

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra základního zpracování dřeva



Dopad nízkých teplot na mechanické vlastnosti dřeva

Bakalářská práce

Autor: Vojtěch Vebr

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

2017

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Vojtěch Vebr

Dřevařství

Název práce

Dopad nízkých teplot na mechanické vlastnosti dřeva

Název anglicky

Influence of low temperatures on mechanical properties of wood

Cíle práce

Hlavním cílem práce je analýza vlivu nízkých teplot na dřevo a následná změna jeho jednotlivých mechanických vlastností.

Metodika

1. Teoretická analýza mechanických vlastností dřeva vystaveného vlivu nízkých teplot. Možnosti ochrany dřeva před působením nízkých teplot ve vztahu k jeho mechanickým vlastnostem a účelu použití.

Doporučený rozsah práce

40-50 stran textu

Klíčová slova

nízké teploty, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti, dřevo

Doporučené zdroje informací

- HORÁČEK, P. Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I., Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1998, 126 s.
- KAFKA, E., COUFAL, R., DRAHOŠ, V. ČERMÁK, J. Dřevářská Příručka, I. část. Praha: SNTL, 1989, 483 s.
- KOLLMANN, F. F. P., COTE, W. A. Jr. Principles of Wood Science and Technology: I. Solid Wood. Springer Science & Business Media, 2012, 592 s. ISBN: 978-3-64287-928-9
- Odborné články k dané problematice.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. Štruktúra a vlastnosti dreva. 2. vydání, Bratislava: Príroda a. s., 1997, 485 s. ISBN: 80-07-00960-4
- ROWELL, R. M. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites. 2. vydání, CRC Press, 2012, 703 s. ISBN: 978-1-43985-380-1
- SMITH, I., LANDIS, E., GONG, M. Fracture and Fatigue in Wood. John Wiley & Sons Ltd., 2003, 234 s. ISBN: 978-0-471-48708-1
-

Předběžný termín obhajoby

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Elektronicky schváleno dne 26. 4. 2016

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 17. 04. 2017

Prohlašuji, že jsem bakalářskou na téma Dopad nízkých teplot na mechanické vlastnosti dřeva vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

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

Podpis autora

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD., za jeho cenné rady, připomínky a vstřícné jednání. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za finanční a psychickou podporu.

Abstrakt

Práce je zaměřená na zjištění vlivu nízkých teplot na mechanické vlastnosti dřeva. Jejím cílem je analyzovat vliv nízké teploty a dalších faktorů na mechanické vlastnosti dřeva. K tomuto účelu jsou v práci použity zdroje na dané téma z odborné literatury. Podle literárních zdrojů je zřejmé, že rychlost zamrzání, obsah vlhkosti a další faktory mají významný vliv na mez pevnosti, modul pružnosti, tvrdost a pevnost. Zkoumání vlivu nízkých teplot je potřebné z hlediska použití dřeva v exteriéru, kde dochází ke změnám jeho mechanických vlastností, například u krovů, teras, mostů nebo nosných sloupů.

Klíčová slova

nízké teploty, mechanické vlastnosti, fyzikální vlastnosti, dřevo

Abstract

The thesis attempts to determine the influence of low temperatures on mechanical properties of wood. The aim of the thesis is to analyse the impact of low temperature and other factors on the mechanical properties of wood. In order to carry out this analysis, sources from academic literature addressing this topic were used. The literary sources clearly show that the freezing rate, moisture content and other factors have a significant impact on the ultimate strength, elastic modulus, hardness and strength. It is necessary to examine the effect of low temperatures when the wood is used outdoors where its mechanical properties change – such as in roof trusses, terraces, bridges or supporting pillars.

Key words

low temperatures, mechanical properties, physical properties, wood

Obsah

1. Úvod	11
2. Struktura a složení dřeva	12
2.1 Anatomická stavba jehličnanů	12
2.2 Anatomická stavba dřeva listnáčů.....	15
3. Vlastnosti dřeva.....	18
3.1 Fyzikální vlastnosti dřeva	18
3.1.1 Vlhkost	18
3.1.2 Hustota.....	20
3.1.3 Teplota.....	21
3.2 Mechanické vlastnosti dřeva	23
3.2.1 Tah.....	25
3.2.2 Tlak.....	30
3.2.2 Smyk.....	33
3.2.4 Ohyb	34
3.2.5 Tvrdost dřeva.....	35
3.2.6 Houževnatost dřeva	37
4. Dopad nízkých teplot	38
4.1 Fyzikální vlastnosti	39
4.1.1 Teplota.....	39
4.1.2 Buněčná struktura	39
4.2 Mechanické vlastnosti	41
4.2.1 Modul pružnosti a mez pevnosti.....	41
4.2.2 Modul pružnosti a mez pevnosti běle a jádra	44
4.2.3 Vliv cyklického zmrazování a rozmrazování na modul pružnosti	48
4.2.4 Vliv nízkých teplot na pevnost, tvrdost a modul pružnosti	49

5. Závěr	53
Použitá literatura:	54

Seznam obrázků

Obrázek 1 Anatomická stavba jehličnatého dřeva (Požgaj et al. 1993)

Obrázek 2 Anatomická stavba listnatého dřeva (Požgaj et al. 1993)

Obrázek 3 Procentuální snížení vlastností listnatého dřeva při vystavení vysoké teplotní zátěži po různou dobu (Budakçı a Korkut. 2009)

Obrázek 4 Pracovní diagram (Frischherz a Skop, 1993)

Obrázek 5 Trhlina v příčném řezu u cyklicky teplotně namáhaných vzorků (Szmotku et al. 2011)

Obrázek 6 Trhlina v tg. řezu u cyklicky teplotně namáhaných vzorků (Szmotku et al. 2011)

Obrázek 7 Rostoucí modul pružnosti dřeva v ohybu se snižující se teplotou (Zhao et al. 2015)

Obrázek 8 Rostoucí mez pevnosti dřeva v ohybu se snižující se teplotou (Zhao et al. 2015)

Obrázek 9 Zamrzlá voda ve dřevě s vlhkostí 136 % (Zhao et al. 2015)

Obrázek 10 Zvyšující se modul pružnosti v ohybu se snižující se teplotou u vzorků běle a jádra ze smrku a jedle (Hernández et al. 2014)

Obrázek 11 Zvyšující se modul pružnosti v ohybu se snižující se teplotou u vzorků běle a jádra ze smrku a jedle (Hernández et al. 2014)

Obrázek 12 Změna venkovní teploty v sledovaném období (Szmotku et al. 2013)

Seznam tabulek

Tabulka 1 Zastoupení jednotlivých prvků buněk v jehličnatém dřevě (Gandelová et al. 2009)

Tabulka 2 Přehled dřevních buněk listnáčů (Gandelová et al. 2009)

Tabulka 3 Pevnost dřeva v tahu napříč vláken (Ugolev 1986)

Tabulka 4 Moduly pružnosti a smykové moduly vybraných dřevin v hlavních směrech pružné symetrie ($w = 11\text{--}12\%$) (Ugolev 1986)

Tabulka 5 Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken (Ugolev 1975)

Tabulka 6 Hodnoty statické tvrdosti vybraných druhů dřev (Matovič 1993)

Tabulka 7 Nejvyšší dosažené hodnoty při teplotě -196 °C (Zhao et al. 2015)

Tabulka 8 Specifikace kulatin pro výrobu vzorků (Hernández et al. 2014)

Tabulka 9 Rychlost zmrazování vzorků (Hernández et al. 2014)

Tabulka 10 Změna při jednotlivých teplotách (Hernández et al. 2014)

Tabulka 11 Změna při jednotlivých teplotách (Hernández et al. 2014)

Tabulka 12 Vliv teplotního ošetření na modul pružnosti (Zhao et al. 2015)

Tabulka 13 Kmeny použité pro výrobu vzorků (Szmotku et al. 2013)

Tabulka 14 Změna hodnot mechanických vlastností (Szmotku et al. 2013)

1. Úvod

Dřevo je materiál, který člověk využívá již od pravěku, a to na zbraně, nástroje, primitivní obydlí a jako palivo. Postupem času se člověk naučil rozeznávat jednotlivé vlastnosti dřeva a vhodnost jeho použití k daným účelům.

V současnosti je dřevo využíváno v mnoha různých oborech, například nábytkářství, dřevostavbě, výrobě konstrukčních desek, výrobě hraček, obalových materiálech, dřevěných konstrukcí, výrobě hudebních nástrojů atd. V každém z těchto oborů (a mnoha dalších) nalézá dřevo své uplatnění díky široké škále zajímavých vlastností, jakými jsou schopnost odolávat chemikáliím, dobrá tepelná a elektrická izolace, lehká opracovatelnost, pevnost a pružnost, ekologičnost, výborné zvukové vlastnosti a vysoká estetičnost.

Dřevo má však i své nedostatky, jimiž jsou anizotropie, hygroskopicitá, lehká zápalnosť, neschopnosť odolat některým biotickým a abiotickým vlivům a 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, jednou z dalších možností ochrany dřeva je i úprava pomocí vysokých teplot. Takto upravené dřevo (tzv. Thermowood) má oproti neupravenému dřevu rozdílné mechanické i fyzikální vlastnosti. Jedná se především o rozměrovou stálost, snížení přijímání vlhkosti, vysokou životnost bez nutnosti povrchové úpravy.

Práce je zaměřená na dopad nízkých teplot na mechanické vlastnosti dřeva a možnosti ochrany dřeva před jejich působením. Tomuto tématu zatím nebyl v odborné literatuře věnován dostatečný prostor a neproběhlo tolik výzkumů, jako v případě vlivu vyšších teplot na vlastnosti dřeva.

2. Struktura a složení dřeva

Dřeviny jsou mnohobuněčné rostliny. Buňky, jimiž jsou tvořeny, se vzájemně liší stářím, tvarem, umístěním a fyziologickou funkcí. Tloušťkový přírůst dřeva ve vegetačním období zabezpečuje kambium.

Celulóza Vytváří kostru zdřevnatělých buněčných stěn dřeva. Ve dřevě jí je přibližně 35–56 %, vyšší zastoupení je u jehličnanů. Celulóza způsobuje anizotropní chování dřeva. Podíl krystalické a amorfni části celulózy ovlivňuje i bobtnání a sesychání dřeva, protože voda vnikající do buněčných stěn se adsorbuje především na volné OH skupiny amorfni celulózy. Celulóza je v běžných anorganických a organických rozpouštědlech nerozpustná. Lze jí rozpouštět v silných anorganických kyselinách (sírová, fosforečná). Celulóza se využívá hlavně na výrobu buničiny, z níž je vyráběn papír, kartony, lepenky.

Hemicelulóza Chemicky je méně stálá než celulóza. Dřevo jí obsahuje asi 15–35 %, vyšší zastoupení je ve dřevě listnáčů než jehličnanů. Hemicelulózy ovlivňují chemické a fyzikální vlastnosti dřeva. Projevuje se to hlavně při technologických operacích: sušení, vaření, paření, lisování dřeva. Při výrobě buničiny slouží jako přírodní adhezivum.

Lignin Množství ligninu ve dřevě kolísá od 15 do 35 %, větší zastoupení je ve dřevě jehličnanů než listnáčů. Jeho obsah kolísá i v různých částech stromu, větší zastoupení je v kůře než ve dřevě. Dodává dřevu pevnost. Je chemicky méně stálý než celulóza. Lignin je látka amorfni, hydrofobni, termoplastická a má velkou absorpci světla. Proces, kdy se lignin ukládá do stěn rostlinných buněk, se nazývá lignifikace (dřevnatění). Při výrobě buničiny lze získat jako odpad technický lignin, z něhož se získává například fenol (Gandelová et al. 2009).

2.1 Anatomická stavba jehličnanů

Jehličnaté dřeviny jsou vývojově starší než listnaté. Dřevo jehličnanů má jednodušší a pravidelnou stavbu, kterou vytvářejí dva anatomické elementy. Tracheidy (cévice) a parenchymatické buňky. Parenchymatické buňky skládají dřevové paprsky, podélný dřevní parenchym a podílejí se na stavbě pryskyřičných kanálků.

Tracheidy Tvoří 87–95 % objemu dřeva. Jsou to uzavřené protáhlé buňky s 4–6 úhelníkovým příčným průřezem a různým zakončením. Dosahují délky 2–6 mm a šířky

kolem 0,04 mm. Mají funkci vodivou a mechanickou. Kromě tracheid v posledním letokruhu živého stromu jsou to mrtvé buňky, které mají zdřevnatělé buněčné stěny. Na jaře, při začátku růstu stromu se tvoří jarní tracheidy – mají převážně vodivou funkci. V letní části vegetačního období se pak tvoří letní tracheidy, které mají převážně mechanickou funkci.

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

Dřeňové 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. Parenchymatické buňky dřeňových paprsků mají tvar krátkých válečků širokých 10–15 μm a dlouhých 40–70 μm (Gandelová et al. 2009).

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. Pryskyřice chrání strom při poranění, má také impregnační funkci a ovlivňuje některé vlastnosti dřeva. Podíl pryskyřičných kanálků ve dřevě je velmi malý. Největší podíl ve dřevě má vejmutovka (0,7 %). Podíl vertikálních pryskyřičných kanálků je 6krát větší než podíl horizontálních pryskyřičných kanálků (Šlezingerová a Gandelová, 2005).

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. Střední vrstvu tvoří tzv. mrtvé buňky, které tvoří mechanickou oporu epitelových buněk. Vnější vrstva se skládá z živých parenchymatických buněk, tzv. doprovodného parenchymu. Průměr pryskyřičných kanálků se udává 30–50 μm .

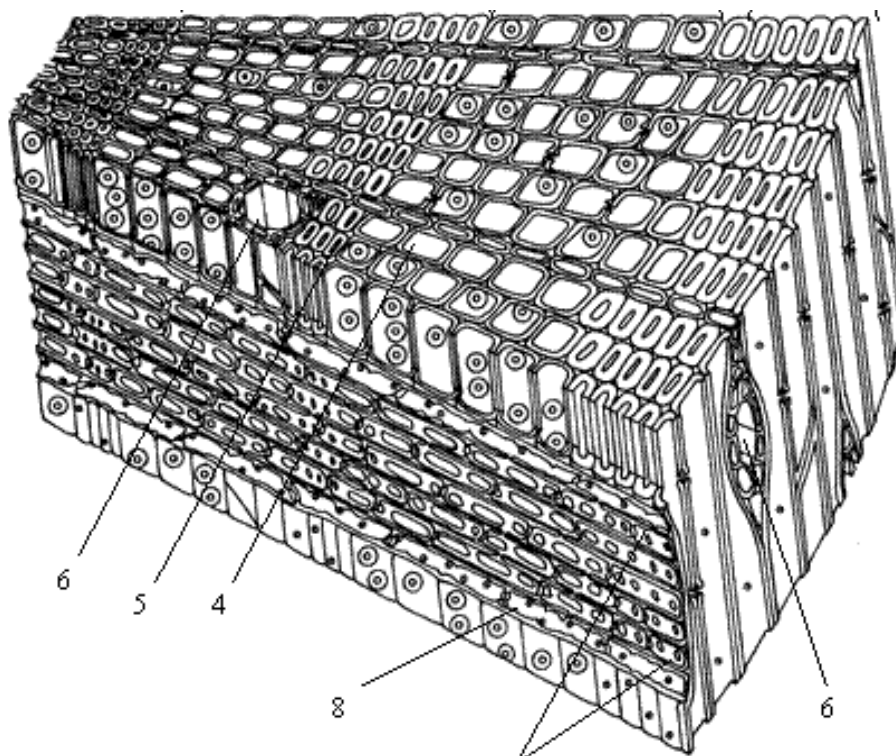
Horizontální pryskyřičné kanálky Procházejí dřevem ve směru kolmém na podélnou osu kmene, jsou tvořeny dvěma vrstvami a uloženy v dřeňových paprscích. Nejlépe jsou viditelné na tangenciálním řezu. Tvoří je epitelové vrstvy a mrtvé

parenchymatické buňky. Postupným stárnutím dřeva, v důsledku odumírání epitelových buněk přestávají pryskyřičné kanálky fungovat.

Podélný dřevní parenchym Je tvořen pásy parenchymatických buněk nebo jednotlivými větvenovitými buňkami orientovanými ve směru podélné osy kmene. Nachází se u některých jehličnanů a slouží k ukládání zásobních látek (Gandelová et al. 2009).

Tabulka 1 Zastoupení jednotlivých prvků buněk v jehličnatém dřevě (Gandelová et al. 2009)

dřevina	tracheidy	dřeňové paprsky	pryskyřičné kanálky	dřevní parenchym
	%			
smrk	92,5–95	5–7,2	0,2–0,3	nepatrně
borovice	91	5,3–8,4	0,5–1,1	–
modřín	89	10	0,1	0,9



Obrázek 1 Anatomická stavba jehličnatého dřeva (Požgaj et al. 1993)

2.2 Anatomická stavba dřeva listnáčů

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

Tabulka 2 Přehled dřevních buněk listnáčů. (Gandelová et al. 2009)

Druh buněk	Hlavní funkce	Uložení
Cévy – tracheje	vodivá	ve směru podélné osy kmene
Cévovité 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 dřevňových 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 mm až po m. V bělovém dřevě tvoří síť drah, kterými je přepravována voda s minerálními látkami od kořenů k listům. V jádrovém dřevě jsou v nich uloženy zásoby vody, případně jsou vyplněny vzduchem nebo jádrovými látkami. Můžou být vyplněné i thylami.

Vzhledem k tomu, jak jsou cévy velké a uspořádané, dělíme dřevo listnáčů z makroskopického hlediska na kruhovitě pórovité, roztroušeně pórovité, polokruhovitě pórovité. Na podélných řezech cévy vypadají jako svislé pásy, podle místa, kde v nich prochází řez, jsou viditelné prázdné lumény (můžou být vyplněné thylami). Nebo můžeme na řezu vidět buněčnou stěnu cévy s dvojtečkami, nebo ztluštěninami. Ve dřevě listnáčů jsou cévy zastoupeny asi 10 %. Podíl a rozměry cév jsou různorodé

v závislosti na druhu dřeviny, stanovištních podmínkách a pěstebních opatřeních (Gandelová et al. 2009).

Cévice (tracheidy) Ve dřevě listnáčů mají funkci: vodivou, mechanickou, někdy i zásobní. Vzhledem k tvarové a funkční odlišnosti se rozlišují tracheidy: cévovité, vláknité, vazicentrické. Jejich podíl ve dřevě listnáčů je velmi rozdílný. U některých tvoří velkou část základního pletiva, jinde nejsou vůbec. Rozlišení na mikroskopickém řezu je celkem obtížné a z hlediska určování dřevin je to doplňkový znak.

Libriformní vlákna Tvoří základní 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. Buňky jsou větvenovité, protáhlé se zašpičatělými, ale i vidličkovitými, zoubkovanými konci. Libriformní vlákna jsou až na výjimky mrtvé elementy. Živá vlákna (například u javoru, akátu) se vyskytují v blízkosti cév a na hranici letokruhu. Rozměry a tvar vláken jsou rozdílné jak v rámci dřeviny, tak i mezi dřevinami.

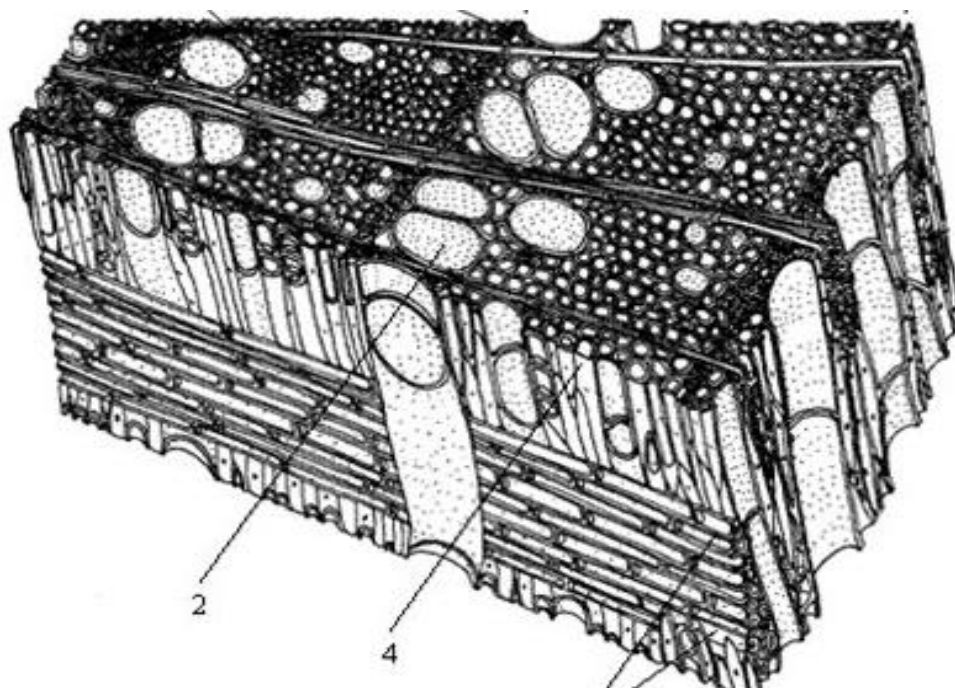
Parenchymatické buňky Jsou tvarově rozmanitější a zastoupeny více než ve dřevě jehličnanů. Zastoupení v procentech je udáváno 8–35 % z celkového objemu dřeva. Tvarově to mohou být: hranoly, krychle, krátké zploštělé válečky nebo větvena. Průměrné rozměry u našich listnatých dřevin jsou: šířka 19–22 μm a délka 81–99 μm . Jejich buněčné stěny jsou lignifikované, ale jsou to buňky živé. 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, kdy tzv. radiální parenchym tvoří dřeňové paprsky.

Dřeňové paprsky Jsou více zastoupeny u listnáčů než u jehličnanů, v průměru asi 10–20 % celkového objemu dřeva. Buňky mají tvar krátkých zploštělých válečků. Slouží jako vodivé elementy ve směru kolmém na podélnou osu kmene a k ukládání zásobních látek. Podle tvarového typu parenchymatických buněk, jež je vytvářejí, rozlišujeme dřeňové paprsky homogenní a heterogenní.

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

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

U některých listnáčů se úzké dřevné paprsky seskupují a vytvářejí tzv. nepravé dřevné paprsky. Dřevné paprsky listnáčů mohou být různě široké, jedno nebo více vrstvé a různě vysoké (Gandelová, et al. 2009).



Obrázek 2 Anatomická stavba listnatého dřeva (Požgaj et al. 1993)

3. Vlastnosti dřeva

3.1 Fyzikální vlastnosti dřeva

3.1.1 Vlhkost

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 však nejpodstatnější z nich.

Vlhkost ve dřevě je nejvíce ovlivněna: stavbou dřeva, hustotou, teplotou a mechanickým namáháním. V rostoucím stromě je rozložení vody nerovnoměrné a mění se podle výškového umístění a po průměru kmene (rozdíl mezi jádrem a bělí). Největší rozdíly mezi vlhkostí jádra a běle je u jehličnanů, kde má jádro 3–4 krát menší vlhkost než běl. U listnatých dřevin je vlhkost po průměru kmene rozmístěna mnohem rovnoměrněji, neboť u jehličnanů se vlhkost ve vyšší výšce zvyšuje, ale u listnáčů zůstává stejná, nezávislá na výšce. Dalším z faktorů ovlivňující vlhkost dřeva je i roční období, kdy v zimním období je vlhkost maximální a v letním naopak minimální (Horáček 1998).

Vodu ve dřevě můžeme rozdělit podílově vzhledem k sušině dřeva na hodnoty:

Vlhkost suchého dřeva – Ve dřevě není žádná voda volná ani voda vázaná. Tohoto stavu dosáhneme při sušení dřeva teplotou 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 hygroscopicity. Rozdíly mezi MNBS a MH jsou v tom, 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}).

Uložení vody ve dřevě

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

Voda vázaná – nachází se v buněčných stěnách a je vázaná vodíkovými můstky na hydroxylové skupiny OH amorfní části celulózy a hemicelulóz. 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.

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.

Dřevo se dle obsahu vlhkosti řadí do skupin:

- Dřevo mokré, dlouhodobě uložené ve vodě ($w > 100\%$),
- Dřevo čerstvě poraženého stromu ($w = 50\text{--}100\%$),
- Dřevo sušené na vzduchu ($w = 15\text{--}22\%$),
- Dřevo vysušené pro použití v interiéru ($w = 8\text{--}15\%$),
- Dřevo vysušené úplně ($w = 0\%$)

(Gandelová et al. 2009).

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 impregnace monomery. Molekulární tok zahrnuje pohyb plynů v lumenech přes ztenčeniny buněčných stěn a pohyb vody vázané v mikrokapilárách buněčné stěny. Aplikací molekulárního toku je sušení dřeva a molekulární tok popisujeme difúzí.

Propustnost dřeva Propustnost je objemový tok tekutin přes dřevo vyvolaný gradientem vnějšího tlaku (statického nebo kapilárního) souhrnně nazývaný 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 propustnější pro kapaliny než dřevo jehličnanů. Rozdíl je nejvíce způsoben přítomností cév. Ve směru podélném je dřevo nejpropustnější, 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.

Nasáklivost dřeva Je to schopnost dřeva v důsledku pórovité stavby nasávat vodu ve formě kapaliny. Nasáklivost je významný pomocník při určování maximální vlhkosti dřeva. Dřevo má maximální vlhkost, když je plně nasyceno vodou vázanou a obsahuje maximální množství vody volné.

Množství volné vody je závislé hlavně na objemu pórů ve dřevě, který je nepřímo úměrný hustotě dřeva. Některé póry ve dřevě mohou být vyplněné pryskyřicí, ucpané thilami, k plnému nasycení dřeva pak dojde za dlouhou dobu. Nasáklivost dřeva se zrychluje se zvyšující se teplotou (Horáček 1998).

3.1.2 Hustota

Určování hustoty dřeva, oproti jiným materiálům, je vzhledem k hygroskopicitě dřeva ztíženo, protože jak hmotnost, tak objem dřeva jsou velmi ovlivněny vlhkostí dřeva. Hustota dřeva a podíl vody ve dřevě je přímo úměrný, 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. I přesto se ale jedná o vlastnost, která velmi významně ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva (Horáček 1998).

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 $w = 0 \%$

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, tedy pouze hmota buněčných stěn. Toto číslo se v závislosti na chemickém složení dřeva pohybuje v rozmezí 1440–1550 kg*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 pro všechny dřeviny se uvádí 1530 kg*m⁻³ (Horáček 1998).

3.1.3 Teplota

Dřevo je špatný vodič tepla. Vodivost tepla závisí na dřevině a je tím větší, čím je dřevo hustější, vlhčí a teplejší (Lysý a Jirů, 1954).

Vliv faktorů na difúzi tepla ve dřevě Vedení tepla ve dřevě je ovlivňováno mnoha faktory, z nichž největší vliv mají anatomická stavba dřeva, hustota dřeva, vlhkost dřeva. Teplotní vodivost v podélném a příčném směru se liší díky 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 tepelná vodivost schopnost daného kusu látky vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí (Horáček 1998). Tepelná vodivost dané látky je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti (Neuberger et al. 2007).

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 částic, 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 (Horáček 1998).

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.

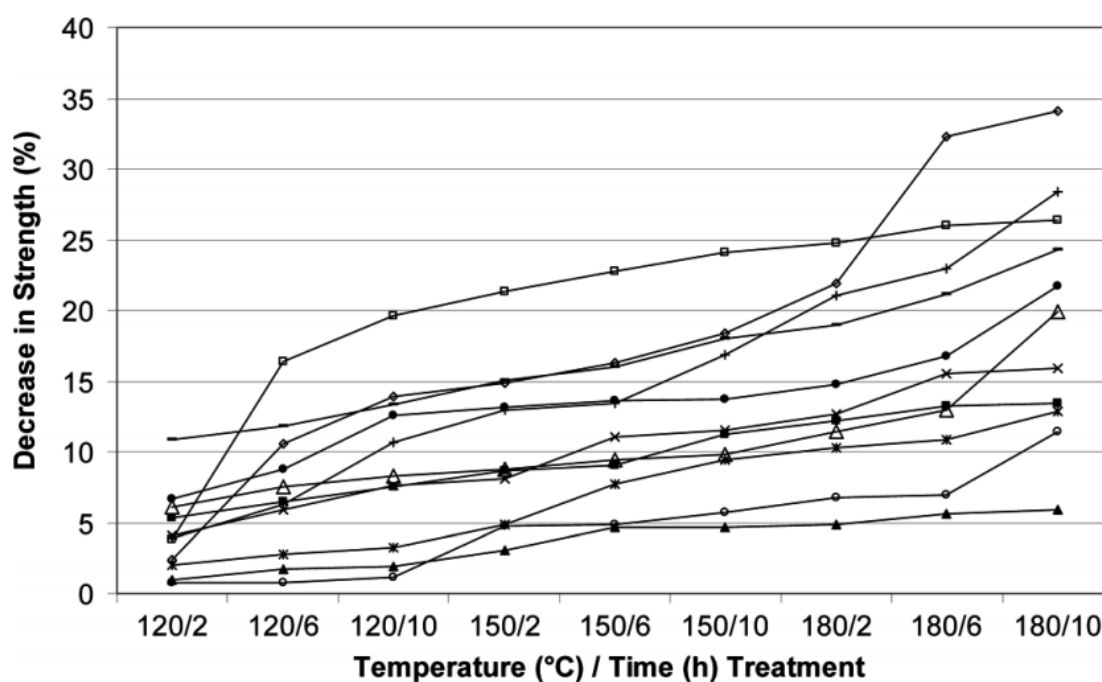
Sálání tepla Je to přenos tepla mezi dvěma tělesy o různé teplotě pomocí elektromagnetických vln. K přenosu není potřeba hmotného prostředí (Horáček 1998).

Vliv vysoké teploty na dřevo Teplota má klíčovou roli při ovlivnění mechanických vlastností dřeva. Když teplota vzroste do 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, a 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. Nejdolnější 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.

A následné vnitřní namáhání ve dřevě se pak rozkládá mezi méně molekul materiálu (Gandelová et al. 2009).



Obrázek 3 Procentuální snížení vlastností listnatého dřeva při vystavení vysoké teplotní zátěži po různou dobu (Budakçı a Korkut 2009)

(-) Pevnost v tlaku, (■) pevnost v ohybu, (Δ) modul pružnosti v ohybu, (*) tvrdost podle Janka při čelním zatížení, (X) tvrdost podle Janka v radiálním směru, (o) tvrdost podle Janka v tangenciálním směru, (◇) rázová houževnatost ohybu, (●) pevnost v tahu kolmo na vlákna, (+) pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny, (▲) pevnost ve smyku, (□) střih

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 pak dochází k většímu snížení pevnosti než u tvrdých (Budakçı a Korkut 2009).

3.2 Mechanické vlastnosti dřeva

Mechanické vlastnosti dřeva charakterizují schopnost dřeva odolávat účinku vnějších sil. Rozdělujeme je do tří skupin: základní, odvozené a technologické. K základním mechanickým vlastnostem patří: pružnost, pevnost, plastičnost, houževnatost. K odvozeným mechanickým vlastnostem se řadí: tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení, odolnost proti únavovému lomu.

A do technologické skupiny vlastností patří: štípatelnost, opotřebovatelnost, impregnovatelnost, 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 určují 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, stačí 3 roviny pružné symetrie:

- příčná (transverzální) značená RT,
- radiální značená LR,
- tangenciální značená LT

(Gandelová et al. 2009).

Mechanické namáhání Jako mechanické namáhání tělesa je označován děj, při němž vzniká interakce mezi dřevem a mechanickými silami, jež na něj působí. Výsledkem tohoto děje je dočasná, nebo trvalá změna tvaru tělesa. Namáhání dřeva lze dle fyzikální podstaty rozdělit na mechanické, vlhkostní, tepelné atd. Při využívání dřeva ke konstrukčním účelům spolupůsobí často zatížení: mechanické a vlhkostní. V případě takového zatížení můžeme uvažovat i faktor času. Vzájemná interakce mezi mechanickým a vlhkostním namáháním v závislosti na čase významně ovlivňuje deformovatelnost při různých druzích namáhání.

Při mechanickém namáhání dřevo reaguje na základě vazeb, které jsou mezi jeho chemickými složkami, dalšími faktory jsou anatomická stavba dřeva a geometrie tělesa. Proto je důležité všechny mechanické vlastnosti dřeva posuzovat z těchto hledisek.

Základní druhy mechanického namáhání Dělí se podle druhu napětí, které v tělese vzniká působením vnější síly. Napětí ve dřevě jsou vnitřní síly, které v tělese vznikají díky působení vnějších mechanických sil. Napětí je definováno jako velikost vnitřní síly, která je vztahena na jednotku plochy tělesa. Když síly působí kolmo na

přířezovou plochu tělesa, jde o normálové napětí σ . Příkladem takových normálových napětí je napětí v tahu a tlaku. V případě působení síly v rovině průřezu vznikají 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, víceosý. Pro pevná tělesa jsou základní dvě vlastnosti: pevnost a pružnost (Gandelová et al. 2009).

Pružnost dřeva je všeobecně definována jako schopnost dřeva dosahovat původní tvar a rozměry po uvolnění vnějších sil. Z fyzikálního hlediska je to takový stav, že změny ve vzdálenosti mezi atomy jsou návratné a odstraněním vnějších sil se atomy vrátí do svých rovnovážných vzdáleností tak, aby dosáhly nejnižší potenciální energie (Požgaj et al. 1997).

3.2.1 Tah

Dřevo bývá v mnoha případech podrobeno tlaku. Příkladem mohou být piloty, sloupy, důlní vzpěry, stavební nosníky, podpěry lešení při stavbách apod. (Vanin 1955).

Pevnost dřeva v tahu rozdělujeme s ohledem na anizotropii v tahu na:

- a) pevnost v tahu ve směru vláken,
- b) pevnost v tahu napříč vláken
 - ve směru radiálním
 - ve směru tangenciálním.

Pevnost dřeva v tahu ve směru vláken Hodnota pevnosti dřeva v tahu ve směru vláken je při porovnání s ostatními hodnotami pevností největší. Pro naše dřeviny se tato hodnota udává 120 MPa. Když se těleso poruší při namáhání v tahu ve směru vláken, dojde k roztrhnutí buněk dřeva v pracovní části tělesa. Velká hodnota v pevnosti je dána především vláknitým tvarem buněk a strukturou buněčných stěn. Zabezpečení především mechanických vlastností je díky letním tracheidám a libriformním vláknům, jejichž buněčná stěna je zdřevnatělá. Stěna je tvořena z více jak z 50 % procent makromolekulami celulózy s téměř rovnoběžnou orientací s podélnou osou buněk.

Takže teoreticky by pevnost v tahu ve směru vláken mohla dosáhnout 8 000 MPa. Molekuly celulózy nejsou tvořeny pouze krystalickými celky, ale ve fibrilární struktuře se nacházejí i amorfní části. Tahová pevnost není tedy dána jenom pevností kovalentních vazeb, ale je snížena o podíl amorfních částí celulózy. Molekulární soudržnost celulóзовých řetězců a celého lignino-sacharidového komplexu je navíc snížena rozdílnou orientací v buněčné stěně, složením střední lamely a výskytem inkrustačních látek. Na úrovni makroskopické je pevnost v tahu omezoována přítomností dřevných pryskyřek. Konečná pevnost v tahu ve směru vláken je dána vzájemnou interakcí rozdílné struktury dřeva.

Při zkoušení dřeva s větší pevností jsou okraje roztržené části vláknité nebo třískovité. Naopak u dřeva s menší pevností je okraj schodovitý, téměř hladký. Při zatížení v tahu ve směru vláken se dřevo chová jako křehký materiál s malou deformací a zlomem bez předcházejících plastických deformací.

Mez úměrnosti v tahu ve směru vláken je u listnáčů s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva 70 % z meze pevnosti. U jehličnatých dřevin je to 80 % z meze pevnosti.

I přes vysokou tahovou pevnost dřeva ve směru vláken nelze tuto vlastnost prakticky v plném rozsahu využít. Často totiž dochází k porušení dřeva v místech, kde jsou uchyceny konstrukční díly. Dochází tam ke smyku a otlacení, s těmito silami se počítá například u ojí vozidel, tahových vozidel, profilovaných nosníků atd.

Pevnost dřeva v tahu napříč vláken Při zatěžování dřeva v tahu napříč vláken je pevnost v porovnání s předchozími pevnostmi jedna z nejmenších vůbec. V průměru je tahová pevnost napříč vláken udávána v rozmezí od 1,5 do 5 MPa. Z tohoto důvodu je při užití dřeva na nosné konstrukce vhodné vyhnout se tomuto způsobu zatížení.

Takto nízká pevnost v tahu kolmo na vlákna je způsobena orientací vazebných sil. Ve směru napříč vláken se na vazebných silách více podílejí vodíkové vazby a Van der Waalsovy vazby, které jsou řádově slabší než vazby kovalentní, je zde předpoklad, že toto je jedna z hlavních příčin velkého rozdílu mezi pevností v tahu ve směru a napříč vláken (Gandelová et al. 2009).

Při tahu v radiálním směru je mez pevnosti větší, než v tangenciálním. U dřeva jehličnanů je to o 10–50 % a u listnatých dřevin o 20–70 %.

Největší pevnost v tahu napříč vláken je u tvrdých dřev roztroušeně pórovitých listnáčů, dalšími jsou listnaté dřeviny s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva a poté měkká dřeva listnáčů s roztroušeně pórovitou stavbou a dřevo jehličnanů. Pevnost dřeva v tahu kolmo na vlákna je v průměru u všech zkoumaných druhů asi 1/20 pevnosti v tahu ve směru vláken. Variační koeficient je cca 25 %.

Tabulka 3 Pevnost dřeva v tahu napříč vláken (Ugolev 1986)

	mez pevnosti (MPa) v tahu napříč vláken ve směru	
druh dřeva	radiálním při vlhkosti	tangenciálním při vlhkosti
	12 %	12 %
smrk	2,2	1,7
dub	5,8	–
buk	4,4	3,4
habr	4,6	3,8

Vzhledem k nízké pevnosti a možnosti výskytu trhlin v namáhané části je použití dřeva celkem ztížené. Tato pevnost má velký význam při řezání dřeva a následném stanovení režimu sušení kvůli možnosti vzniku trhlin ve dřevě vlivem vnitřních napětí. Když je režim sušení příliš rychlý, vznikají ve dřevě vlhkostní a zbytková napětí, která způsobují tahová napětí napříč vláken. V případě, že je překročena mez pevnosti, vznikají výsušné trhliny, a dřevo pak ztrácí svoji kvalitu (Gandelová et al. 2009).

Poissonovo číslo Když je dřevěné těleso zatíženo normálovým namáháním, vznikají deformace ve směru silového působení, které vyjadřují poměrnou podélnou deformaci ε_1 . Vznikají i deformace kolmé k působící síle, které se vyjadřují jako poměrné příčné deformace ε_2 . Poissonovo číslo, které je značeno řeckým písmenkem μ , je podíl

poměrné příčné deformace k poměrné podélné deformaci. Stanovujeme šest Poissonových čísel.

Modul pružnosti Modul pružnosti vyjadřuje vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím větší je číslo modulu pružnosti, tím větší potřebujeme napětí pro vyvolání deformace.

Modul pružnosti pro normálová namáhání, čili tah, tlak, ohyb, se nazývá Youngův modul pružnosti, který se značí E_i . Pro tangenciální namáhání, smyk a krut, se modul pružnosti značí G_{ij} , jde o tzv: smykový modul.

Modul pružnosti obecně klesá s rostoucí vlhkostí až do meze hygroskopicity. Se změnou vlhkosti o 1% se hodnota modulu pružnosti v tahu a tlaku ve směru vláken změní o 2%, v tahu a tlaku napříč vláken o 3 %, v ohybu o 1 %, ve smyku o 3%. Moduly pružnosti jsou důležitou materiálovou konstantou při statickém výpočtu dřevostaveb.

Tabulka 4 Moduly pružnosti a smykové moduly vybraných dřevin v hlavních směrech pružné symetrie ($w = 11-12 \%$) (Ugolev 1986).

Dřevina	Modul pružnosti (MPa)						
	v tlaku a tahu			v ohybu	ve smyku		
	E_L	E_R	E_T	E_{oh}	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
smrk	14 300	680	470	12 800	1 230	800	55
jasan	15 700	1 875	1 250	13 900	1 325	1 080	255
topol	13 900	885	350	-	840	385	110

Pracovní diagram Moduly pružnosti se dají zjišťovat pouze experimentálně, protože pro většinu materiálů nejsou zatím teoreticky odvozené rovnice. Ke zjišťování těchto těchto paramterů se obvykle využívají zkušební stroje, kde se současně měří deformace a působící silové zatížení.

Empirická křivka, která charakterizuje vztah mezi napětím a deformací, se nazývá pracovní diagram. Obecný tvar takového diagramu pro dřevo je na obrázku – neplatí pro tlakovou pevnost ve směru kolmo na vlákna (Gandelová et al. 2009).

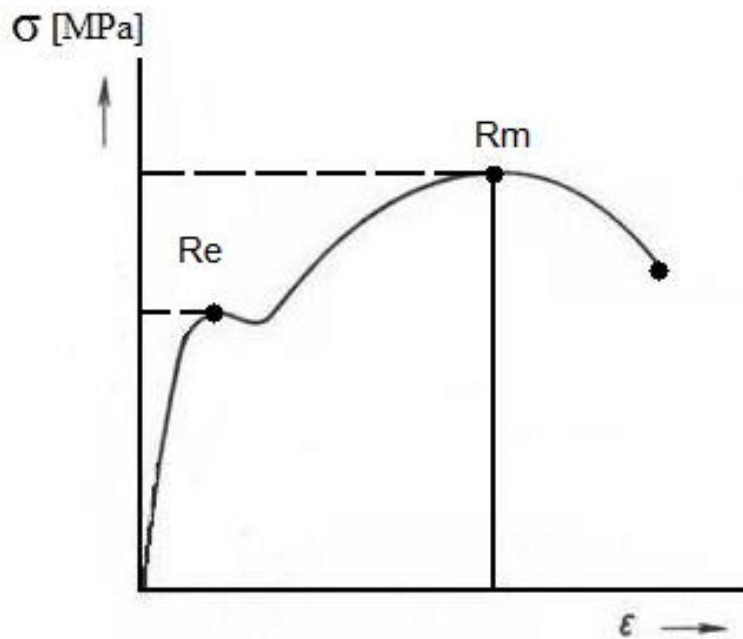
Diagram napětí dřeva se podle deformací může rozdělit na 2 části. První je lineární část, která je po mez úměrnosti σ_u , a druhá, nelineární část nad mezí úměrnosti po mez pevnosti σ_p . Po mez úměrnosti vzniká takové napětí, které má za následek vznik pouze pružných deformací, nebo deformací pružných v čase a napětí v tělese je rovnoměrně rozděleno. Po skončení namáhání se tyto deformace zcela ztrácejí a těleso se vrací do svého původního stavu.

Při vzrůstu napětí nad mez úměrnosti deformace dále roste, ale napětí v tělese se nerozkládá rovnoměrně a deformační čára nabývá charakteru křivky. Vzniklé deformace jsou plastické a už nejsou přímo úměrné napětí. Po přerušení působení vnějších sil deformace zůstávají.

K proušení tělesa dochází až při napětí, které je označováno jako mez pevnosti. Mez pevnosti je nejvyšší hodnota napětí, které dřevo snese bez porušení celistvosti tělesa.

Na molekulární úrovni se pružné deformace do meze úměrnosti projevují namáháním vodíkových vazeb mezi individuálními polymerovými řetězci, což vede k jejich lámání a následnému přeskupování vazeb. Nad mezí úměrnosti je již napětí tak velké, že kromě porušení vodíkových vazeb vznikají také porušení ve vazbách kovalentních. Takové zlomy jsou již nevratné a jejich výsledkem jsou plastické deformace.

Průměrné zastoupení jednotlivých druhů deformací u smrkového dřeva při 12% vlhkosti lze charakterizovat těmito podíly: pružná deformace 67 %, deformace pružná v čase 3 %, deformace plastická 30 %. Toto zastoupení se u jednotlivých druhů mechanického namáhání mění, ale největší podíl zaujímají vždy deformace pružné (Gandelová et al. 2009).



Obrázek 4 Pracovní diagram (Frischherz a Skop, 1993)

3.2.2 Tlak

Vzhledem k směru působící síly vůči orientaci vláken a letokruhům dřeva rozlišujeme:

- 1) pevnost tlaku ve směru vláken,
- 2) pevnost v tlaku napříč vláken
 - ve směru radiálním,
 - ve směru tangenciálním.

Mez pevnosti v tlaku ve směru vláken se vypočítá podle vztahu pro normálové napětí. Mez v pevnosti v tlaku napříč vláken se zjišťuje graficky z pracovního diagramu.

Pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken Tlaková pevnost dřeva ve směru vláken je z praktického hlediska velmi důležitá vlastnost dřeva. Tlak, který působí na zkušební těleso, způsobuje deformaci tělesa, která se projevuje zkrácením délky tělesa. Charakter této deformace je závislý na jakosti a stavbě dřeva. Důležitými činiteli jsou hustota a vlhkost dřeva.

U suchého dřeva s vysokou hustotou a vysokou pevností vzniká zatížením porušení dřeva ve formě smyku jedné části tělesa vzhledem k druhé po linii, která na tangenciální

ploše probíhá pod úhlem 60° vzhledem k podélné ose tělesa. U dřeva vlhkého s nízkou hustotou a malou pevností dochází k otlacení vláken na čelních plochách a k vybočení stěn zatěžovaných těles. Průměrná hodnota meze pevnosti v tlaku ve směru vláken u dřev s vlhkostí 12 % je cca 50 MPa.

Mez úměrnosti v tlaku ve směru vláken je pro některé druhy (modřín, borovice, jedle, jasan, dub) průměrně 60 % meze pevnosti. Hodnoty meze úměrnosti jsou v literatuře uváděny následovně: pro tvrdé listnaté dřeviny 56 %, pro měkké listnaté dřeviny 60 % a pro jehličnaté dřeviny 68 % meze pevnosti. Rozdíly, které jsou v jednotlivých skupinách, souvisí pravděpodobně s rozdílnou stavbou dřeva. Vyšší mez úměrnosti dřeva jehličnatých dřevin je vysvětlována pravidelnější stavbou. Dřeva listnáčů s kruhovitě pórovitou a s méně pravidelnou stavbou mají mez úměrnosti nižší. Předpokládá se, že vzniklé napětí ve dřevě je přenášeno hlavně elementy s tlustšími buněčnými stěnami (letní tracheidy u jehličnanů, libriformní vlákna u listnáčů). V buněčných stěnách je napětí přenášeno přes makromolekuly celulózy a hemicelulóz na amorfní výplň celulózní kostry buněčné stěny. Výrazná trvalá deformace, která při tlaku vzniká, je hlavně projevem trvalých změn ve struktuře ligninu, případně narušení spojů lignino-sacharidového komplexu (Gandelová et al. 2009).

Tabulka 5. Hodnoty meze pevnosti v tlaku ve směru vláken (Ugolev 1975)

Druh dřeva	$S_p \parallel$ (MPa)		Druh dřeva	$S_p \parallel$ (MPa)	
	w=12 %	w =30 %		w =12 %	w= 30 %
modřín	64,5	25,5	akát	75,5	41,5
borovice	48,5	21,0	buk	55,5	26,0
smrk	44,4	19,5	dub	57,5	30,4
habr	60,0	26,5	topol	39,0	18,0

Pevnost dřeva v tlaku napříč vláken Oproti tlaku ve směru vláken nebývá v tomto případě dřevo porušeno oddělováním jednotlivých částí, ale dochází k postupné deformaci a zhušťování dřevní struktury v celém objemu. Když působí tlak napříč vláken, jsou vzhledem k makroskopické stavbě letokruhu možné dva průběhy závislosti napětí – deformace dvoufázová a třífázová.

Když je deformace dvoufázová, je na diagramu lineární část, která probíhá až do maximálního pružného zatížení. Po překročení meze úměrnosti dochází k postupnému porušování soudržnosti tělesa. To se projevuje na hranici letokruhů, které se ohýbají, navzájem se od sebe oddělují a dochází k postupné plastické deformaci. Tento typ deformace je charakteristický pro jehličnaté dřeviny a pro listnaté dřeviny s kruhovitě pórovitou stavbou letokruhů (výjimku tvoří dub). Tato deformace vzniká při tlaku v tangenciálním směru, kdy se stlačují elementy jarního i letního dřeva současně.

Třífázová deformace Je charakteristická pro zatížení dřeva v tlaku napříč vláken v radiálním směru pro všechny naše dřeviny s výjimkou dubu. V tangenciálním směru je charakteristická pro listnatá dřeva s roztroušeně pórovitou stavbou dřeva. Začínající deformace v první fázi při lineární části křivky je způsobena stlačením jarního dřeva v letokruzích. Po skončení této fáze je dosažena mez úměrnosti. Jako další následuje ztráta stability anatomických elementů a začíná jejich stlačování. Tato fáze probíhá za působení stejného nebo o málo se zvětšujícího napětí a postupně dochází k rozvíjení plastických deformací. Na pracovním diagramu se tato fáze zobrazuje jako vodorovná nebo málo zakřivená část křivky. S tím, jak postupně dochází k deformaci obou vrstev letokruhu, začíná přechod do třetí fáze deformace. Tato fáze se děje při velkém zatížení, kdy se dřevo zhušťuje, ale nedochází k úplnému porušení tělesa.

Když působí tlak napříč vláken, nedochází většinou k celkovému porušení tělesa. Pevnost v tlaku se proto určuje z meze úměrnosti. Vzhledem k tomu, že vlastní mez úměrnosti se obtížně určuje, mez úměrnosti se pak určuje na základě stanovených kritérií. Takto stanovená mez úměrnosti je označována jako konvenční mez pevnosti.

Rozlišují se tři druhy pevnosti při tlaku napříč vláken:

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

Hodnoty, které jsou experimentálně naměřené pro tlak napříč vláken na část délky, jsou v průměru o 20–25 % vyšší než pro tlak napříč vláken na celou plochu. Tento rozdíl je vysvětlován jako dodatečný odpor vláken při ohybu na hranách tlačенého tělesa. Hodnoty konvenční meze pevnosti při zatížení dřeva v radiálním a tangenciálním směru se příliš neliší. Dřeva se širokými dřeňovými paprsky, jako například: dub, buk,

javor, mají vyšší konvenční mez pevnosti v radiálním směru. Naopak u jehličnatých dřevin je vyšší konvenční mez pevnosti u tangenciálního zatížení, kdy tlak působí zároveň na jarní i letní dřevo. Při zatížení napříč vláken je konvenční hustota pro všechny druhy dřev v průměru 10krát menší než pevnost v tlaku ve směru vláken (Gandelová et al. 2009).

3.2.2 Smyk

Smyková pevnost Je vlivem anizotropie ve všech třech základních směrech různá. Podmínky při, kterých dojde ve dřevě k čistému smyku, se těžko stanovují, protože smyk ve dřevě vždy doprovází spolupůsobení jiných napětí. Při různých zatíženích ve dřevě má smyk velmi důležitou a nenahraditelnou roli. Napětí, která spolupůsobí při zatížení ve smyku, jsou například: tah, tlak. Proto je nutné rozlišovat, kdy má smyk rozhodující vliv, a takovéto případy podle toho respektovat. Praktické zjištění smyku se provádí, když působí dvě stejně velké síly, které vyvolávají vzájemné posunutí dvou sousedních průřezů. Ve dřevě rozlišujeme tyto pevnosti ve smyku:

- smyková pevnost v radiální a tangenciální rovině ve směru vláken,
- smyková pevnost v radiální a tangenciální rovině napříč vláken,
- smyková pevnost napříč vláken v příčné rovině v radiálním a tangenciálním směru.

Při zjišťování smykové pevnosti pomocí standartních metod jsou výsledné hodnoty nižší vlivem tření, oproti podmínkám při čistém smyku. Ke smykovému napětí napříč vláken dochází v: kolíkových spojích, dřevěných hřebících. Stříhové napětí dřeva ve směru napříč vláken vzniká pod kovovými spoji, pod sponami, hlavicemi svorníků atd. (Gandelová et al. 2009).

Smyková pevnost ve směru vláken Dřevo dosahuje malé smykové pevnosti. Listnáče mají asi 1,5krát větší smykovou pevnost než dřevo jehličnanů. V tangenciální rovině je smyková pevnost o 10–30 % vyšší než v rovině radiální. Při větším počtu dřeňových paprsků ve dřevě je tento rozdíl ještě větší (buk, habr). U dřeva jehličnanů je smyková pevnost ve směru vláken v obou rovinách přibližně stejná.

Většinou je mez pevnosti ve smyku ve směru vláken cca 1/5 meze tlakové pevnosti dřeva ve směru vláken. Při 12 % vlhkosti se průměrné hodnoty udávají kolem 10–12 MPa. I přes malou smykovou pevnost ve směru vláken je dřevo tímto způsobem celkem často namáháno například ve spojích krovů atd.

Smyková pevnost dřeva napříč vláken v tangenciální a radiální rovině je zhruba 2krát menší než smyková pevnost ve směru vláken. Rozdíly mezi rovinami jsou malé. Prakticky se tato vlastnost uplatňuje při namáhání dřevěných klínů, vložených per a při krájení a loupání dýh (Gandelová et al. 2009).

3.2.4 Ohyb

Je to jedna z nejdůležitějších mechanických vlastností dřeva. Rozlišujeme dva druhy pevnosti v ohybu vzhledem k průběhu vláken:

- a) Pevnost v ohybu, kdy jsou vlákna rovnoběžně probíhající s podélnou osou tělesa a síla působí napříč vláken v radiálním nebo tangenciálním směru.
- b) Pevnost v ohybu, kde jsou vlákna probíhající kolmo na podélnou osu tělesa a příčný řez je umístěn v orientaci působící síly nebo kolmo na působící sílu.

Obvykle se sleduje a používá pevnost dřeva v ohybu napříč vláken. Zkušební vzorky se při zkouškách orientují tak, aby zatížení bylo napříč vláken v tangenciálním směru.

U listnatých dřevin jsou rozdíly při tangenciálním a radiálním namáhání ohybem maximálně 2–4 %. Rozdíl u jehličnatých dřevin je daleko větší. Mez pevnosti v tangenciálním směru je zde o 10–12 % větší než ve směru radiálním. Při zatížení tělesa vzniká v jeho spodní části napětí v tahu a v horní části napětí v tlaku. Část tělesa, která se při namáhání nedeformuje (je bez normálového napětí), se nazývá neutrální osa. Mezi tahovým a tlakovým napětím je smykové napětí. Díky tomu, že tlaková pevnost dřeva je podél vláken mnohem menší než tahová pevnost. Proto porušení tělesa začíná při ohybu v tlakové zóně vybočováním vláken. Tento jev je málokdy pozorovatelný pouhým okem. Ke konečnému přerušení tělesa dochází v zóně tahové. V momentě kdy je překročena mez pevnosti, dochází prvně k odštěpení krajních vláken a poté k úplnému lomu tělesa.

Když je dřevo křehké a málo pevné, zlom je téměř hladký. Naopak u dřeviny, která je houževnatá, pevná je zlom vláknitý nebo třískovitý. Při statickém ohybu napříč vláken je mez pevnosti průměrně 100 MPa. Variační koeficient je 16 %. Hodnoty ohybové pevnosti dřeva leží v rozmezí hodnot tahové a tlakové pevnosti dřeva ve směru vláken. Mez úměrnosti je v tomto případě průměrně 70 % meze pevnosti. Pevnost v ohybu je mimo jiné závislá i na rozměrech zatěžovaného tělesa. Podíl vzdálenosti podpěr k výšce tělesa (štíhlostní poměr) musí odpovídat $l_0 : h \geq 14$.

Pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, se moc nevyskytuje. V takovém případě jsou totiž hodnoty meze pevnosti velmi nízké. Z tohoto důvodu se ani v literatuře s tímto druhem namáhání neseťkáváme jako s tabulkovou hodnotou. Při ohybu v tomto směru je u smrku a borovice tato hodnota 4-5 % z meze pevnosti ze statického ohybu, když vlákna probíhají podélně s rovnoběžnou osou tělesa. U buku byla naměřena hodnota 20 % z meze pevnosti. Dřevo je díky své vysoké ohybové pevnosti často využíváno pro konstrukci nosníků, nábytků atd. (Gandelová et al. 2009).

3.2.5 Tvrdost dřeva

Tvrdost dřeva je charakterizována jako schopnost dřeva klást odpor proti vnikání jiného tělesa do jeho struktury. Tvrdost dřeva je důležitá při opracování dřeva reznými nástroji (řezání, loupání, hoblování, frézování) a v případě, kdy je dřevo odíráno. Tvrdost dřeva se dělí podle druhu zatížení na: statickou tvrdost a dynamickou tvrdost.

Statická tvrdost dřeva Statická tvrdost dřeva se zjišťuje pomocí zatlačování ocelové kuličky daného průměru statickým zatížením do čelních, radiálních a tangenciálních ploch dřeva. Tato vlastnost se dá stanovit metodami podle Brinella a podle Janky.

Brinellova tvrdost Metoda spočívá ve vtlačování ocelové kuličky o průměru 10 mm konstantní silou v závislosti na tvrdosti dřeva: velmi měkké 100 N, středně tvrdé 500 N, tvrdé dřeviny 1000 N. Z průměru otláčené plochy a kuličky se potom vypočítává tvrdost, která je značena H_b .

Jankova tvrdost Tato metoda spočívá v zatlačování polokuličky s průměrem 11,28 mm do hloubky 5,64 mm, čímž vzniká na povrchu zkušebního tělesa plocha 100 mm². Síla potřebná pro zatlačení kuličky dělená plochou udává tvrdost značenou H_j .

Statická tvrdost (H_B i H_J) je obecně vyšší na příčné rovině než na podélných rovinách. U jehličnatých dřevin je tento rozdíl 40 % u dřeva listnáčů 30 %. U většiny druhů dřev není rozdíl mezi tvrdostí na radiální a tangenciální ploše. Pouze u listnatých druhů dřev s dobře vyvinutými dřeňovými paprsky (dub, buk) je radiální tvrdost větší o 5–10 % než tangenciální.

Tabulka 6 Hodnoty statické tvrdosti vybraných druhů dřev (Matovič 1993).

Druh dřeva	tvrdost dřeva na ploše (MPa) při vlhkosti					
	čelní		radiální		tangenciální	
	12 %	> 30 %	12 %	> 30 %	12 %	> 30 %
modřín	43,5	20,5	29,0	13,5	29,0	14,0
borovice	28,5	13,5	24,0	11,0	25,0	11,5
smrk	26,0	12,0	18,0	8,5	18,5	8,5
akát	97,0	57,7	68,0	40,5	78,0	46,5
jasan	80,0	48,0	59,0	35,0	67,0	39,5
dub	67,5	40,0	56,0	33,5	49,0	29,0
buk	61,0	36,5	43,5	25,5	44,5	26,5

Na základě údajů o statické čelní tvrdosti při 12% vlhkosti se dřeva dělí do 5 skupin:

- a) měkká dřeva (< 40 MPa),
- b) středně tvrdá dřeva (41-80 MPa),
- c) tvrdá dřeva (81-100 MPa),
- d) velmi tvrdá dřeva (101-150 MPa),
- e) super tvrdá dřeva (> 150 MPa)

(Gandelová et al. 2009).

Dynamická tvrdost Je zkouška, při které je z určené výšky puštěna kulička volným pádem. Výpočet tvrdosti se pak provádí podílem potencionální energie kuličky a plochy otláčení, kterou kulička vytvoří. Dynamická tvrdost se značí H_w a mění se se změnou vlhkosti do meze hygroskopicity. Se změnou vlhkosti o 1 % se dynamická tvrdost změní o 2 %.

Pevnost je vyjádřena jako napětí, u kterého se zruší soudržnost tělesa, to je na mezi pevnosti $-\sigma_p$. Vzhledem k tomu, že teoretická pružnost dřeva se nedá vypočítat pro všechny druhy namáhání, se pevnost dřeva stanovuje jako skutečná pevnost dřeva. Údaje o pevnosti dřeva se zjišťují prostřednictvím zkoušek, kde je sledováno skutečné napětí v okamžiku porušení tělesa. Výjimka v tomto pravidle je při zkoušce pevnosti dřeva v tlaku napříč vláken, protože zde konečného porušení tělesa nelze dosáhnout, proto je zde definována konvenční pevnost.

Aby mohly být výsledné hodnoty vzájemně porovnatelné, byla přijata dohoda o zkušebních postupech, jež definuje podmínky, při kterých se pevnost zjišťuje. Základní zásady jsou: velikost zkušebního tělesa, postup zkoušky, výpočet výsledků.

Pevnost dřeva dělíme podle:

- a) stavu napjatosti – jednoosý nebo víceosý,
- b) způsobu zatížení – tah, tlak, ohyb, krut, smyk,
- c) časového průběhu zatížení – statické nebo dynamické,
- d) účinků zatížení na dřevo – destruktivní a nedestruktivní způsob

(Gandelová et al. 2009).

3.2.6 Houževnatost dřeva

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

Statická houževnatost je mechanická vlastnost, která představuje mechanickou energii spotřebovanou na vznik plastické deformace.

Pokud je deformační práce malá a plastická deformace je nepodstatná, tak takové materiály jsou označeny jako křehké. Při vzniku plastické deformace dřeva je tato deformace energeticky velmi náročná a při určitých způsobech zatížení je velmi výrazná (např. tlak napříč vláken), řadíme ho proto mezi materiály houževnaté (Gandelová et al. 2009).

Rázová houževnatost dřeva Dřevo má schopnost absorbovat práci vykonanou rázovým ohybem, tuto vlastnost nazýváme rázovou houževnatostí dřeva. Rázová houževnatost (občas označovaná jako přerážecí práce) charakterizuje schopnost dřeva

odolávat rázovým zatížením a vyjadřuje ji spotřebovaná energie na přeražení vzorku ze dřeva definovaných rozměrů. Pro přerážecí práci se používají běžná přerážecí kladiva, například: Charpyho kladivo (Gandelová et al. 2009).

4. Dopad nízkých teplot

Je známo, že mechanické vlastnosti dřeva jsou ovlivněny řadou faktorů. Teplota a obsah vlhkosti dřeva patří mezi nejvýznamnější parametry ovlivňující jeho mechanické chování. Při teplotách nad 0 °C je obsah vlhkosti pro mechanickou pevnost dřeva důležitý do meze hygroskopicity. Nad mezí hygroskopicity jsou mechanické vlastnosti dřeva ovlivněny při poklesu teploty pod 0 °C (Hernández et al. 2014).

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 od sněhu a nízké teploty, u lodní přepravy zkapalněného zemního plynu, kdy dřevo musí odolávat teplotě -163 °C a tlaku od plynu. Dalším příkladem je uskladnění dřeva venku v zimních měsících, kdy také dochází k jeho střídavému teplotnímu namáhání.

Vliv nízkých teplot na ohybové vlastnosti dřeva byl poprvé zkoumán v roce 1930, kdy byla pevnost dřeva borovice (*Pinus cembra*) zkoumána od -70 °C, až do 70 °C a výsledky ukázaly, že pevnost dřeva se zvyšuje se snižující se teplotou. Vlivem nízkých teplot (pod 0 °C) na mechanické vlastnosti dřeva se ve čtyřicátých a padesátých letech

v Rusku zabývali A. A. Solncev a V. S. Panfilov: borovicové, dubové a březové dřevo navlhčili okolo meze nasycení buněčných stěn a zkoumali ve zmrzlém stavu při 12 °C. Pro porovnání zkoumali i nezamrzlé dřevo stejných dřevin ve stavu meze hygroskopicity. Bylo zjištěno, že zmrzlé dřevo borovice, dubu a břízy při vlhkosti nad mezí nasycení buněčných stěn má o 35 % vyšší pevnost dřeva v tlaku ve směru vláken a v statickém ohybu, pevnost ve smyku a štípatelnost o 75 %, rázová houževnatost v ohybu (přerážecí práce) se však u borového dřeva snížila přibližně dvojnásobně a v dubovém dřevě o 9 %. U jiných prací zabývajících se smrkovým, jedlovým a borovicovým dřevem se zjistilo, že desetinásobné zmrazování a rozmrazování pevnost dřeva nesnižuje (Perelygin, 1965; Matovič, 1993).

Podobné výsledky při svém výzkumu prokázali i Kollman a Cote v roce 1968. V roce 1995 byla při výzkumu vlivu nízké teploty na modul pružnosti a mez pevnosti vzorků: smrku, borovice a jedle při 12 % vlhkosti, (*Picea glauca*, *Pinus cembra*, *Abies lasiocarpa*). Zjištěno, že při poklesu teploty o 1 ° C, došlo ke zvýšení modulu pružnosti o 0,13 % a meze pevnosti o 0,34 %. Žádný z těchto výzkumů však nezohledňoval rychlost zmrazení vzorku, která je velmi důležitá pro následnou analýzu (Zhao et al. 2015).

4.1 Fyzikální vlastnosti

4.1.1 Teplota

Při teplotě cca -4 °C dochází ve dřevě k zamrznání vody. Pokud teplota nepřekročí 30° C, zamrzá pouze voda volná (k částečnému zamrznání vody vázané pak dochází při delším vystavení dřeva teplotě -45 °C). Zamrzlá voda volná vytváří v lumenech ledové krystaly. Velikost těchto krystalů je ovlivněna rychlostí zamrznání vody.

Při pomalém zamrznání (-1 °C/h) vznikají velké ledové krystaly, které způsobují mikrotrhliny ve dřevě, a tím dochází ke snížení mechanických vlastností dřeva. Při rychlém zamrznání naopak vznikají malé ledové krystaly. Tak dochází k vyztužování lumenů ledovými krystalky a mechanické vlastnosti dřeva se zvyšují (Ispas a Campean, 2014).

4.1.2 Buněčná struktura

Ke vzniku buněčných mikrotrhlin vlivem nízkých teplot dochází přirozeně v zimním období, kdy je pomalá rychlost zamrznání vody ve dřevě. A vzniklé ledové krystaly poškozují buňku a způsobují výrazné snižování mechanických vlastností.

Při zkoumání vzniku mikrotrhlin byly použity 3 rozdílné teplotní testy vzorků s počátečním obsahem vlhkosti 65 %. Velikost vzorků byla 10 x 10 x 40 mm.

- První skupina vzorků byla pomalu zmrazena na teplotu -35 °C na dobu 24 hodin.
- Druhá skupina byla zmrazena na teplotu -35 °C a byla držena ve zmrazeném stavu 1 týden.
- Třetí skupina vzorků byla zmrazena na teplotu -35 °C na 1 týden. Poté byly vzorky na 12 hodin zahřáty na teplotu 10 °C a znovu na dalších 12 hodin zmrazeny na -35 °C. Toto cyklické ošetřování trvalo další týden.

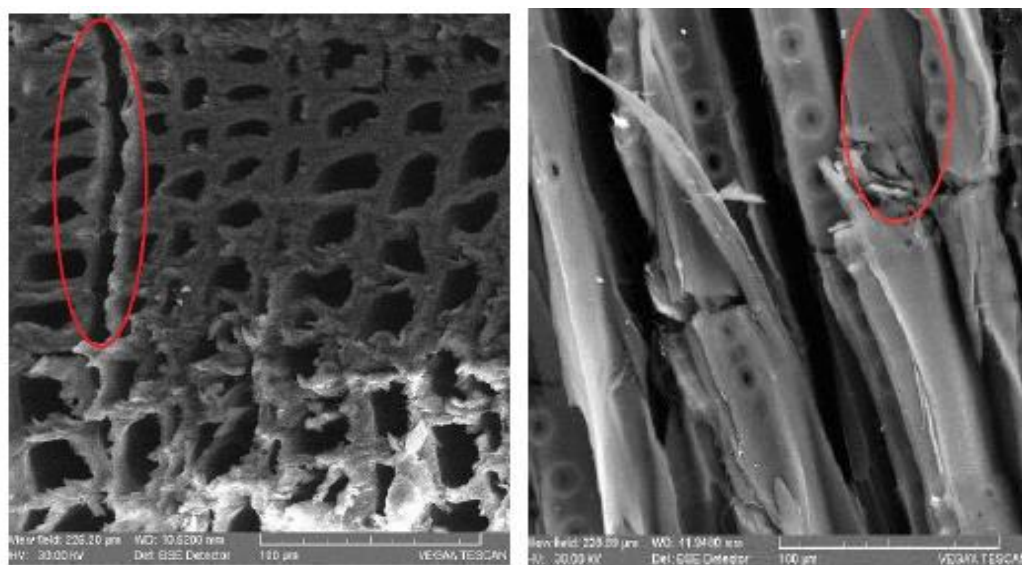
Po ukončení teplotního namáhání vzorků byly vzorky rozmrazeny ponořením do vody o teplotě 10 °C a nařezány do velikosti vzorků pro mikroskopické pozorování 3 x 3 x 3 mm a byly dehydratovány ponořením do různých druhů lázní: 50 %-ethylalkoholová, 70 %-ethylalkoholová, 80 %-ethylalkoholová a lázeň se 100 %-ethylalkoholem a acetonem. Vzorky byly umístěné do každé z této lázni na 7 minut. Poté byly dehydratované vzorky přilepeny na kovový podklad epoxidovým lepidlem s adhezivním přísadkem grafitu.

Při zkoumání testovaných vzorků byly nejviditelnější trhliny nalezeny v příčném řezu a v jednom případě v tangenciálním řezu. Výskyt v příčném řezu byl nejčastěji lokalizován při přechodu mezi jarním a letním dřevem, kde vzniká velká zóna pnutí v důsledku rozdílné hustoty mezi oběma dřevy.

Trhliny, které byly nalezené v první a druhé skupině vzorků, jsou délkově v rozmezí 200-500 μm . U třetí skupiny vzorků došlo k největšímu viditelnému poškození, délka trhlín zde dosahovala 800 μm .

Doba vystavení vzorků nízkým teplotám neměla zásadní vliv na tvorbu trhlín. Trhliny, které se vytvořily po 24 hodinách, nebyly závažnější než u vzorků, které byly teplotně namáhány 7 dnů.

Největší trhliny (800 μm) byly nalezeny u skupiny vzorků, která byla po týdnu mrazení cyklicky namáhána zmrazováním a rozmrazováním.



Obrázek 5, 6 Trhlina v příčném a tg. řezu u cyklicky teplotně namáhaných vzorků
(Szmotku et al. 2011)

Tyto výsledky ukazují, že doba zmrazení vzorku nehraje podstatnou roli při stálé teplotě. Výsledky třetího testu ukazují, že cyklické střídání teploty o 45 ° C vede ke způsobení největšího buněčného poškození. Takovéto poškození může způsobit například střídání denní a noční teploty v zimě (Szmutku et al. 2011).

4.2 Mechanické vlastnosti

4.2.1 Modul pružnosti a mez pevnosti

Modul pružnosti a mez pevnosti jsou dvě důležité vlastnosti dřeva jako konstrukčního materiálu. Předchozí výzkum ukázal, že když teplota klesá pod 0 °C, modul pružnosti a mez pevnosti vzorků se zvyšuje s klesající teplotou. Čím vyšší je vlhkost vzorků, tím větší a rychlejší je růst modulu pružnosti a meze pevnosti.

Vzorky pro zkoušku byly připraveny ze dřeva kmene čerstvě skácené břízy (*Betula platyphylla*) a byly nařezány na rozměry 300 x 20 x 20 mm. Vybrané vzorky neměly defekty a byly upraveny na 5 různých stupňů vlhkosti:

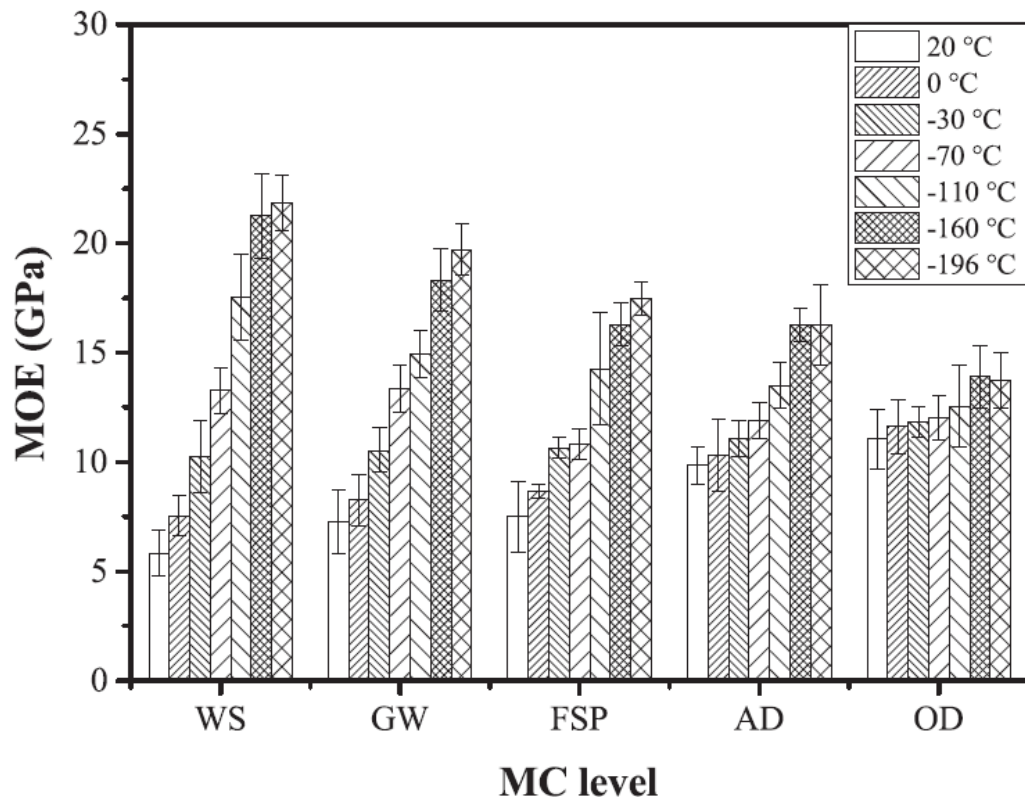
- Vzorky nařezané bez úpravy byly označeny jako GW (green wood) a jejich průměrná vlhkost při měření byla 67 %.
- Druhá skupina vzorků byla po dobu 2 měsíců ponořena ve vodě. Vzorky byly označeny jako WS (water saturated), jejich průměrná vlhkost byla 136 %.
- Třetí skupina byla připravena vysušením vzorků na vzduchu v přístřešku po dobu 2 měsíců, na bod meze hygroskopicity. Tyto vzorky jsou označeny jako FSP (fiber saturated) a jejich průměrná vlhkost 29 %.
- Čtvrtá skupina vzorků byla nejprve umístěna po dobu 2 měsíců ve venkovním přístřešku. Poté byly vzorky umístěny na 2 měsíce do klimatizované místnosti při teplotě vzduchu 20 °C a 65 % relativní vlhkosti. Tyto vzorky byly označeny jako AD (air dried) a měly průměrnou vlhkost 12 %.
- Poslední pátá skupina vzorků byla nejprve umístěna po dobu 2 měsíců pod venkovním přístřeškem a poté byly vzorky umístěny v sušárně při 103 °C po dobu 48 h. Tato skupina vzorků byla označena jako OD (oven dried) a jejich průměrná vlhkost byla 0 % (Zhao et al. 2015).

Vzorky byly testované při teplotách: 20 °C, 0 °C, -30 °C, -70 °C, -110 °C, -160 °C, -196 °C. Pro každou teplotní úroveň zkoušení bylo vybráno 10 vzorků. Jako zdroj pro zmrazení vzorků byl použit válec s kapalným dusíkem. Aby se zabránilo změně obsahu vlhkosti, byly vzorky uzavřeny v plastových sáčcích. Ohyb v tangenciálním směru byl prováděn rychlostí 5 mm/min. až do porušení vzorku.

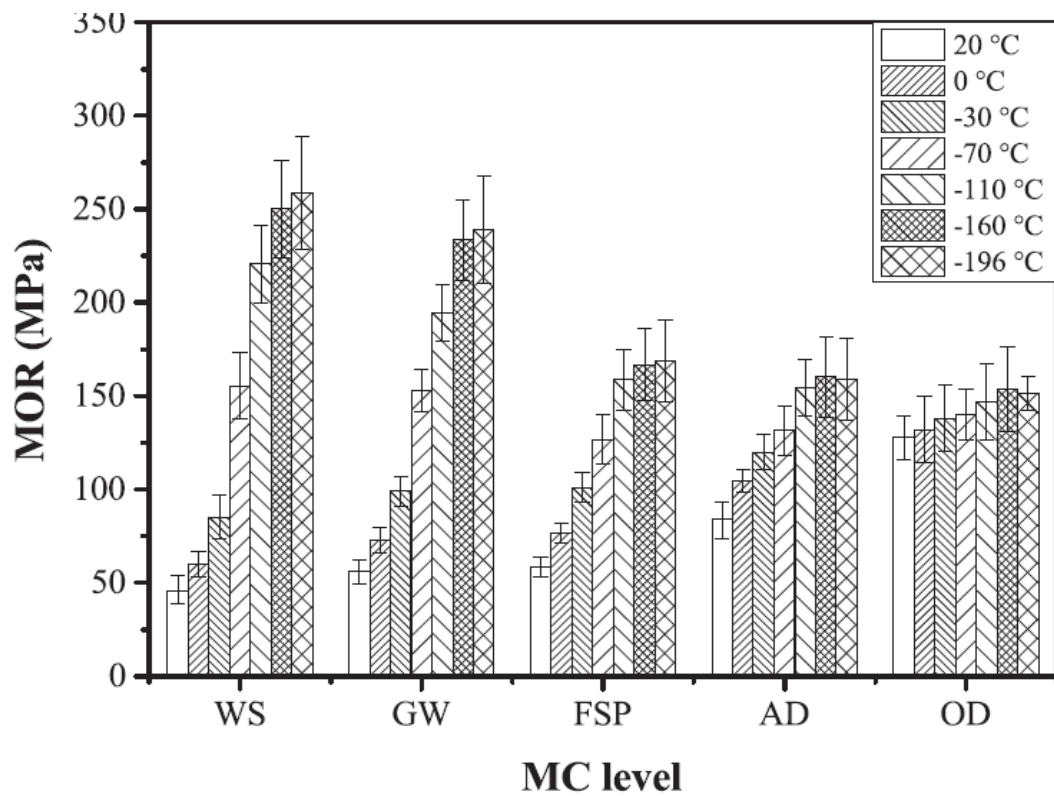
Při zhodnocení výsledků pro jednotlivé teploty a stupně vlhkosti byly nalezeny statisticky významné rozdíly při vlhkosti vzorků ≥ 12 % při všech teplotních stupních zkoušení. K největšímu zvýšení u modulu pružnosti a meze pevnosti došlo při rychlém zmrazení vzorků na teplotu -196 °C (Zhao et al. 2015).

U vzorků vysušených na 0 % vlhkosti byl nárůst meze pevnosti a modulu pružnosti nejpomalejší a nejmenší. A účinky nízké teploty na tyto vzorky nebyly staticky významné. Když vlhkost měřených vzorků překročila mez hygroskopicity, voda volná v lumenech zamrzla a způsobila prudké zvýšení modulu pružnosti a meze pevnosti při porovnání se vzorky, jejichž vlhkost byla na mezi hygroskopicity a nižší. U vzorků plně nasycených vodou byla při teplotě -196 °C naměřena přibližně 2x vyšší hodnota v mezi pevnosti a modulu pružnosti než u vzorků vysušených na 0 % vlhkosti.

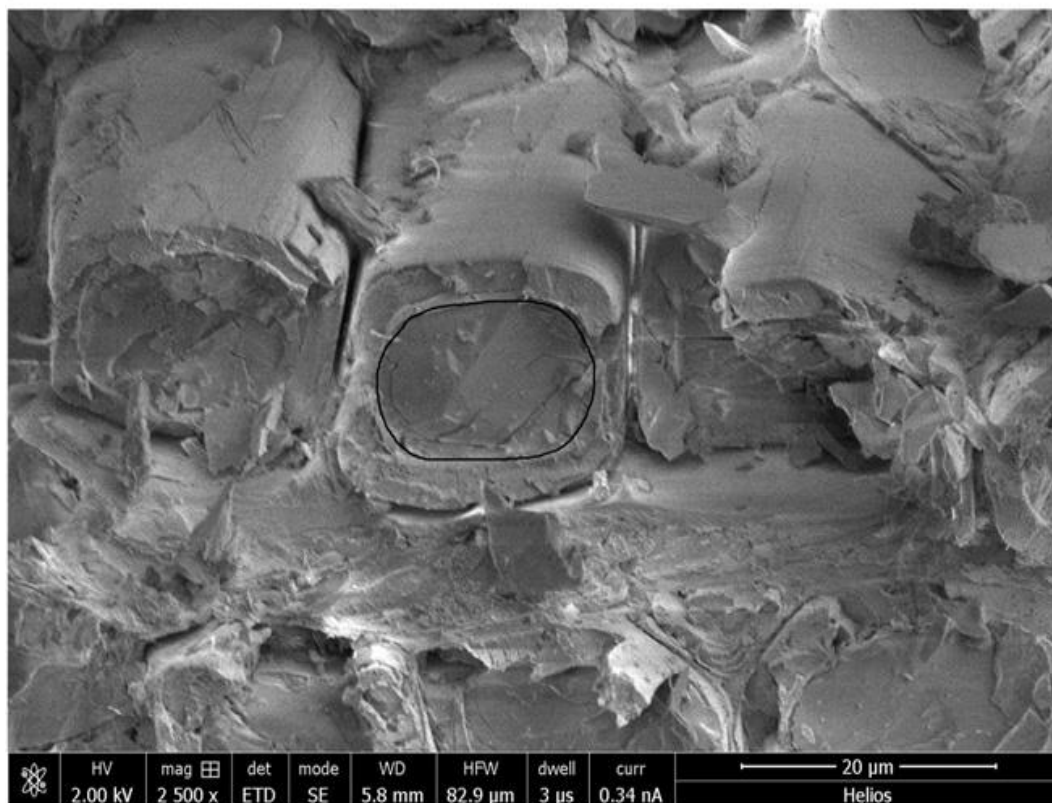
V momentě, kdy došlo k zamrznutí veškeré vody v pórech, se molekulární pohyb celulózy stal obtížný. Což je důvodem, proč je malý rozdíl hodnot mezi teplotami -160 °C a -196 °C (Zhao et al. 2015).



Obrázek 7 Rostoucí modul pružnosti dřeva v ohybu se snižující se teplotou (Zhao et al. 2015)



Obrázek 8 Rostoucí mez pevnosti dřeva v ohybu se snižující se teplotou (Zhao et al. 2015)



Obrázek 9 Zamrzlá voda ve dřevě s vlhkostí 136 % (Zhao et al. 2015)

Tabulka 7 Nejvyšší dosažené hodnoty při teplotě -196 °C (Zhao et al. 2015)

Vlhkost vzorků (%)	Zvýšení modulu pružnosti (%)	Zvýšení meze pevnosti (%)
136	273,7	463,8
67	170,7	328,9
29	126	188,8
12	65,6	92,2
0	24,4	18,6

4.2.2 Modul pružnosti a mez pevnosti běle a jádra

Pro testování vlivu nízkých teplot na modul pružnosti a mez pevnosti jádrového a bělového dřeva byly použity dva druhy dřevin. Použité dřeviny byly: smrk černý (*Picea mariana*) a jedle balzámová (*Abies balsamea*).

Vzorky byly nařezány z 2 kulatin o délce 1,4 m, které byly odříznuty z kmenů ve výšce 1 m od paty stromu. Kulatiny byly s kůrou a konce byly zabaleny v polyethylenu a skladovány se při teplotě -4 °C až do přípravy vzorků.

Kulatina byla bez viditelného poškození a ohybu. Měla minimum suků, soustředné letokruhy a rovná vlákna. Vzorky byly připraveny z jádrového i bělového dřeva obou dřevin pro zkoušení o rozměrech 10 x 10 x 190 mm. Všechny nařezané vzorky byly s rovnými vlákny a bez větších viditelných vad (Hernández et al. 2014).

Tabulka 8 Specifikace kulatin pro výrobu vzorků (Hernández et al. 2014)

Druh	Vlhkost (%)		Hustota (g/cm ³)		Šířka letokruhu (mm)	
	Jádro	Běl	Jádro	Běl	Jádro	Běl
Černý smrk	50	139	417	425	1,38	0,88
Jedle balz.	105	178	357	351	1,51	1,43

Vzorky byly zmrazovány z teploty 20 °C na nejnižší teplotu -30 °C s 10 stupňovým teplotním intervalem. Po zmrazení na určenou teplotu byly vzorky zabaleny do polyesterové pěny a uchovávány v chladné místnosti až do začátku mechanické zkoušky.

Tabulka 9 Rychlost zmrazování vzorků (Hernández et al. 2014)

Konečná teplota	Rychlost zamražení
-30 °C	1,7 °C/min
-20 °C	3,1 °C/min
-10 °C	4 °C/min
0 °C	4,7 °C/min

Mezi vyjmutím vzorků z chladné místnosti a časem do ukončení zkoušky uběhly zhruba 2 minuty. Rychlost aplikované zátěže byla 5 mm/min, až do úplného selhání vzorku (Hernández et al. 2014).

Při porovnání mezi oběma vzorky nad bodem mrazu mají větší hodnoty v modulu pružnosti a mezi pevnosti vzorky smrku černého. Důvodem je větší hustota vzorků smrku.

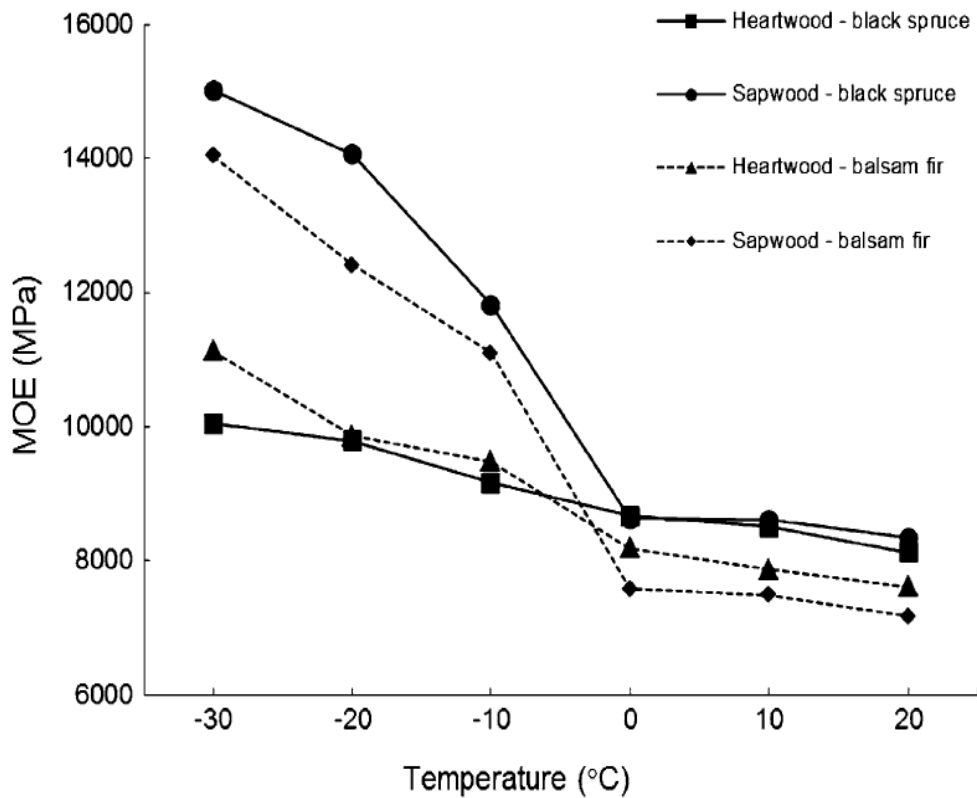
Naopak při poklesu teploty pod 0 °C byly více ovlivněny mechanické vlastnosti vzorků jedle balzámové. Výsledky tak potvrdily, že běl má citlivější reakci na změnu teplot než jádrové dřevo a je také odolnější proti zatížení. Opět platí, že vyšší vlhkost bělového dřeva byla zodpovědná za toto chování (Hernández et al. 2014).

Tabulka 10 Změna při jednotlivých teplotách (Hernández et al. 2014)

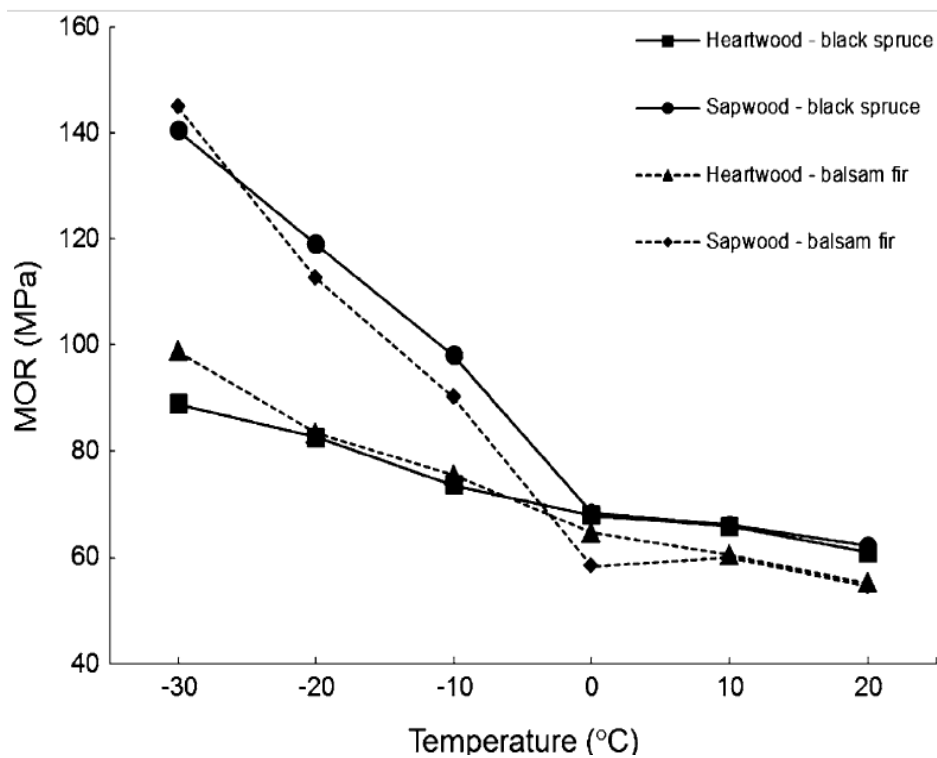
Smrk černý	Mez pevnosti		Modul pružnosti	
	Jádrový vzorek (MPa)	Vzorek běle (MPa)	Jádrový vzorek (MPa)	Vzorek běle (MPa)
-30	89	140	10,045	15,012
-20	83	119	9,786	14,064
-10	74	98	9,164	11,814
0	68	68	8,671	8,63
10	66	66	8,506	8,605
20	62	61	8,121	8,345

Tabulka 11 Změna při jednotlivých teplotách (Hernández et al. 2014)

Jedle balzámová	Mez pevnosti		Modul pružnosti	
	Jádrový vzorek (MPa)	Vzorek běle (MPa)	Jádrový vzorek (MPa)	Vzorek běle (MPa)
-30	99	145	11,119	14,04
-20	83	113	9,864	12,413
-10	76	90	9,482	11,89
0	65	58	8,189	7,577
10	60	60	7,867	7,486
20	55	55	7,611	7,169



Obrázek 10 Zvyšující se modul pružnosti v ohybu se snižující se teplotou u vzorků běle a jádra ze smrku a jedle (Hernández et al. 2014)



Obrázek 11 Zvyšující se modul pružnosti v ohybu se snižující se teplotou u vzorků běle a jádra ze smrku a jedle (Hernández et al. 2014)

4.2.3 Vliv cyklického zmrazování a rozmrazování na modul pružnosti

Vzorky břízy při 4 různých stupních vlhkosti (136 %, 67 %, 12 %, 0 %) byly uzavřeny do plastových sáčků a na 72 hodin byly umístěny do nádrže s tekutým dusíkem o teplotě -196 °C. Poté byly na 24 hodin umístěny do vyhřáté místnosti a jejich naměřená teplota v jádře pomocí infračerveného teploměru byla 23,2 °C. Takto byl proveden 1 cyklus ošetření vzorků. Vzorky byly ošetřené max. 4krát a byly porovnávány s neošetřenými vzorky (Zhao et al. 2015).

Tabulka 12 Vliv teplotního ošetření na modul pružnosti (Zhao et al. 2015)

Průměrná vlhkost (%)	Neošetřené (MPa)	Vzorky 1x ošetřené (MPa)	Vzorky 2x ošetřené (MPa)	Vzorky 3x ošetřené (MPa)	Vzorky 4x ošetřené (MPa)
136	11,75	11,87	12,55	11,81	11,62
67	12,73	12,85	13,52	12,89	12,87
12	13,42	13,78	14,06	13,51	13,64
0,6	14,77	15,21	14,85	15,02	14,92

Modul pružnosti se zvýšil u všech vzorků po prvním ošetření. K největšímu zvýšení modulu pružnosti (s výjimkou vzorků, které byly vysušené na 0,6 %) došlo po 2. ošetření. U vzorků s vlhkostí 136 % o 0,8 MPa, u vzorků s vlhkostí 67 % o 0,79 GPa a u vzorků s vlhkostí 12 % o 0,64 MPa. Pouze u vzorků s 0% vlhkostí došlo k největšímu zvýšení modulu pružnosti po prvním ošetření, a to o 0,46 MPa (Zhao et al. 2015).

Při testu se potvrdilo, že při pokojové teplotě, když je vlhkost vzorků přes mez hygroskopicity, modul pružnosti vzorků ovlivněn vlhkostí není. Nicméně když je obsah vlhkosti pod mezí hygroskopicity, zvýšení vlhkosti způsobí snížení modulu pružnosti. Procentuální vztah je, že při snížení vlhkosti o 1 % se zvýšil modul pružnosti o 1,5 %. Vzorky s vlhkostí 67 % a 136 % byly více ovlivněny ošetřením než vzorky s vlhkostí pod mezí hygroskopicity.

Na základě několika porovnání pomocí Duncanova statistického testu nebyly pro každou úroveň vlhkosti nalezeny žádné významné změny v modulu pružnosti. Vliv opakovaného zmrazování a rozmrazování také neměl statisticky významný vliv na modul pružnosti.

Jako důvod zvýšení modulu pružnosti autoři uvádějí snížení vzdálenosti molekul, jak se společně s klesající teplotou zvyšují mezimolekulární síly, ve srovnání se vzorky, které nebyly ošetřené. Druhým důvodem je, že ošetření nízkou teplotou stabilizuje krystalovou strukturu a redukuje pnutí (Zhao et al. 2015).

4.2.4 Vliv nízkých teplot na pevnost, tvrdost a modul pružnosti

Vzorky použité v této studii jsou ze smrku (*Picea abies*). Vzorky byly nařezány ze tří stromů, které byly ze stejné oblasti, byly pokáceny ve stejném období a zvoleny tak, aby měly přibližně tytéž charakteristiky věku a růstu (Szmotku et al. 2013).

Tabulka 13 Kmeny použité pro výrobu vzorků (Szmotku et al. 2013)

charakteristika	Kmen 1	Kmen 2	Kmen 3
Počáteční vlhkost (%)	158	159	150
Průměrná šířka letokruhů (mm)	2,9	3,25	2,57
Podíl letního dřeva (%)	20,68	19,28	18,66
Stáří (v letech)	67	62	60

Ze stromů byly nařezané vzorky ve tvaru desek o rozměrech: 500 x 80 x 35 mm³ a 500 x 80 x 65 mm³, všechny nařezané vzorky byly bez defektů.

Při prvním testu byly zkoumány účinky rychlého zmrazení. Pro tento účel byly použity desky z prvního kmene. Polovina z nich byla zmrazena v klimatizační komoře na teplotu -25 °C s rychlou teplotou zamrazování -10 °C/h.

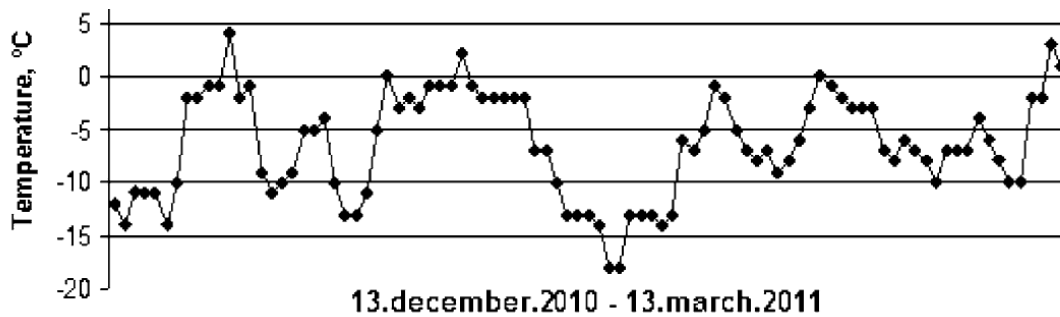
Desky byly poté drženy ve zmraženém stavu ještě týden. Obě skupiny desek, jak zmrazené, tak kontrolní, byly vysušeny na 12% vlhkost.

Skupina desek z druhého stromu byla ošetřena stejným způsobem, s tím rozdílem, že zamrazování bylo pomalé. Rychlost mražení do -25 °C byla -1 °C/h. Následným porovnáním, mezi prvním a druhým zmrazením, pak vyšel vliv rychlosti zamrazování na dřevo.

Skupina desek z třetího kmene byla vystavena po dobu 3 zimních měsíců (13. prosinec – 13. březen) venku na otevřeném prostranství. Tyto desky byly vlivem rozdílných teplot cyklicky zmrazovány a rozmrazovány. Nejvyšší a nejnižší teplotní interval během tohoto sledování byly: +4 °C a -18 °C. Ke zmrazování desek docházelo

pomalu, protože maximální teplotní rozdíl mezi dnem a nocí nepřekročil rozdíl 12 °C (od -4 °C do -16 °C). Tyto výsledky odpovídají rychlosti zamrznání -1 °C/h. Díky tomu mohly být porovnány s druhou skupinou zmrazených vzorků.

U obou skupin byla rozdílná doba a teplota vystavení nízkým teplotám. Teplotní změny počasí u třetí skupiny vzorků jsou zaznamenány v obrázku (Szmotku et al. 2013).



Obrázek 12 Změna venkovní teploty ve sledovaném období (Szmotku et al. 2013)

Všechny desky ze všech tří kmenů byly před nařezáním na zkušební vzorky drženy při 12% vlhkosti. Následně byly nařezány na vzorky, které rozměrově odpovídají normě pro zkoušení mechanických vlastností. Z mechanických vlastností pro zkoušení dřeva bylo vybráno 6 mechanických namáhání, které byly vyhodnoceny jako důležité při namáhání v dřevěných konstrukcích.

- Pro pevnost v ohybu a modul pružnosti byly připraveny vzorky o rozměrech 300 x 20 x 20 mm³.
- Pro pevnost v tahu kolmo na vlákna, v radiálním i tangenciálním směru byly nařezány vzorky o rozměrech 70 x 20 x 20 mm³.
- Pro zkoušení pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny, byly připraveny vzorky 60 x 20 x 20 mm³.
- Pro pevnost ve smyku rovnoběžně s vlákny, v radiálním i tangenciálním směru 50 x 30 x 20 mm³.
- Pro zkoušení tvrdosti podle Janka byly rozměry vzorků 50 x 50 x 50 mm³.

Porovnáním vzorků, které byly zmrazeny vysokou rychlostí, s kontrolními vzorky, které byly bez teplotního ošetření, bylo zjištěno, že došlo k mírnému snížení u všech sil, ale žádná z hodnot jimi nebyla výrazně ovlivněna.

- Pevnost v ohybu byla snížena o 4 % a hodnota modulu pružnosti o 2 %.
- Při pevnosti v tahu došlo ke snížení o 1,6 % v radiálním směru a o 6 % v tangenciálním směru.
- Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny se snížila o 4 %.
- Při testování tvrdosti podle Janka došlo ke snížení v příčném směru o 5 %, v tangenciálním směru pak o 1,6 % a o 0,87 % v radiálním směru.

Na rozdíl od rychlého zmrazení, při pomalém zmrazení výsledky ukazují výrazné snížení všech vybraných vlastností.

- Pevnost v ohybu byla snížena o 20 % a modul pružnosti byl snížen o 24 %.
- Při pevnosti v tahu došlo ke snížení o 9 % v radiálním směru a o 10 % v tangenciálním směru.
- U pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny došlo ke snížení o 31 %.
- Pevnost ve stříhu se snížila v radiálním směru o 30 % a v tangenciálním směru o 18 %.
- Při zkoušce tvrdosti podle Janka došlo ke snížení tvrdosti v transversálním směru o 34 %, o 17 % v tangenciálním směru a o 18 % v radiálním směru.

Tyto výsledky jasně ukazují velký vliv mrazicí rychlosti, což dokazuje, že pomalá rychlost zmrazování postihuje kompaktnost konstrukcí ze dřeva a vede k významným pevnostním ztrátám (Szmotku et al. 2013).

Největší pokles mechanických vlastností při testování byl zjištěn po vystavení desek přírodním klimatickým podmínkám v průběhu tří měsíců:

- Pevnost v ohybu byla snížena o 24 % a modul pružnosti o 37 %.
- U pevnosti v tahu došlo ke snížení o 6 % v radiálním směru a o 4 % v tangenciálním směru.
- Pevnost v tlaku rovnoběžně s vlákny byla snížena o 37 %.
- Při pevnosti ve smyku došlo ke snížení o 5 % v radiálním a o 2 % v tangenciálním směru (Szmotku et al. 2013).

Podle těchto výsledků dlouhodobé vystavení negativním teplotám zvyšuje škodlivé účinky zmrazení na buněčnou membránu a méně působí na odolnost vzorku při zkoušení v tahu. Nepatrně lepší výsledky, pokud jde o pevnost v tahu, mohou být připisány nižší spodní hranici negativní teploty, která při přírodním mrazení nepřekročila $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatímco při pomalém umělém mrazení tvořila spodní teplotní hranice, které byly vzorky vystaveny, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Szmotku et al. 2013).

Tabulka 14 Změna hodnot mechanických vlastností (Szmotku et al. 2013)

Druh zkoušky	Nezmrazené vzorky (MPa)	Rychle zmrazené vzorky (MPa)	Pomalou zmrazené vzorky (MPa)	Přírodně zmrazené vzorky (MPa)
Pevnost v ohybu	66,7	64	53,1	50,6
Modul pružnosti	9203,6	9002,6	6967,7	5758,7
Pevnost v tahu rad.	1,4	1,4	1,3	1,3
Pevnost v tahu tg.	1,6	1,5	1,5	1,6
Pevnost v tahu rovnoběžně s vlákny	46,7	45	31,9	29,6
Pevnost ve smyku rad.	6,4	6,3	5,4	6
Pevnost ve smyku tg.	6,9	6,9	5,7	6,8
Tvrdost podle Janka čelní	25,8	24,4	18,2	20,8
Tvrdost podle Janka tg.	16,1	15,8	13,3	13,3
Tvrdost podle Janka rad.	13,6	13,5	11,1	11,4

Z uvedených výsledků jasně vyplývá, že vysoká rychlost tuhnutí nemá významný vliv na mechanické vlastnosti dřeva. Pomalé tuhnutí však významně redukuje všechny mechanické vlastnosti dřeva, zejména pevnost v ohybu o 20 %, modul pružnosti v ohybu o 24 %, pevnost v tlaku o 31 %, ale pevnost v tahu přibližně o 10 %. Podle podobnosti s potravinovým průmyslem při zmrazování může být snížení mechanických vlastností dřeva pouze při pomalém zamrazování vysvětlen tvorbou větších ledových krystalů v lumenech. Tyto krystaly jsou pak schopné způsobit škodu ve struktuře buněčné stěny (Szmotku et al. 2013).

Ačkoli současný výzkum poskytuje pouze nepřímý důkaz o škodlivosti pomalého zmrazení, rozdíl v rychlostech mrazení zatím tuto teorii podporuje.

5. Závěr

U vlivu nízkých teplot na mechanické vlastnosti dřeva. Je předpoklad, že při rychlém zmrazení dochází k posilování mechanických vlastností dřeva vlivem tvorby ledu v lumenech a při extrémně nízké teplotě dochází i k zamrznání vody vázané.

Při pomalém zamrznání vody je předpoklad, že dochází k degradaci mechanických vlastností vlivem poškození buněčných stěn díky tvorbě větších ledových krystalů. K největší degradaci pak dochází při opakovaném pomalém zamrznání a rozmrznání dřeva. Tento stav je typický pro uskladnění dřeva v zimních měsících na otevřeném prostranství nebo pro dekorační i nosné dřevěné konstrukce.

V případě, kdy je obsah vody pod mezí hygroskopicity, dochází ke zvyšování mechanických vlastností se snižující se teplotou díky přirozenému tuhnutí buněk vlivem nízké teploty.

Se snižující se teplotou přebírá větší podíl na vyztužení dřeva větší vlhkost vzorku, ne hustota dřeva jako u teplot nad bodem mrazu. Tyto poznatky jsou využitelné například u dřevních konstrukcí nebo u skladování a obrábění dřeva v zimních měsících a do budoucna otvírají velký prostor pro jejich další výzkum.

Použitá literatura:

M. Babiak, D. Chovanec, S. Kurjatko, A. Požgaj. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 2. vyd. Príroda Bratislava, 1997. s. 485. ISBN 8007009604

M. Budakçı, S. Korkut. Effect of High-Temperature Treatment on the Mechanical Properties of Rowan (*Sorbus aucuparia* L.) *Wood, Drying Technology*. 2009, vol 27, no. 11, s 1240. ISSN 0737-3937.

L. Gandelová, P. Horáček, J. Šlezingerová. *Nauka o dřevě*. 3. vyd. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2009. 175 s. ISBN 978-80-7375-312-2

R. E. Hernández, L. Passarini, A. Koubaa, 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.

P. Horáček. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 1. vyd. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 1998. 128 s. ISBN 80-7157-347-7

M. Ispas, M. Campean, Experimental research on sawing frozen wood, *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II*, 2014, vol. 7. no.1, s.51, ISSN 2065-2135

F. Lysý, P. Jírů. *Nauka o dřevě*. 1. vyd. Státní nakladatelství technické literatury. 1954. 737 s.

A. Matovič. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva a materiálu na bázi dřeva*. ES VŠZ v Brně. 1993. 212 s.

P. Neurberger, D. Adamovský, R. Adamovský. *Termomechanika*. 1. vyd. Česká zemědělská univerzita v Praze. 2007. 250 s. ISBN 978-80-213-1634-8

L. M. *Pereygin, Náuka o dreve*. 2. vyd. Vyd. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry 444 s.

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

M. B. Szmotku, M. Campean, A. V. Sandu, Microstructure modifications induced in spruce wood by freezing. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering. Series II*. 2014. vol. 7, no. 1, s. 51, ISSN 2065-2135

J.Šlezingerová, L. Gandelová. *Stavba dřeva*. 1. vyd. 2002. dotisk. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. 2005. 187 s. ISBN 80-7157-636-0

I. S. Vanin. *Nauka o dřevě*. 1. vyd. 1955. Státní nakladatelství technické literatury. 428 s.

L. Zhao, J. Jiang, J. Lu, T. Zhan. Flexural property of wood in low temperature environment. *Cold Regions Science and Technology*. 2015, vol. 116, no. 8, s. 65. ISSN 1945-8398.

L. Zhao, J. Lu, Y. Zhou, J. Jiang. Effect of Low Temperature Cyclic Treatments on Modulus of Elasticity of Birch Wood. *Life Science Weekly*. 2015, ISSN 1552-2466