí Hookova zákona jako poměr napětí a jím vyvolané poměrné deformace. Lze ho vypočítat podle následujícího vztahu:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad [14]$$

kde: E – modul pružnosti (MPa), σ – napětí na mezi úměrnosti (MPa), ε – poměrná deformace na mezi úměrnosti (1)

Po dosažení napětí a deformace do uvedeného vztahu vypočítáme modul pružnosti E v tahu/tlaku podle následujícího vztahu:

$$E = \frac{F \times l}{S \times \Delta u} \text{ (MPa)} \quad [15]$$

kde: F – síla na mezi úměrnosti (N), L – původní délka tělesa před silovým působením (m), S – plocha, na kterou síla F působila (m^2), Δu – absolutní celková pružná deformace ve směru silového působení (m)

Ze vzorců lze vidět, že modul pružnosti je větší u materiálu, kde je pro stejnou deformaci potřeba větší napětí. Tedy čím větší modul pružnosti, tím bude materiál vykazovat menší deformaci. Kvůli anizotropii dřeva se modul pružnosti u dřeva stanovuje ve směru vláken a kolmo na vlákna, a to v radiálním a tangenciálním směru. Průměrné hodnoty modulu pružnosti jsou pro dřevo v tlaku/tahu ve směru vláken v rozmezí 10 000–

15 000 MPa. Přitom napříč vláken jsou hodnoty až 25 x menší. V radiálním směru jsou hodnoty větší o 20–50 % než u tangenciálního směru. Vzájemný poměr se udává E_p : E_r : $E_t = 20:2:1$.

kde: E_p – modul pružnosti v podélném směru, E_r – modul pružnosti v radiálním směru, E_t – modul pružnosti v tangenciálním směru (Gandelová a kol., 2009).

4.1.2.3. Smyková pevnost dřeva

Díky anizotropii a vláknité stavbě má dřevo různou smykovou pevnost v různých anatomických směrech. Obyčejný jednoduchý smyk bez působení jiných napětí se nevyskytuje. Proto je důležité, abychom uvažovali jednotlivé účinky u každého namáhání, kde má smyk svoje uplatnění (Požgaj a kol., 1993).

Proto rozlišujeme smykovou pevnost na:

- Pevnost dřeva ve smyku
- Pevnost dřeva ve smyku při ohybu
- Pevnost dřeva v kroucení

Pevnost ve smyku

Smykové napětí vzniká u nosných konstrukcí, při spojování dřeva šrouby, hmoždinkami, kolíky apod. Pevnost ve smyku zjišťujeme tak, že necháme na těleso působit dvě stejné velké síly, které způsobí posunutí dvou sousedních průřezů. Hodnoty vybraných dřevin meze pevnosti ve smyku jsou uvedeny v Tabulce 8 (Lysý a Jírů, 1954).

Rozděluje pevnost ve smyku u dřeva na:

- Smyková pevnost ve směru vláken v radiální a tangenciální rovině
- Smyková pevnost napříč vláken v radiální a tangenciální rovině
- Smyková (stříhová) pevnost napříč vláken v příčné rovině v radiálním a tangenciálním směru

Tab. 8 Mez pevnosti ve smyku (Gandelová a kol., 2009)

dřevo	Mez pevnosti ve smyku (MPa)					
	Ve směru vláken		Napříč vláken		Stříhová pevnost	
	radiální	tangenciální	radiální	tangenciální	radiální	tangenciální
smrk	6,9	6,8	3,3	2,8	31,8	34,4
dub	10,2	12,2	7,9	7,5	-	-
buk	11,6	14,5	7,7	7,6	52,3	47,1
topol	6,1	7,2	3,5	3,8	31,1	20,5

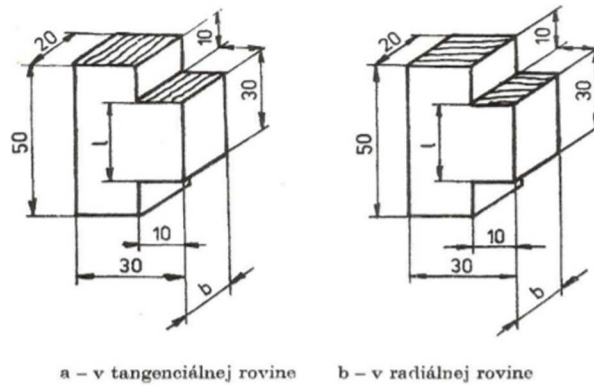
Smyková pevnost ve směru vláken v radiální a tangenciální rovině

Tato pevnost je poměrně malá. Dosahuje hodnot v rozpětí 6–19 MPa. Jehličnaté dřeviny mají pevnost ve smyku ve směru vláken přibližně 1,5 x menší než listnaté dřeviny. Jehličnaté dřeviny mají v obou směrech podobnou hodnotu pevnosti ve smyku. Na rozdíl od listnatých dřevin, které mají v tangenciální rovině hodnotu pevnosti ve smyku o 10-30 % vyšší. I přes malou pevnost je často tímto způsobem dřevo namáháno (spoje krovů) (Matovič, 1993).

Při zjišťování meze pevnosti ve smyku hledáme maximální sílu, při které dojde k deformaci zkušební vzorku. Zkušební vzorky měříme jak v radiálním, tak v tangenciálním směru a měření se řídí normou ČSN 49 0118 (1980). Zkušební vzorek a jeho rozměry jsou uvedeny na Obrázku 15. Daný vzorek vložíme do příslušného stroje a měříme, při jaké síle se vzorek poruší. Rychlost zatížení musí být rovnoměrná. Mez pevnosti ve smyku vypočítáme podle následujícího vztahu:

$$\tau = \frac{F_{max}}{b \times l} \quad [16]$$

kde: τ – napětí ve smyku (MPa), F_{max} – maximální zatížení (N), l – délka smykové plochy (mm), b – šířka smykové plochy (mm)



a – v tangenciálnej rovine b – v radiálnej rovine
Obr. 15 Zkušební těleso (ČSN 49 0118, 1980)

Smyková pevnost napříč vláken v radiální a tangenciální rovině

Tato pevnost je přibližně 2x menší, než pevnost smyku ve směru vláken. Rozdíl hodnot mezi tangenciální a radiální rovinou je minimální. Hodnoty pevnosti ve smyku napříč vláken dosahují 3-8 MPa. Smykem napříč vláken se dřevo namáhá u kolíků, u vložených pér, při dělení dých atd (Matovič, 1993).

Smyková (stříhová) pevnost napříč vláken v příčné rovině

Pevnost stříhová je z druhů pevnosti ve smyku největší. Dosahuje hodnot 20-52 MPa a je přibližně 4 x vyšší, než pevnost ve smyku ve směru vláken. Stříhem se dřevo namáhá u kovových spojů dřevěných konstrukcích, u kolíkových spojů a podobně (Požgaj a kol., 1993).

Smykový modul pružnosti

Stejně jako u normálových napětí je i vztah mezi poměrným posunutím a příslušným napětím zpočátku lineární. Modul pružnosti lze vyjádřit podle následujícího vztahu:

$$G = \frac{d\tau}{dy} \quad [17]$$

Tento vztah je analogický vztahu pro Hookův zákon v tahu/tlaku $\sigma = E \cdot \epsilon$. Z toho vyplývá, že rozlišujeme tři smykové moduly pružnosti (ve směru tangenciálně podélném, radiálně podélném a radiálně tangenciálním). Počítají se z příslušného Youngova modulu pružnosti a odpovídajícího Poissonova čísla podle vztahu:

$$G = \frac{E_{\alpha}}{2 \times (1 + \mu_{\alpha})} \quad [18]$$

kde: E_{α} – youngův modul pružnosti při odklonu podélné osy tělesa od průběhu letokruhů o úhel α , μ_{α} – odpovídající Poissonovo číslo

Průměrné hodnoty modul pružnosti ve smyku G pro dřevo se pohybují v rozmezí 100–2 000 MPa. S různými anatomickými rovinami, ve kterých působí smykové napětí, se hodnoty modulu pružnosti liší. V příčné rovině dosahují hodnoty nejmenších čísel, naopak v radiální rovině jsou největší. Vzájemný poměr mezi rovinami je $G_{pr} : G_{pt} : G_{rt} = 7,5 : 5 : 1 - 10 : 9 : 1$.

kde: G_{pr} – smykový modul pružnosti v radiálně podélném směru, G_{pt} – smykový modul pružnosti v tangenciálně podélném směru, G_{rt} – modul pružnosti v radiálně tangenciálním směru (Zejsa a kol., 2014)

Pevnost dřeva ve smyku při ohybu

Smykové namáhání se objevuje i při namáhání na ohyb, kde je spolu s tahovým a tlakovým napětím je i smykové napětí. Smykové namáhání je se zvětšujícími se rozměry významnější. U malých rozměrů tělesa se u ohybového namáhání smyk skoro nevyskytuje, ale u velkých rozměru tělesa (trámy) se už poměrně často vyskytuje deformace způsobená smykem ve směru vláken. Hodnoty pevnosti ve smyku při ohybu se u jehličnatých dřevin pohybují v rozpětí 1,3-3,5 MPa. (Požgaj a kol., 1993). Při tříbodovém ohybu, kde posouvající síla $F_t = F/2$, vypočítáme maximální smykové napětí při ohybu podle vztahu:

$$\tau = \frac{3 \times F}{4 \times b \times h} \quad [19]$$

kde: τ – napětí ve smyku při ohybu (MPa), F – působící příčné zatížení (N), h – výška (mm), b – šířka (mm)

Pevnost dřeva v kroucení

Při kroucení vznikají smyková napětí ve dvou rovinách. Dané roviny jsou na sebe kolmé. Jedna rovina je rovnoběžná s osou tělesa a druhá rovina je kolmá k ose krouceného tělesa. Při kroucení, kdy osa kroucení je ve směru vláken, dochází k deformaci vlivem smyku ve směru vláken, a to ve formě trhlin. Tato pevnost je asi

1,5 x vyšší než pevnost ve smyku ve směru vláken. Jedná se o nejvýznamnější případ kroucení. Naopak když je osa kroucení kolmo na vlákna, je pevnost malá a dochází k deformaci napříč vláken. Kroucení dřeva se vyskytuje v dřevěných konstrukcích velice málo. Můžeme ho pozorovat např. u mlýnských hřídelí, u nápravy vozu nebo u dřevěných kolíku. Zkoušení meze v krutu se měří na tělesech v podobě hranolu o rozměrech 20x20x400 mm a na strojích se zjišťuje kroutící moment (Matovič, 1993). Následně vypočítáme pevnost v krutu podle vztahu:

$$\tau_K = \frac{M_K}{W_k} \quad [20]$$

kde: τ_K – napětí v krutu (MPa), M_K – kroutící moment (N.mm), W_K – modul průřezu (mm^3) – u čtverce je $W_K = 0,208.a^3$

4.1.2.4. Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu je odpor dřeva proti síle, která působí kolmo na plochu tělesa. Pevnost v ohybu je jedna z nejdůležitějších mechanických vlastností dřeva, protože dosahuje velice vysokých hodnot, které se pohybují v rozmezí od 50 do 130 MPa. Hodnota pevnosti v ohybu se pohybuje mezi pevností tlakovou a tahovou ve směru vláken. Hodnoty vybraných dřevin meze pevnosti v ohybu jsou uvedeny v tabulce 9. Díky vysokým hodnotám pevnosti v ohybu se dřevo používá pro konstrukční prvky, které jsou namáhaný ohybem (Gandelová a kol., 2009).

Tab. 9 Meze pevnosti v ohybu (Ugolev, 1986)

Druh dřeva	Mez pevnosti (MPa)	Druh dřeva	Mez pevnosti (MPa)
smrk	80	dub	108
modřín	112	buk	109
jedle	69	jasan	123

Podobně jako ostatní pevnostní vlastnosti rozdělujeme pevnost dřeva v ohybu na:

- Pevnost v ohybu kolmo na vlákna (radiální nebo tangenciální směr) - vlákna jsou rovnoběžně s podélnou osou tělesa

- Pevnost v ohybu ve směru vláken – vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa (příčný směr ve směru namáhání, nebo kolmo na namáhání)

Sleduje se především první varianta, kde je průběh vláken rovnoběžný s osou tělesa. S druhou variantou se téměř vůbec neuvažuje, protože má velice nízké hodnoty to až 5-10 % pevnosti v ohybu kolmo na vlákna. U pevnosti napříč vláken u jehličnatých dřevin jsou hodnoty v tangenciální směru o 10-12 % větší než v radiálním směru. U listnatých dřevin jsou hodnoty pevnosti v ohybu podobné, liší se maximálně o 24 % (Požgaj a kol., 1993).

Při namáhání na ohyb vznikají na vzorku dva druhy napětí: tahové a tlakové. Tahové napětí vzniká na spodní straně vzorku neboli konvexní straně a tlakové napětí vzniká na horní straně vzorku neboli na konkávní straně. V ose vzorku není normálové napětí a nedochází zde k deformacím. Tuto osu nazýváme neutrální. Se zvětšující se vzdáleností od neutrální osy se normálové napětí zvětšuje a maxima dosahuje na povrchu tělesa. Je známo, že tlaková pevnost dřeva podél vláken je výrazně menší, než pevnost tahová podél vláken. Vznikají nejprve deformace v tlakové zóně v horní části vzorku vybočením vláken. Následně vzniknou deformace v tahové zóně v dolní části vzorku, kdy postupně dojde k úplnému zlomení tělesa. Hladký zlom mají dřeviny s malou pevností a dřeviny křehké. Vlákňitý nebo třískovitý zlom mají dřeviny houževnaté a dřeviny s velkou pevností (Požgaj a kol., 1993).

Pro zkoušku pevnosti v ohybu používáme vzorky ve tvaru tyče se čtvercovým průřezem. Strana čtvercového průřezu bývá 2 cm a délka tyče bývá 30 cm. Vzorek vložíme do trhacího stroje na podpěry vzdálené od sebe 240 mm a zatěžíme silou uprostřed podpěr. Jakmile těleso praskne, odečteme maximální sílu a vypočítáme napětí na mezi pevnosti v ohybu. Rychlost zatěžování má být taková, aby k porušení vzorku došlo v časovém rozmezí 90–120 sekund.

Napětí na mezi pevnosti v ohybu je vyjádřeno vztahem:

$$\sigma_{max} = \frac{3 \times F \times l_0}{2 \times b \times h^2} \quad [21]$$

kde: σ_{max} – napětí v mez pevnosti v ohybu (MPa), F – působící zatížení (N), L_0 – vzdálenost mezi podpěrami (mm), h – výška (mm), b – šířka (mm)

Modul pružnosti ve statickém ohybu

Při měření modulu pružnosti v ohybu se udává pouze modul pružnosti kolmo na vlákna a zkouší se v tangenciálním směru. Modul pružnosti v ohybu vychází z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem. Při zatížení vzorku je konkávní strana namáhána na tlak a strana konvexní na tah. Neutrální osa uprostřed tělesa je nezatížená. Deformace při ohybu je definována jako poměr vzniklého průhybu nosníku a poloměru ohybu (Horáček, 2008). Modul pružnosti ve statickém ohybu je vyjádřen vztahem:

$$E = \frac{f \times l_0^3}{4 \times b \times h^3 \times \Delta y} \quad (\text{MPa}) \quad [22]$$

kde: F – působící síla (N), l_0 – vzdálenost podpěr (mm), b – šířka zkušebního tělesa (mm), h – výška zkušebního tělesa (mm), Δy – průhyb tělesa při zatížení (mm)

4.2. Houževnatost Dřeva

Houževnatost rozeznáváme podle druhu zatížení na statickou a dynamickou. Je to vynaložená práce, která je potřeba k vytvoření plastické deformace a souvisí s plastičností dřeva. Čím větší spotřebovaná práce na plastickou deformaci, tím větší bude houževnatost dřeva.

4.2.1. Statická houževnatost dřeva

Statická houževnatost představuje spotřebovanou mechanickou energii, k tomu, aby vznikla plastická deformace. Neboli je to mechanická práce. Vztah mezi napětím a plastickou deformací je popsán následujícím vztahem:

$$\sigma^2 = 2 \times \lambda \times c \times \varepsilon_{pl} \quad [23]$$

kde: σ – napětí (MPa), λ – koeficient viskozity (Pa.s) – souvisí s vnitřní strukturou dřeva, ε_{pl} – plastická deformace, c – rychlost zatížení (s)

Když je plastická deformace zanedbatelná a deformační práce malá, jde o křehký materiál. Naopak, když je plastická deformace výrazná a deformační práce velká, jedná se o materiál houževnatý (například dřevo) (Gandelová a kol, 2009).

4.2.2. Dynamická houževnatost dřeva

Dynamická nebo rázová houževnatost dřeva se může označovat jako přerážecí práce a udává množství práce, vyjádřená J, potřebné k porušení tělesa. Neboli rázová houževnatost je schopnost dřeva pohltit energie, která vznikne při rázovém zatížení. Čím více práce je potřeba k porušení tělesa, tím je dřevo houževnatější. Houževnatost se obvykle stanovuje v tangenciálním směru napříč vláken, ale u jehličnatých a listnatých kruhovitě pórovitých dřevin se stanovuje i pro směr radiální napříč vláken. V radiálním směru dosahuje rázová houževnatost vyšších hodnot, a to až o 25–50 %. Hodnoty rázové houževnatosti u listnatých dřevin jsou přibližně 2x vyšší než u jehličnatých dřevin. Hodnoty rázové houževnatosti vybraných dřevin jsou uvedeny v Tabulce 10. Zlom u křehkých dřevin je hladký, rovný, případně schodovitý. U houževnatých dřevin je zlom nepravidelný, dlouze třískový (Gandelová a kol., 2009). Houževnatost je významná u těles, která jsou namáhána náhlými velkými silami. Například u sportovního a tělocvičného nářadí (Novák a kol., 1970).

Tab. 10 Hodnoty rázové houževnatosti v ohybu (Ugolev, 1986)

Druh dřeva	Rázová houževnatost (J/cm ²)	Druh dřeva	Rázová houževnatost (J/cm ²)
smrk	3,9	dub	7,7
modřín	5,2	buk	8
jedle	2,9	topol	3,9

Pro zkoušku rázové houževnatosti používáme tělesa o rozměrech 20x20x300 mm, přičemž jedna boční hrana má být v radiální a druhá v tangenciální rovině. Ve středu tělesa změříme výšku a šířku s přesností 0,1 mm. Zkouška se provádí na kyvadlovém Charpyho kladivě. Kladivo pustíme na daný vzorek tak, že kladivo jediným úderem těleso zlomí a odečteme hodnotu práce [W] potřebné k porušení tělesa. Následně vypočteme rázovou houževnatost podle následujícího vztahu:

$$A_w = \frac{W}{b \times h} \quad [24]$$

kde: A_w – rázová houževnatost (J/cm^2), W – práce spotřebovaná na zlomení tělesa (J), b , h – příčné rozměry tělesa (cm)

4.3. Tvrdost

Tvrdost je odpor materiálu proti vniknutí do svojí struktury jiným materiálem. Tvrdost se měří pomocí přístroje, který funguje na principu vnikání cizího tělesa do struktury daného vzorku. Protože dřevo je anizotropní materiál rozeznáváme tři druhy tvrdosti – čelní, radiální a tangenciální. Podle druhu zatížení rozlišujeme statickou a dynamickou tvrdost. Tvrdost se projevuje u opracování materiálu, kde se nástroje se zvětšující se tvrdosti více tupí a hůře se opracovává. Hodnoty statické a dynamické tvrdosti vybraných dřevin jsou znázorněny tabulce 11 (Požgaj a kol., 1993).

Tab. 11 Statická a dynamická tvrdost vybraných dřevin (Matovič, 1993)

dřevo	Statická tvrdost (MPa)			Dynamická tvrdost (J/cm^2)
	čelní	radiální	tangenciální	
modřín	43,5	29	29	0,9
smrk	26	18	18	0,73
bříza	46,5	37	33	0,8
buk	61	43,5	44,5	0,96

4.3.1. Statická tvrdost dřeva

U statické tvrdosti dřeva postupně zatlačujeme ocelovou kuličku rovnoměrným zatížením do plochy materiálu. Hodnoty tvrdosti v příčné rovině jsou o 40 % vyšší u jehličnatých dřevin a o 30 % u listnatých dřevin, než hodnoty v podélných rovinách. Rozdíly hodnot v podélných rovinách jsou minimální. Výjimku tvoří několik listnatých dřevin, které mají zvětšené dřeňové paprsky (buk, dub). Tam je tvrdost v radiální rovině o 5–10 % větší, než tvrdost v tangenciální rovině.

U dřeva zjišťujeme statickou tvrdost dvěma metodami – metodou Brinellovy tvrdosti a metodou Jankovy tvrdosti. Dřeva rozdělujeme do pěti skupin statické tvrdosti (viz Tabulka 12) (Matovič, 1993).

Tab. 12 Rozdělení dřevin podle tvrdosti (Gandelová a kol., 2009)

Měkká dřeva	H < 40 MPa	smrk, lípa
Středně tvrdá dřeva	H = 41–80 MPa	buk, dub, modřín
Tvrdá dřeva	H = 81–100 MPa	habr, akát
Velmi tvrdá dřeva	H = 101–150 MPa	zimostráz
Super tvrdá dřeva	H > 150 MPa	eben, guajak

Brinellova tvrdost

Tato metoda spočívá v tlačení ocelové kuličky do zkušebního tělesa. Kulička má průměr 10 mm. Zatěžující konstantní síla je určena podle tvrdosti dřeva. Měkká dřeva zatěžujeme konstantní silou o hodnotě 100 N a u středně tvrdá silou 500 N a tvrdá dřeva silou 1000 N (Gandelová a kol., 2009).

Tvrdost podle Brinella je vyjádřena vztahem:

$$H_b = \frac{2 \times F}{\pi \times D \times (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [25]$$

kde: H_b – tvrdost podle Brinella (MPa), F – zatěžovací síla (N), D – průměr ocelové kuličky (mm), d – průměr otlačení (mm)

Jankova tvrdost

Tato metoda spočívá v zatlačení polokouličky do materiálu. Tato polokoulička má průměr 11,28 mm a musíme ji zatlačit do daného vzorku, a to do hloubky 5,64 mm, přičemž vznikne otlačená plocha 100 mm². Síla, která byla potřebná k zatlačení polokouličky do dané hloubky udává tvrdost podle Janka (Gandelová a kol., 2009).

Tvrdost podle Janka je vyjádřena vztahem:

$$H_J = \frac{F}{S} \quad [26]$$

kde: H_J – Tvrdost podle Janka (MPa), F – zatěžovací síla (N), S – otláčená plocha ve dřevě (100 mm²)

4.3.2. Dynamická tvrdost dřeva

Tato tvrdost se především stanovuje na radiálních a tangenciálních plochách. U dynamické tvrdosti dřeva používáme kuličku o průměru 25 mm, kterou necháme padat na vzorek z určité výšky (0,5 m). Sledujeme stopu, kterou po sobě kulička zanechá. Čím větší je stopa, tím je dřevo měkčí.

Dynamická tvrdost je vyjádřena vztahem:

$$H_{wy} = \frac{4 \times A}{\pi \times d_1 \times d_2} \quad [27]$$

$$A = m \times g \times h$$

kde: H_{wy} – dynamická tvrdost (J/cm²), A – spotřebovaná práce (J), m – hmotnost kuličky (kg), h – výška pádu kuličky (m), g – gravitační zrychlení ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$), d_1, d_2 – rozměry otláčená napříč a ve směru vláken (cm)

5. Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti jsou takové vlastnosti, u kterých při měření nedojde k porušení celistvosti a chemického složení dřeva. Fyzikální vlastnosti popisují dřevo na základě:

- vnějších vlastností: barva, lesk, textura, vůně
- vnitřních vlastností: hustota
- hlediska reakce na různé fyzikální jevy: vlhkost, teplo, zvuk, elektřina, elektromagnetické vlny (Perelygin, 1965).

5.1. Hustota

Při měření vlastností dřeva patří hustota mezi hlavní fyzikální vlastnosti dřeva, protože ovlivňuje většinu jak fyzikálních, tak mechanických vlastností dřeva. Hustota je

vyjádřena jako podíl hmotnosti tělesa s objemem tělesa a jednotka hustoty dřeva je kg/m³.
Obecný tvar hustoty je podle následujícího vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [28]$$

kde: ρ – hustota (kg/m³), m – hmotnost tělesa (kg), V – objem tělesa (m³)

Pro výpočet hustoty pracujeme podle normy ČSN 49 0108 (1993). Zváží se hmotnost tělesa a změří se strany pro výpočet objemu vzorku. Pokud je složité přesně změřit objem tělesa. Používá se metoda vytlačení vody případně rtuti. Kde těleso ponoříme do kapaliny a objem vytlačené kapaliny se rovná objemu tělesa. Zjištěné hodnoty vložíme do vztahu pro danou hustotu. Rozlišujeme hustotu na tři základní druhy: hustotu dřeva, hustotu dřevní substance a redukovanou hustotu dřeva (Požgaj a kol., 1993).

Hustota dřeva

Na hustotu má velký vliv vlhkost. Platí přímá úměra, čím větší vlhkost tím větší hustota a opačně. Díky vlivu vlhkosti na hustotu stanovujeme tři základní stavy:

- Hustota v suchém stavu: Tato hustota se uvádí kvůli porovnání výsledků při teoretických výpočtech. Z hustoty v suchém stavu lze pomocí nomogramu zjistit hustotu vlhkého dřeva se známou vlhkostí. Je to podíl hmotnosti a objemu absolutně suchém stavu.
- Hustota při 12% vlhkosti: Jde o podíl hmotnosti a objemu při 12% vlhkosti dřeva. Je udávaná ve většině norem, a to především díky tomu, že 12% vlhkosti dřevo dosáhne dlouhodobým působením běžných podmínkách (teplota 20 °C, Vlhkost 65 %) vytápěných místností.
- Hustota vlhkého dřeva (podíl hmotnosti a objemu při dané vlhkosti dřeva)

Podle hustoty při 12% vlhkosti rozdělujeme naše dřeviny do následujících skupin:

- Nízká hustota (hustota je menší než 540 kg/m³) – borovice, smrk, jedle, topol, vrba, olše, osika, douglaska, lípa
- Střední hustota (hustota mezi 540 a 750 kg/m³) – modřín, bříza, buk, dub, ořech, jilm, platan, jasan, třešeň
- Vysoká hustota (hustota větší než 750 kg/m³) – habr, moruše, akát, hruška

Ze všech dřevin na světě má nejmenší hustotu dřevo balzy s hustotou 130 kg/m^3 . Největší hustotu má dřevo guajaku o hustotě 1360 kg/m^3 (Matovič, 1993).

Hustota dřevní substance

Dřevní substance je hmota buněčných stěn bez dutin. Dřevo je porézní materiál, který je tvořen i mezibuněčnými prostory a lumeny cév. Proto je hustota dřeva ($350\text{-}800 \text{ kg/m}^3$) nižší, než hustota dřevní substance. Hustota dřevní substance je závislá na chemickém složení dřeva (celulóza, hemicelulóza a lignin). Protože hustota celulózy, hemicelulózy a ligninu jsou velmi podobné, nezáleží na druhu dřeviny a podílu stavebních látek. Udává se průměrná hodnota hustoty dřevní substance 1530 kg/m^3 . Hustotu dřevní substance vyjadřujeme podílem hmotnosti dřevní substance s objemem dřevní substance (Šlezingerová a kol, 1996).

Redukovaná hustota

Redukovaná hustota je vyjádřena podílem hmotnosti v absolutně suchém stavu a objemem při dané vlhkosti. Ukazuje, kolik sušiny je v nabobtnaném objemu dřeva. Při vlhkosti 0 % je shodná s hustotou dřeva v suchém stavu. Do meze hygroskopicity tato hustota klesá a dál se už nemění, protože dřevo už nebobtná. Dáno je to tím, že ve vzorci se mění je objem tělesa. Hodnota redukované hustoty při mezi hygroskopicity se nazývá konvenční hustota, nebo redukovaná hustota v čerstvém stavu. Je vyjádřena podílem hmotnosti v absolutně suchém stavu s objemem při vlhkosti na a nad mezí hygroskopicity (Horáček, 1998).

5.2. Vlhkost dřeva

Udává množství vody ve dřevě. Protože dřevo je hygroskopický materiál, který dokáže podle okolního prostředí vodu jak přijímat, tak ji odevzdávat, a to ve skupenství plynném i kapalném. Změna vlhkosti dřeva ovlivňuje hustotu, rozměry tělesa (bobtnání a sesychání), mechanické a fyzikální vlastnosti materiálu. Převážně se zvětšující se vlhkostí se vlastnosti dřeva zhoršují (Šlezingerova a kol, 1996). Vlhkost pro výpočet rozdělujeme na vlhkost absolutní a relativní.

Absolutní vlhkost: Je podíl hmotnosti vody z hmotnosti absolutně suchého dřeva. Tato vlhkost se využívá pro charakteristiku fyzikálních a mechanických vlastností. Absolutní vlhkost je dána následujícím vztahem:

$$w_{abs} = \frac{m_w + m_0}{m_0} \times 100 \quad [29]$$

kde: w_{abs} – absolutní vlhkost (%), m_w – hmotnost vlhkého dřeva (kg), m_0 – hmotnost suchého dřeva (kg)

Relativní vlhkost: Je podíl hmotnosti vody s hmotností mokrého dřeva. Tuto vlhkost je důležité znát, pokud chceme vědět procentuální zastoupení vody ve vlhkém dřevě. Tato vlhkost se používá při přejímkách na skladě kulatiny nebo při přejímkách v celulózo-papírenském průmyslu (Horáček, 1998).

Relativní vlhkost je vyjádřena vztahem:

$$w_{rel} = \frac{m_w + m_0}{m_w} \times 100 \quad [30]$$

kde: w_{rel} – relativní vlhkost (%), m_w – hmotnost vlhkého dřeva (kg), m_0 – hmotnost suchého dřeva (kg)

Podle uložení vody ve dřevě dělíme vodu na: chemicky vázanou, vázanou a volnou vodu.

Chemicky vázaná voda (molekulární): Tato voda je součástí chemických složek dřeva. Nelze ji pomocí klasického sušení odstranit. Jediný způsob, jak odstranit chemicky vázanou vodu, je spálením dřeva. Zjišťuje se pomocí chemických analýz. Množství této vody je v rozmezí 1-2 % z celkové hmotnosti dřeva. Na fyzikální a mechanické vlastnosti tato voda nemá vliv (Gandelová, 2009).

Vázaná voda (hygroskopická): Tato voda se váže pomocí vodíkových můstků na hydroxylové skupiny amorfních částí celulózy a hemicelulózy. Vázaná voda se vyskytuje při rozmezí absolutní vlhkosti 0-30 %. Na fyzikální a mechanické vlastnosti má tato voda největší význam (Požgaj a kol., 1993).

Volná voda (kapilární): Tato voda se vyskytuje až při absolutní vlhkosti nad 30 %, tedy jakmile se naplní buněčné stěny vodou vázanou, začnou se naplňovat ve dřevě lumeny a mezibuněčné prostory vodou volnou. Na fyzikální a mechanické vlastnosti nemá moc velký význam.

Mez hygroskopicity (mez nasycení buněčných stěn) je hranice mezi vodou vázanou a vodou volnou. V tomto stavu jsou buněčné stěny plně nasyceny a v dutinách buněk není ještě žádná voda. Tato mez se pohybuje pro naše dřeviny v rozmezí vlhkosti 22-35 % (Horáček, 1998).

Při měření vlhkosti se držíme normy ČSN 49 0103 (1979). Jsou dvě základní metody pro měření vlhkosti – přímá a nepřímá. Přímé metody jsou váhová, destilační a jodometrická titrace. U těchto metod je výhodou přesnost a možnost měřit i nad mezí hygroskopicity, ale nevýhodou je jejich časová náročnost. Z nepřímých metod používáme elektrofyzikální (odporové, dielektrické), akustické, radiometrické. U těchto metod je výhodou časová nenáročnost, terénní použití a jednoduchost, ale nevýhodou je jejich malá přesnost, nutná korekce dle dřeviny a měření jen do meze hygroskopicity (Požgaj a kol., 1993).

Bobtnání a sesychání

Bobtnání a sesychání je jev, u kterého dochází ke změně rozměru při změně vlhkosti. Ke změnám rozměrů dochází jen do meze hygroskopicity. Tedy když se mění vázaná voda ve dřevě. Už víme, že voda vázaná se váže na buněčné stěny dřeva a tím dochází k oddalování nebo přibližování fibrilární struktury v buněčné stěně. Orientace buněčné stěny a převážně vrstvy S2 ovlivňuje velikost rozměrových změn v různých anatomických směrech dřeva. Největší rozměrové změny dřeva u bobtnání a sesychání jsou v tangenciálním a radiálním směru. Naopak v podélném směru jsou rozměrové změny velmi malé. To díky tomu, že voda není schopna se dostat mezi fibrily do valenčního řetězce v podélném spojení (Gandelová a kol., 2009).

Bobtnání

Bobtnání je proces při, kterém se zvětšují rozměry tělesa (lineární, plošné a objemové) s přibývajícím vodou vázanou ve dřevě. Bobtnání dělíme podle směru na tangenciální, radiální a v podélném směru. Bobtnání můžeme také vyjádřit pomocí koeficientu. Koeficient nám ukazuje, o kolik se změní rozměry, když se zvětší vlhkost o 1 %. Poměr mezi jednotlivými směry (tangenciální, radiální, podélný) bobtnání se udává $\alpha_t : \alpha_r : \alpha_l = 20 : 10 : 1$ (Gandelová a kol., 2009).

kde: α_t – tangenciální bobtnání, α_r – radiální bobtnání, α_l – podélné bobtnání

Bobtnání je vyjádřeno vztahem:

$$\alpha_i = \frac{\alpha_{iw2} + \alpha_{iw1}}{\alpha_{iw1}} \times 100 \quad (\%) \quad [31]$$

kde: α – rozměr tělesa, plocha nebo objem (mm, mm², mm³), i – index udávající směr, plochu nebo objem, w_1 – vlhkost před bobtnáním (%), w_2 – vlhkost po bobtnání (%)

Koeficient je vyjádřen vztahem:

$$k_{\alpha i} = \frac{\alpha_i}{w_2 - w_1} \quad (\%/1 \%) \quad [32]$$

kde: α_i – bobtnání (%)

Sesychání

Sesychání je proces při, kterém se zmenšují rozměry tělesa (lineární, plošně a objemové) s ubývající vodou vázanou ve dřevě. Podle koeficientu objemového sesychání rozdělujeme dřevo do následujících skupin (viz tabulka 13)

Tab. 13 Rozdělení dřeva podle koeficientu objemového sesychání (Gandelová a kol., 2009)

Druh sesychání	Koeficient sesychání	dřeva
Málo sesychává	$0.4 > k_{\beta 0}$	Vrba, olše, topol, akát
Středně sesychává	$0.4 > k_{\beta 0} > 0.47$	Borovice, smrk, jedle, dub, jilm, javor,
Hodně sesychává	$0.47 < k_{\beta 0}$	Modřín, bříza, buk, habr, lípa

Koeficient sesychání nám ukazuje, o kolik se změní rozměry tělesa, když se vlhkost zmenší o 1 % (Gandelová a kol., 2009).

Sesychání je vyjádřeno vztahem:

$$\beta_i = \frac{\alpha_{iw1} + \alpha_{iw2}}{\alpha_{iw1}} \times 100 \quad (\%) \quad [33]$$

kde: α – rozměr tělesa, plocha nebo objem (mm, mm², mm³), i – index udávající směr, plochu nebo objem, w_1 – vlhkost před sesycháním (%), w_2 – vlhkost po sesychání (%)

Koeficient je vyjádřen vztahem:

$$k_{\beta_i} = \frac{\beta_i}{w_2 - w_1} \quad (\%/1 \%) \quad [34]$$

kde: β_i – sesychání (%)

5.3. Tepelné vlastnosti dřeva

Tepelné vlastnosti dřeva nás zajímají při technologických procesech (sušení, lisování), plastifikaci, nebo vlivu teploty na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Při změnách teploty dřeva dochází ke změnám rozměru těles dřeva. Když se teplota dřeva zvětšuje, zvětšuje se energie molekul dřeva a tím pádem se zvětší rozměry tělesa. Teplotní roztažnost je charakterizovaná podobně jako u bobtnání a sesychání koeficientem teplotní roztažnosti. Koeficient teplotní roztažnosti se definuje jako podíl změny rozměru a původních rozměrů při závislosti na teplotě a vyjadřuje změnu rozměru při ohřátí dřeva o 1 K. Kvůli anizotropii je teplotní roztažnost v každém směru jinak velká. Poměr teplotní roztažnosti dřeva je $\alpha_t : \alpha_r : \alpha_l = 15 : 10 : 1$. Protože hodnoty teplotní roztažnosti jsou zhruba 10^4 x menší než hodnoty vlhkostní roztažnosti u bobtnání a sesychání, můžeme teplotní roztažnost zanedbat. Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti vybraných dřevin jsou znázorněny v Tabulce 14 (Gandelová a kol., 2009).

Tab. 14 Hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti dřeva (Gandelová a kol., 2009)

Druh dřeva	$10^6 \cdot \alpha_t$	$10^6 \cdot \alpha_r$	$10^6 \cdot \alpha_l$
smrk	34,6	23,9	3,5
jedle	31,6	21,7	3,9
javor	37,6	28,4	4,2

Měrné teplo

Veličina měrné teplo je schopnost materiálu akumulovat teplo. Je to množství tepla potřebného k ohřátí jednotkové hmotnosti dřeva o jeden kelvin. Měrné teplo závislí na teplotě a vlhkosti dřeva a naopak není závislí na druhu dřeva a jeho hustotě.

Průměrná hodnota měrného tepla při teplotě 0 °C a vlhkosti 0 % se udává 1,45 J/kg K a měrné teplo vody je 4,187 J/kg K. Kvůli většímu měrnému teple vody se zvětšuje měrné teplo dřeva s přibývajícím vlhkostí dřeva (viz tabulka 15) (Zejska a kol., 2014).

Měrné teplo se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$c = \frac{Q}{m \times \Delta T} \quad [35]$$

kde: c – měrné teplo (J/kg K), Q – množství tepla (J), m – hmotnost tělesa (kg), ΔT - rozdíl teplot (°K)

Tab. 15 Vliv vlhkosti dřeva na měrné teplo (Zejska a kol., 2014)

Druh dřeva	Měrné teplo dřeva (J/kg.K) při různé vlhkosti dřeva					
	0 %	5 %	10 %	20 %	30 %	100 %
smrk	1,35	1,51	1,63	1,8	2,18	2,8
borovice	1,41	1,54	1,66	1,87	2,33	2,8
dub	1,45	1,59	1,67	1,91	2,37	2,79
buk	1,46	1,6	1,71	1,92	2,41	2,83

Přenos tepla ve dřevě

Přenos tepla ve dřevě se přenáší ve třech formách, a to vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací). Prouděním a sáláním se přenáší teplo u dřeva minimálně. Proto se zabýváme především vedením tepla. Přenášení tepla ve dřevě je způsobeno vnitřním pohybem molekul, které na sebe vzájemně naráží a tím přenáší teplo. Závisí na vzdálenosti molekul a na kinetické energii. Pohyb molekul v tuhých látkách je větší, než u tekutých látek, protože vzdálenosti molekul tuhých látek je menší, než u tekutin (Horáček, 1998).

Vedení tepla

Vedení tepla ve dřevě vyjádříme Fourierovým zákonem. Vedení tepla lze vyjádřit vztahem 36, a to pomocí integrované rovnice vycházející z Fourierova zákona.

$$\frac{Q}{S_t} = \lambda \times \frac{d_v}{d_l} \quad [36]$$

kde: Q – množství tepla (J), d_v – teplotní rozdíl na koncích tělesa (°K), S – činná plocha tělesa (m²), d_l – délka tělesa (m), t – čas (s), λ – koeficient tepelné vodivosti (W/m.K)

Na vedení tepla má ve dřevě vliv anatomická stavba dřeva, hustota a vlhkost dřeva. Vedení tepla v podélném směru je 1,5-2,5 x větší než v příčném směru. Nejvyšší jsou hodnoty v podélném směru, následují hodnoty napříč vláken v radiálním směru a nejmenší jsou hodnoty napříč vláken v tangenciálním směru. To díky orientaci fibril v buněčných stěnách. Pro vyjádření vedení tepla používáme koeficient tepelné vodivosti (Zejda a kol., 2014). Koeficient tepelné vodivosti udává množství tepla, které projde za jednotku plochy za jednotku času při jednotkovém gradientu teploty. Čím menší je koeficient tepelné vodivosti, tím je materiál lepším izolantem. Hodnoty koeficientu tepelné vodivosti u vybraných materiálů: dřeva ve směru vláken $\lambda = 0,25-0,45$ W/m.K, dřeva napříč vláken $\lambda = 0,12-0,18$ W/m.K, vzduchu $\lambda = 0,024$ W/m.K, vody $\lambda = 0,59$ W/m.K, betonu $\lambda = 0,93$ W/m.K, oceli $\lambda = 20$ W/m.K. Zde je vidět že dřevo je dobrým izolantem.

Se zvětšující se hustotou se zvětšuje tepelná vodivost, protože s přibývajícím hustotou roste podíl dřevní substance a klesá podíl vzduchu, který má malou teplotní vodivost. Tepelná vodivost je závislá i na vlhkosti. Se zvětšující se vlhkostí dřevo lépe vede teplo (Požgaj a kol., 1993).

Teplotní vodivost neboli měrná teplotní vodivost je schopnost tělesa vyrovnat teplotní rozdíly. Je definována součinitelem teplotní vodivosti. Tento součinitel se vyjádří z následujícího vztahu:

$$a = \frac{\lambda}{c \times \rho_0} \quad [37]$$

kde: a – součinitel teplotní vodivosti (m²/s), c – měrné teplo (J/kg.K), λ – koeficient tepelné vodivosti (W/m.K), ρ_0 – hustota dřeva (kg/m³)

Stejně jako u tepelné vodivosti, i teplotní vodivost závisí na hustotě a vlhkosti. Se zvětšující se hustotou dřeva se součinitel zmenšuje. A se zvětšující se vlhkostí dřeva, nad mez hygroscopicity, se hodnota teplotní vodivosti zmenšuje. Součinitel teplotní vodivosti je v podélném směru větší, než napříč vláken a hodnoty napříč vláken v radiálním a tangenciálním jsou podobné (Matovič, 1993).

5.3.1. Vliv teploty na vlastnosti dřeva

Obecně platí, že mechanické vlastnosti dřeva se snižují při zahřátí a zvyšují při mražení. Působení teploty rozlišujeme na tři základní oblasti:

- Nízké teploty: pod bodem mrazu
- Střední teploty: od bodu mrazu do teploty začínajícího rozpadu dřeva
- Vysoké teploty: od teploty začínajícího rozpadu dřeva do bodu vznícení dřeva

Dále se zohledňuje doba působení tepla na materiál: Krátkodobý vliv teploty a Dlouhodobý vliv teploty

Přibližný vliv teploty na mechanické vlastnosti dřeva je znázorněn v tabulce 16 a 17 (Wood handbook, 2010).

Tab. 16 Vliv teploty na mechanické vlastnosti dřeva (Gerhards, 1982)

Vlastnosti	Vlhkost	Relativní změna mechanických vlastností od 20 °C	
		Při -50 °C	Při +50 °C
	(%)	(%)	(%)
Modul pružnosti rovnoběžně s vlákny	0	+11	-6
	12	+17	-7
	>MH	+50	-
Modul pružnosti napříč vláken	12	-	-35
	≥ 20	-	-38
Smykový modul	> MH	-	-25
Pevnost v ohybu	11-15	+35	-20
	> MH	+110	-25

Tab. 17 Vliv teploty na mechanické vlastnosti dřeva (Gerhards, 1982)

Vlastnosti	Vlhkost	Relativní změna mechanických vlastností od 20 °C	
		Při -50 °C	Při +50 °C
	(%)	(%)	(%)
Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	0-12	-	-4
Pevnost v tahu napříč vláken	11-16	-	-20
	≥ 18	-	-30
Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny	0	+20	-10
	12-45	+50	-25
	>MH	-	-25
Pevnost v tlaku napříč vláken	0-6	-	-20
	≥ 10	-	-35
Pevnost ve smyku rovnoběžně s vlákny	> MH	-	-25

Vliv nízkých teplot na vlastnosti dřeva

Pružnost

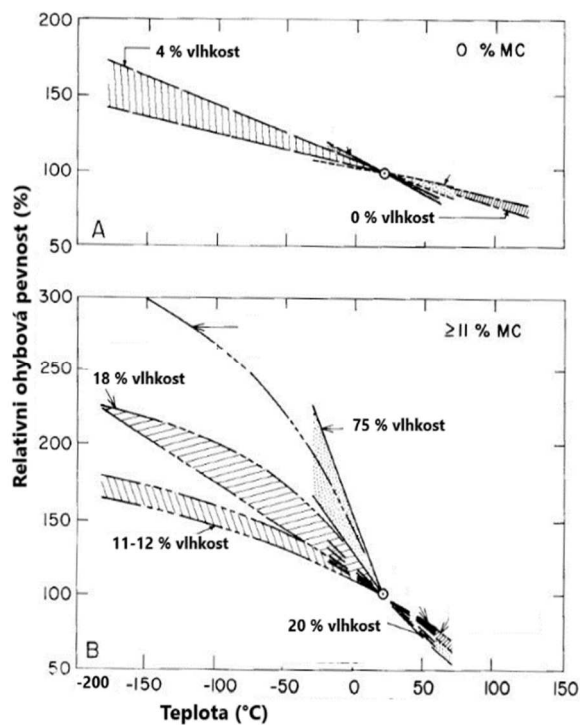
Modul pružnosti se vlivem nízkých teplot zvyšuje. Čím větší je vlhkost, tím rychleji se zvětšuje modul pružnosti a hodnota modulu pružnosti je s přibývajícím vlhkostí o to větší. Pokles teploty o 1 °C zvyšuje modul pružnosti u smrku o 0,13 % a u borovice o 0,34 % (Zhao a kol., 2015).

Pevnost

Všeobecně platí, že pevnost dřeva je vyšší při nízké teplotě pod bodem mrazu a libovolné vlhkosti, než při teplotě pokojové. S teplotou -180 °C se zvětšuje pevnost až o

140–240 % své původní hodnoty. Hodnoty pevnosti dřeva v tlaku ve směru vláken a pevnosti v ohybu jsou u zmrzlého dřeva (borovice, dub a bříza) při vlhkosti nad mezí hygroskopicity vyšší o 35 %, než u pokojové teploty (Perelygin, 1965).

S poklesem teploty pod 0 °C se pevnost v ohybu zvětšuje. Čím je vlhkost dřeva větší, tím je zvětšení hodnoty pevnosti ohybu výraznější. To je vidět na obrázku 16. Pevnost v tahu se pozvolna snižuje se snižující se teplotou pod bod mrazu. Největší hodnota pevnosti v tahu je při rozmezí teplot 0-20 °C a vlhkosti 10 % (Gerhards, 1982).



Obr. 16 Účinek teploty a vlhkosti na pevnost v ohybu při 20 °C (Gerhards, 1982)

Pevnost ve smyku stoupá s teplotou pod bodem mrazu. Hodnoty pevnosti ve smyku a štípatelnosti jsou u zmrzlého dřeva (borovice, dub a bříza) při vlhkosti nad mezí hygroskopicity vyšší o 75 % než u pokojové teploty. U namáhání na smyk většinou dojde k porušení dřeva dříve jiným způsobem, než právě smykem (Matovič, 1993).

Absolutně suché dřevo má jiný průběh změny pevnosti než vlhké dřevo nad mezí hygroskopicity. U suchého dřeva borovice se pevnost v tlaku zvyšuje pozvolna, a to přibližně o 10 %. U vlhkého dřeva nad mezí hygroskopicity se pevnost v tlaku zvýší přibližně o 40 %. Největšího zvýšení se dosahuje při teplotách okolo -20 až -30 °C. Při stoupající vlhkosti při nízkých teplotách pevnost stoupá, a to až do 85% vlhkosti. Po

překročení 85% vlhkosti pevnost klesá, a to až do odpovídající hodnoty meze hygroskopicity (Matovič, 1993).

Houževnatost

Dřevo je křehčí a hodnoty houževnatosti dřeva klesají se snižující se teplotou pod bodem mrazu. Hodnoty houževnatosti dřeva jsou u zmrzlého borového dřeva při vlhkosti na mezi hygroskopicity 2 x nižší, než hodnoty houževnatosti dřeva při pokojové teplotě a u dubového dřeva jsou hodnoty o 9% nižší, než hodnoty houževnatosti dřeva při pokojové teplotě (Matovič, 1993).

Vlhkost

Zmrazení vody ve dřevě závisí na velikosti kapilár a množství jiných rozpustných látek ve dřevě. Čím je menší průměr kapilár, tím nižší teplota je potřeba na zmrazení vody ve dřevě. Volná voda mrzne při teplotě $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vázaná voda mrzne při teplotě $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Perelygin, 1965).

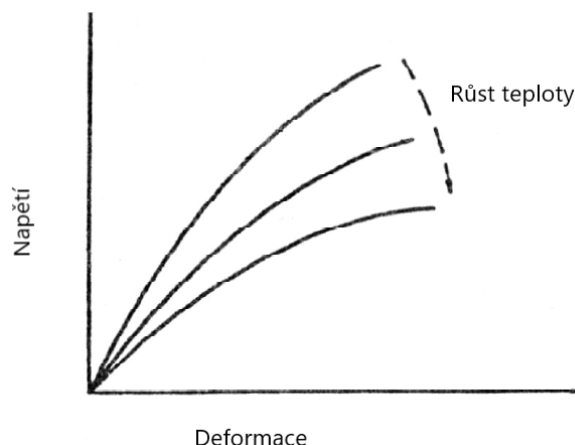
Akustické vlastnosti dřeva

Se snižující se teplotou pod bodem mrazu vzrůstá rychlost zvuku ve dřevě.

Vliv vysokých teplot na vlastnosti dřeva

Působení teploty způsobuje změnu strmosti křivky na pracovním diagramu (vztah mezi napětím a deformací). Na obrázku 17 je vidět, že se zvětšující se teplotou klesá strmost křivky. Tím pádem jsou menší hodnoty modulu pružnosti a pevnostní charakteristiky. Platí, že čím je vyšší teplota a delší doba působení, tím je snížení vlastností výraznější (Bodig, Jayne, 1982).

Vlivem teploty do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ se mechanické vlastnosti mění jen dočasně a nad teplotou $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ už se mechanické vlastnosti mění nastálo. Při teplotách nižších než $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou změny ve struktuře dřeva minimální. Při teplotách v rozmezí $180\text{--}280\text{ }^{\circ}\text{C}$ už jsou změny ve struktuře dřeva výraznější a při teplotě nad $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází k degradaci materiálu (Hill, 2006).



Obr. 17 Vliv teploty na napětovo – deformační diagram (Bodig a Jayne, 1982)

Pružnost

Při zvyšování teploty do 165 °C se zvětšuje hodnota modulu pružnosti. Nad teplotou 160–170 °C se modul pružnosti už snižuje. Snižování hodnoty modulu pružnosti při zvětšení teploty je pomalejší, než u pevnosti dřeva (Reinprecht, 2008). Velikost změny modulu pružnosti závisí na dřevině. U dřeviny smrk se při tepelném zpracování sníží modul pružnosti o 3,5 %. (Percin a kol., 2016)

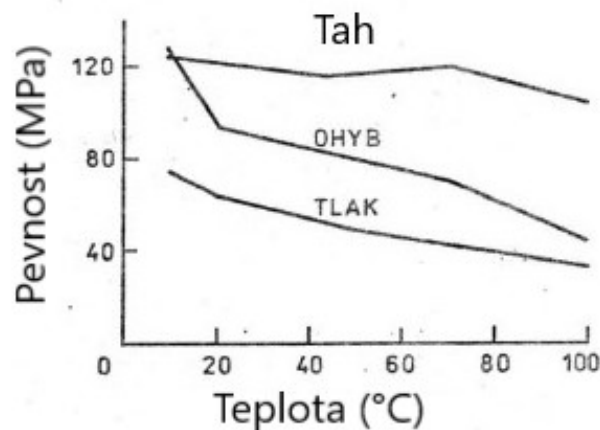
Pevnost

Pevnost dřeva je závislá na hustotě a vlhkosti. Hustota i vlhkost se působením vyšších teplot zmenšuje, tudíž pevnost dřeva je v některých případech nižší (Esteves a Pereira, 2009).

Pevnost dřeva také závisí na obsahu hemicelulózy ve dřevě. Dřeviny s větším obsahem hemicelulózy ve dřevě více podléhají teplotnímu zatížení. Pevnost dřeva také závisí na směru vláken. Při zatížení napříč vlákna dřevo lépe odolává teplotnímu zatížení, než při zatížení ve směru vláken. Při teplotách 20-50 °C je vliv na pevnost v ohybu velmi malý. Vliv teploty se začíná více projevovat až při překročení 60 °C (Schiniewind, 1968).

Při teplotách v rozmezí 80-180 °C dochází k mírnému zvětšení ohybové pevnosti, což je zapříčiněno především zmenšením vlhkosti dřeva. Nad touto hranicí začíná ohybová pevnost klesat. Při teplotě 220 °C se pevnost ohybu snižuje přibližně o 10-40 % (Schiniewind, 1968).

Podle výzkumu Gaffa a kol (2019) při působení teploty 210 °C klesá pevnost v ohybu u dřeviny smrku o 49 % své původní pevnosti. Pevnost tahová po působení vyšších teplot klesá v rozsahu 10-30 % podobně jako u ohybové pevnosti a dřevo je křehčí. Na pevnosti v tlaku se vyšší teplota výrazněji neprojevuje. Případně můžeme pozorovat pozvolné snížení pevnosti v tlaku. Pevnost ve smyku se působením vyšších teplot snižuje. Čím větší je teplota, tím je pokles výraznější (Reinprecht, 2008). Na obrázku 18 je možné vidět, jaký má vliv zvětšující se teplota na pevnost v ohybu, tlaku a tahu (Perelygin, 1965).



Obr. 18 Vliv teploty na pevnost dřeva (Perelygin, 1965)

Houževnatost

Všeobecně platí, že se zvětšující se teplotou houževnatost dřeva klesá. To díky narušování stavebních polymerů při vyšších teplotách (Reinprecht, 2008). Snížení hodnoty houževnatosti je mnohem výraznější, než u statické pevnosti v ohybu. Při teplotě 220 °C se houževnatost dřeva snižuje u dřeviny:

- smrku o 25 %
- douglasky o 34 %
- buku o 81 %
- olše o 63 %

U listnatých dřevin se houževnatost dřeva snižuje výrazněji, než u jehličnatých dřevin. To díky vyššímu obsahu pentosanů ve dřevě (Požgaj a kol., 1993). Podle výzkumu Gaffa a kol. (2019) roste houževnatost do teploty 160 °C. Při této hodnotě houževnatost vzroste u dřeviny smrk až o 29,9 % a u dřeviny dub o 30,9 %. S dále se zvětšující teplotou

houževnatost klesá. Při teplotě 210 °C houževnatost klesá u smrku o 39,8 % a u dubu o 32,2 % ve srovnání s nemodifikovaným dřevem.

Tvrдост

Tvrдост dřeva po působení vyšších teplot podle několika studií ukazuje různé změny. Některé studie uvádí pokles tvrdosti dřeva, jiné zase zvýšení tvrdosti dřeva. Tvrдост dřeva závisí na druhu dřeva a jeho zpracování. U dřeviny smrk tvrdost klesá v podélném směru o 19,7 %, v radiálním směru o 43 % a v tangenciálním směru o 42,5 % (Gunduz a kol., 2009). Vyšší tvrdost dřeva při teplotě do 200 °C způsobuje při degradaci hemicelulózy větší podíl krystalické celulózy (Kocaefe a kol., 2008).

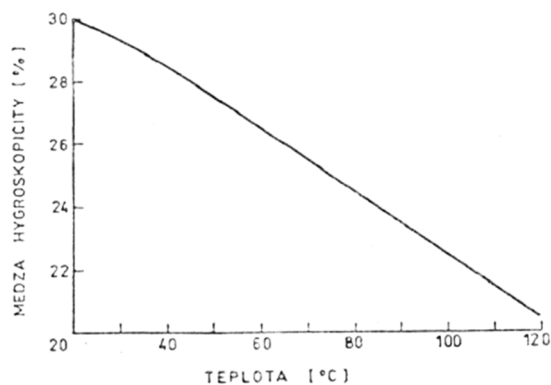
Hustota

Pokles hustoty dřeva až o 7 % způsobí působení teploty 140 °C na dřevo po dobu 8 dnů. Klesající tendence hustoty je zapříčiněná převážně tím, že při zvýšené teplotě se odbourávají chemické složky, a to především hemicelulóza. Tím pádem se snižuje hmotnost tělesa. Rozměr tělesa se sice také zmenšuje, ale ne tak výrazně, jako hmotnost. U smrku při působení teploty 200 °C po dobu 24 hodin poklesne hustota o 15,5 % (Gunduz a kol., 2009).

Vlhkost

Vliv samostatné teploty na dřevo se těžko určuje, protože dřevo téměř vždy obsahuje nějaké procento vody. Vlhkost dřeva má výrazně větší vliv na vlastnosti než teplota. Při zvětšení teploty dochází k rozkladu polymeru, a to způsobuje pokles hydroxylových skupin, které jsou schopny na sebe vázat vodu. To má za následek snížení meze hygroskopicity. Se zvyšující se teplotou klesá vlhkost na mezi hygroskopicity, a to přibližně o 10 % při zvýšení teploty o 10 °C (Dubovský, 1993).

Pokles meze hygroskopicity je znázorněn na obrázku 19. Při teplotě 220 °C je rovnovážná vlhkost menší přibližně o polovinu než při pokojové teplotě.



Obr. 19 Změna meze hygroskopicity v závislosti na teplotě (Siau, 1984)

Akustické vlastnosti dřeva

Při tepelně úpravě nastává lepší rozměrová stabilita a tím se zlepšují akustické vlastnosti dřeva. Zlepšují se absorpční vlastnosti dřeva (Reinprecht, 2008).

6. Metodika

Experiment se zabýval vlivem teplotního zatížení na statický ohyb a dynamický ohyb neboli rázovou houževnatost. Teplotní zatěžování probíhalo ve dvou variantách. První varianta bylo jednocyklické zatěžování (zmrazení a ohřívání) a druhá varianta dvěcyklická zatěžování (2 x první cyklus). Po každé variantě následovalo zkoušení statického ohybu a dynamického ohybu (rázové houževnatosti). Zároveň měla každá varianta i referenční skupinu těles bez teplotního zatěžování. Následně byl experiment vyhodnocen.

6.1. Příprava materiálu

Vzorky pro statický ohyb byly připraveny podle normy ČSN 49 0115 (1979). Vzorky pro dynamický ohyb byly připraveny podle normy ČSN 49 0117 (1980).

Pro zkoušení teplotního zatížení bylo připraveno celkem 180 vzorků smrkového dřeva (*Picea abies*). Vzorky neměly žádnou viditelnou vadu (suky, trhliny, hniloba, letokruhy, točitost vláken atd.), která by mohla zkreslit výsledky. Byly nařezány na rozměr 20x20x300 mm s odchylkou desetín milimetrů.

Vzorky byly rozděleny do dvou skupin tak, že každý typ zatěžování (statický, dynamický) byl prováděn na 90-ti vzorcích. Dále byly vzorky rozděleny do tří skupin, takže 30 vzorků bylo určeno jako referenční vzorky, 30 vzorků pro jednocyklické zatěžování a 30 vzorků pro dvěcyklická zatěžování. Každý vzorek byl viditelně označen (ISOI.). První číslice označuje pořadové číslo vzorku. Druhá dvě písmena označují, o jaký typ mechanického zatížení se jedná – ve zkratce SO pro statický ohyb, nebo DO pro dynamický ohyb. Písmena na konci označují, o jaký typ teplotního zatížení se jedná – ve zkratce I pro jednocyklické zatěžování, nebo I+II pro dvoucyclické zatěžování, nebo se jedná o referenční vzorek a ten je znázorněn písmenem R. U vzorků pro dynamický ohyb byly takto popsány oba konce vzorku. (viz. obr. 20)



Obr. 20 Smrkové vzorky

Po rozdělení vzorků do daných skupin a jejich označení byly vzorky změřeny a zváženy. Příčné rozměry byly změřeny digitálním posuvným měřítkem s přesností na setiny milimetrů, a to tak, že tloušťka vzorku odpovídala šířce radiální roviny a šířka vzorku odpovídala šířce tangenciální roviny. Délka vzorku byla změřena pravítkem o délce 50 cm. Hmotnost vzorku byla měřena na laboratorních vahách s přesností na setiny gramu. Následně byla vypočítána počáteční hustota podle následujícího vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad [38]$$

kde: ρ – hustota (kg/m^3), m – počáteční hmotnost tělesa (kg), V – objem tělesa (m^3) –

Všechny vzorky dřeva byly poté vloženy do klimatizační komory (viz. obr. 21) a naklimatizovány na vlhkost 12 %. Klimatizační komora byla nastavena na teplotu 20 ° C a relativní vzdušnou vlhkost na 65 %. Vzorky byly v klimatizační komoře vyskládané do šesti sloupců podle skupin a zároveň tak, aby každý vzorek měl vedle sebe prostor pro proudění vzduchu. Systém skládání byl následovný: V první řadě každého sloupce byly vzorky skládány kolmo na směr ukládacího roštu v pravidelných odstupech tak, aby vedle sebe měly vždy stejné mezery. V druhé řadě byly vzorky skládány podobně ale směr jejich kladení byl o 90° otočený. Další řady byly kladeny obdobně. V jednom sloupci byly vzorky vždy jen pro jeden druh zatěžování. Během klimaticace byla průběžně sledována hmotnost šesti vybraných vzorků z každého sloupce. Ve chvíli, kdy se jejich hmotnost ustálila, vzorky dosáhly vlhkosti 12 %.



Obr. 21 Klimatizační komora

6.2. Teplotní zatěžování

Vzorky byly zatíženy dvěma způsoby.

- První způsob – jednocyklové teplotní zatížení, kdy u vzorku proběhlo jedenkrát mražení s následným ohřívání.
- Druhý způsob – dvoucyklové teplotní zatížení, kde u vzorků proběhlo dvakrát jednocyklové teplotní zatížení.

Výsledky se byly porovnány s referenčními vzorky, které nebyly teplotně zatěžovány.

6.2.1. Referenční vzorky

Referenční vzorky nebyly teplotně zatěžovány ani nebyly nijak jinak upravovány. Sloužily k porovnání se vzorky, které byly teplotě zatíženy. Jakmile vzorky dosáhly vlhkosti 12 %, podle výše popsaného postupu byla zvážena jejich hmotnost a změřeny jejich rozměry. Podle vzorce 38 byla vypočítána jejich hustota při vlhkosti 12 %. Následně byly změřeny jejich ohybové charakteristiky (ohybová pevnost, modul pružnosti v ohybu, průhyb a rázová houževnatost).

6.2.2. Jeden cyklus teplotního zatížení

Vzorky při jednom cyklu teplotního zatížení prošly mražením a ohříváním. Mrazící box (viz. obr. 22) byl nastaven na teplotu $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jakmile se v boxu nastavená teplota ustálila byly do něj postupně vkládány vzorky dřeva, vždy 10 kusů v 15-ti minutových intervalech. Vzorky byly uloženy do mrazícího boxu na dobu 12 hodin. Uspřádány byly do sloupců stejným způsobem jako do klimatizační komory. Po uplynutí 12 hodin byla nastavena laboratorní sušárna na teplotu $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzorky byly postupně vyndávány z chladícího boxu, podle výše popsaného postupu byla zvážena jejich hmotnost a změřeny jejich rozměry po mražení. Podle vzorce 38 byla vypočítána jejich hustota. Následně byly vzorky postupně ukládány do laboratorní sušárny opět na dobu 12 hodin. Po uplynutí 12 hodin byla opět zvážena jejich hmotnost a změřeny jejich rozměry. Podle vzorce 38 byla vypočítána hustota po ohřívání. Na závěr byly změřeny ohybové charakteristiky dřeva (ohybová pevnost, modul pružnosti v ohybu, průhyb a rázová houževnatost).

6.2.3. Dva cykly teplotního zatížení

Vzorky, které byly připravené na dva cykly teplotního zatížení prošly 2x prvním cyklem. První cyklus byl proveden stejně, jako u měření vzorků pro jeden cyklus teplotního zatížení. Následně byly vzorky vloženy do klimatizační komory a byly naklimatizovány na vlhkost 12%. Klimatizační komora byla nastavena na teplotu 20 ° C a relativní vzdušnou vlhkost na 65 %. Během klimatizace byl sledován průběh změny hmotnosti šesti vybraných vzorků. Jakmile se hmotnost ustálila, vzorky dosáhly vlhkosti 12 %. Druhý cyklus teplotního zatížení se prováděl stejně jak první cyklus. Po dokončení druhého cyklu byly změřeny ohybové charakteristiky (ohybová pevnost, modul pružnosti v ohybu, průhyb a rázová houževnatost).



Obr. 22 Mrazicí box

Sušení vzorků a výpočet vlhkosti

Po skončení měření statického a dynamického ohybu byly všechny vzorky vloženy do laboratorní sušárny (viz. obr. 23). Na sušárně byla nastavena teplota 103 °C. Všechny vzorky byly vysušeny na vlhkost 0 %. Opět byl sledován průběh změny hmotnosti 10-ti vybraných vzorků a ve chvíli, kdy se hmotnost ustálila, vzorky dosáhly této vlhkosti. Vysušené vzorky byly zváženy na laboratorní váze. Tím byla zjištěna hmotnost suchých vzorků. Podle vzorce 39 byla pak vypočtena přesná vlhkost vzorků v každé fázi měření.

$$w_{abs} = \frac{m_w + m_0}{m_0} \times 100 \quad [39]$$

kde: w_{abs} – vlhkost absolutní (%), m_w – hmotnost mokrého dřeva (g), m_0 – hmotnost suchého dřeva (g)



Obr. 23 Laboratorní sušárna

6.3. Měření ohybových charakteristik

Po dokončení teplotního zatížení byly u vzorků testovány ohybové charakteristiky. V tomto experimentu byly zkoumány á statický ohyb (ohybová pevnost, průhyb a modul pružnosti v ohybu) a dynamický ohyb neboli rázová houževnatost.

6.3.1. Statický ohyb

Zkouška tříbodového statického ohybu byla měřena na trhacím stroji (viz. obr. 24). Zkouška byla provedena podle norem ČSN 49 0115 (1979) a ČSN 49 0116 (1982). Měření probíhalo následovně: Byl nastaven rozestup podpěr na 240 mm. Zatěžovací síla byla umístěna na středu mezi podpěrami. Po této přípravě byl spuštěn počítač, a otevřena šablona pro tříbodový statický ohyb v programu TIRA. Následně byl spuštěn motor trhacího stroje a jeho měřicí části. Vzorek byl uložen na podpěry trhacího stroje tak, aby zatěžovací síla byla na podélném středu vzorku v tangenciálním směru. V programu bylo vynulováno zatížení a spuštěno měření.

Vzorek byl zatěžován rovnoměrně při konstantní rychlosti zatěžování. Rychlost zatěžování byla taková, aby se těleso porušilo přibližně do 1,5 minuty s odchylkou 0,5 minuty. Z programu TIRA byly získány potřebné hodnoty (max síla, max. průhyb, síla v 10 %, síla ve 40 %, průhyb 10 % a průhyb 40 %). Potřebné hodnoty byly přeneseny do připraveného excelového souboru, ve kterém byly vypočítány ohybová pevnost a modul pružnosti ve statickém ohybu.

Ohybová pevnost je vyjádřena vztahem:

$$\sigma_{max} = \frac{3 \times F \times l_0}{2 \times b \times h^2} \quad [40]$$

kde: σ_{max} – napětí v mez pevnosti v ohybu (MPa), F – působící zatížení (N), L_0 – vzdálenost mezi podpěrami (mm), h – výška (mm), b – šířka (mm)

Modul pružnosti v ohybu je vyjádřen vztahem:

$$E = \frac{l^3 \times (F_2 - F_1)}{4 \times b \times t \times (a_2 - a_1)} \quad [41]$$

kde: E – modul pružnosti (MPa), F_1 – síla, která odpovídá 10 % max. síly (N), F_2 – síla, která odpovídá 40 % max. síly (N), l – vzdálenost mezi podpěrami (mm), t – tloušťka (mm), b – šířka (mm), a_1 – průhyb tělesa při síle F_1 (mm), a_2 – průhyb tělesa při síle F_2 (mm)



Obr. 24 Trhací stroj

6.3.2. Dynamický ohyb

Rázová houževnatost byla zjišťována na Charpyho kladivu (viz. obr. 25) s rozsahem 50 J. Zkouška byla provedena podle normy ČSN 49 0117 (1980). Kladivo bylo zajištěno v horní poloze a vzorek byl umístěn na podpěry. Byl umístěn na podpěry tak, aby kladivo dopadlo na vzorek v tangenciálním směru v podélném středu vzorku. Ručička číselníku byla vždy před měřením v počáteční poloze na hodnotě 50 J. Následně bylo kladivo uvolněno a vzorek byl přeražen. Z analogického číselníku s přesností 0,5 J byla odečtena spotřebovaná přerážecí práce. Její hodnota byla zapsána do připraveného excelu a vypočítána rázová houževnatost podle následujícího vztahu:

$$A_w = \frac{W}{b \times h} \quad [39]$$

kde: A_w – rázová houževnatost (J/cm^2), W – práce spotřebovaná na zlomení tělesa (J), b , h – příčné rozměry tělesa (cm)



Obr. 25 Charpyho kladivo

6.4. Hodnocení

Všechny výsledky byly přehledně zapisovány do připraveného excelového souboru. Statistika byla vyhodnocena v programu STATISTICA 13 od společnosti TIBCO Software Inc. Na vyhodnocení dat byla použita jednofaktorovou analýza ANOVA, která využívá Fischerův test. Tato analýza rozptylu je založena na 95 % spolehlivosti, tedy připouští 5 % statistickou chybu.

7. Výsledky a diskuze

7.1. Fyzikální vlastnosti

Očekává se, že vlhkost se bude měnit podle stadia měření. U vzorků po mražení bude vlhkost dřeva větší než u vzorků před zmražením. To z toho důvodu, že v chladnějším prostředí má vlhkost vzduchu tendenci se usazovat na povrchu tělesa. Tento proces známe jako kondenzaci. Usazená voda se v chladném prostředí nemá tendenci odpařovat a zůstává na povrchu dřeva. Dřevo usazenou vodu vstřebává a tím se zvětšuje jeho vlhkost. Naopak u vzorků po ohřívání bude vlhkost dřeva nižší, než před ohříváním. To z toho důvodu, že v teplejším prostředí má voda tendenci se vypařovat a vlhkost dřeva se snižuje. Čím větší teplota, tím je odpařování vody rychlejší. V Tabulce 18 je vidět průběh vlhkosti v každém fázi mého měření. Vlhkost po prvním mražení se zvětší přibližně o 2,5 % od původní vlhkosti. Po prvním ohřívání se zmenší vlhkost přibližně o 70 % oproti vlhkosti po prvním mražení. Po druhém mražení se vlhkost zvětší přibližně o 3 % od vlhkosti po klimatizaci na vlhkost 12 %. Vlhkost po druhém ohřívání klesá přibližně o 72,5 % oproti vlhkosti po druhém mražení.

Tab. 18 Vlhkost smrkového dřeva

Soubor	Typ zatěžování	Vlhkost						Počet těles
		$W_{I,p}$ (%)	$W_{I,m}$ (%)	$W_{I,s}$ (%)	$W_{II,p}$ (%)	$W_{II,m}$ (%)	$W_{II,s}$ (%)	
1	referenční	11,68	-	-	-	-	-	30
2	I. cyklus	11,83	12,13	3,74	-	-	-	30
3	I. + II. cyklus	11,95	12,26	3,68	11,16	11,51	3,17	30

$W_{I,p}$ – počáteční vlhkost těles po klimatizaci na 12 % (před I. cyklem), $W_{I,m}$ – vlhkost po mražení během I. cyklu, $W_{I,s}$ – vlhkost po sušení během I. cyklu, $W_{II,p}$ – počáteční vlhkost těles po klimatizaci na 12 % (po I. cyklu a před II. cyklem), $W_{II,m}$ – vlhkost po mražení během II. cyklu, $W_{II,s}$ – vlhkost po sušení během II. cyklu,

Z Tabulky 19 lze vidět, že hustota dřeva se mění v každé fázi měření. Protože teplotní roztažnost je malá na rozdíl od vlhkostní roztažnosti, bude mít převážný vliv na

hustotu dřeva jeho vlhkost. Tam, kde se zvyšuje či snižuje vlhkost, se také zvyšuje či snižuje hustota dřeva. Dle literatury Matovič (1993) má smrkové dřevo nízkou hustotu, a to kolem 455 kg/m^3 . Szmutku a kol. (2012) ve svém výzkumu udávají hustotu smrkového dřeva 410 kg/m^3 . Po prvním mražení se hustota dřeva zvětší přibližně o 0,55 % od původní hustoty. Hustota dřeva po prvním ohřívání se zmenší přibližně o 4,6 % od hustoty po prvním mražení. Zvětšení hustoty dřeva přibližně o 0,4 % se projevilo po druhém mražení od hustoty po klimatizaci na vlhkost 12 %. Po druhém ohřívání hustota dřeva klesla přibližně o 4,7 % od hustoty dřeva po druhém mražení.

Tab. 19 Hustota smrkového dřeva

Soubor	Typ zatěžování	Hustota						Počet těles
		$\rho_{I.p}$ (kg/m ³)	$\rho_{I.m}$ (kg/m ³)	$\rho_{I.s}$ (kg/m ³)	$\rho_{II.p}$ (kg/m ³)	$\rho_{II.m}$ (kg/m ³)	$\rho_{II.s}$ (kg/m ³)	
1	referenční	457,4	-	-	-	-	-	30
2	I. cyklus	476,9	479,1	457,9	-	-	-	30
3	I. + II. cyklus	472,1	475,0	452,8	472,5	474,4	452,0	30

$\rho_{I.p}$ – počáteční hustota těles po klimatizaci na 12 % (před I. cyklem), $\rho_{I.m}$ – hustota po mražení během I. cyklu, $\rho_{I.s}$ – hustota po sušení během I. cyklu, $\rho_{II.p}$ – počáteční hustota těles po klimatizaci na 12 % (po I. cyklu a před II. cyklem), $\rho_{II.m}$ – hustota po mražení během II. cyklu, $\rho_{II.s}$ – hustota po sušení během II. cyklu,

7.2. Mechanické vlastnosti

7.2.1. Statistické vyhodnocení

Statistika byla provedena v programu STATISTICA 13. Na vyhodnocení dat byla použita Jednofaktorová ANOVA, která využívá Fischerův test. Tato analýza rozptylu je založená na 95 % spolehlivost. Tedy připouští 5 % statistickou chybu. V Tabulce 20 a 21 je tato přípustná chyba znázorněná ve sloupci hladina významnosti (označována p) v absolutní hodnotě (max statistická chyba 0,05) Když je hodnota hladiny významnosti nižší než 0,05, je daná vlastnost statisticky významná a číslo je znázorněno červenou

barvou. Pokud je však vyšší než 0,05 je daná vlastnost statisticky nevýznamná a číslo je znázorněno černou barvou.

Z Tabulek 20–23 je vidět, že na základě hladiny významnosti ohybová pevnost, průhyb a modul pružnosti jsou statisticky významné. Naopak rázová houževnatost je statisticky nevýznamná. Naměřené hodnoty rázové houževnatosti se hodně překrývají, proto není možné posoudit významnost dané vlastnosti.

Tab. 20 Statistické vyhodnocení ohybové pevnosti

Ohybová pevnost					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F – Test	Hladina významnosti
Intercept	642390,7	1	642390,7	4105,640	0,000000
Typ zatěžování	10104,9	2	5052,4	32,291	0,000000
Chyba	13612,5	87	156,5		

Tab. 21 Statistické vyhodnocení průhybu

Průhyb					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F – Test	Hladina významnosti
Intercept	5307,494	1	5307,494	1866,460	0,000000
Typ zatěžování	43,599	2	21,799	7,666	0,000858
Chyba	247,395	87	2,844		

Tab. 22 Statistické vyhodnocení modulu pružnosti

Modul pružnosti					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F – Test	Hladina významnosti
Intercept	6992203323,98	1	6992203323,98	6322,425	0,000000
Typ zatěžování	16162494,61	2	8081247,30	7,307	0,001166
Chyba	96216506,53	87	1105936,86		

Tab. 23 Statistické vyhodnocení rázové houževnatosti

Rázová houževnatost					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	1014,783	1	1014,783	375,6720	0,000000
Typ zatěžování	10,392	2	5,196	1,9236	0,152247
Chyba	235,009	87	2,701		

7.2.2. Statický ohyb

Ohybová pevnost

Dle Tabulky 24 je průměrná ohybová pevnost vzorků 70,13 MPa. Dle Ugoleva (1986) je ohybová pevnost u dřeviny smrku při 12% vlhkosti 80 MPa. Rozdíl mezi mnou naměřenou hodnotou a hodnotou z Ugoleva (1986) může být způsoben nějakou skrytou vadou dřeva či horším měřením. Na obrázku 26 je vidět průběh ohybové pevnosti při teplotním zatížení.

Po prvním teplotním cyklu (zmrazení – ohřívání) ohybová pevnost vzrostla o 36%. Průměrná hodnota ohybové pevnost po prvním teplotním cyklu je 95,39 MPa.

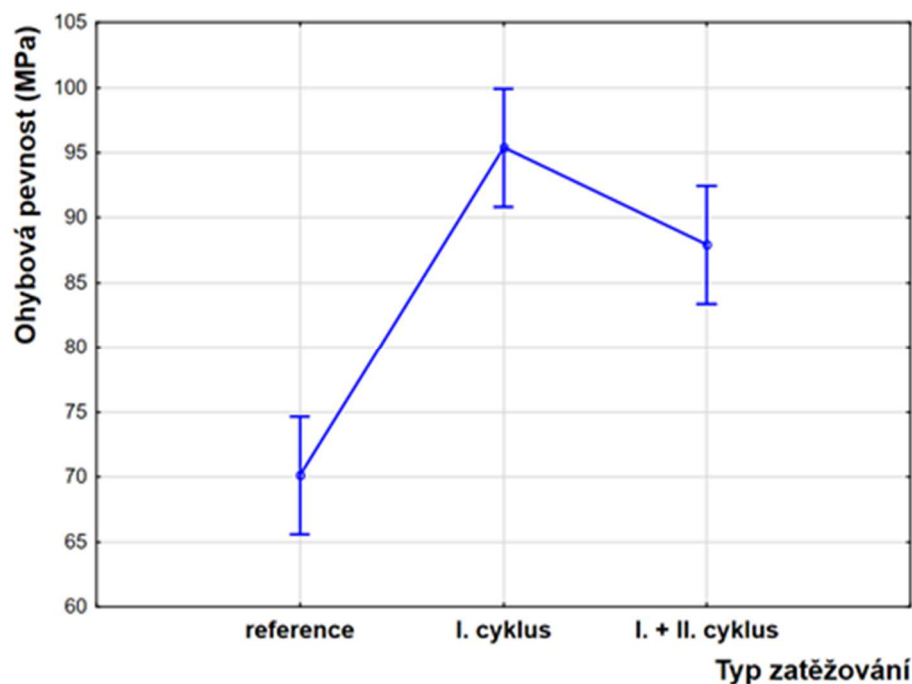
Po druhém teplotním cyklu (zmrazení – ohřívání – zmrazení – ohřívání) byla ohybová pevnost stále vyšší, než u referenčních vzorků, a to o 25,4 %. Zároveň byla ohybová pevnost nižší, než po prvním teplotním cyklu, a to o 7,8 %. Průměrná hodnota ohybové pevnosti po druhém teplotním cyklu byla 87,3 MPa.

Při ohřívání o teplotě 70 °C dochází k odpařování vody. Jeden z hlavních vlivů na zvětšení ohybové pevnosti bude mít vlhkost dřeva, protože se snižující se vlhkostí se pevnost dřeva zvětšuje. Při měření mechanických vlastností měly vzorky po prvním a druhém teplotním cyklu přibližnou vlhkost 3,5 % a referenční vzorky měly 12% vlhkost. Tento rozdíl se také projevil v ohybové pevnosti.

Další vliv mohlo na zvětšení pevnosti mít uvolnění napětí mezi molekulami vlivem mražení. Zároveň negativní dopad na ohybovou pevnost mohlo mít vytváření malých trhlin ve dřevě způsobené mražením, kdy se ve dřevě mění voda volná na krystalky ledu a tlačí na buněčné stěny. Přitom vznikají malé trhliny ve dřevě. Tento vliv se prokázal při druhém cyklu teplotního zatížení, kdy pevnost při podobné vlhkosti klesla.

Protože nejsou známe výsledky střídání teploty z bodu mrazu (-25 °C) do hodnoty nad pokojovou teplotu (70 °C), budu porovnávat různé autory, kteří se zabývali ohybovou pevností buď pod bodem mrazu nebo teplotami vyššími. Szmutku a kol. (2012) se ve své práci zabývali tím, jaký má vliv týdenní cyklické 12hodinové zmrazování (-25 °C) a zahřívání (10 °C) na ohybovou pevnost u smrkové dřeviny. Podle jejich výsledků ohybová pevnost klesla o 17 %. Referenční vzorek měl hodnotu 66,68 MPa, vzorek, který byl nepřetržitě zmrazován má hodnotu 64 MPa a vzorek po týdenním cyklu má hodnotu 55,29 MPa. Campean a kol. (2008) zjišťovali, jaký má vliv 20hodinové zmrazení (-30 °C) na ohybovou pevnost smrkového dřeva. Zjistila, že ohybová pevnost klesla přibližně o 6 % z hodnoty 96 MPa na hodnotu 90 MPa. Podle Wood Handbook (2010) ohybová pevnost dřeva při teplotě -50 °C stoupne o 35 % při vlhkosti 11-15 % a klesne při teplotě +50 °C o 10 % při vlhkosti menší než 4 %. Oltean a kol. (2011) zjistili, že u smrkových desek, které jsou sušeny při 65 a 80 °C dosahují hodnoty ohybové pevnosti 78,8 a 77,4 MPa při vlhkosti 12 %. Autoři Bekhta a Niemz (2003) ve svém článku uvádějí, že ohybová pevnost u smrkového dřeva roste do teploty 100 °C a po překročení této teploty

ohybová pevnost klesá. Podle Vykoukala (2016) při působení vyšší teploty do 160 °C se ohybová pevnost zvětší.



Obr. 26 Vliv typu zatížení na ohybovou pevnost

Tab. 24 Průměrné hodnoty ohybové pevnosti

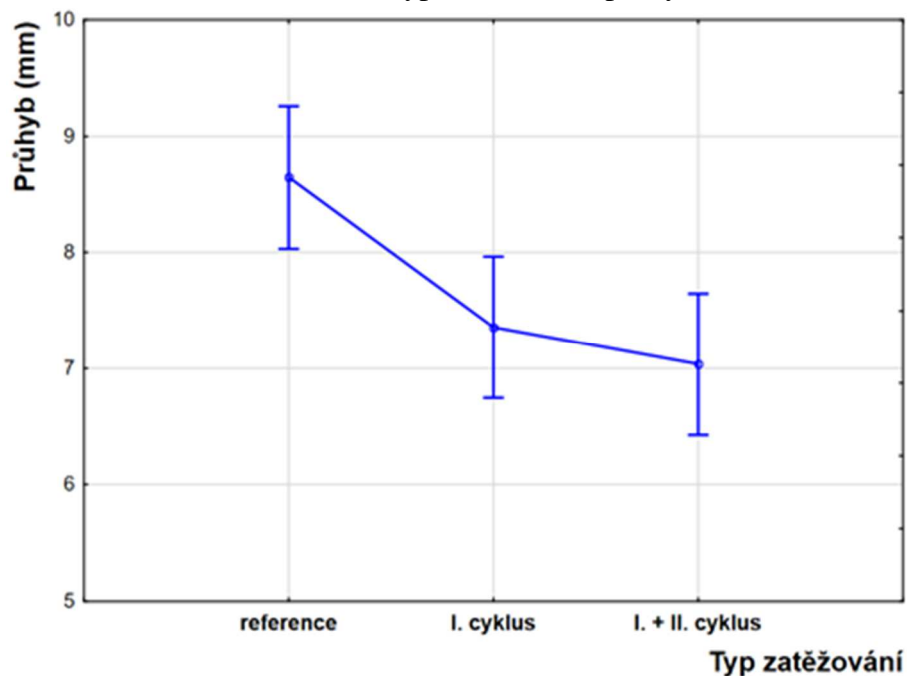
Ohybová pevnost							
Soubor	Typ zatěžování	průměr (MPa)	Směrodatná odchylka	Standardní chyba - SE	- min. (MPa)	+ max. (MPa)	Počet těles
1	reference	70,13	10,50	1,92	66,21	74,05	30
2	I. cyklus	95,39	11,58	2,11	91,07	99,72	30
3	I. + II.	87,93	15,00	2,74	82,33	93,53	30

Průhyb

Dle Tabulky 25 je průměrný průhyb vzorků 8,6 mm. Po prvním cyklu teplotního zatížení průměrný průhyb klesl o 14 % na hodnotu 7,4 mm. Po druhém cyklu teplotního zatížení průhyb klesla o 5,4 % od prvního cyklu teplotního zatížení a od referenčních vzorků klesl o 18,6 %, a to na hodnotu průhybu 7 mm. Na obrázku 27 je vidět průběh průhybu při statickém ohybu při teplotním zatížení. Snížení průhybu je způsobeno tím,

že při nízké teplotě se dřevo stává křehčím a uvolňuje se napětí mezi jednotlivými molekulami. Snížení způsobily také malé trhliny ve struktuře dřeva, který vznikly při mražení vzorků.

Obr. 27 Vliv typu zatížení na průhyb



Tab. 25 Průměrné hodnoty průhybu

Průhyb							
Soubor	Typ zatěžování	průměr (mm)	Směrodatná odchylka	Standardní chyba - SE	- min. (mm)	+ max. (mm)	Počet těles
1	reference	8,6	1,67	0,30	8,0	9,3	30
2	I. cyklus	7,4	1,52	0,27	6,7	8,0	30
3	I. + II. cyklus	7,0	1,86	0,34	6,4	7,6	30

Modul pružnosti v ohybu

Dle Tabulky 26 je průměrný modul pružnosti vzorků 8338,2 MPa. Dle Požgaje a kol. (1993) je modul pružnosti v ohybu u dřeviny smrku při vlhkosti 12 % 12 800 MPa.

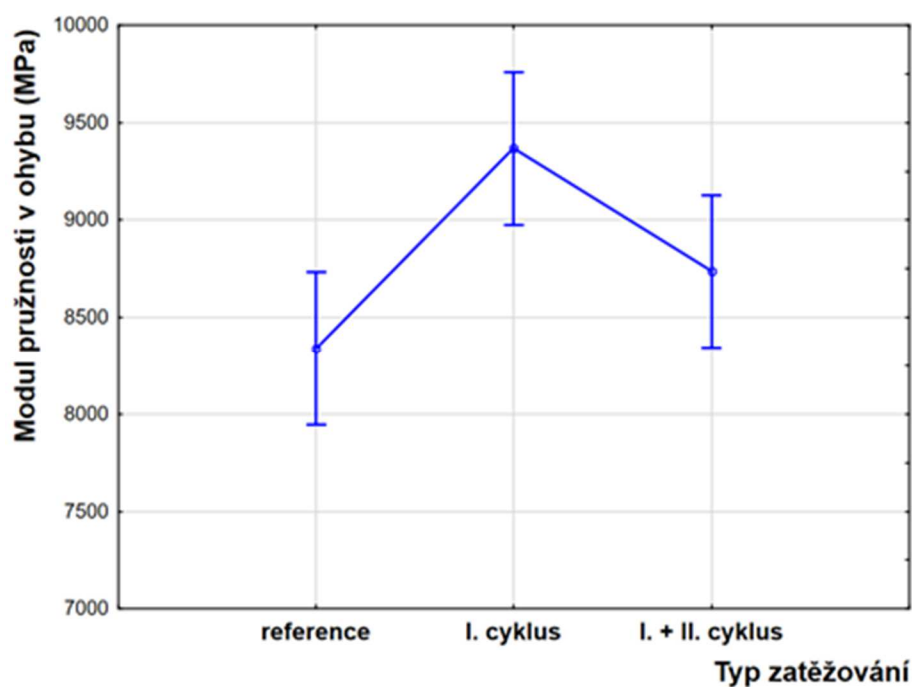
Rozdíl mezi mnou naměřenou hodnotou a hodnotu od Požgaje a kol. (1993) může být způsoben nějakou skrytou vadou dřeva či horším měřením.

Na obrázku 28 je vidět průběh modulu pružnosti při teplotním zatížení. Po prvním teplotním cyklu (zmrazení – ohřívání) modul pružnosti vzrostl o 12,3 %. Průměrná hodnota modulu pružnosti po prvním teplotním cyklu je 9367,5 MPa. Po druhém teplotním cyklu (zmrazení – ohřívání – zmrazení – ohřívání) byl modul pružnosti stále vyšší, než u referenčních vzorků, a to o 4,8 % a zároveň byl modul pružnosti nižší, než po prvním teplotním cyklu a to o 6,7 %. Průměrná hodnota modulu pružnosti po druhém teplotním cyklu je 8737,1 MPa. Změna modulu pružnosti je mírnější, než změna ohybové pevnosti.

Stejně jako u ohybové pevnosti bude patřit vlhkost dřeva mezi jeden z hlavních činitelů průběhu modulu pružnosti. Se snižující se vlhkostí dřeva se modul pružnosti zvětšuje. Podle několika autorů Vykoukal (2016), Valášková (2015) a Reinprechta (2008) se modul pružnosti do teploty 165 °C zvětšuje a průběh změny je mírnější, než u změn pevnosti dřeva. Modul pružnosti při teplotě pod bodem mrazu se zvětšuje. Při mrazení dochází k mírnému porušení celistvosti tělesa. Když těleso dosáhne pokojové teploty, zmenší se modul pružnosti, a to právě díky porušení tělesa a změně napětí po mražení. Právě tento pokles se projevil u druhého cyklu teplotního zatížení.

Protože nejsou známe výsledky střídání teploty z bodu mrazu (- 25 °C) do teploty nad pokojovou teplotu (70 °C), budu porovnávat různé autory, kteří se zabývali modulem pružnosti v ohybu buď pod bodem mrazu nebo při vyšších teplotách. Szmutku a kol. (2012) se kromě ohybové pevnosti zabývali modulem pružnosti při ohybu. Zjistili, že modul pružnosti v ohybu klesl o 29 %. Referenční vzorek měl hodnotu 9204 MPa, vzorek, který byl nepřetržitě zmrazován, měl hodnotu 9003 MPa a vzorek po týdenním cyklování měl hodnotu 6559 MPa. Campean a kol. (2008) ve svém výzkumu zjišťovali, jaký má vliv 20hodinové zmrazení (-30 °C) na modul pružnosti smrkového dřeva. Zjistila, že modul pružnosti klesl přibližně o 13 %, a to z hodnoty 10751 MPa na hodnotu 10609 MPa. Podle Reinprechta (2008) se modul pružnosti při teplotě do 165 °C zvětšuje. Podobné výsledky uvádí ve svých pracích Vykoukal (2016) a Valášková (2015). Při

působení vyšší teploty (do 160 °C) se dle jejich výsledků modul pružnosti zvětší. S překročení této teploty modul pružnosti klesá.



Obr. 28 Vliv typu zatížení na modul pružnosti v ohybu

Tab. 26 Průměrné hodnoty modulu pružnosti v ohybu

Modul pružnosti v ohybu							
Soubor	Typ zatěžování	průměr (MPa)	Směrodatná odchylka	Standardní chyba - SE	- min. (MPa)	+ max. (MPa)	Počet těles
1	reference	8338,2	1057,9	193,1	7943,1	8733,2	30
2	I. cyklus	9367,5	1046,9	191,1	8976,6	9758,4	30
3	I. + II. cyklus	8737,1	1050,2	191,7	8344,9	9129,2	30

7.2.3. Rázová houževnatost

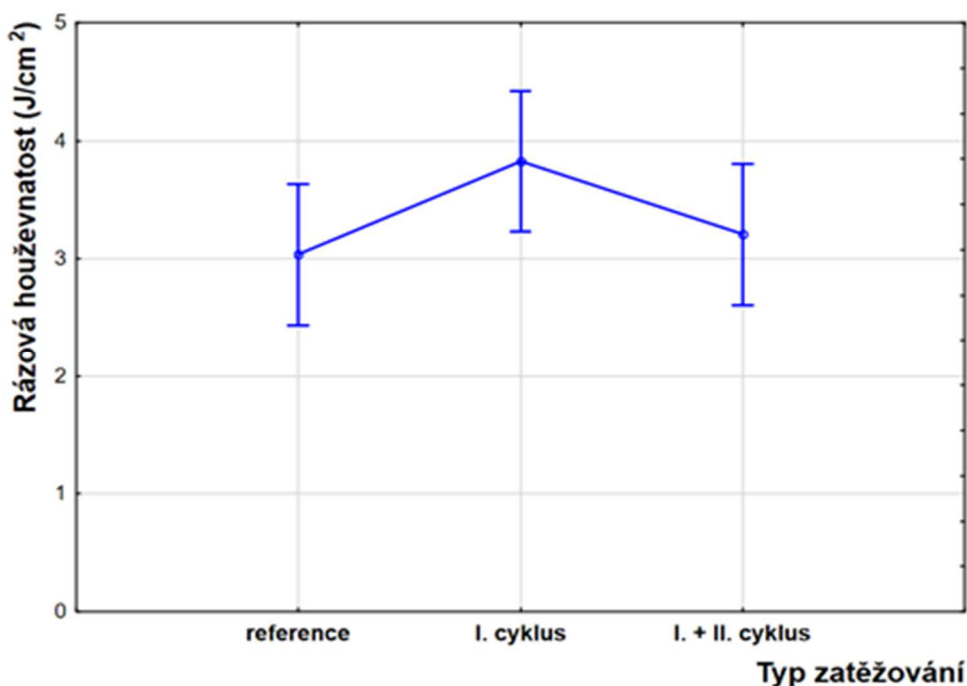
Dle Tabulky 27 je průměrná rázová houževnatost vzorků 3,04 J/cm². Dle Ugoleva (1986) je rázová houževnatost u dřeviny smrku 3,9 J/cm² při vlhkosti 12 %. Rozdíl mezi

mnou naměřenou hodnotou a hodnotu od Ugoleva (1986) může být způsoben nějakou skrytou vadou dřeva či horším měřením.

Na obrázku 29 je vidět průběh rázové houževnatosti při teplotním zatížení. Po prvním teplotním cyklu (zmrazení – ohřívání) rázová houževnatost vzrostl o 26 %. Průměrná hodnota rázové houževnatosti po prvním teplotním cyklu je 3,83 J/cm². Po druhém teplotním cyklu (zmrazení – ohřívání – zmrazení – ohřívání) je rázová houževnatost stále vyšší než u referenčních vzorků, a to o 5,6 % a zároveň je rázová houževnatost nižší, než po prvním teplotním cyklu, a to o 16,2 %. Průměrná hodnota rázové houževnatosti po druhém teplotním cyklu je 3,21 J/cm².

Rázová houževnatost je velice citlivá na teplotní zatížení. Je vidět, že i přes nižší vlhkost v prvním a druhém teplotním cyklu, se rázová houževnatost příliš nezvedla. Po druhém cyklu jsou hodnoty velice podobné s referenčními. Působením teploty na dřevo se dřevo stává křehčím a snižuje se jeho houževnatost.

Podle výzkumu Gaffa, a kol (2019) se rázová houževnatost zvýšil u smrku o 29,9 % při teplotě 160 °C. Podle výzkumu Rautkari a Honkanen (2014) poklesla u borovice rázová houževnatost u běle o 6 % a u jádra o 12 %. Podle Reinprechta (2008) způsobí zvýšená teplota dřevo křehčí a méně odolné vůči rázovým vlivům. Podle několika zdrojů je dřevo při teplotě pod bodem mrazu křehčí. Hodnoty houževnatosti klesají s teplotou snižující se pod bod mrazu.



Obr. 29 Vliv typu zatížení na rázovou houževnatost

Tab. 27 Průměrné hodnoty rázové houževnatosti

Rázová houževnatost							
Soubor	Typ zatěžování	průměr (J/cm ²)	Směrodatná odchylka	Standardní chyba - SE	- min. (J/cm ²)	+ max. (J/cm ²)	Počet těles
1	reference	3,04	1,17	0,21	2,60	3,47	30
2	I. cyklus	3,83	1,97	0,36	3,09	4,56	30
3	I. + II. cyklus	3,21	1,69	0,31	2,58	3,84	30

8. Závěr

Diplomová práce se zabývá otázkou, jaký má střídavá teplota vliv na mechanické vlastnosti dřeva. V první části jsou popsány fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, a to především ty vlastnosti, které se v experimentálně zkoumají. Mezi tyto vlastnosti patří pevnost, pružnost, houževnatost, vlhkost, hustota a teplota.

V druhé části se práce zabývá, jaký má vliv střídání teploty na ohybovou pevnost (tříbodový statický ohyb), modul pružnosti, průhyb při ohybu a rázovou houževnatost (dynamický ohyb) dřeva. Měření na vzorcích smrkového dřeva bylo rozděleno do několika teplotních cyklů. Po každém měření byly zjišťovány dané vlastnosti vzorků (ohybovou pevnost, modul pružnosti, průhyb při ohybu a rázovou houževnatost).

První měření probíhalo na neošetřených vzorcích smrkového dřeva. S těmito vzorky se pak porovnávali vzorky, které byly vystaveny teplotnímu namáhání a zjišťovalo se tak, jaký má vliv střídání teploty na vybrané mechanické vlastnosti vzorků.

Druhé měření probíhalo na vzorcích po jednom teplotním cyklu (12 hodin mražení při teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně 12 hodin ohřívání při teplotě $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Třetí měření probíhalo na vzorcích po dvou teplotních cyklech (12 hodin mražení při teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 12 hodin ohřívání při teplotě $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, klimatizování na 12 % vlhkost, opět 12 hodin mražení při teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nakonec opět 12 hodin ohřívání při teplotě $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Výsledky měření ukázaly, že po jednom teplotním cyklu se zvětšily všechny hodnoty, kromě průhybu. Po dvou teplotních cyklech byly všechny hodnoty kromě průhybu stále větší, než hodnoty u neošetřených vzorků. Zároveň byly tyto hodnoty menší, než byly hodnoty naměřené po prvním teplotním cyklu. Hodnoty průhybu stále klesaly.

Po prvním teplotním cyklu vzrostla ohybová pevnost oproti referenčním vzorkům o 36 %, modul pružnosti o 12,3 % a rázová houževnatost o 26 %. Hodnota průhybu klesla o 14 % oproti referenčním vzorkům.

Po druhém teplotním cyklu vzrostla ohybová pevnost oproti referenčním vzorkům o 25,4 %, modul pružnosti o 4,8 % a rázová houževnatost o 5,6 %. Hodnota průhybu klesla o 18,6 % oproti referenčním vzorkům. Při mražení se vlhkost dřeva zvětšila

přibližně o 2–3 % a hustota dřeva o 0,5 %. Při ohřívání se vlhkost dřeva zmenšila přibližně o 70 % a hustota dřeva o 4,6 %.

Protože začínají být ve světě čím dál více populární stavby ze dřeva v podobě obytných staveb, altánků, teras, mostů, dětských hřišť, rozhleden apod., je třeba, aby všechny tyto konstrukce splňovaly určité hodnoty mechanických vlastností, které se ale vlivem různých faktorů mohou měnit.

Jedním z těchto faktorů je právě i teplota, při jejíchž změnách dochází, jak potvrzuje mé měření, i ke změnám mechanických vlastností dřeva. Zkoumání vlivu teploty na mechanické vlastnosti dřeva je proto podstatné a důležité.

9. Seznam literatury

- Bekhta, P. & Niemz, P.**, (2003). Effect of High Temperature on the Change in Color, Dimensional Stability and Mechanical Properties of Spruce Wood. *Holzforschung*. 57. 539-546. 10.1515/HF.2003.080.
- Bodig, J.**, Jayne B.A., 1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. VNR New York - Cincinnati - Toronto - London - Melbourne, 712.
- Boller, K. H.**, 1954. Wood at low temperatures. *Mod. Packag.* 28(1):153 -157.
- Borůvka V.**, Zeidler A., Holeček T., Dudík R., Elastic and Strength Properties of Heat-Treated Beech and Birch Wood. *Forests* [online]. 2018, 9(4), 197- [cit. 2019-04-5]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1999-4907/9/4/197>. DOI: 10.3390/f9040197. ISSN 1999- 4907.
- Campean M.**, Ispas M., Porojan M., (2008) Considerations on Drying Frozen Spruce Wood and Effects upon Its Properties, *Drying Technology*, 26:5, 596-601, DOI: 10.1080/07373930801946411
- Clausen, C.A.**: Bacterial Association with Wood Decay: a Review. *International Biodeterioration and Biodegradation* 37.1-2, 1996, pp. 101–107.
- Comben, A. J.**, 1964. The effect of low temperatures on the strength and elastic properties of timber. *J. Inst. Wood Sci.* 13:44-55.
- Dubovský J.**, 1990. Vliv teploty na ohybové vlastnosti dřeva. In: *Biologická a protipožární ochrana dřeva*. Valašské Meziříčí, 9-15.
- Dubovský J.**, Ohybové charakteristiky a kvalita dřeva. (*Vedecké a pedagogické aktuality* 5/93). 1993, 77.
- Esteves, B.M;** Pereira, H.M. *Wood modification by heat treatment: a review* [online]. *BioResources*. 2009, vol. 4, no 1. [cit. 11. 3. 2019]. Dostupné z www.ncsu.edu/bioresources/.
- Feio, A.O.**: *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour*. Ph.D. thesis – Universidade do Minho, Guimaraes, 2005, 208 pp.
- Gandelová L.**, Horáček P., Šležingerová J., *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2009. ISBN 978-80-7375-312-2.

- Gerhards CC** (1982) Effect of the moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. *Wood Fiber* 14(1):4–36
- Green D.W.**, Evans JW (2008) Effect of cyclic long-term temperature exposure on the bending strength of lumber. *Wood Fiber Sci* 40(2):288–300
- Gunduz G**, Korkut S, Aydemir D, Bekar Í (2009) “The density, compression strength and surface hardness of heat treated hornbeam (*Carpinus betulus*) wood,” *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, 11(1):61-70. DOI: 10.3832/ifer1229-007
- Hill, C. A. M.** Wood modification: chemical, thermal, and other processes. 1. vyd. Chichester: England : John Wiley & Sons, 2006. 239 s.
- Horáček, P.** Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2. přepracované vydání. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.
- Kačíková, D.**, Kačík, F. *Chemické a mechanické změny dřeva při termické úpravě*. 1.
- Kafka E.**, Dřevařská příručka. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989.
- Kang, H.**, Booker, R.E. 2002. Variation of stress wave velocity with MC and temperature. *Wood Science and Technology* 36, Springer-Verlag 2002, pp. 41–54
- Klapálek P.**, Melzerová L., Plachý T., Dynamic modulus of elasticity of glued laminated timber beams. *Civil engineering journal: stavební obzor*. Praha: ČVUT v Praze – Fakulta stavební, 2004(9-10). ISSN 1805-2576.
- Kloiber, M.**, Nedestruktivní zjišťování vlastností dřeva. Brno, 2007. 208 s. Dizertační práce. Mendelova Univerzita v Brně.
- Kloiber, M.**, Kotlínová, M., Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti poškozeného dřeva, In: *Applied mechanics* 2006, Srní, Czech Republic. ISBN: 80-7043-441-4, 15 s
- Kocaefe, D.**, Poncsak, S., Boluk, Y. *Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen* [online]. *BioResources*. 2008, vol. 3, no 2. [cit. 8. 4. 2019]. Dostupné z www: www.ncsu.edu/bioresources/
- Korkut, S.**; Akgül, M.; DüNDAR, T. 2007. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood. *Bioresource Technology* 99(6): 1861-1868.

Lexa J. et al. Mechanické a fyzikálně vlastnosti dřeva. Bratislava: Drevárský výzkumný ústav. 1952. 436 s.

Lysý F., Jírů P., Nauka o dřevě. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1954. Řada dřevařské literatury.

Matovič A., Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva: určeno pro posl. lesnické fak., obor dřevařský a lesnický. Brno: Vysoká škola zemědělská, 1993. ISBN 80-7157-086-9.

Novák V., ed. Johánek, A.; ed. Spurná M., Dřevařská technická příručka, 1. vyd., Praha: Nakladatelství technické literatury, SNTL, 1970, 743 s.

Oltean L., Alfred Teischinger, Christian Hansmann. Influence of low and moderate temperature kiln drying schedules on specific mechanical properties of Norway spruce wood. European Journal of Wood and Wood Products, Springer Verlag, 2010, 69 (3), pp.451-457. <10.1007/s00107-010-0467-1>. <hal-00615329>

Percin O., Peker H., Atilgan A., (2016). The effect of heat treatment on the some physical and mechanical properties of beech (*Fagus orientalis lipsky*) wood. Wood research. 61. 443-456.

Perelygin L. M., Náuka o dreve. 2. preprac. a dopl. vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1965. Edícia drevárskej literatúry.

Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., Babiak, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00960-4.

Rautkari, L., Honkanen, J., Hill, C.A.S. et al. Eur. J. Wood Prod. (2014) 72: 33.
<https://doi.org/10.1007/s00107-013-0749-5>

Reinprecht L., Vidholdová, Z.; 2008. Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.

Ross, R.J., Hunt, M.O. 2000. Stress wave timing nondestructive evaluation tools for inspecting historic structures—A guide for use and interpretation. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 15 pp

Schiniewind, A.P., 1968. Recent Progress in Study of the Rhology of Wood. Wood Science and Technology, 2, 2, 188-206.

Siau, J.F., 1984. Transport Processes in Wood. Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo, 245.

Sinha A., Gupta R. a Nairn J.A., Effect of heat on the mechanical properties of wood and wood composites, World Conference on timber engineering [online], 2010, 1-8, [cit. 27.3.2019], dostupný z :

<https://pdfs.semanticscholar.org/8785/4830afa9c53114e6a263cf5e0d5301766a22.pdf>

Szmutku M. B., Câmpean M, Laurenzi W (2012) Influence of Cyclic Freezing and Thawing Upon Spruce Wood Properties. PRO LIGNO, 8(1):35-43

Szmutku M. B., Campean M., Porojan M., Strength reduction of spruce wood through slow freezing. European Journal of Wood and Wood Products. 2013. vol. 71, no. 2, s. 205, ISSN 0018-3768.

Šlezingerová, J., Gandelová, L., Horaček, P., 1996: nauka o dřevě, MZLU Brno, 176s. ISBN 978-80-7157-577-1

Thermowood handbook 2003. *International thermowood association.* [Online] 2003.

<https://www.thermowood.fi>.

Ugolev, V.N. Drevesinovedenje s onovami lesnovo tovarovedenija. Moskva

Valášková R., Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva douglasky, Praha, 2015, Bakalářská práce, Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra základní zpracování dřeva, Ing. Vlastimír Borůvka. PhD.

Vykoukal J., Posouzení houževnatosti a pevnosti v ohybu tepelně upraveného dřeva buku s nepravým jádrem, Praha, 2016, Bakalářská práce, Česká zemědělská univerzita v Praze, Katedra základní zpracování dřeva, Doc. Ing. Aleš Zeidler. PhD.

Normy:

ČSN 49 0108- Drevo. Zisťovanie hustoty, 1993

ČSN 49 0115 - Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. 1979

ČSN 49 0116 - Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti při statickom ohybe. 1982

ČSN 49 0117 - Drevo. Rázová húževnatost v ohybe. 1980.

ČSN 49 0118 - Drevo. Medza pevnosti v šmyku v smere vlákien, 1980

ČSN 490114- Zkoušky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania pevnosti v ťahu naprieč vlákien, 1992

ČSN EN 310 - Desky ze dřeva. Stanovení modulu pružnosti v ohybu a pevnosti v ohybu, 1996

ČSN EN 408 - Dřevěné konstrukce - Konstrukční dřevo a lepené lamelové dřevo - Stanovení některých fyzikálních a mechanických vlastností, 2011

Internetové zdroje:

Zejda, J., J. Tippner, V. Sebera a E. Koňasová. Fyzikání a mechanické vlastnosti dřeva [online]. Mendelova univerzita v Brně, 2014 [cit. 2019-04-03]. Dostupné z: <https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/index.pl?opora=554>. Skripta. Mendelova univerzita v Brně.