

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



Vliv nízkých teplot na tvrdost dřeva

Diplomová práce

Autor: Bc. Vojtěch Vebr

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Vojtěch Vebr

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv nízkých teplot na tvrdost dřeva

Název anglicky

The influence of low temperatures on wood hardness

Cíle práce

Cílem práce je experimentální zkoumání vlivu různých nízkých teplot na tvrdost dřeva z vybraných jehličnatých a listnatých dřevin.

Metodika

1. Zpracování literární rešerše o fyzikálních a mechanických vlastnostech dřeva se zameřením na tvrdost, jako i o vlivu teplot na tyto vlastnosti.
2. Příprava, třídění a značení zkušebních těles.
3. Určení základních fyzikálních, resp. mechanických, vlastností dřeva z vybraných jehličnatých a listnatých dřevin.
4. Experimentální zjišťování vlivu různých nízkých teplot na tvrdost dřeva z vybraných dřevin. Porovnání tvrdosti dřeva vystaveného nízkým teplotám a tvrdosti dřeva při běžné teplotě okolí.
5. Statistické zpracování výsledků v textové, tabulkové a grafické podobě.
6. Diskuze a závěry.

Doporučený rozsah práce

65 – 75

Klíčová slova

tvrdost, nízké teploty, hustota, mechanické vlastnosti

Doporučené zdroje informací

- DINWOODIE, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, 2nd ed., EFN Spon: London, New York, 257 s. ISBN: 0-419-23580-9
- 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
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva, Bratislava: Príroda a. s., 485 s. ISBN: 80-07-00960-4
- RICHTER, Ch. Wood Characteristics: Description, Causes, Prevention, Impact on Use and Technological Adaptation. Springer International Publishing AG, 2015, 222 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
- SANDBERG, D., NAVI, P. Thermo-Hydro-Mechanical processing of wood. Boca Raton: CRC Press, 2012, 280 s. ISBN 978-1-4398-6042-7
- SKAAR, Ch. Wood-Water Relations. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988, 283 s. ISBN 978-3-642-73685-8
-

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 01. 04. 2019

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: „*Vliv nízkých teplot na tvrdost dřeva*“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD., a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že napsáním 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

Rád bych touto cestou poděkoval panu Ing. Gašparíkovi, PhD., za jeho pomoc a rady při vedení mé diplomové práce. Poděkování patří také mé skvělé rodině za její podporu během celého studia.

ABSTRAKT

V této práci se zabývám působením nízkých teplot (teploty pod 0 °C) na dřevo buku a modřínu. Při výzkumu jsem použil tvrdoměr pro změření tvrdosti vzorků při různé teplotě. Měření probíhalo pomocí tzv. Brinellovy metody a výsledky byly zpracovány do statistických grafů. Výsledky těchto grafů ukazují, že s klesající teplotou dochází ke zvyšování tvrdosti dřeva a také ke zvýšení jeho objemové hmotnosti.

Klíčová slova: tvrdost, nízké teploty, hustota, mechanické vlastnosti

ABSTRACT

In this work I deal with the effect of low temperatures (temperatures below 0 °C) on beech and larch wood. I used a hardness tester to measure the hardness of samples at different temperatures. The measurement was carried out using the so-called Brinell method and the results were processed into statistical graphs. The results of these graphs show that as the temperature decreases, the hardness of the wood increases and its density increases.

Key words : hardness, low temperatures, density, mechanical properties

OBSAH

1. Úvod.....	11
2. Cíl práce.....	12
3. teoretický rozbor	13
3.1 Dřevo jako přírodní materiál	13
3.1.1 Mikroskopická stavba dřeva	15
3.1.2 Makroskopická stavba dřeva.....	19
3.2 Vlastnosti dřeva.....	22
3.2.1 Fyzikální vlastnosti	24
3.2.2 Mechanické vlastnosti.....	29
3.2.3 Odvozené a technologické vlastnosti.....	31
3.3 Tvrdost.....	31
3.3.1 Statická tvrdost	33
3.3.2 Dynamická tvrdost.....	37
3.3.3 Faktory ovlivňující tvrdost dřeva	38
3.3.3.1 Stavba, struktura a složení dřeva.....	38
3.3.3.3 Teplota.....	41
4. Metodika práce	53
4.1 Příprava těles	53
4.2 Postup měření	55
4.2.1 Metoda měření	56
4.2.2 Tvrdoměr	57

4.3 Vyhodnocení	59
5. Výsledky	60
6. závěr.....	67
7. Seznam literatury:	68

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. č. 1 Anatomická stavba jehličnatého dřeva.....	16
Obr. č. 2 Anatomická stavba listnatého dřeva.....	19
Obr. č. 3 Schématické znázornění základních řezů dřeva.....	21
Obr. č. 4 Průběh Brinellovy zkoušky tvrdosti.....	35
Obr. č. 5 Model Brinellovy zkoušky tvrdosti.....	36
Obr. č. 6 Závislost hustoty na šířce letokruhů jehličnatého dřeva	40
Obr. č. 7 Závislost mezi šířkou letokruhů a podílem letního dřeva u jasanu	40
Obr. č. 8 Závislost meze hygroskopicity na teplotě	43
Obr. č. 9 Schématické znázornění vlivu rychlosti mrazícího procesu na zachování buněčné ultrastruktury.....	49
Obr. č. 10, 11 Trhlina v příčném a tg. řezu u cyklicky teplotně namáhaných vzorků smrku.....	51
Obr. č. 12. Označené fotky buku.....	54
Obr. č. 13. Zobrazení míst vtisku do tělesa.....	54
Obr. č. 14. Tvrdoměr DuraVision	58
Obr. č. 15. Měřicí hlava tvrdoměru.....	59
Obr. č. 16. Závislost Brinellovy tvrdosti na druhu dřeviny.	63
Obr. č. 17 Závislost Brinellovy tvrdosti na teplotě.	64
Obr. č. 18 Závislost Brinellovi tvrdosti na teplotě a druhu dřeviny.....	65

SEZNAM TABULEK

Tab. č. 1 Přehled dřevních buněk listnáčů	17
Tab. č. 2 Přehled fyzikálních vlastností dřeva	24
Tab. č. 3. Tabulka tvrdosti dřeva dle Janka	34
Tab. č. 4 Výsledky tvrdosti	52
Tab. č. 5 Počet ks těles pro zkoušení	55

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

F – působící síla [N]

S – plocha na kterou působí síla [mm²]

P – tlak [MPa]

MPa – MegaPascal

Pa – Pascall

mm² – milimetr čtvereční

mm – milimetr

% - procento

°C – stupně Celsia

α – opravný koeficient

g – gram

W – označení vlhkosti

σ – napětí při namáhání [Pa]

H – tvrdost [Pa]

m – hmotnost [g]

t – teplota [°C]

1. ÚVOD

Dřevo je materiál, který člověk využívá již od pravěku na zbraně, nástroje, primitivní obydlí, jako palivo. Postupem času se člověk naučil rozeznávat jednotlivá dřeva a vhodnost jejich použití k různým účelům.

V současnosti je dřevo využíváno v mnoha různých oborech, jako jsou například nábytkářství, dřevostavby, výroba konstrukčních desek, výroba hraček, obalové materiály, dřevěné konstrukce, výroba hudebních nástrojů atd. V každém z těchto oborů (a mnoha dalších) nalézá dřevo své uplatnění díky široké škále zajímavých vlastností, jako jsou např. schopnost odolávat chemikáliím, dobrá tepelná a elektrická izolace, lehká opracovatelnost, pevnost a pružnost, ekologičnost, výborné zvukové vlastnosti, vysoká estetičnost.

Dřevo má ale i své nedostatky, jako je např. anizotropie, hygroskopicita, lehká zápalnost, také neodolává některým biotickým a abiotickým vlivům a vykazuje různé růstové vady. Většina z těchto problémů se dá odstranit nebo výrazně zlepšit například správným konstrukčním řešením, pravidelnou údržbou nebo použitím ochranných opatření. Mezi ochranná opatření můžeme zařadit impregnaci, ochranu dřeva před kontaktem s vodou a i úpravu pomocí vysokých teplot. Takto upravené dřevo (tzv. Thermowood) má rozdílné mechanické i fyzikální vlastnosti oproti neupravenému dřevu, jako jsou rozměrová stálost, snížené přijímání vlhkosti a vysoká životnost bez nutnosti povrchové úpravy.

Opačným příkladem oproti Thermowoodu je působení nízkých teplot na strukturu dřeva, kdy také dochází ke změnám, jež ovlivňují vlastnosti dřeva. Tato práce je zaměřená na ovlivnění tvrdosti dřeva při jeho vystavení nízkým teplotám, které se běžně vyskytují během zimního období.

K dosažení tohoto cíle byla použita tzv. Brinellova metoda, pomocí níž jsem testoval vzorky buku a modřínu při různých teplotách, a následně prováděl jejich statistické vyhodnocení spolu s dalšími sledovanými faktory.

2. CÍL PRÁCE

Cílem práce je experimentální zkoumání vlivu různých nízkých teplot na tvrdost dřeva vybraných jehličnatých a listnatých dřevin.

3. TEORETICKÝ ROZBOR

3.1 Dřevo jako přírodní materiál

Dřevo je přírodní materiál, který se skládá ze složitého komplexu makromolekulárních látek. Pojem dřevo se využívá pro označení sekundárního xylému stonků a kořenů rostlin produkovaných mnoho let. Právě tyto rostliny nazýváme jako dřeviny. Vznikají díky činnosti živých buněk uložených mezi dřevem a kůrou. Tyto živé buňky (tzv. kambium) jsou speciálním dělivým pletivem, které směrem dovnitř vyvíjí sekundární dřevo a směrem vně sekundární lýko (kůru). Dochází tak k tloušťnutí stonků. Směrem dovnitř se buňky dělí mnohem rychleji než směrem ven, a tak dřevo, při srovnání rychlosti růstu s kůrou, roste rychleji [2].

Dřevo je známé pro svoji přirozenou proměnlivost vlastností, kterou zapříčiňuje složitý komplex faktorů, které jsou aktivní během tvorby dřeva v živém stromě. Každé dřevo má svoji specifickou chemickou stavbu a strukturu jednotlivých buněčných stěn, mikro a makro stavbu. I tak ale lze v rámci jednoho druhu dřeva pozorovat rozdíly v jeho struktuře v důsledku individuálního vývoje stromu a s tím spojenou určitou zákonitost tvorby dřeva v závislosti na působení různých faktorů během vegetačního období. Působení těchto faktorů se projevuje na stavbě anatomických částí dřeva, hlavně na tloušťce buněčných stěn a sklonu fibril, na délce a průměru buněk a stavbě letokruhu. Všechny uvedené atributy stavby dřeva spolu úzce souvisí a odrážejí se v hustotě dřeva. Hustota dřeva je v přímé souvislosti s většinou fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. I přesto, že se vyznačuje určitou variabilitou, představuje hustota dřeva komplexní a relativně přesný ukazatel kvality dřeva. Na základě vědomostí o zákonitostech proměnlivosti této charakteristiky lze následně získat i představu o změnách jiných vlastností dřeva [10].

Veškerá produkce dřeva je závislá hlavně na okolních podmínkách. V našem klimatickém podnebí je tvorba buněk ovlivněna především střídáním ročních období. Kambium zastavuje svoji činnost se začátkem zimy a obnovuje ji znovu na jaře, důsledkem čehož vznikají letokruhy.

Tento opakující se jev má za následek to, že dochází k vývoji jarního (světlejší a měkčí část letokruhu) a letního (tmavší a tvrdší část letokruhu) dřeva. Tyto různé části mají také rozdílnou úlohu – jarní dřevo slouží k vedení látek, zatímco letní dřevo plní funkci mechanickou. Obvykle se vytváří jeden letokruh během jednoho roku, ale není tomu tak vždy [6].

Buňky kambia nevytváří homogenní hmotu, ale dochází k tvorbě vláken, které mají podélný tvar o velikosti zhruba 1–8 mm a jsou uspořádány téměř rovnoběžně. Proto se vlastnosti dřeva v závislosti na směru k vláknům liší – ve směru vláken je dřevo mnohem pevnější a odolnější, kolmo na vlákna jsou jeho vlastnosti horší.

Dřevo mimo kambia obsahuje i další pletiva, tím je pletivo pokožkové na povrchu, a pletivo cévních svazků uvnitř kmene. Tato pletiva se liší tvarem i funkcí, která může být mechanická, zásobní nebo vodivá [26].

Základní chemické složení organické hmoty je u všech dřevin téměř stejné, ačkoli se anatomické prvky jehličnanů od listnatých dřevin liší.

Hlavními složkami dřeva jsou:

- celulóza (40–50 %),
- lignin (20–30 %),
- hemicelulóza (20–30 %),
- další organické látky (1–3 %): terpeny, tuky, vosky, pektiny, třísloviny, steroly, pryskyřice,
- anorganické látky, které po spálení tvoří popel (0,1–0,5 %),
- voda v různém množství.

Poměrná množství prvků v sušině tuzemského dřeva jsou:

- uhlík: 50 %
- vodík: 6 %
- kyslík: 43 %
- dusík: 0,04–0,2 %
- popeloviny: 0,2–0,6 %

Anatomie dřeva se zkoumá na základě jeho makroskopických a mikroskopických znaků. Makroskopické znaky jsou viditelné pouhým okem, kdežto u mikroskopických je k jejich rozboru potřeba lupy nebo mikroskopu [34].

3.1.1 Mikroskopická stavba dřeva

Anatomická stavba dřeva jehličnanů

Jehličnaté dřeviny jsou vývojově starší než listnaté. Dřevo jehličnanů má jednodušší a pravidelnou stavbu, kterou vytvářejí dva anatomické elementy, a to tracheidy (cévice) a parenchymatické buňky. Parenchymatické buňky se skládají z dřevných paprsků, podélného dřevního parenchymu a podílejí se na stavbě pryskyřičných kanálků [11]

Tracheidy tvoří 87–95 % objemu dřeva. Jsou to uzavřené protáhlé buňky se čtyř až šestiúhelníkovým příčným průřezem a různým zakončením. Dosahují délky 2–6 mm a šířky kolem 0,04 mm. Mají funkci vodivou a mechanickou.

Parenchymatické buňky mají tvar kratších hranolků, válců nebo větven. Ve dřevě mají vodivou a zásobní funkci, jejich buněčné stěny jsou zdřevnatělé až na epitelové buňky pryskyřičných kanálků.

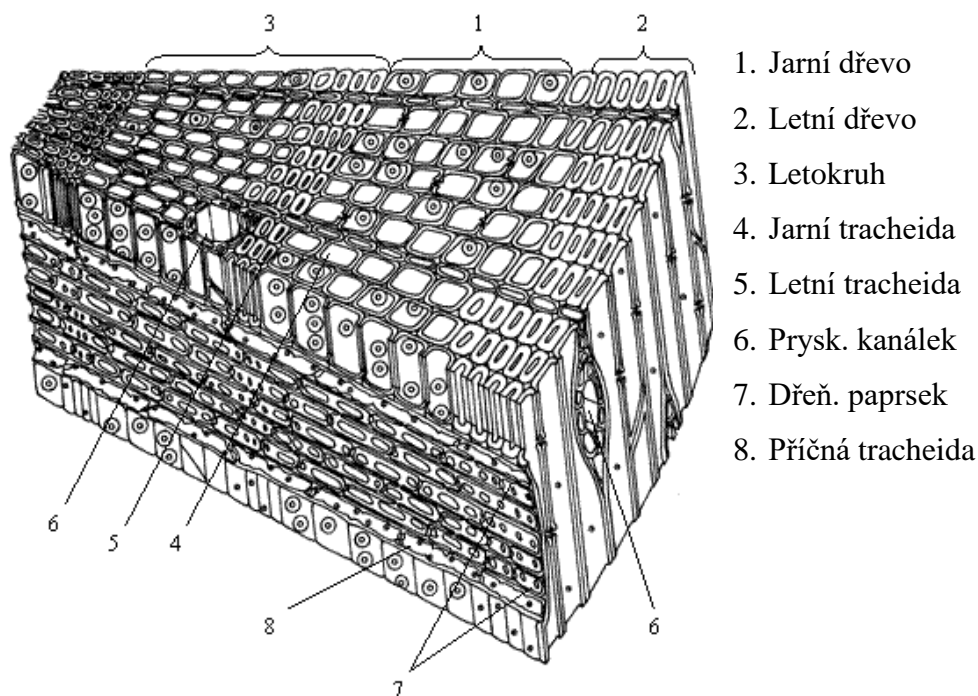
Dřevné paprsky tvoří 5–10 % objemu dřeva, skládají se z pásů parenchymatických buněk, orientovaných kolmo na letokruhy. V tomto směru vedou růstové látky a živiny. Zastávají i funkci zásobní pro škroby a tuky.

Pryskyřičné kanálky jsou tvořeny buňkami, které shromažďují a vylučují pryskyřici. Ne všechny naše jehličnaté dřeviny disponují pryskyřičnými kanálky, nemají je například jedle, tis a jalovec. Podle orientace v kmeni rozlišujeme vertikální (podélné) a horizontální (příčné) pryskyřičné kanálky, které jsou navzájem propojeny a vytváří systém kanálků, ze kterých při poranění kůry rostoucích stromů vytéká pryskyřice.

Vertikální pryskyřičné kanálky jsou v podélném směru osy kmene. Na jejich stavbě se podílejí tři vrstvy parenchymatických buněk. Vnitřní vrstva je tvořena epitelovými buňkami. Mohou být tenkostěnné nebo tlustostěnné. Vnější vrstva se skládá z živých parenchymatických buněk, tzv. doprovodného parenchymu.

Horizontální pryskyřičné kanálky procházejí dřevem ve směru kolmém na podélnou osu kmene, jsou tvořeny dvěma vrstvami a uloženy v dřevných paprcích. Nejlépe jsou viditelné na tangenciálním řezu. Tvoří je epitelové vrstvy a mrtvé parenchymatické buňky.

Podélný dřevní parenchym je tvořen pásy parenchymatických buněk nebo jednotlivými vřetenovitými buňkami orientovanými ve směru podélné osy kmene. Nachází se u některých jehličnanů a slouží k ukládání zásobních látek [11].



Obr. č. 1 Anatomická stavba jehličnatého dřeva [25].

Anatomická stavba dřeva listnáčů

Dřevo listnáčů je vývojově mladší než dřevo jehličnanů. Má složitější stavbu a je tvořeno větším počtem specializovaných buněk.

Tab. č. 1 Přehled dřevních buněk listnáčů [11].

Druh buněk	Hlavní funkce	Uložení
Cévy – tracheje	vodivá	Ve směru podélné osy kmene
Céovité tracheidy	vodivá	Ve směru podélné osy kmene
Vláknité tracheidy	mechanická	Ve směru podélné osy kmene
Vazicentrické tracheidy	vodivá	Ve směru podélné osy kmene
Libriformní vlákna	mechanická	Ve směru podélné osy kmene
Parenchymatické buňky axiálního parenchymu	zásobní	Ve směru podélné osy kmene
Epitelové buňky kanálků	vylučovací	Ve směru podélné osy kmene
Parenchymatické buňky dřevových paprsků	vodivá, zásobní	Kolmo na osu kmene
Epitelové buňky kanálků	vylučovací	Kolmo na osu kmene

Cévy jsou vodivé elementy dřeva listnáčů, jsou to kapiláry, které mají různou délku od několika milimetrů až po metry. V bělovém dřevě tvoří síť drah, kterými je přepravována voda s minerálními látkami od kořenů k listům. Vzhledem k tomu, jak jsou cévy velké a uspořádané, dělíme dřevo listnáčů z makroskopického hlediska na kruhovitě pórovité, roztroušeně pórovité a polokruhovitě pórovité.

Cévice (tracheidy) mají ve dřevě listnáčů funkci vodivou, mechanickou a někdy i zásobní. Vzhledem k tvarové a funkční odlišnosti se rozlišují tracheidy cévovité, vláknité a vazicentrické.

Libriformní vlákna tvoří podstatnou část základního pletiva většiny listnáčů, v závislosti na druhu mohou tvořit 50–60 %, někdy až 75 % celkového objemu dřeva. Jejich funkcí ve dřevě je mechanické zpevnění elementů dřeva.

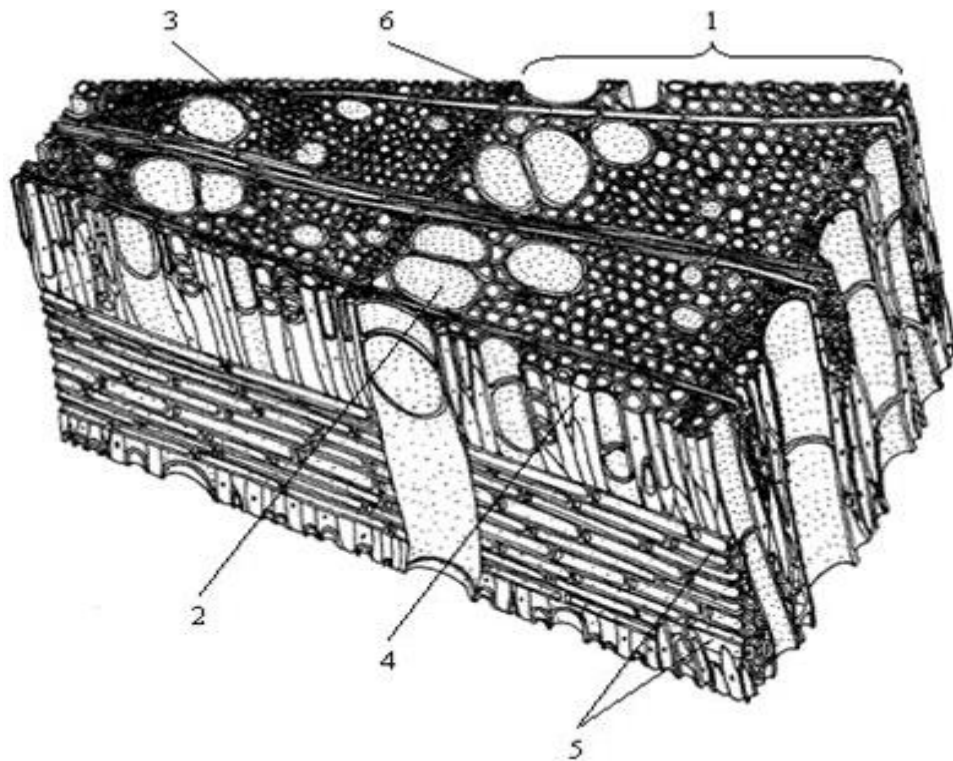
Parenchymatické buňky jsou tvarově rozmanitější a zastoupeny častěji než ve dřevě jehličnanů. Jejich funkce je hlavně vodivá a zásobní pro ukládání škrobů tuků a bílkovin. Parenchymatické buňky jsou uloženy jednak ve směru podélném na osu kmene a tvoří tzv. axiální parenchym, nebo ve směru kolmém, tzv. radiální parenchym, tvořící dřevové paprsky.

Dřevové paprsky se vyskytují častěji u listnáčů než u jehličnanů, v průměru tvoří 10–20 % celkového objemu dřeva. Podle tvarového typu parenchymatických buněk, jež je vytvářejí, rozlišujeme dřevové paprsky homogenní a heterogenní.

Homogenní dřevové paprsky jsou takové, na jejichž stavbě se podílí tvarově stejné buňky. Tyto obdélníkové buňky jsou orientovány buď na ležato nebo na stojato.

Heterogenní dřevové paprsky jsou tvořeny různou kombinací ležatých, stojatých a u některých dřevin ještě tzv. čtvercových parenchymatických buněk.

U některých listnáčů se úzké dřevové paprsky seskupují a vytvářejí tzv. nepravé dřevové paprsky. Dřevové paprsky listnáčů mohou být různě široké, jedno nebo více-vrstvé a různě vysoké [12].



Obr. č. 2 Anatomická stavba listnatého dřeva [25].

1. Letokruh
2. Jarní céva
3. Letní céva
4. Libriformní vlákno
5. Dřeňový paprsek
6. Podélný parenchym

3.1.2 Makroskopická stavba dřeva

Dřevo pozorovatelné pouhým okem (makroskopicky) má charakteristické morfologické znaky textury, a to kresbu, barvu a tvar. Znaky jsou typické pro určité dřeviny, což umožňuje určení příslušného druhu [1].

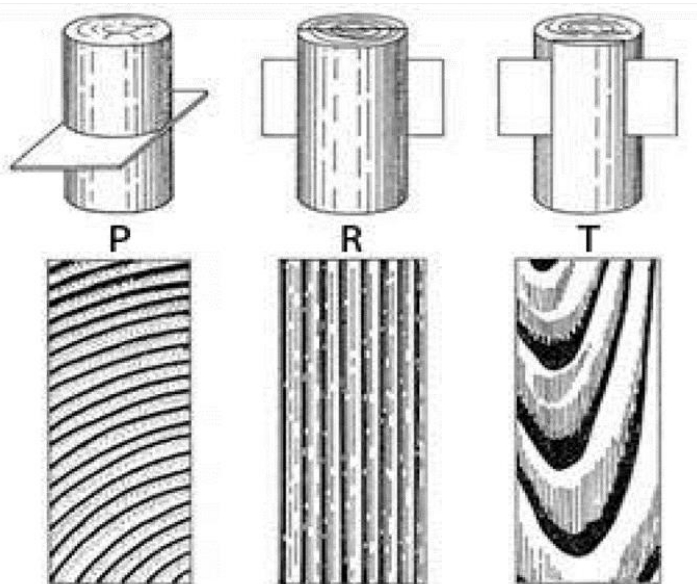
K základním makroskopickým charakteristikám dřeva patří letokruhy, jarní a letní dřevo v letokruhu, jádro, běl, vyztáhlé dřevo, dřeňové paprsky, cévy, pryskyřičné kanálky, dřeňové skvrny a suky. Tyto znaky vytvářejí charakteristickou texturu na

základních řezech dřevem a při makroskopickém určování dřeva jsou také na těchto řezech posuzovány. Nemusí být pozorovatelné u všech druhů dřev příslušných dřevin, rovněž se nemusí vyskytovat u dřeva každého taxonu a na všech řezech.

Běl je vnější část dřeva přiléhající ke kambiu. V rostoucím stromě je charakterizována přítomností živých buněk v dřevných paprscích a dřevním parenchymu, a průchodností vodivých elementů. Fyziologická funkce běli rostoucího stromu spočívá v rozvádění vody s minerálními látkami z kořenů k listům a k ukládání zásobních látek. Díky vodivé funkci běli, má bělové dřevo vyšší vlhkost. Na běl je navázáno jádro. U listnatých dřevin, zejména pak s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva, je běl zpravidla užší než u jehličnanů. Někdy má i odlišnou strukturu, např. šířku letokruhů, podíl letního dřeva, délku vláknitých anatomických elementů. Tyto odlišnosti mohou ovlivňovat fyzikální a mechanické vlastnosti bělového dřeva.

Jádro je tmavší část centrálního kmene, je výrazněji makroskopicky odlišná od světlejší běli. Takto definované jádro je charakteristické pro dřevo jádrových dřevin. Jádro lze pokládat za fyziologicky mrtvé pletivo, které ztratilo vodivou funkci. Jeho vodivé elementy (cévy, cévice) jsou většinou neprůchozí a neobsahují živé parenchymatické buňky. Za neprostupnost cév (vodivých elementů jádra listnáčů) jsou zodpovědné thyly a jádrové látky. Thyly vyplňují a ucpávají lumény cév listnáčů, které tím ztrácí svou vodivou funkci a naopak zvyšují mechanickou funkci dřeva. Vlastnosti thyly jsou odlišné u různých druhů listnatých dřevin. Často se vyskytuje u listnáčů s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva (akát, dub, jasan, aj.). Jádrové látky zvyšují trvanlivost a odolnost jádrového dřeva. Mají také vliv na chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva [31].

Mezi základní řezy kmene patří: Příčný (transverzální), radiální a tangenciální.



Obr. č. 3 Schématické znázornění základních řezů dřeva [2].

U různých druhů dřevin jsou letokruhy různě výrazně i strukturně odlišené, podle čehož můžeme rozlišovat:

- jehličnaté dřevo, které se vyznačuje výraznou vrstvou letního dřeva a nejméně výrazným rozdílem mezi jarním a letním dřevem. Jarní dřevo tvoří světlejší část letokruhu, je výrazně měkčí, a jeho podíl bývá vyšší. Letní dřevo, které tvoří tmavší část letokruhu, je výrazně tvrdší a má dvakrát až třikrát větší hustotu.
- listnaté kruhovitě pórovité dřevo, které má výrazné jarní dřevo. Je tvořeno širokými, často pouhým okem viditelnými cévami (o průměru 0,2–0,4 mm). Ty vytvářejí na začátku letokruhu výrazný pás. Na příčném řezu jsou pozorovatelné jako póry, na podélných řezech jako rýhy. V letním dřevě jsou cévy úzké, okem nerozlišitelné. Sdružují se však do skupin, které tvoří makroskopicky viditelnou strukturu letního dřeva. S rostoucí šířkou letokruhu narůstá tloušťka letního dřeva, přičemž podíl letního dřeva v letokruhu je zpravidla větší. Z našich dřevin do této skupiny patří dub, jasan, akát, jilm aj.

- listnaté polokruhovitě pórovité dřevo se vyznačuje víceméně zřetelnou zónou světlejšího jarního dřeva, které vzniká seskupením většího počtu drobných cév (třešeň) nebo výskytem velkých cév s postupně se zmenšujícím průměrem (ořešák). Hranice mezi jarním a letním dřevem je méně výrazná než u dřeva s kruhovitě pórovitou stavbou.
- listnaté roztroušeně pórovité dřevo, které nevykazuje výrazné rozlišení jarního a letního dřeva. Letokruhy jsou většinou zvýrazněné pouze úzkou tmavší (světlejší) vrstvou na hranici letokruhu, proto jsou špatně rozpoznatelné. Cévy mají přibližně stejný rozměr v rámci celého letokruhu a okem nejsou rozlišitelné. Do této skupiny patří např. buk, habr, bříza, olše, topol, lípa, atd. [41].

3.2 Vlastnosti dřeva

Dřevo má celou řadu předností, ale i nedostatků. Mezi jeho přednosti můžeme zařadit pevnost (především pevnost v tahu ve směru vláken) a v závislosti na pevnostních vlastnostech i jeho nízkou hmotnost v porovnání s ostatními stavebními materiály. Míra pevnosti je ovlivněna řadou činitelů, jako jsou hustota, obsah vody, suky, vady dřeva a teplota. Tyto všechny mají dopad na výslednou pevnost. Dřevo je pružný materiál, který má schopnost nabývat počáteční tvar a rozměry po přerušení působení vnějších sil a namáhání. Má dobré tepelně izolační a akustické (rezonanční) vlastnosti, je lehce opracovatelné a esteticky působivé. Z hlediska ekologie je dřevo dobře recyklovatelné a výroba materiálů na bázi dřeva není energeticky náročná.

Z hlediska nedostatků dřeva je jednou z jeho hlavních omezujících vlastností anizotropie – nerovnoměrnost. Dřevo je vláknitý materiál a jeho nestejněměrná struktura způsobuje odlišné vlastnosti v různých směrech (lepší vlastnosti má v podélném než v příčném řezu). Anizotropie dřeva je trojsměrná – rozlišuje se směr příčný, radiální a tangenciální.

Mnoha experimenty se prokázalo, že pružné deformace v malém objemu dřeva ukazují na rozdíl ve třech vzájemně kolmých směrech, a to v podélném, radiálním a tangenciálním. Experimentální zkoušky z pružnostních a pevnostních vlastností dřeva prokazují, že jsou značně odlišné.

Hlavní příčinou anizotropie je tvar a uspořádání základních buněk ve dřevě, především libriformních vláken a tracheidy. Směr mikrofibril ve středních vrstvách sekundárních S2 stěn je příčinou anizotropie s významným rozdílem mechanických vlastností dřeva podélně a kolmo na vlákna.

Rozdíl mechanických vlastností v podélném a kolmém směru na vlákna vyplývá z vazbových energií chemických složek dřeva. V podélném směru se na namáhání více podílí kovalentní a v kolmém směru zase vodíkové vazby. Síly působící kolmo na vlákna způsobí větší deformaci a zploštění buněk než při působení rovnoběžně s vlákny [1].

Další překážkou je jeho nehomogenita, která se projevuje různorodostí struktury, kvality a vlastností dřeva. Je způsobena prostředím, ve kterém dřevo vyrůstalo při působení řady vnějších podmínek. K negativním vlastnostem dřeva patří i jeho hygroskopicitu (nasáklivost). Hygroskopicitu vyvolává změnu vlhkosti a zároveň změnu rozměrů dřevního materiálu.

Dřevo je hořlavý materiál, ale jeho chování se dá v případě požáru předpovídat a relativně přesně spočítat (a tím určit i stupeň nebezpečí). Na rozdíl od ostatních materiálů má nízkou tepelnou vodivost a v důsledku vytvoření povrchové zuhelnatělé vrstvy, která působí izolačně, je postup spalování dřevěné konstrukce v případě požáru poměrně pomalý. Navíc dřevěná konstrukce dokáže hrozbu zborcení v předstihu akusticky oznámit. V současnosti se dá požární odolnost dřeva zlepšit chemicky i mechanicky.

Dřevo se musí také chemicky chránit proti dřevokazným houbám pomocí fungicidních nátěrů a proti dřevokaznému hmyzu insekticidními postřiky, protože jeho přirozená odolnost proti těmto škůdcům je minimální [1].

3.2.1 Fyzikální vlastnosti

Tab. č. 2 Přehled fyzikálních vlastností dřeva [15].

Fyzikální vlastnosti	
<u>Vnitřní</u>	<u>Vnější</u>
Vlhkost	Barva
Hustota	Lesk
Propustnost	Textura
Tepelné vlastnosti	Vůně
Elektrické vlastnosti	-
Zvukové vlastnosti	-

Vlhkost

Vlhkostí dřeva se označuje přítomnost vody ve dřevě. Vyjadřuje se podílem hmotnosti vody k hmotnosti dřeva v absolutně suchém stavu = vlhkost absolutní (W_{abs}). Vlhkost absolutní je užívána při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Podíl hmotnosti vody k hmotnosti mokrého dřeva = vlhkost relativní (W_{rel}). Vlhkost relativní využijeme především tam, kde potřebujeme znát, kolik procent z hmotnosti dřeva tvoří voda, a to například při jeho nákupu nebo prodeji [2].

Vodu ve dřevě můžeme vzhledem k sušině dřeva rozdělit podílově takto:

Vlhkost suchého dřeva – ve dřevě není žádná voda volná ani voda vázaná. Tohoto stavu dosáhneme sušením dřeva při teplotě okolo 100 °C. Tato vlhkost se značí jako absolutně suché dřevo (W_0).

Vlhkost při nasycení buněčných stěn – vlhkost při plném zaplnění buněčných stěn, značíme jako MNBS – mez nasycení buněčných stěn, nebo MH – mez hygroskopicity. Rozdíl mezi MNBS a MH je ten, že MNBS nezávisí na teplotě prostředí, ale MH ano a se stoupající teplotou klesá. Další rozdíl spočívá ve formě vody, které je dřevo vystaveno: u MH se jedná o vzdušnou vlhkost a u MNBS se jedná o vodu kapalnou.

Vlhkost při maximálním nasycení – je jí dosaženo při plném nasycení mikro i makrokapilární struktury vodou. Tato vlhkost se označuje jako maximální vlhkost dřeva (W_{\max}).

Voda chemicky vázaná – je součástí chemických sloučenin, ze dřeva se nedá odstranit sušením, ale pouze spálením. Při charakteristice fyzikálních a mechanických vlastností nemá žádný význam.

Voda vázaná – nachází se v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny OH amorfni části celulózy a hemicelulózy. Voda vázaná se ve dřevě vyskytuje do MH (okolo 30 % vlhkosti) a má přímý vliv na sesychání a bobtnání dřeva. Pro fyzikální a mechanické vlastnosti má nejdůležitější význam [11].

Mění-li se vlhkost dřeva v rozsahu vody vázané, dřevo podléhá rozměrovým změnám – hygroexpanzi rozměrů. Sesychání a bobtnání je lokalizováno v buněčné stěně, kde dochází k oddalování či přibližování fibrilární struktury. Významný vliv na míru sesychání a bobtnání má orientace fibril v buněčné stěně. Vzhledem k tomu, že největší podíl z buněčné stěny připadá na S_2 vrstvu sekundární buněčné stěny (až 90 %), kde se orientace fibril příliš neodklání od podélné osy kmene (15–30°), dochází k maximálnímu sesychání a bobtnání ve směru napříč vlákny. Malé rozměrové změny v podélném směru se vysvětlují tím, že molekuly vody nemohou vnikat mezi fibrily do valenčního řetězce v podélném spojení.

Voda volná (kapilární) – je přítomná v lumenech a mezibuněčných prostorech, začíná se vyskytovat po naplnění dřeva vodou vázanou a má menší vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti než voda vázaná [11].

Dřevo se dle obsahu vlhkosti řadí do skupin:

- Dřevo mokré, dlouhodobě uložené ve vodě ($w > 100$ %)
- Dřevo čerstvě poraženého stromu ($w = 50-100$ %)
- Dřevo sušené na vzduchu ($w = 15-22$ %)

- Dřevo vysušené pro použití v interiéru ($w = 8\text{--}15\%$)
- Dřevo vysušené úplně ($w = 0\%$)

Dřevo je ve vztahu k okolí materiálem, který je schopný přijímat a odevzdávat vodu jak ve formě kapalné, tak ve formě plynné, a měnit svoji vlhkost dle stavu okolního prostředí. Dřevo dokáže přijímat i jiné látky než vodu, voda je ale nejpodstatnější z nich [11]. Větší množství vody ve dřevě negativně ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti a činí jej náchylnějším k napadení.

Pohyb vody ve dřevě

Kapaliny a plyny se ve dřevě mohou pohybovat dvěma základními způsoby: objemovým tokem a molekulárním tokem.

Objemový tok probíhá v mezo- a makrokapilárách pod vlivem gradientu statického nebo kapilárního tlaku. Prakticky se toho využívá při tlakové impregnaci ochranných látek do dřeva a impregnaci monomery.

Molekulární tok zahrnuje pohyb plynů v lumenech přes ztenčení buněčných stěn a pohyb vody vázané v mikrokapilárách buněčné stěny. Aplikací molekulárního toku je sušení dřeva a popisujeme jej difúzí [15].

Bobtnání

Bobtnáním nazýváme schopnost dřeva zvětšovat svoje lineární rozměry, plochu nebo objem, při přijímání vázané vody v rozsahu vlhkosti **0 % – MH (mez hygroscopicity)**. Bobtnání se vyjadřuje podílem změny rozměru k původní hodnotě a uvádí se nejčastěji v %. Hodnota diferenciálního bobtnání závisí na hustotě dřeva, s rostoucí hustotou se snižuje.

Sesychání

Sesycháním nazýváme proces, při kterém se zmenšují lineární rozměry, plocha nebo objem tělesa, v důsledku ztráty vody vázané. Sesychání se řídí podobnými zákonitostmi jako bobtnání.

Hustota dřeva

Hustota dřeva a podíl vody ve dřevě jsou přímo úměrné, ale hmotnost a objem dřeva nerostou stejně. Hmotnost se zvyšuje s vlhkostí až do maximálního nasycení. Objemové změny dřeva se zastaví po dosažení meze hygroskopicity.

Určování hustoty dřeva je oproti jiným materiálům vzhledem k hygroskopicitě dřeva ztíženo, protože jak hmotnost, tak objem dřeva jsou velmi ovlivněny vlhkostí dřeva.

I přesto se ale jedná o vlastnost, která velmi významně ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva.

Při určování vlhkosti se nejčastěji užívají následující vlhkostní stavy:

- Hustota suchého dřeva ($w = 0 \%$)
- Hustota dřeva při vlhkosti 12%
- Hustota při vlhkosti vyšší jak $w = 0 \%$

Při výpočtech se pro možnost porovnávání jednotlivých výsledků používá hustota při vlhkosti $w = 0 \%$. Výpočet vlhkosti pomocí váhové metody se provádí podle vzorce:

$$W = \frac{m_w - m_0}{m_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

w = absolutní vlhkost zkušebních vzorků (%)

m_w = hmotnosti zkušebních tělísek při vlhkosti w (g)

m_0 = hmotnost zkušebních tělísek v suchém stavu (g)

Dřevo je porézní materiál, objemy lumenů a mezibuněčných prostor často převyšují objem buněčných stěn. Proto se často také používá výpočet tzv. hustoty dřevní substance, což je hustota bez započítání lumenů a mezibuněčných prostor (pouze hmota buněčných stěn). Toto číslo se v závislosti na chemickém složení dřeva pohybuje v rozmezí $1440\text{--}550 \text{ Kg} \times \text{m}^{-3}$

Hustota dřevní substance se vypočítá stejně jako obyčejná hustota, pouze se spodním indexem s , který zde značí dřevní substanci.

Hustota dřevní substance se používá hlavně při výpočtech pórovitosti, maximální nasáklivosti a pro impregnaci dřeva. Jako průměrná hustota se pro všechny dřeviny uvádí $1530 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$.

Propustnost je objemový tok tekutin přes dřevo vyvolaný gradientem vnějšího tlaku (statického nebo kapilárního) souhrnně nazývaného hydrodynamickým pohybem. Jako měřítko propustnosti může být použita pórovitost, která určuje lehkost toku přes dřevo za působení gradientu tlaku. K propustnosti dřeva pro tekutiny je potřeba kromě pórovitosti i propojení lumenů buněk perforovanými přehrádkami cév, ztenčeninami buněčných stěn nebo křížovými poli dřeňových paprsků.

Obecně platí, že dřevo listnáčů je pro kapaliny propustnější než dřevo jehličnanů. Rozdíl je nejvíce způsoben přítomností cév. Ve směru podélném je dřevo nejpropustnější a ve směru radiálním je dřevo propustnější než ve směru tangenciálním. Rozdíl mezi propustností v podélném a příčném směru je větší u dřeva listnáčů než u jehličnanů [15].

Teplotní vlastnosti dřeva

Dřevo je špatný vodič tepla. Vodivost tepla závisí na dřevině a je tím větší, čím je dřevo hustější, vlhčí a teplejší [18].

Vliv faktorů na difúzi tepla ve dřevě – vedení tepla ve dřevě je ovlivňováno mnoha faktory, z nichž největší vliv mají anatomická stavba dřeva, hustota a vlhkost dřeva. Teplotní vodivost se v podélném a příčném směru liší kvůli anizotropii dřeva.

V podélném směru je 1,5–2,5krát větší než ve směru příčném. Ve směru tangenciálním a radiálním se hodnoty teplotní vodivosti α příliš nemění.

Tepelná vodivost ve fyzice označuje schopnost daného kusu látky vést teplo. Představuje rychlost, jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí [15]. Tepelná vodivost dané látky je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti [23].

Přenos tepla ve dřevě – teplo se přenáší vnitřním pohybem molekul v závislosti na jejich vzdálenosti a kinetické energii. Molekulární pohyb je mnohem intenzivnější u tuhých látek než u tekutin, protože přenos tepla probíhá vzájemnými srážkami částic. U tekutin jsou tyto částice mnohem více vzdáleny než u pevných těles, a proto je přenos tepla v tekutinách pomalejší.

Měrné teplo – dřevo je schopné akumulovat teplo jako i jiné látky. Veličinou této vlastnosti je měrné teplo c . Tato veličina udává množství tepla, které je nutné na ohřátí jednotkové hmotnosti dřeva o 1 °K. Měrné teplo závisí na teplotě a vlhkosti dřeva.

Tento přenos se může teoreticky uskutečnit ve třech základních formách: vedením, prouděním, sáláním. Tepelný tok lze popsat i jako stacionární a nestacionární.

Vedení tepla probíhá v hmotném prostředí, jehož objemové elementy zůstávají v klidu.

Proudění tepla probíhá v hmotném prostředí, jehož objemové elementy vykonávají translační pohyb. Pomocí proudění se popisuje tepelný tok v tekutinách nebo na rozhraní tekutiny a pevné látky.

Sálání tepla je přenos tepla mezi dvěma tělesy o různé teplotě pomocí elektromagnetických vln. K přenosu není potřeba hmotného prostředí [15].

3.2.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti charakterizují schopnost dřeva odolávat účinku vnějších sil. Tyto vlastnosti rozdělujeme do tří skupin na základní, odvozené a technologické.

K základním mechanickým vlastnostem patří pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost. K odvozeným mechanickým vlastnostem se řadí tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu. K technologické skupině vlastností patří štípatelnost, opotřebovatelnost, impregnovatelnost a ohýbatelnost.

Stejně jako fyzikální vlastnosti, mají i mechanické vlastnosti anizotropní charakter. To je dáno uspořádáním a orientací molekul stavebních látek ve dřevě. Orientace kovalentních a vodíkových vazeb určuje velikost a orientaci mechanických vlastností na úrovni mikrostruktury a makrostruktury dřeva. Tvar a uspořádání základních mechanických elementů dřeva, libriformních vláken, tracheid, směr fibril ve střední vrstvě sekundární buněčné stěny a rozdílná orientace kovalentních a vodíkových vazeb zapříčiňují významný rozdíl mechanických vlastností ve směru podélném a kolmém na vlákna.

Pro charakteristiku mechanických vlastností dřeva používáme tři roviny pružné symetrie:

- Příčnou (transverzální), značenou RT
- Radiální, značenou LR
- Tangenciální, značenou LT

Základní druhy mechanického namáhání

Základní druhy mechanického namáhání se dělí podle druhu napětí, které v tělese vzniká působením vnější síly. Napětí ve dřevě jsou vnitřní síly, které vznikají působením vnějších mechanických sil.

Napětí je definováno jako velikost vnitřní síly, která je vztažena na jednotku plochy tělesa.

Když síly působí kolmo na průřezovou plochu tělesa, jde o normálové napětí σ . Příkladem takových normálových napětí je napětí v tahu a tlaku. V případě působení síly v rovině průřezu vzniká tangenciální (smykové) napětí τ . Příkladem je napětí ve

smyku. Kombinací normálového a tangenciálního je ohyb. Speciálním případem ohybového momentu je napětí v krutu.

Stav napjatosti je definován počtem, druhem a průběhem napětí v objemu dřeva a jejich vzájemnými vztahy. Podle toho, kolik působí hlavních napětí, je tento stav napjatosti jednoosý, dvouosý nebo víceosý.

Pro pevná tělesa jsou základní dvě vlastnosti: pevnost a pružnost.

Pružnost dřeva je charakterizována jako schopnost dřeva dosahovat původních rozměrů po uvolnění působících vnějších sil. Pevnost dřeva charakterizuje jeho odolnost proti trvalému poškození.

3.2.3 Odvozené a technologické vlastnosti

Do této skupiny se řadí ty druhy zatížení, které vyvolávají složité stavy napjatosti. Mezi ně patří např.:

Houževnatost dřeva

Houževnatost dřeva je mechanickou prací, která je spotřebována na vytvoření plastické deformace. Má velmi úzký vztah k plastičnosti dřeva. Podle druhu zatížení se rozlišuje statická a dynamická (rázová) houževnatost.

Tvrdomost dřeva

Tvrdomostí charakterizujeme schopnost dřeva klást odpor proti vnikání jiného tělesa do jeho struktury. Tvrdomost dřeva má význam při opracování reznými nástroji (řezání, loupání, hoblování, frézování) a v případech, kdy se dřevo odírá. Podle druhu zatížení se rozlišuje statická a dynamická tvrdomost [11].

3.3 Tvrdomost

Pod pojmem tvrdomost dřeva je myšlena schopnost dřeva klást odpor proti vnikání do jeho struktury. Tato vlastnost má velký vliv při mechanickém obrábění např. při

frézování, řezání, soustružení, a v případech, kdy je dřevo vystaveno namáhání oděrem, např. u dřevěných mostů a podlah.

Tvrdot dřeva lze stanovit více způsoby. Při měření deformace běžnými přístroji nelze z makroskopického pohledu tvrdost považovat za plně vratný proces, protože když dojde k uvolnění vnějších zatěžujících sil na těleso, nenabyde těleso původní tvar [1].

Tvrdot lze zjistit velmi snadno pomocí řady mechanických zkoušek a podle hodnoty tvrdosti pak lze odhadnout ostatní vlastnosti materiálu [21].

Zkoušky podle tvrdosti se dělí na:

vrypové zkoušky

- zkouška se provádí pohybem ostrého nástroje ve směru rovnoběžném s povrchem tělesa tak, aby se vytvořil vryp
- slouží pro testování křehkých materiálů jako jsou např. minerály

dynamické zkoušky (tzv. rázové zkoušky)

- testované těleso je vystaveno zkoušce kolmým rázem
- zkoušky jsou prováděné pomocí kladívka a skleroskopu

statické zkoušky (tzv. zkoušky Vnikací)

- do testovaného povrchu tělesa je vtlačováno těleso v kolmém směru
- zkoušky: Brinellova, Jankova, Rockwellova, Vickersova [40].

Podle druhu zatížení, které působí na těleso je rozlišujeme na:

- Statickou tvrdost (při statickém zatížení)
- Dynamickou tvrdost (při dynamickém zatížení) [21].

3.3.1 Statická tvrdost

Tvrdomost dřeva (H) je specifikována na základě výsledků dvou nejpoužívanějších způsobů zkoušení, a to zkoušky podle Brinella a podle Janka, která se provádí na čelních, radiálních a tangenciálních plochách dřeva.

Statická tvrdost na čelních plochách materiálu je vyšší než na bočních plochách. U jehličnatých dřevin o 40 % a u listnatých dřevin o 30 %. U většiny druhů dřevin nejsou výrazné rozdíly mezi tvrdostí v radiální a tangenciální ploše. Jenom u dřevin s dobře vyvinutými dřeňovými paprsky (dub, buk, jilm) je radiální tvrdost o něco vyšší (5–10 %) než tangenciální.

Na základě zjištěných údajů statické tvrdosti na čelních plochách při 12% vlhkosti se dřeva dělí do pěti skupin podle tvrdosti:

- měkká dřeva (tvrdost do 40 MPa)
- středně tvrdá dřeva (tvrdost 41–80 MPa)
- tvrdá dřeva (81–100 MPa)
- velmi tvrdá dřeva (101–150 MPa)
- super tvrdá dřeva (nad 150 MPa)

Hodnoty statické tvrdosti dřeviny jsou také závislé na její hustotě a vlhkosti. Čím je vlhkost dřeviny až do meze nasycení vláken vyšší, tím jsou hodnoty tvrdosti dřeva nižší. Při změně vlhkosti o 1 % v rozmezí vlhkosti od 0 % do meze nasycení vláken se mění hodnoty statické tvrdosti o 3 %.

$$\sigma_{12} = \sigma_w (1 + \alpha (w-12)) \text{ (MPa)} \quad (2)$$

w – vlhkost dřeva v době zkoušení

σ_w – pevnost dřeva při vlhkosti W

α – opravný koeficient (pro naše dřeviny 0,03) [21].

Zkouška tvrdosti podle JANKA – základem testu je ocelová kulička (půlkulička) o průměru 11,28 mm, která je vtlačována do tělesa působením síly tak, aby kulička vnikla do dřeva do poloviny své výšky (5.64 mm). Tím ve dřevě vznikne otláčená plocha (100 mm²). Výsledkem je síla, která byla potřebná pro zatlačení kuličky. Podle průměru výsledků byla vytvořena Jankova stupnice tvrdosti, viz tabulka č. 3.

Tab. č. 3. Tabulka tvrdosti dřeva dle Janka [35].

Tvrđost	Kg×cm ⁻²	Druh dřeva
1. tvrđost	0–350 (velmi měkká)	smrk, borovice, limba, jedle, topoly, vrby, lípy
2. tvrđost	351–500 (měkká)	modřín, douglaska, kleč, jalovec, bříza, olše, jíva, střemcha, teak
3. tvrđost	501–650 (středně tvrđá)	kaštan jedlý, platan, jilmy, líska
4. tvrđost	651–1000 (tvrđá)	dub, ořešák, javor, třešeň, jabloň, jasan, buk, hrušeň, švestka, akát, habr
5. tvrđost	1001–1500 (velmi tvrđá)	dříň, svída, ptačí zob, dub pýřitý, zimostřáz
6. tvrđost	nad 1501 (neobyčejně tvrđá)	eben cejlonský, africký grenadil, guajak a jiné exotické dřeviny

Jankova tvrđost je dána vzorcem:

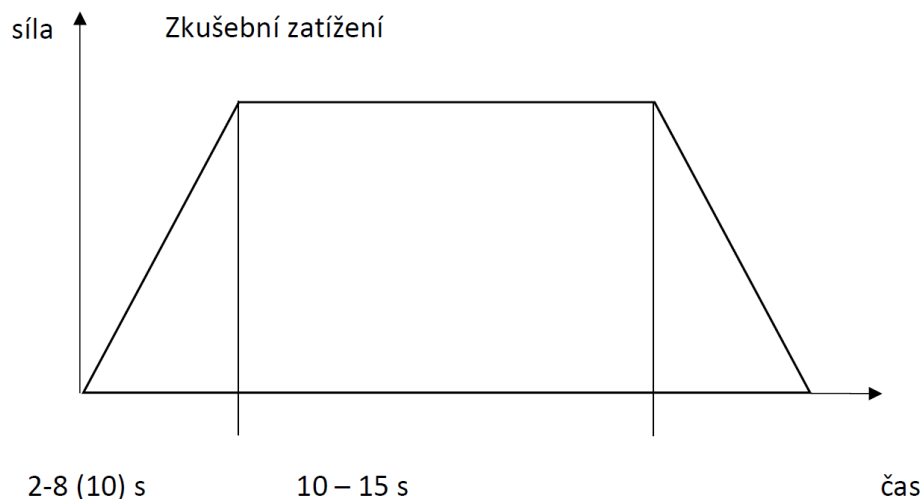
$$H_J = \frac{F}{S} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

H_J – tvrđost dle Janka (v MPa)

F – síla potřebná na zatlačení kuličky (v N)

S – otláčená plocha ve dřevě (100 mm²) [36].

Brinellova metoda se řadí mezi nejrozšířenější při určování tvrdosti dřeva. Podstatou Brinellovy zkoušky je vlačování ocelové kalené kuličky daného průměru do plochy zkoušeného tělesa konstantním zatížením. Těleso musí být při zkoušce pevně uchyceno a položeno na tuhé podložce, aby se během zkoušky nepohnulo. Důležitý je stav tělesa, jehož povrch nesmí obsahovat nečistoty a cizí tělíska (povrch musí být hladký a rovný). Vnikací indentor se zatlačuje do povrchu zatížením směřujícím kolmo k povrchu tělesa, bez rázů a chvění. Doba zatěžování do dosažení zkušební síly nesmí být menší než 2 s a zároveň delší než 8 s, doba působení zkušební síly se pohybuje v rozmezí 10 až 15 s podle druhu materiálu.



Obr. č. 4 Průběh Brinellovy zkoušky tvrdosti [7].

Podmínky zkoušek je nutno dodržovat z důvodu porovnatelnosti naměřených výsledků. Na výsledek má vliv zejména velikost působící síly, která se volí s ohledem na průměr použité kuličky a měřený materiál [7].

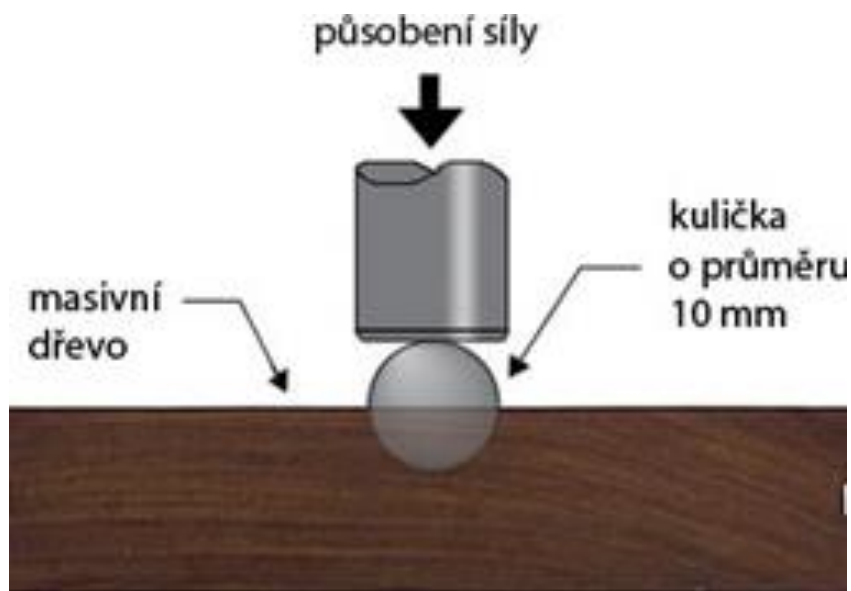
Podle tvrdosti dřeva se kulička vmačkává silou o velikosti 100 N u velmi měkkých, 500 N u středně tvrdých a 1000 N u tvrdých dřevin. Z průměru otláčené plochy a kuličky se vypočte plocha otláčení. Tvrdost H_B je potom dána hodnotou napětí podle vztahu:

$$H_B = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{MPa}) \quad (4)$$

F – síla působící na kuličku (N)

D – průměr kuličky (mm)

d – průměr otláčené plochy ve dřevě (mm)



Obr. č. 5 Model Brinellovy zkoušky tvrdosti [40]

Průměr kuličky (D) závisí na tloušťce měřeného materiálu – bývá 1 mm; 2,5 mm; 5 mm a 10 mm. Minimální tloušťka zkoušeného materiálu by měla být desetinásobkem hloubky vtisku, v opačném případě by výsledky mohly být ovlivněny tvrdostí podložky.

Pro praktickou potřebu jsou sestaveny tabulky, kde se označení tvrdosti skládá ze značky tvrdosti H_b a k ní připojených údajů podmínek zkoušky, tj. průměru kuličky D , síly F a doby zatížení t . Tyto údaje jsou od sebe odděleny lomítkem. Podrobnější a přehlednější hodnoty tvrdosti dle Brinella jsou uvedeny v tabulce.

Tab. č. 2 Tvrdość dřevin dle Brinellovy stupnice [11].

Dřevina	Tvrdość dle Brinella	Relativní tvrdość v %
smrk	1,6	42
borovice	1,8	48
český modřín	2,1	56
sibiřský modřín	3	77
třešeň evropa	3,3	85
bříza	3,3	85
ořeř vlašský eur.	3,5	90
javor evropský	3,6	92
teak plantážový	3,7	95
buk	3,8	97
dub	3,9	100
třešeň USA	3,9	100
jasan	4,1	105
hevea	4,2	109
hrušeň	4,9	113
teak pralesní	4,6	118
javor kanadský	4,8	123
merbau	5,3	136
bambus	6,2	162
ipe-brazil. ořeř	6,7	174
jatoba-brazil.	7,4	186
ironwood	7,7	196

- Relativní tvrdość se odvíjí od tvrdości dubu

3.3.2 Dynamická tvrdość

Mírou dynamické tvrdości je stopa, kterou ve dřevě zanechá kulička o průměru 25 mm padající na dřevo z určité výšky (0,5 m). Stopa, kterou vytvoří kulička ve dřevě je tím větší, čím je dřevo měkčí. Dynamická tvrdość dřeva se obvykle stanoví na radiálních nebo tangenciálních plochách (*Matovič, 1993*).

Stejně jako statická tvrdość, je dynamická tvrdość při posuzování závislá na vlhkosti materiálu. Se změnou vlhkosti o 1 % se dynamická tvrdość změní o 2–3 % [11].

3.3.3 Faktory ovlivňující tvrdost dřeva

Všeobecně platí, že dřevo je přírodní materiál, který se vyznačuje variabilitou vlastností. Variabilita může být zapříčiněná vnitřními činiteli, vnějšími činiteli, chemikáliemi, houbami a hmyzem [27].

Tvrdost dřeva je ovlivněna faktory, mezi které patří:

- část kmene a stromu
- makroskopická struktura dřeva
- mikroskopická stavba dřeva
- chemické složení dřeva
- hustota dřeva
- vady dřeva
- vlhkost dřeva
- proměnlivost dřeva
- anizotropie dřeva

3.3.3.1 Stavba, struktura a složení dřeva

Lignin je po celulóze nejdůležitější a nejzastoupenější polymer dřeva. Jeho ukládání do buněčných stěn anatomických elementů dřeva se označuje jako lignifikace neboli dřevnatění. Ukládání ligninu do buněčných stěn je nerovnoměrné.

Nejvíce ligninu je ve střední lamelle a primární buněčné stěně. Lignin dodává dřevu specifické vlastnosti. Zvyšuje jeho mechanickou pevnost, snižuje propustnost dřeva a má i funkci ochrannou [31].

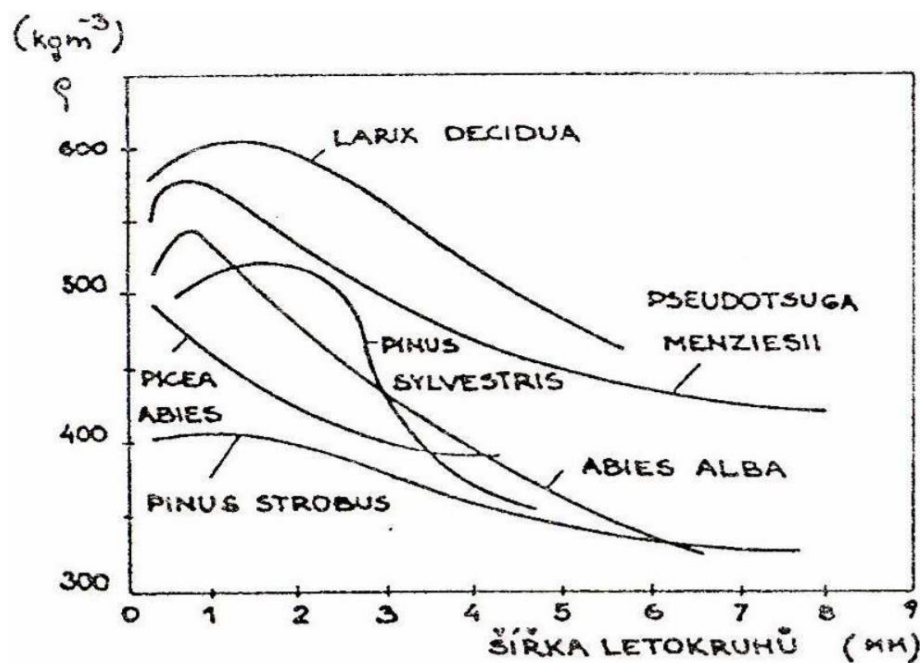
Letokruh – jeho šířka a stavba závisí na věku a druhu dřeviny, na stanovištních podmínkách, umístění stromu v porostu, pěstebních opatřeních a genotypových odlišnostech. Struktura letokruhu je výsledkem komplexu vlivů (teploty, srážek) působících na daném stanovišti. Šířka letokruhů je ovlivněna klimatickými sezónními změnami, s nimiž koreluje periodicita tloušťkového růstu dřeva určité dřeviny. U většiny hospodářsky významných dřevin se šířka letokruhů pohybuje v rozmezí 1–5

mm. V důsledku stárnutí stromu dochází k postupnému snižování šířky letokruhů. Se vzrůstající zeměpisnou šířkou a nadmořskou výškou se průměrná šířka letokruhů snižuje. Široké letokruhy vytvářejí dřeviny s optimálními stanovištními podmínkami. Šířka letokruhů se může měnit po obvodu kmene u excentrických kmenů a vlivem abiotických faktorů (silné větry, sníh, ledovka atd.). Šířka letokruhů je tedy velmi proměnlivá a závislá na komplexu vzájemně působících faktorů. Způsob měření letokruhů (letního dřeva) na zkušebních tělesech uvádí ČSN 49 0102 (1988). U letního dřeva, které je ukazatelem kvality dřeva, se určuje procentický podíl v letokruhu ze vztahu:

$$\% \text{ ldř} = \frac{\text{šldř}}{\text{šl}} \times 100 (\%) \quad (5)$$

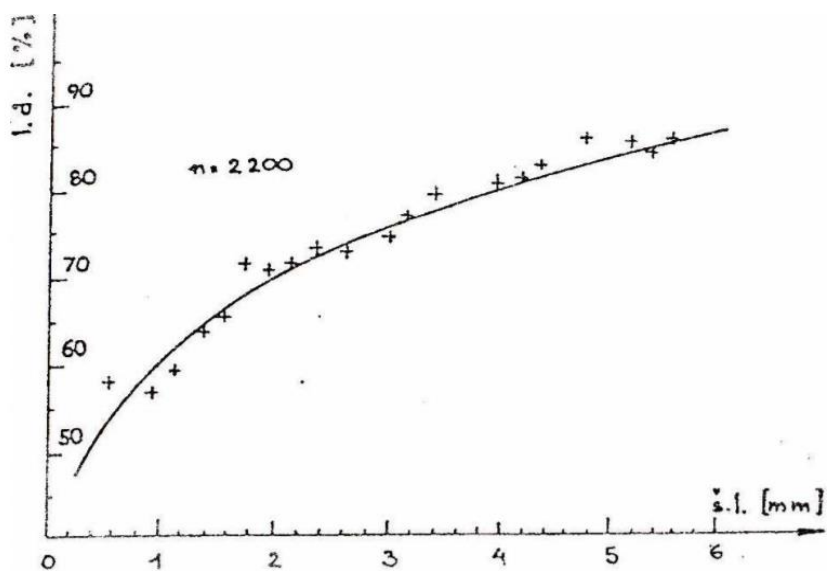
- % ldř – podíl letního dřeva (%)
- šl – šířka letokruhu (mm)
- šldř – šířka letního dřeva (mm) [31] .

Letokruhy nemusí být v celém obvodu kmene stejně široké. K tomu dochází zejména tehdy, je-li dřeň umístěna excentricky. To je důsledek jednostranné zátěže stromu způsobené větrem, sněhem, ledem apod. Excentrická stavba letokruhů se projeví v odlišných fyzikálně mechanických vlastnostech [1].



Obr. č. 6 Závislost hustoty na šířce letokruhů jehličnatého dřeva [31]

Vliv šířky letokruhů na vlastnosti dřeva je zřetelný zejména u jehličnanů a listnáčů s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva, u kterých je zřetelný rozdíl mezi jarním a letním dřevem. Šířka letokruhů a procento zastoupení letního dřeva mohou sloužit jako přibližný ukazatel fyzikálních a mechanických vlastností dřeva.



Obr. č. 7 Závislost mezi šířkou letokruhů a podílem letního dřeva u jasanu [31].

U dřev listnáčů s kruhovitě pórovitou stavbou se s rostoucí šířkou letokruhu naopak hodnoty fyzikálních a mechanických vlastností zvyšují. U různých dřevin jsou letokruhy různě výrazně i strukturně odlišené uspořádáním cév na příčném řezu (to má vliv na tvrdost dřeva), podle čehož můžeme rozlišovat:

- jehličnaté dřevo
- listnaté kruhovitě pórovité dřevo
- listnaté polokruhovitě pórovité dřevo

3.3.3.3 Teplota

Teplota je mírou vnitřní energie materiálu. Při nahřívání tělesa narůstá mechanický pohyb základních částic tělesa, což za určité intenzity může vést k jeho fyzikálním a chemickým změnám. Bodig a Jayne [5] chápou tuto energii jako vibrační a rotační energii jednotlivých atomů a molekul. Jestliže teplota klesá, jednotlivé formy pohybu se postupně zmrazují. Jestliže teplota vzrůstá, energetická hladina atomů a molekul se může zvýšit natolik, že ve vnitřní struktuře molekul dojde k omezeným změnám. V extrémních případech může při vyšších teplotách dojít k hoření, kdy se energie chemických vazeb dřeva zeslabuje a celková struktura dřeva se narušuje, čímž dochází k vytváření jednodušších molekul, hlavně oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a vody [8].

Podle autorů Bodiga a Jayne [5] je potřeba rozlišovat tři základní oblasti působení teploty:

- nízké teploty – pod bodem mrazu
- střední teploty – od bodu mrazu až po teploty, při kterých začíná tepelný rozklad dřeva
- vysoké teploty – od tepelného rozkladu až po teplotu jeho vznícení

Změny teploty ve dřevě vyvolávají objemové změny – teplotní roztažnost. V porovnání s vlhkostní roztažností jsou výrazně nižší a v dřevařské praxi nemají podstatný význam [27].

Lineární rozměry tělesa l_i se mění s teplotou t podle rovnice:

$$l_i = l_{i0} \times (1 + \alpha_i \times t) \quad (6)$$

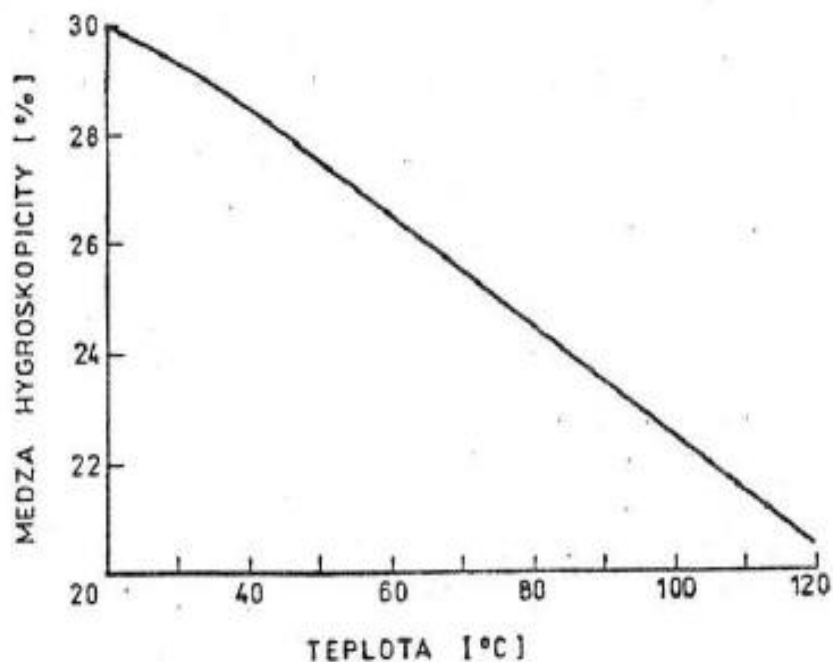
α pro $i = r, t, l$, je koeficient tepelné roztažnosti a dosahuje hodnoty podle anatomických směrů řádově 10^{-5} až 10^{-6} [24].

Střední teploty jsou v rozpětí od 0 °C až po teplotu, kdy začíná tepelný rozklad dřeva, tj. cca 150 °C. Teploty v tomto rozsahu mají velký význam z hlediska praxe v dřevařské výrobě (sušení, paření, lisování, atd.), proto se jim věnuje největší pozornost. Pro praktické použití se předpokládají lineární změny mechanických vlastností [8], [24] [25].

Změna mechanických vlastností je ale mimo teploty také výrazně ovlivňována tím, jakou dobu teploty na dřevo působí. Čím je daná teplota vyšší, a délka působení delší, tím je poté následný pokles mechanických vlastností výraznější [3], [4], [17], [22].

Hodnotit vliv teploty jako individuálně působící fyzikální veličiny na mechanické vlastnosti je celkem složité. Dřevo totiž vždy obsahuje určité procento vody, která má výrazně větší vliv na vlastnosti než teplota. V této souvislosti je nutné zvážit i působení teploty na rovnovážnou vlhkost dřeva [5].

Při zkoumání tohoto problému můžeme vycházet z diagramu rovnovážné vlhkosti ($t - \varphi - w$), při kterém je zohledněna interakce teploty (t), relativní vlhkost vzduchu (φ) a rovnovážná vlhkost (w), a je přístupný v podstatě v každé publikaci učebního textu o fyzikálních vlastnostech dřeva. V mnoha případech je potřeba posoudit změnu MH, která představuje velmi důležitý bod pro fyzikální a mechanické vlastnosti z aspektu teploty [8]. S nárůstem teploty vlhkost na MH klesá, viz obr. č. 8.



Obr. č. 8 Závislost meze hygroskopicity na teplotě [28].

Teplota má klíčovou roli při ovlivnění mechanických vlastností dřeva. Když teplota vzroste na 70 °C, dojde k přechodné změně vnitřních energetických hladin bez porušení vzájemně rovnovážných poloh molekul. Pokud teplota překročí 100 °C, vznikají ve dřevě trvalé změny způsobené porušením rovnovážně kmitajících molekul a degradací lignino-sacharidového komplexu. Také dochází k dehydrataci dřeva. Rozklad dřeva nastává při působení teplot 130–150 °C, intenzivní rozklad s uvolňováním velkého množství plynů pozorujeme při teplotách 180–195 °C. Po překročení 200 °C se dřevo stává křehkým. Začátek exotermického rozkladu nastává při 270–280 °C.

Při tomto procesu se uvolňuje velké množství tepla, které je schopné při zabránění ztrát do okolí vyvolat hoření dřeva bez externího zdroje tepla.

Jednotlivé základní složky dřeva (celulóza, hemicelulóza, lignin) se liší odolností vůči termickému rozkladu. Nejmenší odolnost vůči termickému rozkladu má hemicelulóza, která se rozkládá v teplotním intervalu 170–240 °C. Odolnější než hemicelulóza je celulóza, do teploty 250 °C je její rozklad jen mírný, intenzivní termický rozklad nastává v teplotním intervalu 250–350 °C.

Nejodolnější složkou dřeva je lignin. Aktivní rozklad ligninu probíhá při teplotách 300–400 °C. Při delším časovém působení vysokých teplot dochází k výraznému snížení mechanických vlastností dřeva.

Degradace mechanických vlastností při tepelném ošetření je způsobena snížením hustoty dřeva, ke které dochází v důsledku degradace komponentů dřeva, hlavně pak hemicelulózy, která se uvolňuje jako těkavá látka. Následné vnitřní namáhání ve dřevě se pak rozkládá mezi méně molekul materiálu.

Další změnou u tepelně ošetřených vzorků je ztráta pružnosti a zvýšení křehkosti. Rozsah změn se liší podle druhu dřeviny a teplotního ošetření. U měkkých dřev dochází k většímu snížení pevnosti než u tvrdých [11].

Analýza vlivu vlhkosti a teploty byla až do současnosti zaměřena na individuální vliv teploty a vlhkosti. Z mnoha případů je ale jasné, že jsou tyto parametry přímo nerozdělitelné a je potřebné o nich uvažovat ve vzájemné interakci [9].

Čím více je dřevo tvarovatelnější, tím více se dá využít pro výrobky, které procházejí procesem lisování, ohýbání atd. Tvarovatelnost a plastická deformace se zlepšují díky vyššímu množství vody vázané v buněčné stěně a narůstající teplotě. Vliv teploty je výraznější při vyšší vlhkosti, optima dosahuje okolo bodu nasycení buněčných stěn. Vlivem teploty a vázané vody se zvětšují plastické deformace a celá tuhost lignino-sacharidového systému se snižuje.

Při nulové vlhkosti je vliv teploty zanedbatelný. Se zvyšujícím se obsahem vody v buněčných stěnách se vliv teploty zvětšuje. Interakce vody a tepla se začíná významněji objevovat až při teplotě 60–90 °C. Při technologické úpravě dřeva pomocí tvárnění se snažíme dosáhnout takového stupně plastifikace, aby jednotlivé složky lignino-sacharidové matrice byly co nejméně poškozené a maximálně deformovatelné. Takovýto stav se dá očekávat např. v bukovém dřevě při vlhkosti okolo bodu nasycení vláken při teplotě 90 °C. Za uvedených podmínek by měly amorfní polymery, jako jsou lignin, hemicelulóza a amorfní celulóza, přejít ze sklovitého do viskozopružného stavu [1].

Při analýze struktury buněčné stěny se na suchém bukovém dřevě pozorovalo porušení, které přecházelo přes celou tloušťku buněčné stěny. Při větším obsahu vlhkosti vzniká kromě zmíněného typu porušení i porušení buněčné stěny mezi jednotlivými vrstvami, jakož i ve složené střední lamelle [20]. Uvolnění se pozorovalo i mezi buňkami ve dřeňových paprscích, které se při vyšších vlhkostech ohýbají a nekladou tak velký odpor jako při nízkých teplotách. Zvyšováním teploty a vlhkosti dřeva až po optimální podmínky se místa porušení více posouvají ke střední lamelle, která je nejvíce lignifikována. Vlivem teploty a vlhkosti se lignin stává plastičtějším.

Polymery, ve dřevě především lignin a hemicelulózy, se vlivem teploty dostávají do tří stavů: sklovitého, viskozněpružného a viskozního tečení. Ve dřevě bude se zřetelem na míru plastifikace pravděpodobně důležitý stav přechodu ze sklovitého do viskozno-pružného stavu (teploty sklovitosti). Dokud teplota nepřesáhne bod sklovitosti, polymery jsou tuhé. Dalším zvyšováním teploty se jejich makromolekuly stávají pohyblivější, až dosáhnou teploty, kdy se molekulové vazby trhají a příslušné makromolekuly nabývají schopnost měnit vůči sobě polohu. Za tohoto stavu se mění i mechanické vlastnosti polymerů dřeva, a to ligninu a hemicelulóz. Ve dřevě můžeme tento proces zaznamenat při teplotě nad 100 °C. Při návratu teploty do stavu sklovitosti se i přechodné změny mechanických vlastností dřeva vrátí do původního stavu. Komponenty dřeva, celulóza, lignin a hemicelulóza, se při normální teplotě nacházejí ve sklovitém stavu. Molekuly vody vnikající do buněčných stěn se vážou na OH skupiny, narušují původní vodíkové vazby dřevo-dřevo a mezi molekulami vody a hydroxylovými skupinami chemických složek dřeva se vytvářejí nové vodíkové vazby. Systém lignino-sacharidové matrice ztrácí svoji původní tuhost, snižuje se zejména teplota ligninu a hemicelulóz ve sklovitém stavu. Možno konstatovat, že interakce plastifikátoru vody a tepla je účinnější než samotný vliv vody nebo tepla, což nakonec potvrzují i experimenty [1].

Vliv nízké teploty na dřevo

Při zkoumání vztahu mezi teplotou a mechanickými vlastnostmi dřeva byla většina předchozích studií zaměřená pouze na působení vysokých teplot. Nicméně existuje mnoho příkladů působení nízkých teplot na dřevo, například u dřevostaveb a dřevěných střešních konstrukcí, kde je spolupůsobení tlaku sněhu a nízké teploty, u lodní přepravy zkapalněného zemního plynu, kdy dřevo musí odolávat teplotě $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku od plynu. Dalším příkladem je venkovní uskladnění dřeva v zimních měsících, kdy také dochází k jeho střídavému teplotnímu namáhání [32].

Při teplotách nad $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ je obsah vlhkosti pro mechanickou pevnost dřeva důležitý do meze hygroskopicity. Nad mezí hygroskopicity ovlivňuje vlhkost mechanické vlastnosti dřeva při poklesu teploty pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14].

Teplotám pod bodem mrazu věnoval zvýšenou pozornost například Gerhads [12], který zpracoval několik literárních údajů o působení nízké teploty na modul pružnosti a mez pevnosti, kde byl sledovaný vliv teploty až do $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dále Zhao a kol. [32], kteří testovali modul pružnosti a mez pevnosti při proměnné vlhkosti se snižující se teplotou až do $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tito autoři ve svém výzkumu došli k závěru, že v momentě kdy dojde k zamrznutí veškeré vody volné, stává se molekulární pohyb celulózy obtížným. Což má za následek, že mezi teplotami zmražených vzorků dřeva při $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ nejsou statisticky významné rozdíly při zkoumání jeho mechanických vlastností. Při sledování vlhkosti vzorků autoři zjistili, že statisticky významné rozdíly mezi nízkými teplotami se začaly objevovat až při vlhkosti vzorků, která byla stejná nebo větší než 12 %. Když porovnali vzorky vysušené na 0 % a vzorky plně nasycené vodou, byl rozdíl mezi výslednými testovanými hodnotami mechanických vlastností dvojnásobný. Další pokusy prováděli Hernández a kol. [14], kteří zjišťovali rozdílný vliv nízkých teplot na modul pružnosti a mez pevnosti bělí a jádra.

Pro ukázkou vlivu nízké teploty a vlhkosti na buňku dřeva (dřevo obsahuje mrtvé buňky) lze pro názornost použít příklad ze zmrazování živých organizmů, tzv. mrazové fixace – kryometody. Mrazící metody jsou v současné době na obrovském vzestupu především v biologické elektronové mikroskopii.

Hlavním důvodem je skutečnost, že jsou schopny zafixovat vzorek co nejbližší nativnímu (přírodnímu) stavu bez cizorodých přípravků, a tak se řada přístrojů stala komerčně dostupnými. Tyto přístroje umožňují reprodukovatelně biologické objekty zmrazovat, krájet, sušit apod. Mrazová fixace je stejně jako při použití chemického způsobu přípravy preparátů prvním a velmi důležitým krokem přípravy. Většina živých organismů má v sobě obsaženo víc než 70 % vody, která je nerovnoměrně rozdělena membránami do ohraničených oblastí. Chceme-li tedy dobře zafixovat vzorek pomocí mrazu, musíme vycházet především z vlastností vody, která jej tvoří. Voda má při zmrazování řadu anomálií, které jsou odlišné od ostatních látek, a které celý proces znesnadňují:

- Ve zmrzlém stavu má cca o 9 % větší objem než v kapalném.
- Nejvyšší hustoty dosahuje v kapalném stavu při teplotě 3,95 °C.
- Má abnormálně vysoký bod tání: -0,15 °C, bod varu 98,85 °C a kritickou teplotu 373,85 °C.
- Má vysoké vypařovací teplo a dielektrickou konstantu, která přispívá k její roli jako univerzálního rozpouštěče v biochemických reakcích.
- Je známá řada krystalických forem ledu.

Tyto anomálie jsou ve velké míře způsobeny přítomností intermolekulárních vazeb – vodíkových můstků a van der Waalsových sil, které v praxi znamenají nebezpečí poškození ultrastruktury dřeva v důsledku potrhání buněk zvětšujícím se objemem nebo tvořícími se krystaly [37].

U velmi čisté vody je nepravděpodobné, že zmrzne při -0,15 °C a že ji je možné podchladit bez tvorby ledu podle čistoty a při normálním atmosférickém tlaku až k teplotě -38,15 °C. V této teplotní hladině začínají náhodně vznikat jednotlivé krystaly ledu, které fungují jako krystalizační zárodky. Průvodním jevem při krystalizaci ledu je uvolňující se teplo, které ohřívá celý systém a udržuje jej v oblasti růstu krystalů. Tento proces je označován jako homogenní nukleace. Růst krystalů pokračuje až k dosažení rekrystalizační teploty zhruba při -135,15 °C a pokud teplo uvolňované krystalizací není dostatečně rychle odváděno, jsou vytvářené krystaly

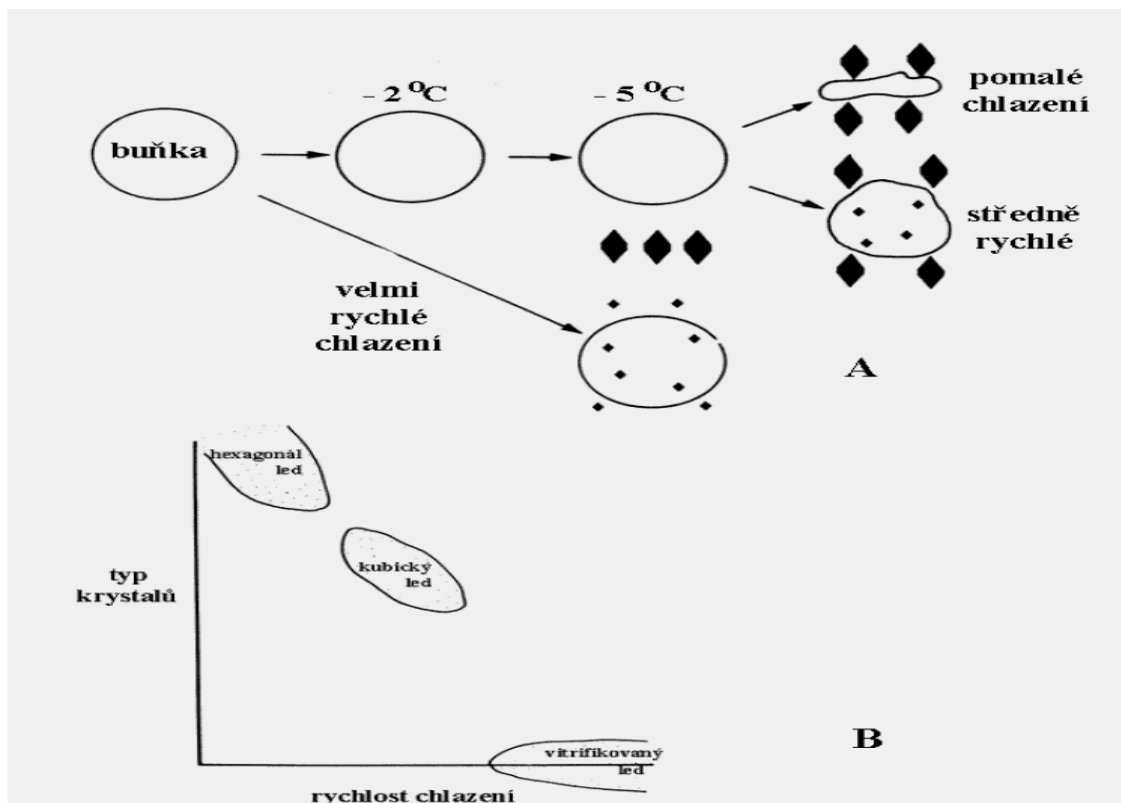
relativně velké. U vody s normálním obsahem nerozpustných látek působí tyto nerozpuštěné částice jako krystalizační zárodky a jedná se v tomto případě o heterogenní nukleaci.

U biologických materiálů ale není situace při zamrznání tak jednoduchá jako v předešlém případě, protože buňky se skládají z komponentů ohraničených membránami, které obsahují směsi organických a anorganických vodných roztoků. Z experimentálních příkladů vyplývá, že u buňky, která obsahuje okolo 80 % vody, dochází k zamrznutí při teplotě $-40,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rekrystalizační teplota je pak cca $-85,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, což znamená, že teplotní interval pro růst krystalů je značně omezen.

Při procesu krystalizace ve vodných roztocích dochází vždy k fázové separaci, kdy narůstající ledové krystaly stahují vodu z nezamrzlých oblastí, díky čemuž dochází ke zvýšení koncentrace zbylých roztoků. Tento proces pokračuje až do momentu, kdy celý systém dosáhne eutektické teploty a ztuhne. Fázová separace přináší během mrazení změnu osmotického gradientu a pH, které vedou k redistribuci intra a extracelulárních roztoků a k destrukci membrán. Možností, jak lze zkrátit teplotní interval, při kterém dochází k růstu krystalů, je ošetřit vzorek před zmrazením kryoprotektanem. To je látka, která snižuje teplotu homogenní nukleace, zvyšuje rekrystalizační teplotu a snižuje množství volné vody v systému [37].

Při teplotě cca $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází ve dřevě k zamrznání vody. Pokud teplota nepřekročí $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, zamrzá pouze voda volná (k částečnému zamrznání vody vázané pak dochází při delším vystavení dřeva teplotě $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zamrzlá voda volná vytváří v lumenech ledové krystaly. Velikost těchto krystalů je ovlivněna rychlostí zamrznání vody. Při pomalém zamrznání ($-1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$) vznikají velké ledové krystaly, které způsobují mikrotrhliny ve dřevě, a tím dochází ke snížení mechanických vlastností dřeva [16].

Z tohoto přehledu vyplývá, že základní podmínkou pro minimalizaci škod při mrazení vzorku je dostatečně velká rychlost odvodu tepla ze vzorku, tzn. dosažení vysoké rychlosti chlazení. V literatuře se uvádí, že pro kvalitní kryofixaci je nutná chladicí rychlost minimálně $-263,15^4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}^{-1}$



Obr. č. 9 Schématické znázornění vlivu rychlosti mrazícího procesu na zachování buněčné ultrastruktury [42]

Zajímavé poznatky uvádějí Čermák, Martinková a Narovec [33] z Ústavu lesnické botaniky, dendrologie a genociobiologie LDF MZU v Brně, kteří se zabývali patologickými účinky mrazu a sněhu na smrčiny.

Přímé poškození rostlinných pletiv mrazem většinou souvisí s vytvářením krystalů ledu v pletivech. Protoplasy s vysokým obsahem vody při podchlazení zamrzají, a krystaly ledu, které se vytvářejí uvnitř buňky, ji mechanicky poškozují kvůli svému zvětšenému objemu. Tento mechanický typ destrukce může postihnout jak jehličí, tak i kmeny, zejména v místech s větším podílem parenchymu, tj. v oblasti širokých lýkodřevních paprsků. Pak dochází k mrazovým trhlinám, které jsou po zhojení patrné jako mrazové kýly.

Častější je ale extracelulární zamrznání vody, kdy se krystaly ledu netvoří v protoplastech, ale v mezibuněčných prostorech nebo mezi buněčnou stěnou

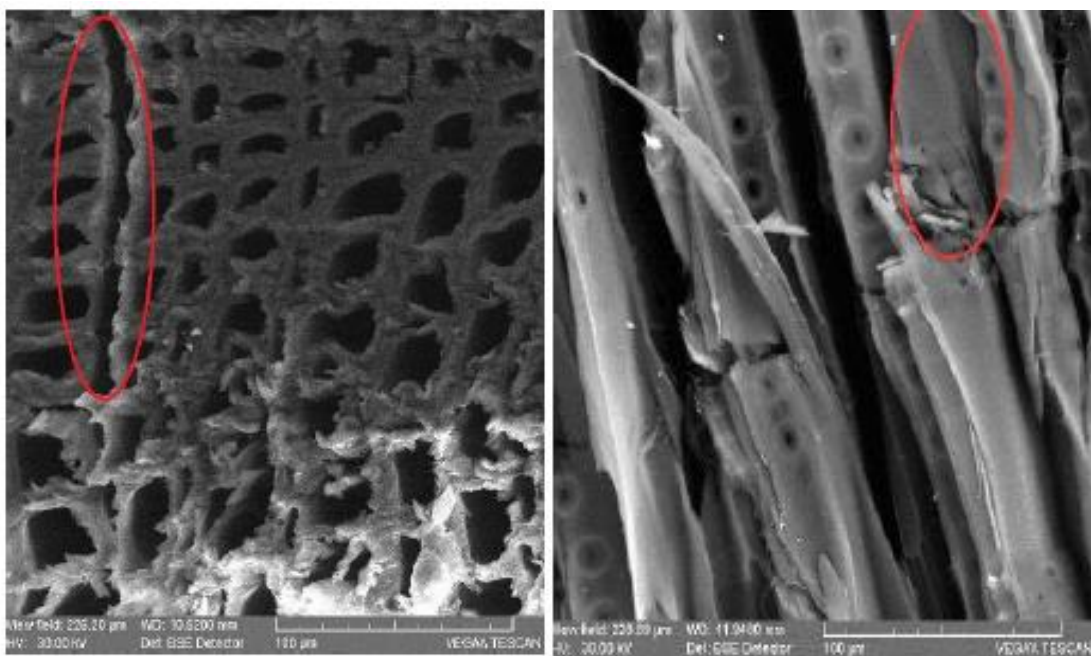
a protoplastem. Led, který se takto v pletivech vytvoří, působí obdobně jako suchý vzduch. Protože je tlak páry nad ledem nižší než tlak páry nad podchlazeným roztokem, odčerpává led vodu z protoplastů a ty se smršťují až na 2/3 svého původního objemu. Redistribuce volné a vázané vody a fáze ledu pokračuje tak dlouho, až v protoplastu nastane mezi ledem a vodou rovnovážný stav vodního potenciálu. Nízké teploty tedy mají v principu při extracelulárním zamrznání stejný účinek jako vysušení a mohou způsobit nekontrolované smrštění buněk. Naopak přežití takových situací napomáhá týmž pletivům překonávat nedostatek vody v letních suchých a horkých dnech.

Testování výsledného rozdílu mechanických vlastností při pomalém a rychlém zamrznání se věnovali Szmotku a kol. [29] a došli k závěru, že vysoká rychlost tuhnutí nemá významný vliv na mechanické vlastnosti dřeva, zatímco pomalé tuhnutí významně redukuje všechny mechanické vlastnosti dřeva a vede k významným pevnostním ztrátám. Autoři výzkumu dále uvádějí, že doba, po kterou je dřevo zmrazeno, není významná, pokud v průběhu nedochází ke změnám teploty, ale při cyklickém střídání teplot dochází ke způsobení většího buněčného poškození. Takovéto poškození může způsobit například střídání denní a noční teploty v zimě [30].

Testování dopadu nízkých teplot na dřevo prováděli výzkumníci Szmotku a kol. [29] na vzorcích smrku (*Picea abies* (L.) H. Karst.). Autoři výzkumu použili vzorky ze 3 stromů, které byly pokáceny ve stejné oblasti, ve stejném období a zvoleny tak, aby měly přibližně tytéž charakteristiky věku a růstu.

Ze stromů vyrobili vzorky, které rozdělili do 3 skupin. První skupinu vzorků zmrazili na teplotu $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ s rychlostí zmrazování $-10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ a drželi je 1 týden ve zmraženém stavu. Druhou skupinu vzorků ošetřili stejným způsobem, ale s rozdílnou rychlostí zamrznání: $-1\text{ }^{\circ}\text{C/h}$. Obě skupiny vzorků byly testovány při 12% vlhkosti. Na 3. skupinu vzorků autoři aplikovali postup, kdy vzorky vystavili na 3 zimní měsíce ven na otevřené prostranství. Během sledovaného období naměřili nejvyšší a nejnižší teplotní interval v rozmezí $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Při porovnání výsledků došli Szmutek a kol. [29] k závěru, že u vzorků, které byly zmrazeny vysokou rychlostí, došlo k mírnému snížení všech mechanických vlastností dřeva, ale žádná z měřených hodnot nebyla výrazně ovlivněna. Na rozdíl od rychlého zmrazení, při pomalém zmrazení došlo k výraznému snížení všech vlastností dřeva, což dokazuje, že pomalá rychlost zmrazování postihuje kompaktnost konstrukcí ze dřeva a vede k významným pevnostním ztrátám.



Obr. č. 10, 11 Trhlina v příčném a tg. řezu u cyklicky teplotně namáhaných vzorků smrku [29].

Největší pokles mechanických vlastností při testování zaznamenali po vystavení desek přírodním klimatickým podmínkám v průběhu tří měsíců [29].

Z uvedených výsledků v tab. č. 4 vyplývá, že vysoká rychlost tuhnutí nemá výrazný vliv na mechanické vlastnosti dřeva, zatímco pomalé tuhnutí je všechny významně redukuje.

Tab. č. 4 Výsledky tvrdosti

Druh zkoušky	Nezmrazené (kontrolní) vzorky	Rychle zmrazené vzorky	Pomalou zmrazené vzorky	Přírodně zmrazené vzorky
Tvrдость podle Janka čelní	25,8	24,4	18,2	20,8
Tvrдость podle Janka tg.	16,1	15,8	13,3	13,3
Tvrдость podle Janka rad.	13,6	13,5	11,1	11,4

Podle podobnosti s potravinářským průmyslem při zmrazování, může být snížení mechanických vlastností dřeva pouze při pomalém zamrazování vysvětleno tvorbou větších ledových krystalů v lumenech. Tyto krystaly jsou pak schopné způsobit škodu ve struktuře buněčné stěny. A ačkoli současný výzkum poskytuje pouze nepřímý důkaz o škodlivosti pomalého zmrazení, rozdíl v rychlostech mrazení zatím tuto teorii podporuje [29].

4. METODIKA PRÁCE

Experimentální měření vzorků se skládalo z těchto kroků:

1. Příprava těles
2. Měření a teplotní úprava
3. Zkoušení
4. Vyhodnocení

4.1 Příprava těles

Vzorky použité v této práci jsou ze dřeva modřínu a buku. Tělesa byla připravena ve fakultní truhlárně, kde byly nařezány vzorky o rozměrech 50 × 50 × 30 mm.

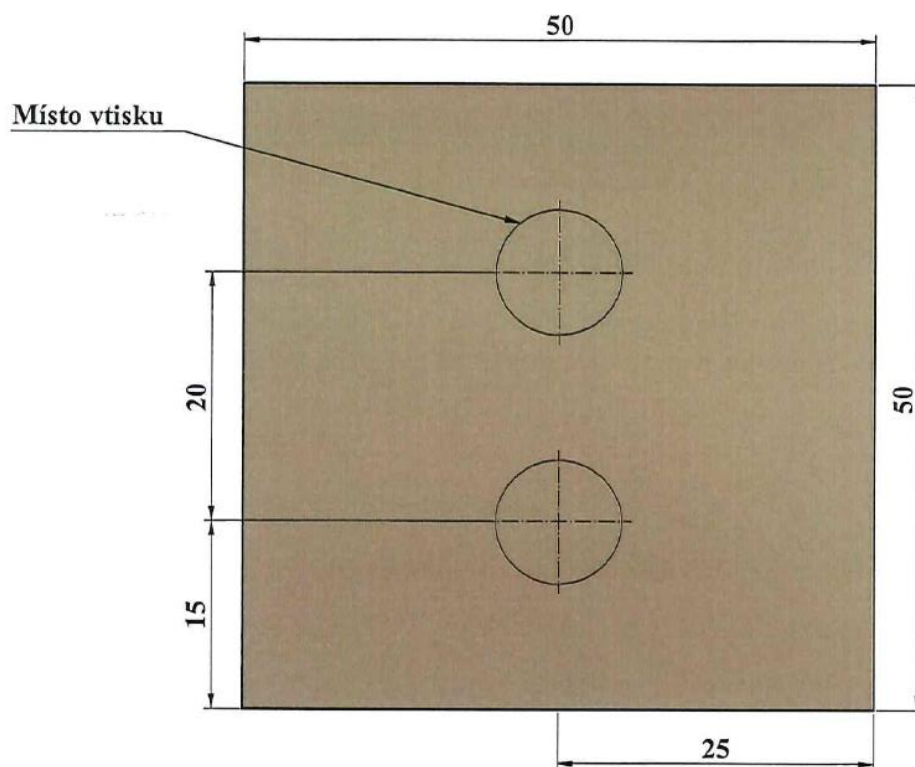
Buk (*Fagus silvatica* L.) – Nemá barevně odlišené jádro, jeho vyztřelé dřevo i běl jsou světle růžové. Dřevo je poměrně tvrdé a těžké, přesto se dobře a čistě obrábí. V nábytkářství se po ohřátí párou využívá jeho dobré ohebnosti. Dále se používá v truhlářství, na výrobu parket, železničních pražců či kuchyňského náčiní. Špatně snáší vlhkost a střídání vlhka se suchem [38].

Modřín (*Larix decidua* (Mill.) Kubát) – Modřínové dřevo je polotvrdé, tvrdší než smrkové nebo borové, pevné a trvanlivé. Bělová vrstva je světle žlutohnědá, jádro okrové až červenohnědé. Na vzduchu a po napuštění tmavne. Texturu (kresba letokruhů) má hustší než smrk a vyniká krásou mnoha drobných, většinou dobře zarostlých součků. Dobře se obrábí, nezalepuje tolik nástroje jako borovice a lépe přijímá lepidla i napouštění. Modřínové dřevo se používá k výrobě šindelů, masivního nábytku, schodů, zábradlí, obložení apod. [39].

Z nařezaných těles jsem vybral vzorky bez: suků, smolníků (u modřínu) a bez viditelného mechanického poškození. Vzorky jsem vybíral náhodně a jejich označení se skládalo z počátečního písmena dřeviny, B pro buk a M pro modřín, a pořadového čísla, naměření a označení místa pro vtisk křížkem.



Obr. č. 12. Označené fotky buku.



Obr. č. 13. Zobrazení míst vtisku do tělesa.

Celkově bylo zkoumáno 6 souborů dřevěných těles – 3 soubory byly vyrobeny z modřínu a 3 z buku. Každý soubor se skládal z třiceti těles a na každém tělese byl proveden dvojitý vtisk pro měření tvrdosti, při rozdílných teplotách každého souboru vzorků. Pro větší přehlednost jsou počet těles a teplota zkoušení uvedeny v tabulce.

Tab. č. 5 Počet ks těles pro zkoušení

	Referenční tělesa	- 15 °C	- 25 °C
BUK LESNÍ	30 ks	30 ks	30 ks
MODŘÍN	30 ks	30 ks	30 ks
Celkem těles	60 ks	60 ks	60 ks

Zkušební tělesa byla po označení umístěna do klimatizační komory, která byla nastavena na hodnoty: teplota vzduchu 20 °C a relativní vlhkost vzduchu 65 %. V klimatizační komoře byly umístěny cca 3 týdny. Po uplynutí této doby byla jejich vlhkost přibližně 12 %.

4.2 Postup měření

Při měření byly sledovány rozhodující faktory, jimiž jsou:

- Druh dřeviny
- Teplotní úprava vzorků

Měření referenčních těles

Referenční tělesa byla postupně vyjmuta z klimatizační komory a po 5 kusech byla transportována do místnosti s tvrdoměrem. Okamžitě po vyjmutí byla referenční tělesa uzavřena do vzduchotěsného sáčku, aby nedošlo k významnější změně vlhkosti. V sáčku byla tělesa umístěna do doby, dokud nebyla po jednom vyjmuta a změřena. Měření probíhalo pomocí posuvného měřítka a digitální váhy, se zápisem výsledků s přesností na dvě desetinná místa. Po naměření byly vzorky upnuty do tvrdoměru a otestovány.

Měření teplotně upravených těles

Vzorky pro tepelnou úpravu byly přenášeny z klimatizační komory po 10 kusech ve vzduchotěsném sáčku. Z něj byly postupně vyjmuty a byly naměřeny jejich rozměry a hmotnost. Po jejich přeměření byly vzorky umístěny do mrazáku, ve kterém již byla dosažena cílová teplota pro testování – tj. $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tělesa byla vkládána do mrazáku po 10 ks v časovém intervalu 20 min a poté byla vystavena působení nízké teploty po dobu 12 hodin.

Po uplynutí 12 hodin byly vzorky postupně po 3 ks přesunuty v přenosném chladicím izolačním boxu do místnosti s tvrdoměrem, kde byly postupně vyndány, znovu zváženy a byly naměřeny jejich rozměry. Po naměření byly vzorky upnuty do tvrdoměru a otestovány.

4.2.1 Metoda měření

Existuje řada metod pro měření tvrdosti dřeva, pro tuto práci byla vybrána metoda zkoušení tvrdosti podle Brinella.

Zkouška tvrdosti podle Brinella je výsledkem práce švédského inženýra Johana Augusta Brinella, kterou zařazujeme mezi statické zkoušky tvrdosti materiálu. Způsob jejího provedení v tomto případě byl metodicky založen na principech normy ČSN EN 1534 (49 2124) (2011) Dřevěné podlahoviny – Stanovení odolnosti proti vtisku – Metoda zkoušení. Princip celé zkoušky je založen na vtlačení zkušebního tělesa (indentoru) kulového tvaru do zkoumaného tělesa a poté se zjišťuje průměr vtisku.

Tvrdost podle Brinella označujeme znakem H_B (Brinell hardness). Jestliže je použita k měření ocelová kulička z kalené oceli, označujeme metodu ve zkratce H_{BS} . Ta je vhodná pro měkkší materiály. Existuje možnost změřit materiály i mnohem tvrdší kuličkou ze slinutých karbidů H_{BW} [40].

Běžně se testování metodou pomocí Brinella používá na materiály měkké a středně tvrdé. Experimentální měření tvrdosti v tomto případě probíhalo na tvrdoměru

DuraVision 30 Struers z Dánska. I přestože jsou podmínky měření podle Brinella stanoveny normou, výsledky mohou být rozdílné, proto je nutné uvádět ke každému zkoušení, za jakých podmínek testování probíhalo.

Při tomto testování byl tvrdoměr nastaven tak, aby zatěžovací síla pro všechny vzorky byla 500 N. Měření probíhalo pomocí kuličky o průměru 5 mm a délka měření jednoho vtisku byla 10 vteřin.

Testování

Přístroj byl nastaven na požadovanou testovací (zatěžovací) hodnotu, tedy 500 N. Kalibrace a vtisk indentoru trvaly přibližně 1 minutu, z toho samotný proces vtisku měřicího tělesa do vzorku trval 10 s. Každé těleso bylo měřeno na dvou místech, aby byla zjištěna variabilita tvrdosti. Po vtisku se muselo těleso uvolnit a posunout o 2 centimetry. Vtisk byl prováděn vždy do tangenciální plochy tělesa. Tvrdoměr je až na manuální připevňování vzorků plně automatický, výsledky tvrdosti materiálu u každého vtisku byly zobrazeny přímo na dotykovém displeji. Naměřená hodnota byla po každém vtisku zapsána do tabulky v MPa.

4.2.2 Tvrdoměr

Statickou tvrdost můžeme měřit pomocí různých druhů tvrdoměrů. V laboratoři v dřevařském pavilonu na fakultě lesnické a dřevařské, kde probíhalo zkoušení těles, je umístěn tvrdoměr DuraVision 30 od firmy Struers z Dánska.

DuraVision je inovativní řada univerzálního tvrdoměru, určená pro měření metodami: Brinell, Vickers, Knoop nebo Rockwell. Pokrývá celý rozsah zátěží běžného měření tvrdosti nejen dřevěných materiálů a je vybaven mimořádně snadným ovládním.

V případě měření tvrdosti v rámci této práce byl použit model DuraVision 30, který je tvořen pevnou testovací hlavou s automatickým vyhodnocením výsledků. Testovací metoda je založena na vlačování ocelové kuličky do testovaného materiálu.

Souhrn technických parametrů tvrdoměru:

- Automatické měření tvrdosti dle metod: Brinell, Rockwell, Vickers a Knoop
- Modernější technologie zatěžování, pro přesné a opakovatelné zatěžování, nastavená zatěžovací síla odpovídá přesné hodnotě.
- Plně automatické testovací cykly a automatické vyhodnocení tvrdosti
- Snadné a flexibilní upínání těles



Obr. č. 14. Tvrdoměr DuraVision

- Testovací zařízení lze nastavit v rozsahu: 250 N, 500 N a 1000 N, volí se podle předpokládané tvrdosti materiálu.
- Ovládání je přes dotykový panel pro snadné a přehledné nastavení všech parametrů (veškeré nastavení je naprogramováno v angličtině).



Obr. č. 15. Měřící hlava tvrdoměru.

4.3 Vyhodnocení

Při zpracování a vyhodnocení výsledků byla použita softwarová technologie:

Microsoft Excel 2014 – program byl v tomto případě použit pro zápis a uspořádání výsledků jednotlivých měření. Tyto výsledky pak byly použity pro vyhodnocení a analýzu v dalším softwaru.

Statistica 13 – pro analýzu naměřených dat byla použita třífaktorová ANOVA (zkratka Analysis of variance = analýza rozptylu) s využitím Fisherova testu a další metoda, tj. Duncanův test. ANOVA je založena na 95% intervalu spolehlivosti, což znamená, že ze 100 % přípouští max. 5% statistickou chybu. 5 % v absolutních hodnotách je 0,05, což je číslo ve vaší tabulce Statistické vyhodnocení tvrdosti uvedené jako hladina významnosti (označení p). Když jsou hodnoty hladiny významnosti v tabulce nižší než 0,05, jsou daná vlastnost nebo faktor statisticky významné a jsou uvedeny červenou barvou, protože statistická chyba je menší, než je přípustná hodnota. Je-li hodnota vyšší než 0,05, není faktor statisticky významný a je uveden černou barvou, protože statistická chyba je vyšší než dovolená hodnota.

5. VÝSLEDKY

V této kapitole jsou zpracovány všechny výsledky měření ve formě přehledných grafů a tabulek, které zobrazují vliv nízké teploty na tvrdost dřeva, jakož i další zkoumané faktory. Výsledky Brinellovy zkoušky byly postupně zapisovány do tabulky v Excelu a následně připraveny ve statistickém softwaru Statistica 13, který na základě třífaktorové analýzy vyhodnotil všechny působící faktory.

Následující tabulka (Tab. č. 7) zobrazuje fyzikální vlastnosti vlhkost a hustotu referenčních a teplotně upravených vzorků.

Největší hodnota hustoty po zmražení je u vzorků buku, které byly zmrazeny na $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato skutečnost poukazuje na to, že ve dřevě došlo k zamrznutí vody vázané, díky čemuž se ve dřevě vytvořila krystalická struktura ledové mřížky vody, která je podobná jako u kovů, a pomohla tak k zvýšení hustoty i tvrdosti. Mírné snížení hustoty po zmražení na nejnižší teplotu ($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$) bylo naměřeno u vzorků modřínu. Odchylení může být dáno například i skrytou vadou dřeva (odklon vláken, suky, trhliny). Dřevo jí mohlo být ovlivněno, už od začátku, nebo vznikla působením nízké teploty.

Obsah vlhkosti po zmražení se zvedl u obou dřevin. K většímu nárustu obsahu vlhkosti po obou teplotních zkouškách došlo u buku, který měl také větší vstupní vlhkost. Zvýšený obsah vlhkosti po teplotní zkoušce je možné vysvětlit zvýšenou hmotností vzorků, která byla způsobena zamrznutím určitého množství vody ve dřevě a vytvořením námrazy na dřevě. Podle vzorce pro výpočet vlhkosti dle ČSN EN 322 (1994) pro zjišťování vlhkosti byla pak jejich vlhkost počítána přes změny hmotnosti, které nastaly při procesu zamrazování.

Tab. č. 7. Vlhkost a hustota bukového a modřínového dřeva

Soubor	Dřevina	Teplota (°C)	Vlhkost		Hustota		Počet těles
			W_p (%)	W_k (%)	ρ_p (kg/m ³)	ρ_k (kg/m ³)	
1	Buk	reference	11,87	-	727,8	-	30
2	Buk	-15	11,94	12,60	737,5	738,8	30
3	Buk	- 25	11,91	13,20	738,3	743,0	30
4	Modřín	reference	11,85	-	644,4	-	30
5	Modřín	-15	11,70	12,06	648,1	649,7	30
6	Modřín	- 25	11,84	12,81	655,3	654,7	30

W_p – počáteční vlhkost těles po klimatizaci na 12%, W_k – konečná vlhkost těles po mražení na danou teplotu ρ_p – počáteční hustota těles po klimatizaci na 12%, ρ_k – konečná hustota těles po mražení na danou teplotu

Další tabulka (Tab. č. 8) zobrazuje významnost měření v souvislosti s naměřenými výsledky. Všechny faktory působící jednotlivě nebo společně v kombinaci jsou statisticky významné na základě 95% intervalu spolehlivosti $p < 0,05$. V tomto případě má tedy druh dřeviny větší významnost než teplota, za které byla dřevina zkoumána. To je dáno především rozdílnou anatomickou a chemickou stavbou dřevin a díky tomu i jejich rozdílnou tvrdostí.

Tab. č. 8. Trojfaktorová analýza rozptylu tvrdosti

Tvrdost H_B					
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupně volnosti	Rozptyl	Fischerův F - Test	Hladina významnosti
Intercept	505673,0	1	505673,0	65292,11	0,00
Dřevina	6913,0	1	6913,0	892,60	0,00
Teplota	3247,5	2	1623,7	209,66	0,00
Dřevina * Teplota	1806,2	2	903,1	116,61	0,00
Chyba	1347,6	174	7,7		

Další statistickou metodou použitou pro vyhodnocení byl Duncanův test pro buk a modřín. Zkoumána byla statistická významnost dvou teplot při porovnání s referenční, jak moc se liší tvrdost. U teploty buku došlo k rovnoměrnému zvýšení tvrdosti o 1,45 MPa mezi jednotlivými teplotami. Proto je při porovnání referenčních vzorků s teplotou mražení $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a porovnání vzorků upravených při $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ stejná hodnota. A největší významný rozdíl je tak u těles nezmražených (referenčních) a těles zmražených na $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, což podporuje teorii o zamrznání vody a tvorbě ledové mřížky.

Tab. č. 9: Duncanův test pro buk.

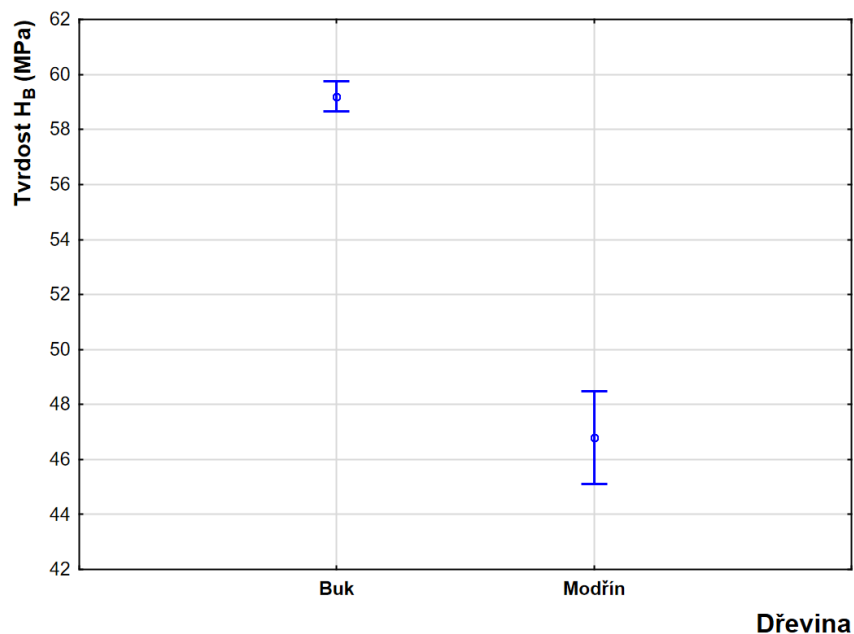
	Teplota	{1} 57,75	{2} 59,20	{3} 60,65
1	reference		0,020568	0,000065
2	mražení $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,020568		0,020568
3	mražení $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,000065	0,020568	

Při porovnání jednotlivých teplot a tvrdostí pomocí Duncanova testu pro vzorky modřínu došlo k významnému zvýšení tvrdosti mezi referenčními vzorky a vzorky vystavenými teplotě $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. To je způsobeno nižší počáteční tvrdostí modřínu, která mohla být zaviněna např. skrytou vnitřní vadou nebo odklonem vláken, případně významně rozdílným podílem jarního a letního dřeva. Zároveň měla tato skupina vzorků nejnižší hustotu. A jako nejvýznamnější je hodnota při porovnání mezi vzorky referenčními a upravenými na $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. K nejméně významnému (nejmenšímu) zvýšení tvrdosti došlo mezi teplotami $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Byla to zřejmě situace, kdy při teplotě $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ došlo k zamrznutí většího množství vody vázané než při $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hodnota významnosti při porovnání mezi $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ je významnější u vzorků modřínu než dubu. To znamená, že u vzorků modřínu došlo k většímu nárůstu tvrdosti mezi těmito dvěma tvrdostmi. A to konkrétně o 1,9 MPa u vzorků modřínu a o 1,5 MPa u vzorků dubu. Tento rozdíl mohl vzniknout díky mrazovým mikrotrhlinám ve dřevě, případně skrytou vadou vzorků.

Tab. č.10: Duncanův test pro modřín.

	Teplota	{1} 36,40	{2} 51,05	{3} 52,97
1	reference		0,000114	0,000053
2	mražení -15°C	0,000114		0,020232
3	mražení -25°C	0,000053	0,020232	

Na grafu č. 1 je zobrazení rozptylu tvrdosti buku a modřínu, kde vzorky buku jsou relativně blízko sebe. To svědčí o přibližně stejných podmínkách vnitřní struktury dřeva a absence vad. Tvrdost buku se ve směru kolmo na vlákna pohybuje v rozmezí 58–60 MPa. Podle dostupné literatury je tvrdost buku uváděna od 40 do 80 MPa. Tvrdost modřínu se pak pohybuje v rozmezí 44–49 MPa. Důvodem většího rozptylu modřínu je větší rozdíl mezi referenčními vzorky a vzorky po teplotní úpravě. Tvrdost modřínu se podle dostupné literatury udává v rozmezí 35–50 MPa.

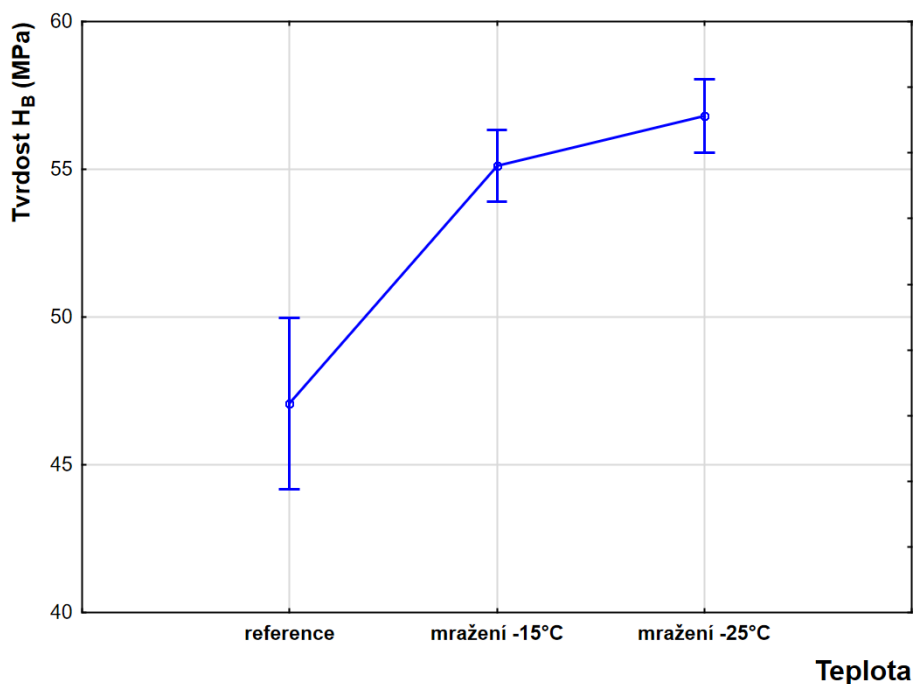


Obr. č. 16. Závislost Brinellovy tvrdosti na druhu dřeviny.

Jak velkou mají významnost sledované faktory při působení na statickou tvrdost, ukazují následující grafy. Výstupem měření je závislost teplotní úpravy a druhu dřeviny na tvrdost dřeva.

Závislost tvrdosti s měnící se teplotou je zobrazena na grafu č. 2. Z grafu je zřejmé, že hodnoty tvrdosti jsou významně ovlivněny teplotou zamražení a tato skutečnost platí pro obě dřeviny. Při zmražení na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ došlo k významnému zvýšení tvrdosti dřeva v důsledku zamrznutí vody ve dřevě a tvorby ledové mřížky. Při teplotě zmražení mezi $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ již nedošlo k většímu skokovému nárůstu tvrdosti, protože množství zamrzající vody již nebylo o tolik větší než při $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. A zároveň mohlo dojít ke vzniku mrazových mikrotrhlin, které dřevo poškodily a došlo tak ke snížení jeho tvrdosti.

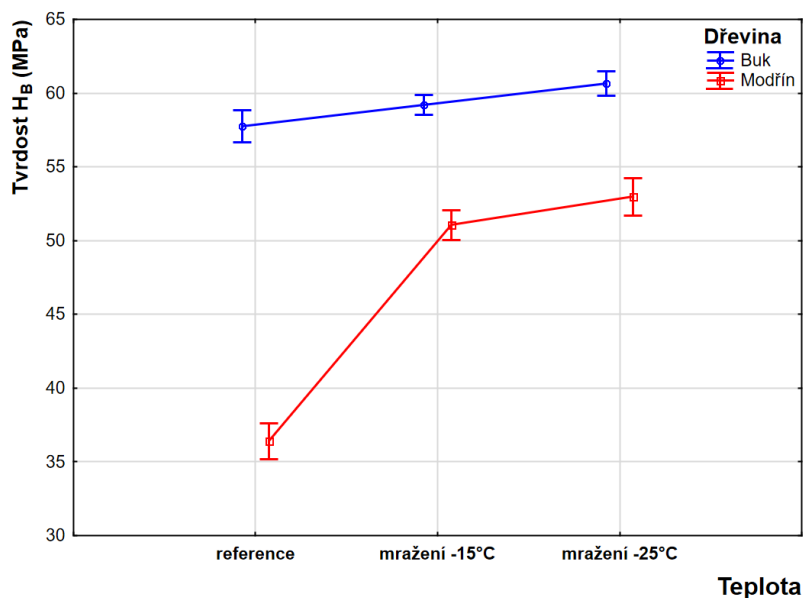
Pokud zanalyzujeme každou dřevinu zvlášť, jsou jejich hodnoty více proměnlivé. Průběh závislosti na teplotě a jednotlivé dřevině je zobrazen v grafu č. 3.



Obr. č. 17 Závislost Brinellovy tvrdosti na teplotě.

V tomto grafu je vidět, že došlo u obou vzorků k významnému zvýšení jejich tvrdosti při přechodu z hodnoty referenční na hodnotu $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. U buku bylo toto zvýšení z 57,8 MPa na 59,2 MPa. To naznačuje, že dřevo bylo bez vnitřních vad a odklonu vláken. Při snížení zkoušecí teploty na $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ u vzorků buku, došlo ke zvýšení tvrdosti z 59,2 MPa na 60,7 MPa, tedy o 1,5 MPa. To je o 0,4 MPa méně než u vzorků modřínu, což mohlo být způsobeno vznikem mrazových trhlin a následně byla nepatrně snížena tvrdost.

U vzorků modřínu došlo k velkému skoku mezi vzorky referenčními a vzorky zmraženými na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. U referenčních vzorků je jejich hodnota na spodní hranici hodnoty (35–50 MPa) udávané literaturou pro rozmezí modřínu; vzhledem k variabilitě dřeva je možné, že jsou vzorky ovlivněny skrytou vnitřní vadou, případně odklonem vláken. Při $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ je tvrdost vzorků již na hodnotě 51,1 MPa. Tedy na větší hodnotě, než kolik udává literatura pro modřín. Lze tedy bezpečně předpokládat, že došlo k zamrznutí určitého množství vody vázané ve dřevě a díky tomu společně s tvorbou ledové mřížky došlo ke zvýšení tvrdosti dřeva. Po přechodu na $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ pak došlo k podobnému zvýšení jako u vzorků buku. A tyto hodnoty jsou srovnatelné.



Obr. č. 18 Závislost Brinellovi tvrdosti na teplotě a druhu dřeviny.

Číselné zobrazení hodnot pro porovnání zobrazuje tabulka č. 11, ve které jsou přehledně zaznamenány jednotlivé výsledky měření, od referenčních vzorků až po teplotu $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, standardní chyba, směrodatná odchylka a minimální a maximální hodnota pro vzorky buku a modřínu.

Tab. č. 11. Průměrné hodnoty Brinellovy tvrdosti pro buk a modřín.

Soubor	Dřevina	Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	Brinellova tvrdost Hb					Počet těles
			průměr (MPa)	Směrodatná odchylka	Standardní chyba - SE	- min. (MPa)	+ max. (MPa)	
1	Buk	referen	57,8	2,90	0,53	56,7	58,8	30
2	Buk	-15	59,2	1,84	0,34	58,5	59,9	30
3	Buk	- 25	60,7	2,27	0,42	59,8	61,5	30
4	Modřín	referen	36,4	3,23	0,59	35,2	37,6	30
5	Modřín	-15	51,1	2,73	0,50	50,0	52,1	30
6	Modřín	- 25	53,0	3,41	0,62	51,7	54,2	30

Největší tvrdost buku byla při teplotní zkoušce pro $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to 61,5 MPa. Nejvyšší teplota modřínu byla také při teplotní zkoušce $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, a to 54,2 MPa.

Tvrdost dřeva patří k mechanickým vlastnostem, kterým v literatuře není věnována tak velká pozornost. A podobný výzkum se stejnými dřevinami a nízkými teplotami k porovnání se mi nepovedlo dohledat.

6. ZÁVĚR

Úkolem mé diplomové práce bylo zjistit, jaký je vliv nízkých teplot a dalších sledovaných faktorů (druh dřeviny, rozměry, vlhkost, hustota) na statickou tvrdost dřeva, testovanou metodou podle Brinella. Provedenými měřeními a analýzou byly zjištěny tyto informace.

Zkoušením bylo zjištěno, že tvrdost buku je vyšší než tvrdost modřínového dřeva. Druh dřeviny, která byla testována, má větší význam než teplota, při které probíhalo testování. Tvrdost pak stoupala s klesající teplotou zamrzání. U buku šlo o téměř stejný nárůst při obou teplotách. U modřínu pak došlo k velkému nárůstu mezi referenčními hodnotami a teplotou při $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přechod mezi teplotou $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ už byl pozvolnější, ale stále šlo o větší nárůst než u buku. Celkově po zmrazení u dřevin došlo k nárůstu hustoty a hmotnosti.

Z experimentu vyplývá, že teplota má velký význam na statickou tvrdost dřeva, především pak v kombinaci s druhem dřeviny, a to takovým způsobem, že se snižující se teplotou se tvrdost zvyšuje. Tato skutečnost platí pro obě zkoumané dřeviny, ale větší změna nastala v případě modřínu, který zastupoval měkké dřeviny.

Výše uvedené výsledky mají význam u dřevěných materiálů, kde je kladen velký důraz na tvrdost materiálu, především u konstrukcí podlah a nášlapných prvků na schodištích (stupnice, mezipodesta), které jsou umístěny venku, kde teplota může klesat pod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a dochází k velkému mechanickému zatížení a opotřebení materiálu.

7. SEZNAM LITERATURY:

- [1] BABIAK, M., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., POŽGAJ, A., 1997. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Príroda Bratislava, 488. ISBN 80-07-00960-4
- [2] BALABAN, K.:1955 *Nauka o dřevě*. 1. vyd. Praha: Státní zemědělské nakladatelství. Lesnická knihovna (Státní zemědělské nakladatelství).
- [3] BARISKA, M., 1983 a. *Zur dynamischen Torsionselastizitat von Holz*. Teil 1: Untersuchungen im Temperatur-bereich von 23 bis 350 °C. Holz als Roh -u. Werkstoff
- [4] BARISKA, M., 1983 b. *Zur dynamischen Torsionselastizitat von Holz*. Teil 2: Temperaturbelastung von Holz. Holz als Roh -u. Werkstoff
- [5] BODIG, J., JAYNE, B.A., 1982. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. VNR New York – Cincinnati – Toronto – London – Melbourne
- [6] DESCH, H. E., DINWOODIE, J. M. 1996. *Timber: structure, properties, conversion, and use*. 7th ed. New York: Food Products Press, ISBN 15-602-2861-X.
- [7] DRASTÍK, F., BARTÁK, J., BEDNÁŘ, B., FURBACHER, I., HERMAN, A., JÍLEK, L., LABÍKOVÁ, R., MACHEK, V., NEUSTUPA J., NOŽIČKA, J., PILOUS, V., ŘEZNÍČEK, J., RUSÍN, K., ŘEZNÍČKOVÁ, J., STEJSKAL, V., SUCHÁNEK, R., TREJTNAR J., MÁDL, J., 2009. *Strojnická příručka: vývoj, výpočty, konstrukce, technologie, výroba*. Praha: Dashöfer. ISBN 80-862-2965-3.
- [8] DUBOVSKÝ, J., ČUNDERLÍK, I., 1989 *Náuka o dreve*. Návodý na cvičenia pre prvni ročník ERDP. VŠLD Zvolen
- [9] DUBOVSKÝ, J., 1993. *Ohybové charakteristiky a kvalita dreva*. Vedecké a pedagogické aktuality. TU Zvolen

- [10] GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., 2002. *Nauka o dřevě*. 2. nezm. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7157-577-1.
- [11] GANDELOVÁ, L., HORÁČEK, P., ŠLEZINGEROVÁ, J., 2009. *Nauka o dřevě*. Vyd. 3., nezměn. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita. ISBN 978-80-7375-312-2.
- [12] GERHARDS, C. C., 1982. *Effect of Moisture Content and Temperature on the Mechanical Properties of Wood*. An Analysis of Immediate effect. Wood and Fibre.
- [13] HOADLEY, R. B., c1990. *Identifying wood: accurate results with simple tools*. Newtown, CT: Taunton Press. ISBN 09-423-9104-7.
- [14] HERNANDEZ, R. E. PASSARINI, L. KOUBAA, A. *Effects of temperature and moisture content on selected wood mechanical properties involved in the chipping proces*. Wood Science and Technology 2014, vol. 48 no. 6, s.1281, ISSN 0043-7719
- [15] HORÁČEK, P., 1998. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. 2.*, přeprac. vyd. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, ISBN 80-715-7347-7.
- [16] ISPAS, M., CAMPEAN, M., 2014 *EXPERIMENTAL RESEARCH ON SAWING FROZEN WOOD*, Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II, vol. 7. no.1, s.51, ISSN 2065-2135
- [17] KNUDSON, R.M., SCHNIEWIND. A.P., 1975. *Performance of structural wood members exposed to fire*. For. Prod. J., 25,2,
- [18] LYSÝ, F. JÍRŮ, P. *Nauka o dřevě*. 1954. 1. Vyd. Státní nakladatelství technické literatury 737 s.

- [19] KOLLMANN, F., CÔTÉ A., 1968. Principles of Wood Science and Technology. I. Solid Wood, 1. vyd Springer – Verlag Berlin – Heidelberg – New York
- [20] KÚDELA, J., 1990. Vliv vlhkosti a teploty na mechanické vlastnosti bukového dřeva. [Kandidátská dizertační práca] VŠLD Zvolen, Drevárska fakulta
- [21] MATOVIČ, A. 1993. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva*: Určeno pro posl. les. fak. obor dřevař a les. Brno: Vysoká škola zemědělská. ISBN 80-715-7086-9.
- [22] MILLETT, M. A., GERHARDS, C. C., 1972. *Accelerated aging: residual weight and flexural properties of wood heated in air at 115 °C 175 °C* Wood Science, 4.
- [23] NEURBERGER, P. ADAMOVSÝ, D. ADAMOVSÝ, R. 2007. *Termomechanika* 1. vyd. Česká zemědělská univerzita v Praze. 250 s. ISBN 978-80-213-1634-8
- [24] PERELYGIN, L.M., 1965. *Náuka o dreve*. 2. vyd. SVTL Bratislava
- [25] POŽGAJ, A. CHOVANEC, D. KURJATKO, S. BABIAK, M. 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava: Príroda, ISBN 80-07-00600-1.
- [26] PTÁČEK, L. 2003. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, ISBN 80-720-4283-1.
- [27] REGINÁČ, L. 1990, *Náuka o dreve*. V. vyd. Drevárska fakulta, VŠLD Zvolen.
- [28] SIAU, J.F., 1993. Application of a thermodynamic model to experiments on nonisothermal diffusion of moisture in wood. Avramidis, S. Wood Sci. Technol. 27: 131. ISSN: 1432-5225
- [29] SZMUTKU, M.B., CAMPEAN, M., POROJAN, M., 2013. *Strength reduction of spruce wood through slow freezing*. European Journal of Wood and Wood Products. vol. 71, no. 2, s. 205, ISSN 0018-3768.

- [30] SZMUTKU, M.B., CAMPEAN, SANDU, A. V., 2011. *Microstructure modifications induced in spruce wood by freezing*. Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II. vol. 7, no. 1, s. 51, ISSN 2065-2135
- [31] ŠLEZINGEROVÁ, J., GANDELOVÁ, L., 2002. *Stavba dřeva*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, ISBN 80-715-7636-0.
- [32] ZHAO, L., JIANG, J., LU, J., ZHAN. T., 2015. Flexural property of wood in low temperature environment. 2015. *Cold Regions Science and Technology*. vol. 116, no. 8, s. 65. ISSN 1945-8398.

ONLINE ZDROJE

- [33] ČERMÁK, M. MARTINCOVÁ, M. NÁROVEC, V. Patologický účinek mrazu a sněhu na smrčiny, Kapitola – *Poškození pletiv marazem* [online]. [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: <http://lesprace.silvarium.cz/content/view/242/8/>
- [34] DŘEVO: Víš, že dřevo je. *VZDĚLÁVACÍ PORTÁL* [online]. [cit. 2018-7-9]. Dostupné z: <http://drevostavebniportal-popularizace.msdk.cz/zajimavosti-ze-sveta-dreva/drevo/>
- [35] Tvrdost dřeva. [online]. [cit. 2018-10-10]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/tvrdost.htm>
- [36] Fyzikální a mechanické vlastnosti: *e-learning* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <http://www.ldf.mendelu.cz/29855-studijni-materialy>
- [37] NEBŠÁROVÁ, J., 2001. Příprava preparátu pro TEM fyzikálními metodami, Kapitola 5.1- Kryometody, Elektronová mikroskopie pro biologie [online] – [cit. 2019-1-5] Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/5.1.html> "
- [38] Typy dřevin aneb rozeznáte buk od dubu? [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: <http://www.ketyban.cz/typy-drevin-aneb-rozeznate-buk-od-dubu/>

- [39] Modřín. [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z:
<https://lesycr.cz/drevo/charakteristika-dreva-jednotlivych-drevin/modrin/>
- [40] Tvrdost dřeva, přehled, 2016 [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z:
<https://www.optimtop.cz/tvrdost-dreva-prehled/>
- [41] Nábytkářský informační systém, Makroskopická stavba dřeva [online]. [cit. 2019-04-3]. Dostupné z: <http://www.n-i-s.cz/cz/makroskopicka-stavba-dreva/page/318/>
- [42] Microscopic Techniques in Biotechnology, HOPPERT, M. [online]. [cit. 2019-04-13]. Dostupné z:
https://books.google.co.uk/books?id=1CQ3ZoRIBJgC&dq=robards+a+sleyter+1985+Microscopic+Techniques+in+Biotechnology&hl=cs&source=gbs_navlinks_s

TECHNICKÉ NORMY

- [43] ČSN EN 1534 (49 2124): *Dřevěné podlahoviny – Stanovení odolnosti proti vtisku – Metoda zkoušení*, 2011
- [44] ČSN 49 0136 (490136): *Drevo. Metóda zisťovania tvrdosti podľa Janky*, 1984
- [45] ČSN 49 0102 (490102): *Skúšky vlastností rasteného dreva. Metóda zisťovania priemernej šírky letokruhov a priemerného podielu letného dreva*, 1988
- [46] ČSN EN 322 (490143) *Dosky z dreva. Zisťovanie vlhkosti* 1994.