

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

**Pevnostní vlastnosti vrstvených materiálů na bázi
dřeva a nedřevních komponentů**

Bakalářská práce

Autor: Filip Žíla

Vedoucí práce: Ing. Adam Sikora

2019

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Filip Žíla

Podnikání ve dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu

Název práce

Pevnostní vlastnosti vrstvených materiálů na bázi dřeva a nedřevních komponentů.

Název anglicky

Strength properties of layered wood-based and non-wood-based components

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je zhodnocení vlivu vybraných faktorů, jako druh dřeviny (Buk), tloušťka materiálu (5 a 9 mm), použitý nedřevní komponent (Carbon), stupeň zhuštění (10, 20%) a jejich slepení na základní mechanické charakteristiky zjišťované tří-bodovým ohybem (modul pružnosti, ohybová pevnost) zhuštěného rostlého dřeva spolu s nedřevním komponentem a zhuštěného vrstveného dřeva spolu s nedřevním komponentem.

Metodika

1. Analýza literních zdrojů s následným teoretickým rozбором dané problematiky.
2. Příprava zkušebních těles a jejich testování
3. Statistické vyhodnocení získaných dat
4. Zhodnocení výsledků spolu s diskusí
5. V závěru popsat přínos pro vědu a pro praxi

Doporučený rozsah práce

40 stran

Klíčová slova

Buk, vrstvený materiál, zhuštěné dřevo, stupeň zhuštění, nedřevní komponenty, carbon, ohybové charakteristiky, modul pružnosti, ohybová pevnost

Doporučené zdroje informací

Gaff, M., Babiak, M., (2017). "Methods for determining the plastic work in bending and impact of selected factors on its value", Composite Structures, 163(1):410-422, November 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.036>

Gaff, M., Babiak, M., (2018). "Tangent modulus as a function of selected factors", Composite Structures, 163 (1):410-422, November 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.02.052>

Gaff, M., Gašparík, M., Babiak, M., Vokatý, V. (2017). "Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region", Composite Structures, 163(1):410-422, March 2017 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.052>

Předběžný termín obhajoby

2018/19 ZS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Adam Sikora

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Konzultant

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Elektronicky schváleno dne 14. 3. 2019

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí ústavu

Elektronicky schváleno dne 18. 3. 2019

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 15. 04. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Pevnostní vlastnosti vrstvených materiálů na bázi dřeva a nedřevních komponentů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Adama Sikory. a použil jsem prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že zveřejněním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 20.4.2019

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Adamovi Sikorovi za cenné rady, věcné připomínky a odborné vedení mé práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing Milanu Gaffovi PhD za spolupráci při získávání údajů pro teoretickou část práce. Poděkování také patří mé rodině, která mě podporovala ve studiu.

Abstrakt ve státním jazyce

V současné době je velmi rozšířený trend použití kompozitních materiálů na bázi dřeva. Pro správnou aplikaci těchto materiálů je důležité znát jejich pevnostní vlastnosti. První část této bakalářské práce se zabývá teoretickým rozбором problematiky vrstvení, zhušťování a použití nedřevního komponentu na bázi uhlíku. Druhá část práce se zabývá experimentem, jehož cílem bylo doložit popisované poznatky z teoretické části. V rámci experimentu byly vytvořeny soubory zkušebních těles, které byly zhuštěné, vrstvené a podlepené prošívanou uhlíkovou tkaninou. Z výsledků práce jsme zjistili, že zhušťování dřeva a použití nedřevního komponentu mají významný vliv na pevnostní vlastnosti dřeva a jsou významným faktorem při tvorbě materiálů na bázi dřeva, které jsou ve svých aplikacích namáhané na ohyb.

Klíčová slova: buk, vrstvený materiál, zhuštěné dřevo, stupeň zhuštění, nedřevní komponenty, carbon, ohybové charakteristiky, modul pružnosti, ohybová pevnost

Abstrakt v cizím jazyce

Nowadays, the use of wood-based composite materials is widespread. For proper application of these materials it is important to know their strength properties. The first part of this thesis deals with the theoretical analysis of the problems of layering, densification and use of carbon -based component. The second part of the thesis deals with an experiment, the aim of which was to demonstrate the knowledge from the theoretical part. In the experiment, sets of test specimens were made using densification, laminating and strengthening with a quilted carbon fabric. From the results of the work we have found that densification of wood and use of non-wood component have a significant influence on wood strength properties and are an important factor in the creation of wood-based materials that are prone to bending in their applications.

Key words: beech, laminated material, densified wood, degree of densification, non-wood component, carbon, bending characteristics, modulus of elasticity, bending strength

Obsah

_Toc6488657Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	12
1 Úvod	13
2 Charakteristika Buku lesního.....	15
2.1 Obecná charakteristika	15
2.2 Makroskopická stavba	15
2.3 Mikroskopická stavba.....	16
2.4 Submikroskopická stavba	16
2.5 Chemická stavba	17
3 Vlastnosti dřeva	18
3.1 Fyzikální vlastnosti.....	18
3.1.1 Hustota.....	18
3.1.2 Vlhkost	19
3.2 Mechanické vlastnosti	21
3.2.1 Deformace	21
3.2.2 Pružnost	22
3.2.3 Pevnost	23
3.3 Napětí při ohybu.....	23
3.3.1 Moduly pružnosti	24
3.3.2 Mez úměrnosti	27
3.3.3 Mez pevnosti.....	27
4 Modifikace dřeva za účelem zvýšení mechanických vlastností	28
4.1 Fyzikální modifikace dřeva	28
4.1.1 Tepelná modifikace dřeva	28
4.2 Mechanické modifikace dřeva	28
4.2.1 Modifikace tlakem	28
4.3 Chemické modifikace dřeva	29
4.3.1 Modifikace acetylací	29
4.3.2 Modifikace amoniakem.....	29
4.3.3 Modifikace impregnací.....	29

4.4	Fyzikálně-mechanické modifikace dřeva	29
4.4.1	Zhušťování.....	29
4.5	Zhuštěné dřevo	30
5	Kompozitní materiály na bázi dřeva	32
6	Vrstvení dřeva.....	33
6.1	Vrstvené dřevo	33
7	Vyztužování dřeva nedřevním komponentem	37
7.1	Carbon	37
7.1.1	Příprava prekurzoru.....	37
7.1.2	Stabilizace.....	38
7.1.3	Karbonizace	38
7.1.4	Grafitizace	38
7.1.5	Povrchová úprava.....	38
8	Lepidla pro kompozitní materiály.....	39
8.1	PVAc lepidla	39
9	Metodika	40
9.1	Použité materiály.....	40
9.1.1	Dřevo	40
9.1.2	Nedřevní komponent	40
9.1.3	Lepidlo.....	41
9.2	Příprava zkušebních těles	41
9.3	Tříbodový ohyb.....	44
9.4	Výpočet sledovaných charakteristik.....	45
9.4.1	Pevnost v ohybu	45
9.4.2	Modul pružnosti.....	46
10	Výsledky a diskuse	47
11	Závěr	50
12	Seznam použité literatury	51
13	Přílohy	55

Seznam obrázků

Obrázek 1 Fagus Sylvatica, Tangenciální řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)	16
Obrázek 2 Fagus Sylvatica, příčný řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)	16
Obrázek 3 Fagus Sylvatica, radiální řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)	16
Obrázek 4 pórovitost a dřevní substance různých dřevin, 1 - lehké dřevo, 2 –jarní dřevo jehličnanů, 3 – smrk, 4 – olše, 5 – modřín, 6 – buk, 7 – letní dřevo jehličnanů, 8 – nejtěžší bělové dřevo, 9 – nejtěžší jádrové dřevo, 10 – dřevní substance, (Šlesingerová & Horáček, 2002).....	19
Obrázek 5 rovnovážná vlhkost dřeva, smrk, (NIS, Nábytkářský informační systém, 2013)	21
Obrázek 6 Rozložení napětí při radiálním ohybu, (Požgaj <i>et al.</i> 1993).....	23
Obrázek 7 pracovní diagram (Požgaj <i>et al.</i> 1993).....	26
Obrázek 8 Závislost modulu pružnosti na vlhkosti a hustotě, (Požgaj <i>et al.</i> 1993)	27
Obrázek 9 rozdělení materiálů na bázi dřeva, (Böhm <i>et al.</i> 2012)	33
Obrázek 10 Halový vazník z KERTO-S s velkým střešním přesahem, (Metsä wood, 2019)	34
Obrázek 11 KERTO-S, (Metsä wood, 2019).....	34
Obrázek 12, Stavba sportovní haly za použití vrstvených nosníků, Oulo, Finsko, (www.puuinfo.ee)Obrázek 13, KERTO-S, (Metsä wood, 2019)	34
Obrázek 14, Stavba sportovní haly za použití vrstvených nosníků, Oulo, Finsko, (www.puuinfo.ee)	34
Obrázek 15, lamela z bukového dřevaObrázek 16, Stavba sportovní haly za použití vrstvených nosníků, Oulo, Finsko, (www.puuinfo.ee)Obrázek 17, KERTO-S, (Metsä wood, 2019)	34
Obrázek 18, Stavba sportovní haly za použití vrstvených nosníků, Oulo, Finsko, (www.puuinfo.ee)Obrázek 19, KERTO-S, (Metsä wood, 2019)	34
Obrázek 20 Stavba sportovní haly za použití vrstvených nosníků, Oulo, Finsko, (www.puuinfo.ee)	35
Obrázek 21 lamela z bukového dřeva	40
Obrázek 22 prošívaná tkanina Sikawrap 150 C/30,	40
Obrázek 23 Popis zkušebních těles neslepených	41
Obrázek 24 Popis zkušebních těles slepených.....	42
Obrázek 25, Planžety pro výškové nastavení lisu	42
Obrázek 26, Slepění lamel pomocí ztužidel	44
Obrázek 27 testovací zařízení TIRA	45

Obrázek 28, Grafické znázornění modulu pružnosti	
Obrázek 29, testovací zařízení TIRA	45
Obrázek 30, testovací zařízení TIRA	45
Obrázek 31, Grafické znázornění modulu pružnosti	
Obrázek 32, testovací zařízení TIRA	45

Seznam tabulek

Tabulka 1, vyhodnocení ohybových zkoušek vrstveného dřeva, (Gaff, a další, 2016), Hodnoty v závorkách jsou variační koeficienty v %	35
Tabulka 2, Výsledky modulu pružnosti.....	47
Tabulka 3, výsledky modulu pružnosti	48

1 Úvod

V současné době je čím dál více rozšířený trend používání kompozitních materiálů na bázi dřeva. Tento jev je možné vysvětlit tím, že tyto materiály mají lepší vlastnosti, než masivní dřevo, a některé dokonce svými vlastnostmi předčí tradiční materiály používané v náročných konstrukčních aplikacích, jako je například kov (Sandberg *et al.* 2018). Dalším důvodem, proč se kompozitní materiály na bázi dřeva dostávají do popředí, je fakt, že jejich výroba je šetrnější k životnímu prostředí a napomáhají k lepšímu hospodaření s obnovitelnými zdroji naší planety. Je také možné je vyrábět ve velkých rozměrech a do jejich složení zakomponovat retardéry hoření a další látky prodlužující jejich životnost (Böhm *et al.* 2012). Jedním z nejpoužívanějších procesů, při tvorbě kompozitních materiálů je vrstvení, které spočívá ve skládání jednotlivých vrstev dřeva na sebe při zachování orientace vláken v jednom směru (Sandberg *et al.* 2018).

Po tisíce let se dřevo používalo ve více, či méně upravené podobě k výrobě nástrojů, zbraní, dopravních prostředků, nábytku a dalších předmětů nezbytných k životu člověka (Gorg Blanc, 2001). Dřevo má celou řadu kladných vlastností. Mezi tyto vlastnosti bychom mohli zařadit nízkou hmotnost, vysokou pevnost, pružnost, snadnou opracovatelnost, možnost plastifikace, nízkou tepelnou a elektrickou vodivost. Je také příjemné na dotek a má charakteristickou vůni, díky čemuž plní nejen funkci užitnou, ale i estetickou (Požgaj *et al.* 1993).

Ačkoliv je dřevo jako materiál spjaté s činností člověka už od pradávna a má celou řadu kladných vlastností, v dnešní době je zapotřebí, aby svými vlastnostmi konkurovalo ostatním materiálům. Z tohoto důvodu dnes existují mnohé způsoby modifikace dřeva, jejichž účelem je zlepšit hlavně jeho mechanické, ale i fyzikální a estetické vlastnosti. Mezi metody modifikace dřeva bychom mohli zařadit například zhušťování, jehož cílem je zvýšení hustoty dřeva a tím zlepšení jeho ohybových vlastností a zároveň zmenšení jeho objemu. Modifikované dřevěné materiály se také mohou kombinovat pomocí lepení. K tomu slouží celá řada lepidel s rozdílnými vlastnostmi a oblastmi použití (Böhm *et al.* 2012).

Kompozitní materiály na bázi dřeva můžeme vyztužovat nedřevním komponentem, který má oproti neupravenému dřevu výrazně lepší mechanické vlastnosti. Nejčastěji se jedná o sklolaminát, carbon nebo plast. Tyto materiály se vyznačují vysokou pevností, malými rozměry a nízkou hmotností. Jejich použitím v kombinaci se dřevem je možné získat nový materiál, jehož mechanické vlastnosti jsou výrazně lepší, než u neupraveného dřeva.

Používání carbonu, jako vyztužujícího prvku dřeva je stále předmětem výzkumů a není pochyb o potenciálním přínosu jeho využití (Sandberg *et al.* 2018).

V práci jsme se zaměřili na vlastnosti a modifikace buku lesního, který byl zhuštěný na 10 % a 20 %, vrstvený a podlepený prošívanou uhlíkovou tkaninou.

2 Charakteristika Buku lesního

2.1 Obecná charakteristika

Buk lesní (*Fagus Sylvatica* L.) je druhá nejrozšířenější listnatá dřevina rostoucí na území České republiky a je zde původním druhem. Jedná se o opadavý, jednodomý, až 35 metrů vysoký strom. Má kulovitou nebo metlovitou korunu a přímý kmen. Jeho borka je šedavá, hladká. Listy má eliptické, celokrajné, jeho plody jsou trojboké nažky-bukvice, uložené v dřevnaté číšce. Vyskytuje se v listnatých i smíšených lesích na čerstvých, vlhkých, humózních a minerálně bohatých půdách. Buk je statný strom dožívající se až 400 let a je nejpěstovanější listnatou dřevinou u nás. Má tvrdé dřevo využívající se hojně v dřevozpracujícím a nábytkářském průmyslu (Kocián, 2018).

Jeho dřevo je tvrdé a těžké, s hustotou pohybující se kolem 720 kg/m³ při relativní vlhkosti 12 %. Má světlou, až narůžovělou pleťovou barvu, bez výrazné kresby letokruhů, zato s výraznými dřevnými paprsky, které jsou dobře viditelné ve formě krátkých černých čárek na radiálním i tangenciálním řezu. Je velmi vhodné k ohýbání za pomoci paření/vaření, dobře se moří, impregnuje, opracovává a zastupuje velké procento ve výrobě, nejen ohýbaného, nábytku (Gryc *et al.* 2008).

Hůře se suší (má sklon k tvorbě trhlin a k borcení). Bukové dřevo může trpět vadami jako jsou nepravé jádro nebo reakční dřevo, které mají vliv na jeho pevnost, pružnost a další vlastnosti (Lesy ČR, 2019).

2.2 Makroskopická stavba

Buk je roztroušeně pórovitá listnatá dřevina, má bělové dřevo, u starých stromů se často vyskytuje nepravé jádro. Dřevo je narůžovělé, nahnědlé, až červenohnědé barvy. Poměrně dobře je zřetelná hranice mezi letokruhy, v rámci letokruhu je zřetelná vrstvička letního dřeva. Ve dřevě jsou patrné pouze mikrocévy (radiální hladké řezy). Velmi četné jsou dřevné paprsky, viditelné na všech řezech jako tmavé 1–5 mm dlouhé svislé tmavé čárky. Bukové dřevo je málo dekorativní se stejnoměrnou texturou, lehce fládrovitou (T), lehce pruhovanou (ldf.mendelu.cz, nedatováno).



Obrázek 1 Fagus Sylvatica, příčný řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)



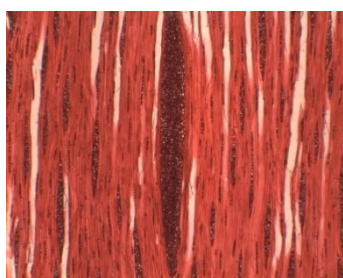
Obrázek 2 Fagus Sylvatica, radiální řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)



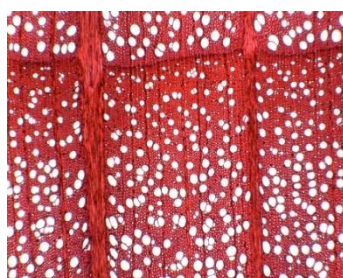
Obrázek 3 Fagus Sylvatica, tangenciální řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)

2.3 Mikroskopická stavba

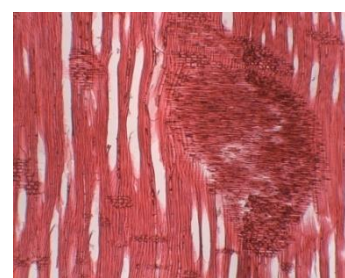
Hranice mezi jarním a letním dřevem v rámci letokruhu je nezřetelná. Uspořádané jsou pouze mikrocévy, cévy jsou jednotlivě nebo v radiálních skupinkách. Perforace cév je jednoduchá i žebříčkovitá. Thyly se mohou vyskytovat v nepravém jádru. Dřeňové paprsky jsou homogenní (slabě heterogenní). Tracheidy v základním pletivu jsou cévovité, vazicentrické a vláknité. Na hranici letokruhu dochází k rozšíření dřeňového paprsku (ldf.mendelu.cz, nedatováno).



Obrázek 1 Fagus Sylvatica, Tangenciální řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)



Obrázek 2 Fagus Sylvatica, příčný řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)



Obrázek 3 Fagus Sylvatica, radiální řez, (Ústav nauky o dřevě, 2007)

2.4 Submikroskopická stavba

Z hlediska submikroskopické stavby je dřevo buku tvořeno lignifikovanými buňkami, které se skládají z buněčné stěny a buněčné dutiny. Buněčná dutina se nazývá lumen. Buněčná stěna je souvrstvím více chemicky a submikroskopicky odlišných vrstev.

Jsou to primární a sekundární stěna a střední lamela. Střední lamela, také nazývaná mezibuněčná hmota spojuje buňky dřeva. Obsahuje cca 70 % ligninu, zbytek tvoří pektiny. Lignin je amorfní, hydrofobní látka, která nejvíc ovlivňuje pevnost dřeva. Primární stěna se chemicky podobá střední lamele, ale odlišuje se strukturálně. Obsahuje pouze 15% celulózy a také nižší počet krystalických oblastí. Sekundární stěnu tvoří až ze 43% celulózy, fibrily jsou v ní specificky orientované a lamely kompaktněji uložené. Sekundární stěna má tři vrstvy – vnější, střední a vnitřní. Ty se mezi sebou liší chemicky a tvoří sekundární stěnu v jiných podílech (vnější 6-8 %, střední 88-89 %, vnitřní 4-5 %) (Požgaj *et al.* 1993).

2.5 Chemická stavba

Z chemického hlediska je dřevo tvořeno uhlíkem, kyslíkem, vodíkem a dusíkem. Tyto čtyři prvky tvoří základní stavební jednotky dřeva v různém procentuálním zastoupení. Hlavní složky (polymery) tvoří 90-97 % dřeva a doprovodné látky (extraktiva) tvoří 3-7 %. Polymery se skládají ze sacharidické části, což je celulóza a hemicelulózy (70 %), z aromatické části, což je lignin (25 %) a doprovodných složek (5 %). U buku lesního je procentuální podíl hlavních chemických složek následující: celulóza 39,2 %, hemicelulózy 35,3 %, lignin 20,9 % (FLD, 2018).

3 Vlastnosti dřeva

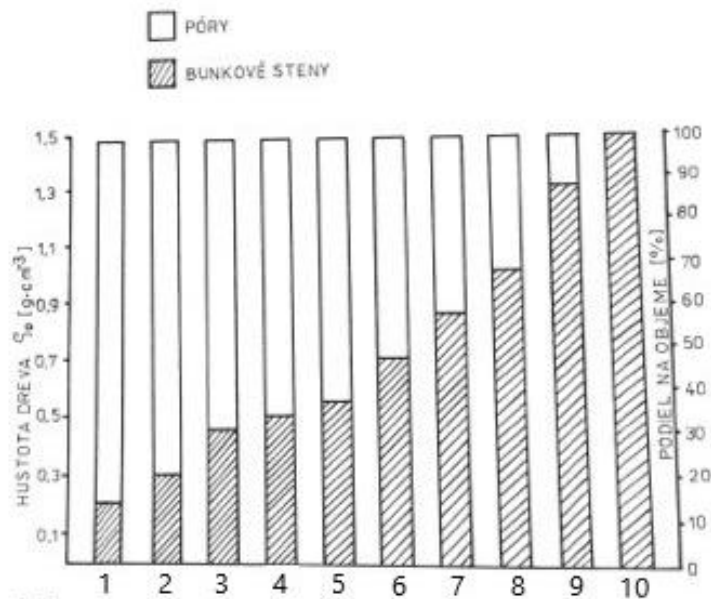
3.1 Fyzikální vlastnosti

Fyzikální vlastnosti dřeva popisují dřevo z hlediska jeho základních vnějších vlastností, vnitřních vlastností a z hlediska reakce na různé jevy. Mezi fyzikální vlastnosti dřeva bychom mohli zařadit barvu, texturu, lesk, tepelnou a elektrickou vodivost a další. Největší význam z hlediska zpracování dřeva mají vlhkost a hustota (Mezistromy.cz, 2019).

3.1.1 Hustota

Hustota dřeva je charakterizována podílem hmotnosti dřeva ku jeho objemu, její nejčastěji používanou jednotkou je kg/m^3 . Vzhledem k hygroskopické povaze dřeva je určení jeho hustoty poměrně obtížné, neboť s rostoucí vlhkostí roste jeho hmotnost a do jisté míry (MH) i objem. Tento jev se nazývá bobtnání. Hustota je jednou z nejdůležitějších charakteristik dřeva, protože velkou měrou ovlivňuje většinu fyzikálních a mechanických vlastností (Horáček, 1998).

Hmotnost dřeva je převážně tvořena buněčnými stěnami, proto by se mohlo zdát, že hustotu vypočítáme jako hmotnost buněčných stěn vůči objemu. Takto se však vypočítá hustota dřevní substance ($1460\text{--}1570 \text{ kg/m}^3$), protože do hmotnosti dřeva musíme zahrnout i lumeny a mezibuněčné prostory, které jsou vyplněny vzduchem, popřípadě u vlhkého dřeva vodou. Proto se hustota dřeva pohybuje v rozmezí $350\text{--}800 \text{ kg/m}^3$. Objem lumenů a mezibuněčných prostorů vyjadřuje pórovitost. Naše dřeviny mají pórovitost v rozmezí 40 % - 80 % (Šlesingerová & Horáček, 2002). Pórovitost znázorňuje obrázek 7.



Obrázek 4 pórovitost a dřevní substance různých dřevin, 1 - lehké dřevo, 2 - jarní dřevo jehličnanů, 3 - smrk, 4 - olše, 5 - modřín, 6 - buk, 7 - letní dřevo jehličnanů, 8 - nejtěžší bělové dřevo, 9 - nejtěžší jádrové dřevo, 10 - dřevní substance, (Šlesingerová & Horáček, 2002)

3.1.2 Vlhkost

Vlastnosti dřeva velice úzce souvisí s jeho vlhkostí. Vlhkost je podíl vody obsažené ve dřevě. Ta může být ve dřevě obsažena třemi způsoby: **Voda chemicky vázaná**, **voda vázaná (hygroskopická)** a **voda volná (kapilární)** (is.mendelu.cz, nedatováno).

3.1.2.1 Voda chemicky vázaná

Je součástí podstaty složení dřeva a je vázána chemickými vazbami v molekulách. Lze ji ze dřeva odstranit pouze spálením. Představuje 1-2 % objemu sušiny. Nemá vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti (is.mendelu.cz, nedatováno).

3.1.2.2 Voda vázaná

Je vázaná na vodíkové můstky hydroxylových skupin amorfních částí celulózy a hemicelulózy v buněčných stěnách dřevních buněk. Tento jev se označuje jako hygroskopicitá. Její zastoupení ve dřevě se pohybuje v rozmezí 0 % - 30 % a má zásadní

vliv na mechanické a fyzikální vlastnosti. Hranice 30% vlhkosti se označuje, jako mez hygroskopicity (MH) (is.mendelu.cz, nedatováno).

3.1.2.3 Voda volná

je voda vyskytující se ve dřevě v lumenech a mezibuněčných prostorech. K jejímu výskytu ve dřevě dochází po bodu nasycení vláken (dosažení 30 % vlhkosti). Nemá výrazný vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti (is.mendelu.cz, nedatováno).

U dřeva rozlišujeme dva typy vlhkosti: absolutní a relativní. Absolutní vlhkost dřeva je podíl hmotnosti vody vůči hmotnosti absolutně suchého dřeva, relativní vlhkost dřeva je podíl hmotnosti vody ku hmotnosti mokrého dřeva. Jsou vyjádřeny vzorci 1 a 2 (is.mendelu.cz, nedatováno).

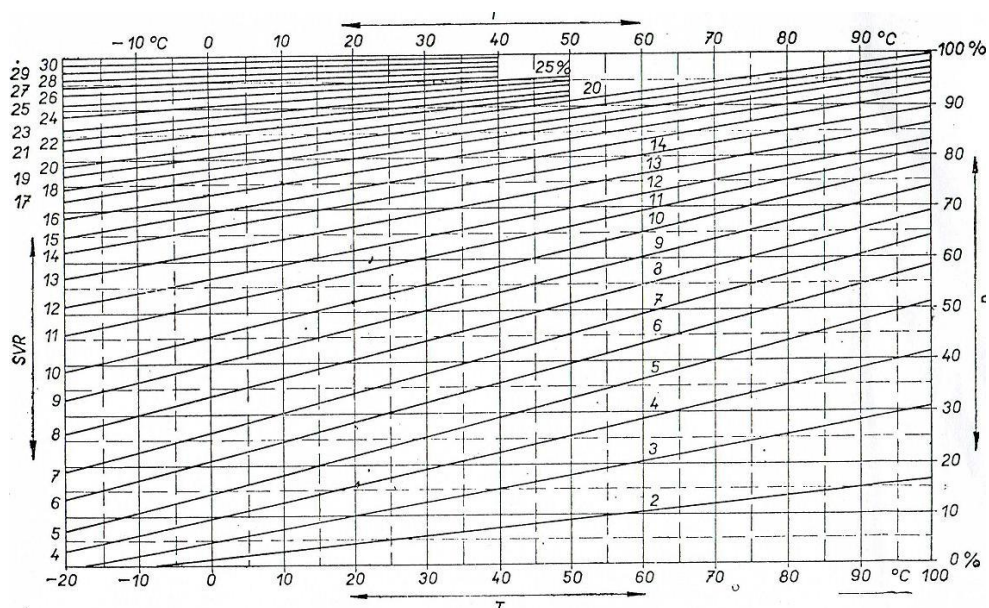
$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_v} \cdot 100 \quad (1)$$

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

Vlhkost dřeva, zvláště obsah vody vázané, výrazně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Spolu s hustotou dřeva je vlhkost nejvýraznější faktor ovlivňující jeho pevnost a pružnost (is.mendelu.cz, nedatováno). Obecně platí, že čím vyšší vlhkost dřevo má, tím menší je jeho pevnost. Většina mechanických zkoušek je prováděna při 12 % vlhkosti dřeva (is.mendelu.cz, nedatováno).

3.1.2.4 Rovnovážná vlhkost dřeva

Dřevo se neustále snaží dosáhnout rovnováhu vlhkosti s prostředím, ve kterém se nachází. Suché dřevo přijímá vlhkost (sorpce), vlhké dřevo naopak vlhkost odevzdává (desorpce). Tyto procesy jsou podmíněny hygroskopicitou přírodního materiálu, jakým dřevo je (NIS, Nábytkářský informační systém, 2013).



Obrázek 5 rovnovážná vlhkost dřeva, smrk, (NIS, Nábytkářský informační systém, 2013)

3.2 Mechanické vlastnosti

Schopnost dřeva odolávat účinku vnějších sil je charakterizována mechanickými vlastnostmi. Jsou rozděleny do tří skupin: základní, odvozené, technologické. Mezi základní vlastnosti se řadí pružnost, pevnost, plastičnost a houževnatost. Mezi odvozené se řadí tvrdost, odolnost proti tečení, odolnost proti trvalému zatížení a odolnost proti únavovému lomu. Technologické vlastnosti jsou úzce spjaté s technologií zpracování dřeva a jsou to: štípatelnost, impregnovatelnost, ohybatelnost, opotřebovatelnost a další (is.mendelu.cz, nedatováno). V naší práci se zaměříme na základní mechanické vlastnosti dřeva pružnost a pevnost.

Mechanické namáhání je proces, při kterém dochází k interakci namáhaného objektu s vnějšími silami a činiteli. Působením tohoto procesu vznikají v namáhaném dřevě vratné (dočasné) a nevratné (trvalé) změny (vos.volyne.cz, nedatováno).

3.2.1 Deformace

Jedná se o změny tvaru a rozměrů vzniklé působením mechanických sil. Druhy deformace jsou prodloužení, zkrácení, zkroucení jednotkového objemu dřeva do kosodélníkového tvaru. Prodloužení a zkrácení jsou důsledkem normálového napětí, což je napětí, které vyvolává síla působící kolmo na plochu. Zkroucení do kosodélníku je

důsledkem tangenciálního napětí, což je napětí vyvolané silou působící ve směru tečném k ploše (mech.fd.cvut.cz, nedatováno). Deformací rozlišujeme tři druhy: pružnou, pružnou v čase a plastickou.

3.2.1.1 Pružná deformace

vratná změna rozměrů a tvaru dřeva, která okamžitě odezní po ukončení působení vnějších sil. Pokud je dřevo namáháno napětím, které vyvolává pouze pružné deformace, nachází se v pružné oblasti stavu napjatosti (Požgaj *et al.* 1993).

3.2.1.2 Deformace pružná v čase

je vratná změna rozměrů a tvaru dřeva po uvolnění vnějších sil, která nenastává okamžitě, ale až za určitý čas. Tento druh pružné deformace ve dřevě vzniká také až za určitou dobu působení vnějších sil. Pokud se dřevo deformuje pružně a pružně v čase, nachází se v pružně-viskózní oblasti stavu napjatosti (Požgaj *et al.* 1993).

3.2.1.3 Plastická deformace

je trvalá, nevratná změna rozměrů a tvaru dřeva, která po odstranění působení vnějších mechanických sil zůstává a těleso získává nový tvar a rozměry. Stav napjatosti dřeva, při kterém se těleso předcházejí deformace pružné a pružné v čase, je v pružně-viskózně-plastické oblasti (is.mendelu.cz, nedatováno). trvale deformuje a plastickým deformacím (Požgaj *et al.* 1993).

3.2.2 Pružnost

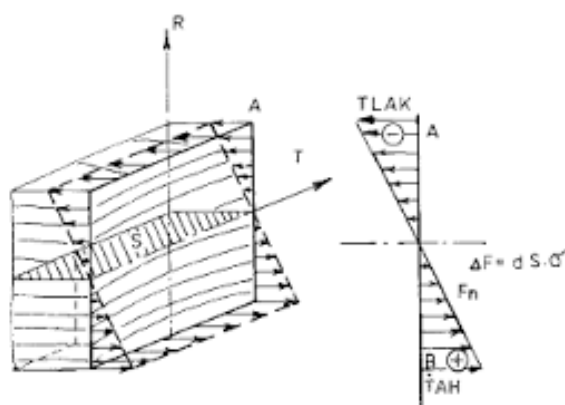
Je charakterizována jako schopnost dřeva nabýt původních rozměrů po uvolnění vnějších sil. Z fyzikálního hlediska je tento stav charakterizovaný tím, že změny mezi atomovými vzdálenostmi jsou návratné, tedy že po odstranění vnějších sil se atomy vrátí do svých rovnovážných vzdáleností tak, aby dosáhly největší potenciální energii. Z makroskopického hlediska můžeme stav pružnosti měřený běžnými přístroji (tenzometry, odchylkoměry) popsat jako úplně návratný, protože po uvolnění vnějších sil těleso nabyde původní tvar. Z hlediska submikroskopické stavby dřeva (jeho polymerů) nebo na úrovni fibril nemusí ve struktuře dřeva nastat zcela návratné procesy. Z hlediska termodynamiky se, kromě deformace, mění i objem dřeva. Proto je celý proces možné popsat jako *adiabatický*. Všechny uvedené jevy naznačují, že z hlediska submikroskopické struktury buněčných stěn dřevo není dokonale pružné, jako jiné materiály. Je proto možné ho označit jako anelastické (Požgaj *et al.* 1993).

3.2.3 Pevnost

Charakterizuje odolnost dřeva proti trvalému poškození. Pevnost v ohybu je jednou z nejdůležitějších vlastností dřeva. Rozlišujeme pevnost, kdy vlákna probíhají rovnoběžně s podélnou osou tělesa a síla působí napříč vláken v radiálním nebo tangenciálním směru a kdy vlákna probíhají kolmo na podélnou osu tělesa, kdy příčný řez je orientován ve směru působící síly nebo kolmo k působící síle. Většinou se sleduje a měří pevnost v ohybu napříč vláken. Při zkoušení se zkušební tělesa orientují tak, aby síla působila napříč vláken v tangenciálním směru (tangenciální ohyb). Při působení síly v radiálním směru nejsou u listnatých dřevin patrné výrazné rozdíly oproti tangenciálnímu ohybu (rozdíl pouze 2–4 %). U jehličnatých dřevin je tento rozdíl vyšší (10–12 %) (Požgaj *et al.* 1993). V tabulkách se často setkáváme s hodnotami, které jsou výrazně vyšší, než hodnoty naměřené námi v laboratoři. To je způsobené použitím tzv. 5 % kvantilu. Znamená to, že při měřeních pouze 5 % a méně vzorků vykazovalo hodnoty nižší, než jsou v tabulce uvedeny. Je to způsobeno heterogenitou dřeva a různými podmínkami růstu daného stromu (Dřevostavitel, nedatováno).

3.3 Napětí při ohybu

Při ohybu je tělesa vznikají v různých částech jeho průřezu napětí – na vrchní straně napětí tlakové a na spodní straně napětí tahové. Nedeformovatelná část tělesa se nachází ve středu průřezu tělesa a nazývá se neutrální zóna. Ve středu tělesa kromě neutrální zóny také vzniká největší smykové napětí, viz. Obrázek 9 (Požgaj *et al.* 1993).



Obrázek 6 Rozložení napětí při radiálním ohybu, (Požgaj *et al.* 1993)

3.3.1 Moduly pružnosti

Vztahem mezi napětím a deformací ve dřevě se jako první zabýval Hooke (1635 – 1703). zjistil, že do určité hranice zatížení je deformace úměrná působící síle. Vyslovil zákon, podle něhož: „Každá složka napětí je přímo úměrná každé složce deformace“ Lze vypočítat podle vztahu 3 (Požgaj *et al.* 1993).

$$\alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

α = změna délky jednotky tělesa na jednotku napětí

σ = napětí

ε = poměrná pružná deformace

Později převrácenou hodnotu α (vzorec 4) později definoval Young jako Modul pružnosti (Požgaj *et al.* 1993).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu proti pružné deformaci. Čím je modul pružnosti vyšší, tím větší je napětí potřebné k vyvolání deformace. Rozlišujeme moduly pružnosti E při normálových namáháních (tlak, ohyb, tah) a G při tangenciálních namáháních (krut, smyk). Při víceosových namáháních používáme objemový modul pružnosti E_k . Tyto hodnoty představují důležité konstanty při statických výpočtech dřevařských konstrukcí (Požgaj *et al.* 1993). Modul pružnosti se vyjadřuje jako směrnice přímkou procházející lineární částí pracovního diagramu (is.mendelu.cz, nedatováno).

(is.mendelu.cz, nedatováno) uvádí vzorec (5) pro číselné vyjádření modulu pružnosti v tahu a tlaku následovně:

$$E_i = \frac{d\sigma_i}{d\epsilon_i} \quad (5)$$

Pokud do uvedeného vztahu (is.mendelu.cz, nedatováno) dosadíme vyjádření napětí a poměrné deformace, vypočítáme modul pružnosti E_i v tahu a tlaku podle vzorce 6

$$E = \frac{F.l}{S.\Delta u_1} \quad (6)$$

F - síla na mezi úměrnosti [N]

l - původní délka tělesa před silovým působením [m]

S - plocha na kterou síla F působila [m²]

Δu_1 - absolutní celková pružná deformace ve směru silového působení [m]

Průměrná hodnota modulu pružnosti pro dřevo v tahu a tlaku ve směru vláken se pro domácí dřeviny udává v rozpětí 10 000 - 15 000 MPa při průměrné absolutní vlhkosti 12 %. Napříč vláken je tato hodnota až 25x menší, přičemž v radiálním směru je cca o 20 % - 50% vyšší než ve směru tangenciálním. Vzájemný poměr mezi jednotlivými směry lze stanovit $E_L : E_R : E_T \gg 20 : 2 : 1$ (is.mendelu.cz, nedatováno).

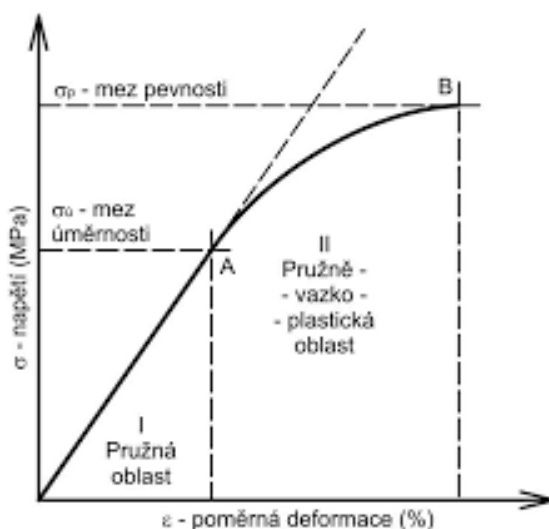
V ohybu se udává pouze modul pružnosti kolmo na vlákna, kdy dochází k normálovému zatížení, které způsobuje ohybový moment. Při zatížení dřevěného nosníku, je jedna jeho strana namáhána na tah a její protější na tlak. Přibližně uprostřed se nachází neutrální tahová zóna (Požgaj *et al.* 1993).

Deformace při ohybu je definována jako poměr vzniklého průhybu nosníku a poloměru ohybu, působící napětí je potom dáno vztahem 7 (is.mendelu.cz, nedatováno).

$$\sigma_L = \frac{E_L \cdot dx_2}{dr} \quad (7)$$

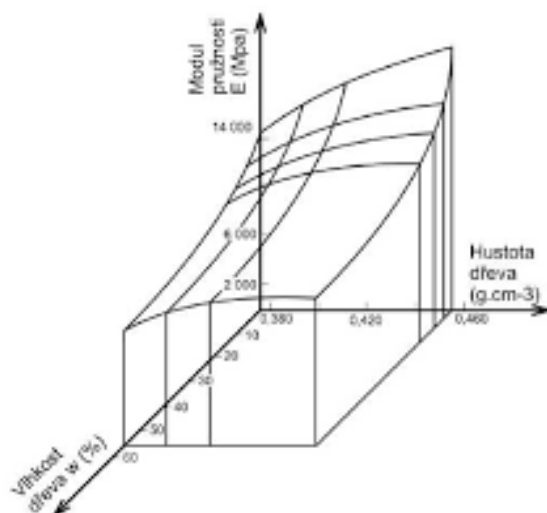
Modul pružnosti v ohybu vychází z ohybového momentu, který lze odvodit ve vzorci 8 (is.mendelu.cz, nedatováno).

$$M_T = \frac{E_L \cdot I_T}{r} \quad (8)$$



Obrázek 7 pracovní diagram (Požgaj *et al.* 1993)

Modul pružnosti výrazně závisí na hustotě a vlhkosti. Se zvyšující se hustotou se zvětšuje modul pružnosti a se zvyšující se vlhkostí se modul pružnosti zmenšuje. 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 % a ve smyku o 3 % (is.mendelu.cz, nedatováno).



Obrázek 8 Závislost modulu pružnosti na vlhkosti a hustotě, (Požgaj *et al* 1993)

3.3.2 Mez úměrnosti

Když napětí dřeva překročí mez úměrnosti, lineární průběh diagramu se mění na nelineární a křivka se odklání od svislé osy. Tento odklon způsobuje především nárůst deformací pružných v čase a plastických deformací. Napětí, jenž odpovídá bodu křivky, ve kterém dochází k odklonění, nazýváme mezí úměrnosti. Je to hranice, ve které přechází pružné deformace do deformací pružných v čase a plastických. Pojem meze úměrnosti je třeba chápat i v souvislosti s rychlostí zatěžování. Výše uvedené úvahy platí při krátkodobém namáhání, které trvá 2–4 minuty až po zlomení materiálu. Při dlouhodobém zatížení vznikají ve dřevě deformace pružné v čase a plastické deformace ještě před dosažením meze úměrnosti. Rozvoj těchto deformací je při dlouhodobém zatížení lépe patrný (Požgaj *et al.* 1993).

3.3.3 Mez pevnosti

Mez pevnosti je hodnota napětí, při které dřevo poruší svoji soudržnost a zlomí se. Je definována jako odolnost dřeva proti trvalému porušení vlivem vnějšího zatížení. Mez pevnosti má velký praktický význam pro použití dřeva na trámy, nosníky a jiné horizontální nosné prvky. Namáhání dřeva v ohybu je jedním z nejdůležitějších druhů namáhání, protože při něm dochází ke změně struktury dřeva natažením, stlačením a vzájemnému posunutí jeho elementů. Na ohybatelnost mají výrazný vliv rozdíly mezi jarním a letním dřevem a různá šířka letokruhů (Trávník, 2005).

4 Modifikace dřeva za účelem zvýšení mechanických vlastností

Modifikace je způsob úpravy dřeva tak, aby byly posíleny jeho kladné vlastnosti a zároveň sníženy nebo eliminovány jeho záporné vlastnosti. Modifikace dřeva převážně působí na submikroskopické úrovni, zejména v oblasti buněčné stěny, kde dochází k úpravě počtu volných hydroxylových skupin. Modifikace lze provádět různými způsoby, jsou to: fyzikální, mechanické, fyzikálně-mechanické a chemické (Mezistromy.cz, 2019).

4.1 Fyzikální modifikace dřeva

Fyzikální modifikace dřeva spočívají v úpravě fyzikálních vlastností dřeva, což jsou vlastnosti patrné navenek (Barva, lesk, textura), vnitřní vlastnosti (hustota) a vlastnosti reagující na různé fyzikální jevy (vlhkost, teplo, zvuk, elektřina) (Mezistromy.cz, 2019).

4.1.1 Tepelná modifikace dřeva

Tento způsob modifikace dřeva spočívá ve vystavení dřeva vysokým teplotám v rozmezí od 180 do 260°C. To má za následek změnu chemických složek ve dřevě (celulóza, hemicelulóza, lignin, doprovodné složky). Výsledkem těchto změn je snížení koeficientu bobtnání a sesychání. Mění se též rovnovážná vlhkost dřeva. Dalším výsledkem tepelné úpravy dřeva je tvarová a rozměrová stabilita. Tepelná úprava dřeva se používá už od dávných dob, ale v průmyslovém měřítku se vyvinula v minulém století ve Finsku pod názvem Thermowood (Scottywood, nedatováno).

4.2 Mechanické modifikace dřeva

Jsou to modifikace založené na působení vnějších mechanických sil na dřevo za účel změny jeho rozměru, tvaru a vnitřní struktury (Hill, 2006).

4.2.1 Modifikace tlakem

Jedná se o úpravu dřeva lisováním. Tento způsob modifikace zvyšuje hustotu a zlepšuje mechanické vlastnosti dřeva, jako jsou pevnost a pružnost. Tlakově modifikované dřevo má také vyšší odolnost vůči mechanickému poškození. Při lisování

nesmí být porušena mez pevnosti dřeva, protože to má za následek snížení mechanických vlastností (Mezistromy.cz, 2019).

4.3 Chemické modifikace dřeva

4.3.1 Modifikace acetylací

Provádí se působením chemické látky acetanhydridu. Působí na volné OH skupiny v buněčných stěnách a kompletně je vyplňuje. Dřevo tak neustále zůstává v nabobtnalém stavu. Toto může být nevýhodou v oblasti mechanického namáhání (Mezistromy.cz, 2019).

4.3.2 Modifikace amoniakem

Působení čpavku na dřevo má za následek zvýšení bodu nasycení vláken a změny rovnovážné vlhkosti. U některých dřevin tento způsob modifikace ovlivňuje míru sesychání. Modifikace amoniakem má za následek barevné změny dřeva. Čím déle je dřevo chemické látce vystaveno, tím je tmavší (Mezistromy.cz, 2019).

4.3.3 Modifikace impregnací

Impregnace mohou být prováděny nátěrem, nástřikem, ponořováním nebo máčením. Podle hloubky průniku impregnační látky do dřeva je rozdělujeme na povrchové (do 2 mm), mělké (2–10 mm) a hloubkové (nad 10 mm). Impregnace dřeva snižují rovnovážnou vlhkost dřeva a působí kladně na rozměrovou stabilizaci. Mají těž význam při ochraně proti biotickým a abiotickým činitelům (Mezistromy.cz, 2019).

4.4 Fyzikálně-mechanické modifikace dřeva

Jsou to modifikace, které mají vliv na fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Jsou výsledkem kombinace různých procesů, kterým je dřevo vystaveno (nejčastěji teplota a tlak) (Hill, 2006).

4.4.1 Zhušťování

Zhušťování je proces fyzikálně-mechanické modifikace dřeva, kdy na dřevo zároveň působí teplota i tlak. Zvýšená teplota má za následek plastifikaci ligninu, což umožní stlačení dřeva na požadovaný objem. Tímto procesem dosáhneme vyšší hustoty

a lepších mechanických vlastností. Dřevo upravené zhušťováním je poměrně tvarově a rozměrově nestabilní a má sklony k bobtnání (NIS, Nábytkářský informační systém, 2013).

Míra zhuštění má výrazný vliv na pevnostní vlastnosti dřeva. Se zvyšující se mírou zhuštění rostou hodnoty pevnosti v ohybu a modulu pružnosti (Gaff *et al.* 2017).

4.5 Zhuštěné dřevo

Hustota dřeva výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva, zejména pružnost, pevnost a modul pružnosti. Se zvyšující se hustotou se pevnostní vlastnosti zlepšují. Je tedy nasnadě, uměle zvýšit hustotu dřeva za účelem vylepšení vlastností rostlého dřeva. Termomechanickým zpracováním dřeva ve statickém nebo kontinuálním lisu je možné jeho objem zhustit až na cca 50% původní hodnoty. Toto tváření probíhá při teplotě 140°C a tlaku 5 MPa kolmo ke směru vláken. Zvýšenou teplotou a tlakem dojde k plastifikaci buněk dřeva, což umožní změnu objemu a tvaru. U masivního dřeva se postup zhušťování skládá ze čtyř kroků. Jsou jimi: ohřev, zhuštění, tváření, ochlazování. Po ochlazení si dřevo do jisté míry uchová svůj nový tvar. Nově vzniklé prvky lze lepit a popřípadě opakovaně lisovat, čímž se dosáhne hustota až 1400 kg/m³ (mmspektrum, 2004).

Hustota dosažená lisováním/zhušťováním je variabilní v průřezu vzorku. Výsledná hustota se snižuje směrem od povrchu do středu průřezu vzorku (Sikora *et. al* 2017).

Problém u zhuštěného dřeva spočívá v tom, že nový tvar tělesa vzniklého zhušťováním není permanentní. Zhuštěné dřevo je stále náchylné na přijímání vlhkosti a bobtnání, tím pádem mění své rozměry a hustotu. Dokonce bobtnání zhuštěného dřeva může být výraznější, než u dřeva neupraveného, protože dřevo s vyšší hustotou má tendenci více bobtnat (Haygreen & Daniels, 2007).

Dalším problémem při zhušťování je tzv. *springback*. Jedná se o okamžitou změnu rozměrů dřeva ihned po vytažení z lisu. Protože je lis vyhříváný, vlhkost dřeva během zhušťování lehce poklesne a po vytažení z lisu se dřevo snaží nabýt své původní vlhkosti a změnit své rozměry. Tento jev pozorujeme u dřeva, které bylo vytažené z lisu ještě teplé, protože na *springback* má vliv i plasticita ligninu. *Springback* se dá do jisté míry eliminovat tím, že vzorky z lisu se vyndávají až po jeho vychladnutí, kdy už lignin není plastický (Haygreen & Daniels, 2007).

Tento aspekt zhušťování představuje problém pro komerční využití této technologie, protože dřevo zhuštěné má sice menší rozměry, vyšší hustotu a tím i předpokládané zlepšení mechanických vlastností v ohybu, ale je tvarově a rozměrově nestálé a je velice náchylné na bobtnání. Tento problém znemožňuje jeho použití tam, kde je vyžadována stálost tvaru a rozměru, ale i tam, kde je požadována určitá pevnost vycházející z hustoty (Haygreen & Daniels, 2007).

5 Kompozitní materiály na bázi dřeva

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že různorodá struktura dřeva ovlivňuje jeho vlastnosti při mechanickém namáhání. Při použití dřeva například jako konstrukčních prvků je zapotřebí eliminovat variabilitu hodnot jeho vlastností a zajistit tak bezpečnost a životnost vytvořené konstrukce. Toho se dá dosáhnout správným výběrem dřeviny, správným výběrem kvalitativní třídy dřeva, konstrukčním řešením nebo různými úpravami dřeva. Jedna z možností úpravy dřeva je vytvoření materiálu na bázi dřeva a kompozitních materiálů (Sandberg *et al.* 2018).

Historie kompozitních materiálů úzce souvisí i s někdejší Čkoslovenskem. V roce 1949 byla v závodu Bučina Zvolen průmyslově vyráběna DVD deska podle Fahrniho patentu. Byla to třívrstvá deska, jejíž střed tvořila drť (třísky) a její povrchy byly tvořeny lístkovými třískami. Byl to první deskový materiál tvořený z listnaté dřeviny (buku) na světě (Böhm *et al.* 2012).

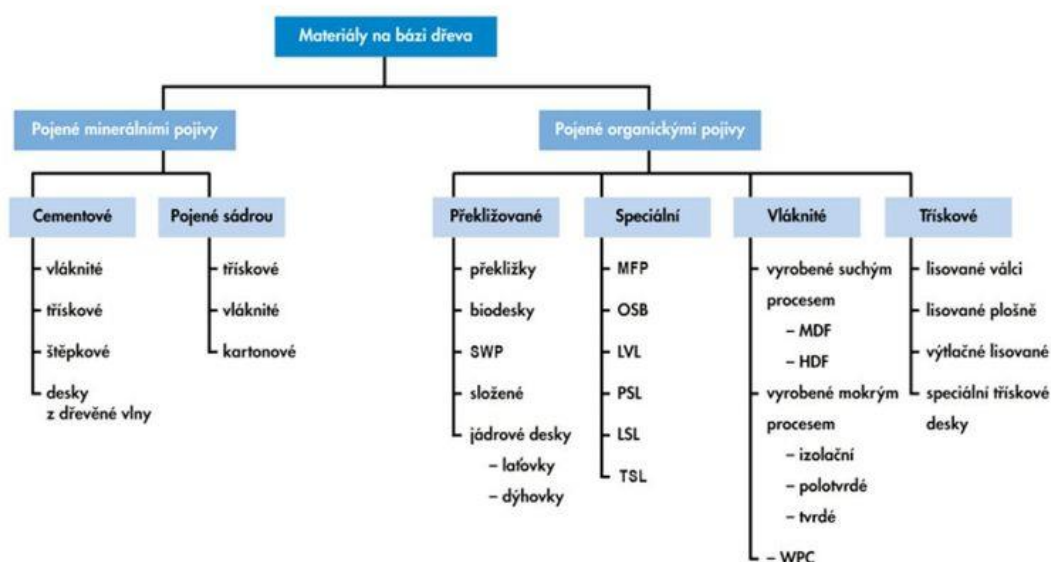
Kompozitní materiály jsou moderním řešením nežádoucích vlastností dřeva, jako jsou anizotropie, heterogenita, různá hustota, reologie a v neposlední řadě také cena. Jejich vývoj začal již v dobách dávného starověku, což dokumentují archeologické nálezy oblasti Egypta a Skandinávie. V dnešní době je tvorba kompozitů stále důležitou otázkou v dřevozpracujícím průmyslu a je to odvětví, které díky rozvoji technologie kráčí vpřed mílovými kroky (Sandberg *et al.* 2018).

Kompozitních materiálů na bázi dřeva je velké množství druhů. Mezi nejznámější bychom mohli zařadit dřevotřískové desky, překližované desky, dřevovláknité desky, desky z orientovaných plochých třísek, spárovky a vrstvené dřevo (Böhm *et al.* 2012).

Kompozitní materiály na bázi dřeva mají velký potenciál i vzhledem k velkému množství výhod, které nabízejí. Jsou to například:

- Použití kompozitních materiálů napomáhá zachování zbylých zdrojů vyčerpateľných surovin
- Relativně malé znečištění životního prostředí dřevozpracujícím průmyslem
- Pro stavební materiály je důležitý i aspekt jejich životního cyklu od těžby suroviny až po konečnou likvidaci.
- Technologie zpracování dřeva se progresivně vyvíjí
- Nízká energetická náročnost při jejich výrobě (Kuklík & Kuklíková, 2002).

Kompozitních materiálů je v současné době velké množství druhů. Patří mezi ně materiály vyrobené z řeziva, vyrobené z dýh, vyrobené z plochých třísek, proužků, třísek a částic, vyrobené z vláken a také hybridní materiály na bázi dřeva. V tvorbě kompozitních materiálů se poslední dobou vyskytují i nedřevěné materiály, jako uhlíkové vlákno, laminát nebo plast (Gaff *et al.* 2016).



Obrázek 9 rozdělení materiálů na bázi dřeva, (Böhm *et al.* 2012)

6 Vrstvení dřeva

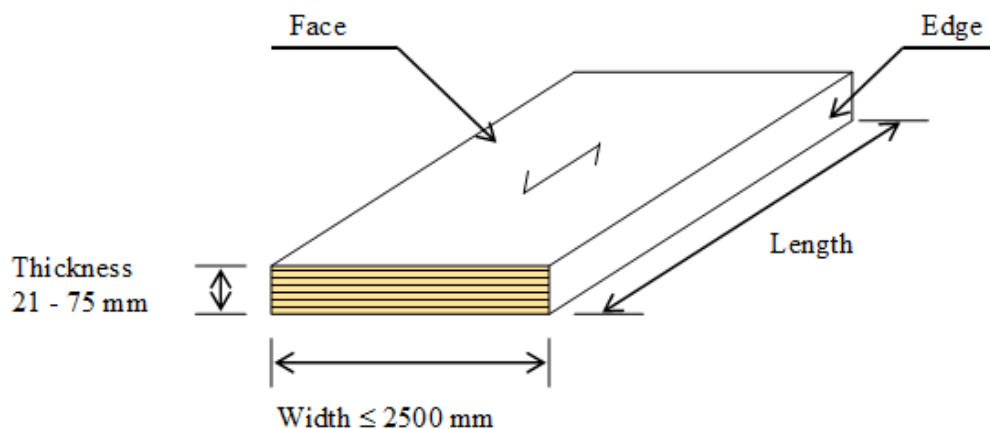
Při zkoumání kompozitních materiálů na bázi dřeva se setkáváme s technologií, která se nazývá vrstvení dřeva. Jejím základem je lepení více vrstev dřeva na sebe za účelem zlepšení mechanických vlastností. Tato technologie je používána mnoha výrobci a na trhu lze nalézt mnoho produktů založených právě na této technologii, jako je například: Ultralam, Kerto, STEICOultralam, Micro-lam, Para-lam další (Macháček, nedatováno).

6.1 Vrstvené dřevo

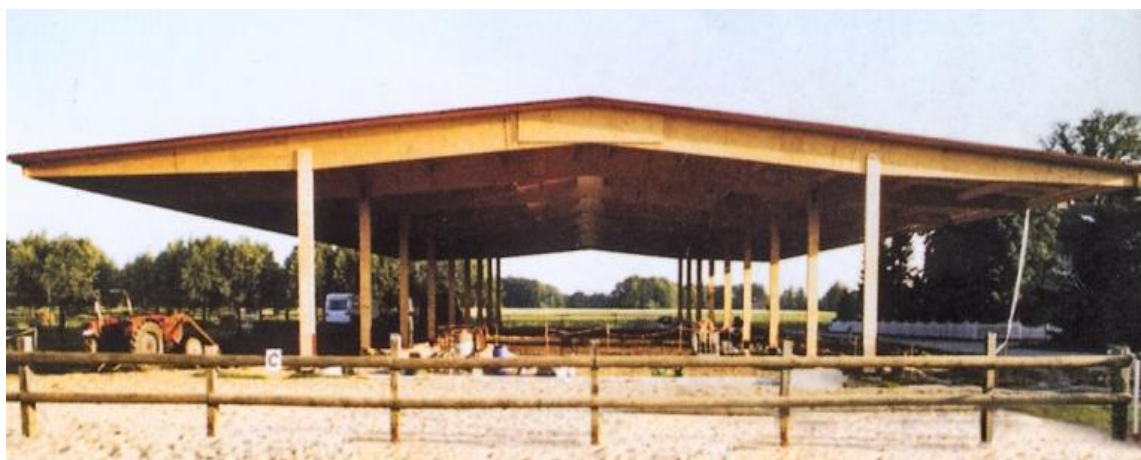
(LVL = laminated veneer lumber,) je materiál, který se skládá z vrstev dýhy slepených v jednom směru orientace vláken. Vykazuje mimořádně vysoké a rovnoměrné hodnoty mechanických vlastností, protože vady jednotlivých vrstev se rozloží na jiná místa a jejich vliv je omezen na minimum. Vrstvené dřevo také vykazuje velkou tvarovou a rozměrovou stabilitu díky tomu, že po slepení nedochází k vnitřním napětím. Používá se pro výrobu prutových prvků (nosníků), jakož i rovinných nosných prvků (desky, tabule).

Průměrná variabilita vrstveného dřeva v ohybu byla zjištěna menší, než 15 %, přičemž rostlé dřevo dosahuje hodnot 20 % - 30 % (Koželouh, 2016).

V Evropě se vrstvené dřevo vyrábí ve Finsku a nese název KERTO. Jeho základním stavebním prvkem jsou smrkové dýhy o tloušťce 3,2 mm (po zalisování 3 mm), které se orientují podélně, slepí se s malým překrytím a zalisují. Takto vzniklé prvky mohou dosahovat až 26m délky, šířky 180 cm a tloušťky od 21 do 75 mm. Varianty KERTO systému jsou KERTO-S a KERTO-Q. KERTO-S je standartní systém skládání jednotlivých vrstev, kdy jsou všechny vrstvy orientovány v jednom směru – směru délky prvku. KERTO-Q je systém skládání vrstev, kdy je většinou každá pátá vrstva orientována kolmo k délce prvku. Charakteristická pevnost v rovině desky KERTO-S je 51 MPa, modul pružnosti v ohybu je průměrně 14 000 MPa. Z vrstveného dřeva je možné realizovat nejnáročnější dřevěné konstrukce, jakou je například zastřešení haly o rozpětí 115 m ve finském Oulu (Kuklík & Kuklíková, 2002).



Obrázek 11 KERTO-S, (Metsä wood, 2019)



Obrázek 10 Halový vazník z KERTO-S s velkým střešním přesahem, (Metsä wood, 2019)

Zvláštními druhy vrstveného dřeva jsou Parallam a Intralam. Jsou to technologie používající vrstvení dých a dřevěných plochých částic. Protože jsou tyto technologie poměrně nové, ještě pro ně v českém jazyce neexistuje název Parallam je technologie, při které se v kontiguálním lisu podélně lisují úzké pruhy dýhy 20-30 mm široké a až 2400 mm dlouhé. Prvky vyrobené touto technologií mají srovnatelné vlastnosti, jako železobeton. Intrallam je technologie, která používá velké dřevěné třísky dlouhé až 300 mm a široké až 30 mm. Ty se slepí a slisují orientovány v podélném směru. Vytvoří se tak produkt deskového charakteru, který má vlastnosti podobné, jako vrstvené lamelové dřevo. Další výhodou vrstvených dřevěných materiálů je vysoká požární odolnost, což je vysoce žádaná vlastnost u stavebních konstrukcí (Kuklík & Kuklíková, 2002).



Obrázek 20 Stavba sportovní haly za použití vrstvených nosníků, Oulo, Finsko, (www.puuinfo.ee)

Tabulka 1, vyhodnocení ohybových zkoušek vrstveného dřeva, (Gaff et al.2016)

Vlastnosti		Masivní bukové dřevo (9% vlhkost)	Vrstvené dřevo (9% moisture)			
			Lepidlo			
			UF	PVAc	Směs (UF + PVAc)	PUR
Mez pevnosti	σ_{bend} (MPa)	130.2 (9.8)	136.2 (8.7)	101.7 (6.4)	111.2 (7.1)	148.5 (4.8)
Modul pružnosti	E_m (MPa)	11,654 (7.6)	13,060 (9.4)	10,102 (8.5)	11,709 (7.3)	14,268 (4.2)
Pevnost	(počet cyklů)	-	9,923 (10.7)	16,882 (10.8)	13,394 (8.0)	40,136 (9.3)
Zatěžovací síla	F_{max} (N)	1,284.2 (8.2)	1,721 (7.5)	1,351 (4.3)	1,446 (7.7)	2,035 (3.3)
Max. průhyb při mezi pevnosti	y_{max} (mm)	13.3 (8.4)	9.9 (4.6)	10.7 (9.6)	8.75 (9.7)	13.0 (7.3)

Na mechanické vlastnosti vrstvených materiálů má také významný vliv druh použitého lepidla. (Gaff *et al.* 2016) se při výzkumu zabývali vlivem druhu lepidla na vlastnosti ohýbaného vrstveného dřeva. Z této práce je patrné, že různé druhy lepidel ovlivňují modul pružnosti, mez pevnosti, koeficient ohybatelnosti, odolnost proti dlouhodobému zatížení a další. Použití lepidel zvýšilo pevnost a pružnost dřeva, přičemž se snížily moduly pružnosti a mez pevnosti. Jako nejodolnější se ukázaly vzorky slepené PUR lepidlem. Ze studie je patrné, že vhodnou volbou lepidla, nebo kombinací více druhů lepidel je možné vytvořit vhodný materiál (vrstvené dřevo) pro daný účel použití.

7 Vyztužování dřeva nedřevním komponentem

Vyztužování dřeva nedřevním komponentem se v praxi používá ke zlepšení fyzikálních a mechanických vlastností dřeva. Nejčastěji se používají nedřevní komponenty s vysokou pevností, které při správné aplikaci zvyšují pevnost a pružnost, jako carbon, laminát nebo plast (Gaff *et al.* 2016).

7.1 Carbon

Uhlíkové vlákno neboli carbon je materiál, který si v posledních letech nachází své místo v řadě odvětví lidské činnosti, od výroby sportovních pomůcek až po aplikaci v kompozitních materiálech na bázi dřeva (Sandberg *et al.* 2018).

Uhlíkové vlákno jinak nazývané carbon (z angl. carbon fibre) je druh vlákna, které obsahuje uhlík v různých modifikacích. Je to dlouhý a tenký pramen materiálu o průměrné tloušťce 5-8 μm . je složen převážně z atomů uhlíku, které jsou spojeny paralelně k dlouhé ose vlákna. Díky tomu disponuje uhlíkové vlákno vysokou pevností při zachování malých rozměrů. Používá se pro výrobu pevných a odolných tkanin, které mají využití v mnoha oborech (Fiberpreg cz a.s., nedatováno).

Vlastnosti uhlíkového vlákna jsou četné a jejich kombinace je často u materiálů jedinečná. Tyto vlastnosti jsou například: vysoká pevnost v poměru k hmotnosti, tuhost, odolnost proti korozi, elektrická vodivost, nehořlavost. Vlákna také nejsou toxická a pronikne jimi rentgenové záření. Jsou však velmi křehká a jejich výroba je nákladná.

Uhlíkové vlákno je dvakrát tužší, než ocel a má až 5x větší pevnost, proto je to ideální materiál pro zlepšení mechanických vlastností (Verma & Netula, 2017).

Výroba uhlíkového vlákna se dělí na 5 základních kroků:

7.1.1 Příprava prekurzoru

Úprava výchozího materiálu tavným zvlákněním nebo zvlákněním z roztoku, dlužení na požadovaný rozměr. Kvalita prekurzoru ovlivní výslednou kvalitu produktu (Fiberpreg cz a.s., nedatováno).

7.1.2 Stabilizace

Zahřátí na 200 – 450 °C po dobu 20 – 30 minut. Při této teplotě látka sbírá molekuly kyslíku ze vzduchu a přetváří se atomová struktura vlákna (Fiberpreg cz a.s., nedatováno).

7.1.3 Karbonizace

Převod prekurzoru na uhlíková vlákna. Zahřátí materiálu na 1000 - 2000°C v inertní (nejčastěji dusíkové) atmosféře způsobí rozkmitání atomů tak, že většina přebytečných atomů je odstraněna. Vznikne tak vlákno s obsahem 85 – 95% uhlíku (Fiberpreg cz a.s., nedatováno).

7.1.4 Grafitizace

nemusí se provádět vždy. Zahřátí materiálu v inertní atmosféře na 2400 - 3000°C. vzniká uspořádaná vrstevnatá struktura a vlákno s obsahem vyšším, než 99 % uhlíku (Fiberpreg cz a.s., nedatováno).

7.1.5 Povrchová úprava

Oxidace povrchu pomocí plynů nebo roztoků za účelem přidání molekul kyslíku na povrch materiálu pro lepší přilnavost epoxidů a jiných materiálů. Může také probíhat ochrana povrchu před poškozením před další manipulací (Fiberpreg cz a.s.).

Většinou se uhlíkové vlákno používá v kompozitech jako vystužující prvek. Uhlíkové vlákno bychom mohli nalézt použité v letectví, při výrobě větrných elektráren, výrobě sportovního náčiní nebo v automobilovém průmyslu (Fiberpreg cz a.s., nedatováno).

V naší práci jsme použili prošívané uhlíkové vlákno pro podlepení vzorku testovaného ohybovou zkouškou. Protože má karbonové vlákno vynikající pevnost, bylo aplikováno na spodní stranu vzorků, kde se v ohybu vyskytuje tahové napětí. Přidání uhlíkového vlákna na tahovou zónu vzorku by mělo výrazně zlepšit jeho ohybové vlastnosti. Předpokladem pro použití carbonu je posun neutrální osy směrem k materiálu s vyšším modulem pružnosti, což carbonová vlákna prokazatelně jsou.

8 Lepidla pro kompozitní materiály

Ke zpracování kompozitních materiálů se používají lepidla na různých bázích. Mezi nejpoužívanější patří lepidla močovinoformaldehydová, melamin–močovino–formaldehydová, izokyanátová, difenylmetandiizokyanátová, polyvynilacetátová nebo lepidla na přírodní bázi (Sandberg *et al.* 2018).

Lepidla použitá při tvorbě kompozitů se mohou lišit chemickou podstatou, pevností vytvořeného spoje nebo životností, ale obecně pro ně platí, že jejich správná funkce je podmíněna dobrým provedením dřevěného spoje, hladkostí povrchu, správným přtlakem, správnou teplotou, dobou při vytvrzení a také samozřejmě vlhkostí dřeva. Asi nejvhodnější způsob, jak klasifikovat lepidla, je podle jejich chemického složení. Jsou to:

- Močovinoformaldehydová lepidla (UF)
- Fenolformaldehydová lepidla (PF)
- Melaminformaldehydová lepidla (MF)
- Metylendifenyl-diizokyanátová lepidla (MDI)
- Polyuretanová lepidla (PU)
- Epoxidová lepidla
- Polyvynilacetátová lepidla (PVAc)
- Resorcinolová lepidla
- Polyesterová lepidla
- Lepidla na přírodní bázi

(Sandberg *et al.* 2018)

Různé druhy lepidel ovlivňují mechanické vlastnosti například vrstveného dřeva. Je to způsobeno způsobem, jakým se lepidlo vytvrzuje a jakou tvoří vazbu s dřevními elementy. UF lepidla tvoří tvrdé, ale křehké spoje, zatímco PVAc lepidla tvoří spoje, které jsou více pružné. PUR lepidla tvoří nekvalitnější spoje, co se týče pružnosti a pevnosti (Gaff *et al.* 2016).

8.1 PVAc lepidla

Jsou to lepidla, která vznikají polymerací za přítomnosti vody a stabilizačních činidel. Pro zvýšení jejich flexibility se používá dibutilftalát a další externí změkčovadla. Kopolymerací etylénu s vinylacetátem vzniká jejich kvalitnější forma – Etylvynilacetát (EVA). Lepidla typu PVAc jsou poměrně levná, lehce aplikovatelná a mají zanedbatelný negativní vliv na životní prostředí (Sandberg *et al.* 2018).

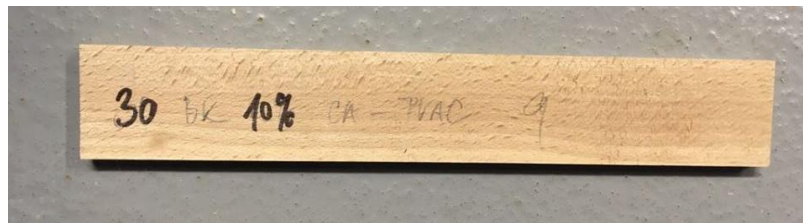
9 Metodika

V následující kapitole jsou popsány materiály použité k tvorbě zkušebních těles a postup jejich přípravy včetně popisu použitých strojů a pomůcek. Dále také kapitola popisuje princip ohybové zkoušky a její samotné provedení.

9.1 Použité materiály

9.1.1 Dřevo

Pro vytvoření zkušebních těles byl použit Buk Lesní (*Fagus sylvatica*) o vlhkosti 8 %. Dřevo bylo selektováno tak, aby byly minimalizovány přirozené vady dřeva ovlivňující mechanické vlastnosti při opracování a ohybové zkoušce.



Obrázek 21 lamela z bukového dřeva

9.1.2 Nedřevní komponent

Jako nedřevní komponent v naší práci bylo použité prošívané uhlíkové vlákno Sikawrap 150 c/30. jedná se o jednosměrnou, prošívanou tkaninu z uhlíkových vláken pro dodatečné zesílení konstrukčních prvků namáhaných především na ohyb a smyk.



Obrázek 22 prošívaná tkanina Sikawrap 150 C/30,

9.1.3 Lepidlo

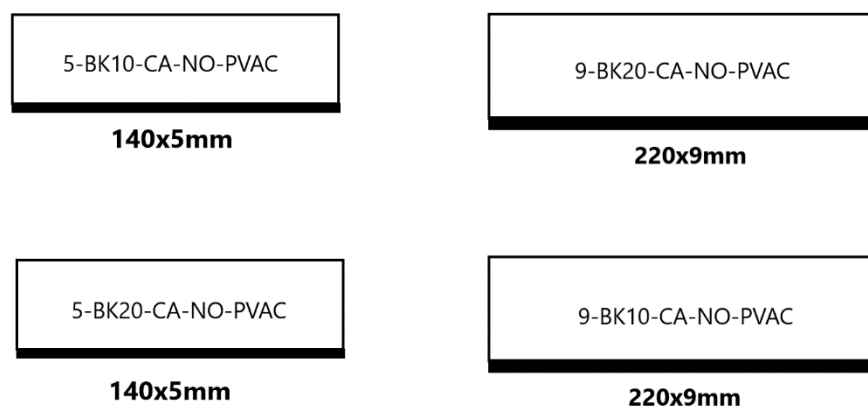
Použité lepidlo bylo PVAC – Ag-Coll 8731/L D3. jedná se o PVAc disperzní lepidlo bílé barvy, s dobrou voděodolností, které splňuje nároky skupiny D3 při jednosložkovém použití. Jeho minimální lisovací čas při montážním lepení je 10–15 minut (www.simek.eu, nedatováno).

9.2 Příprava zkušebních těles

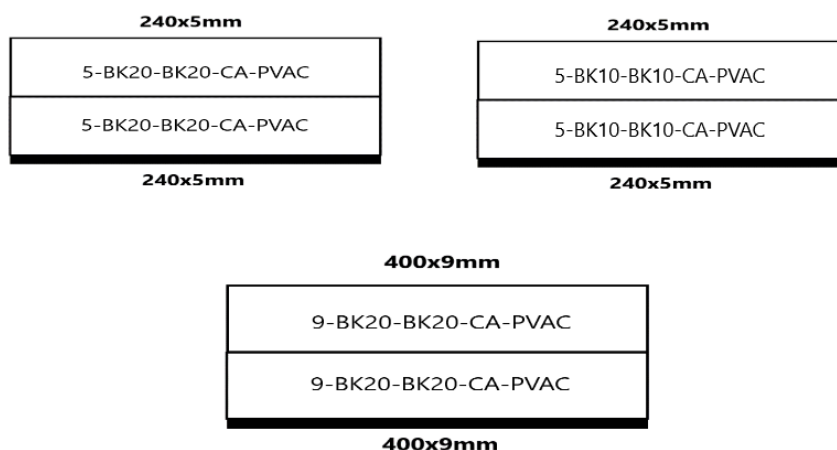
Prvním krokem v přípravě zkušebních těles bylo vytvoření bukových lamel. Z bukových fošen byly na kotoučové pile nařezány 2 m dlouhé lamely o tloušťce přibližně 11 mm a 7 mm. Za pomoci tloušťkovací frézky byla tloušťka lamel upravena na přesný rozměr 5 mm a 9 mm.

Lamely o dané tloušťce a délce 2 metry poté bylo nutno přetvořit v kratší lamely tak, aby daná trojice menších lamel byla vymanipulovaná z jedné dlouhé lamely.

Pomocí kotoučové pily Felder BF 6-41 byly nařezány na rozměry 140 mm, 240 mm, 220 mm a 400 mm v závislosti na jejich tloušťce (20x tloušťka + 400 mm), viz. schéma níže. Každá nově vytvořená lamela byla označena specifickým kódem zajišťující přehlednost. Kódové označení bylo vytvořeno pomocí pořadí v souboru, zkratkou použité dřeviny, nedřevního komponentu, použitého lepidla a tloušťky.

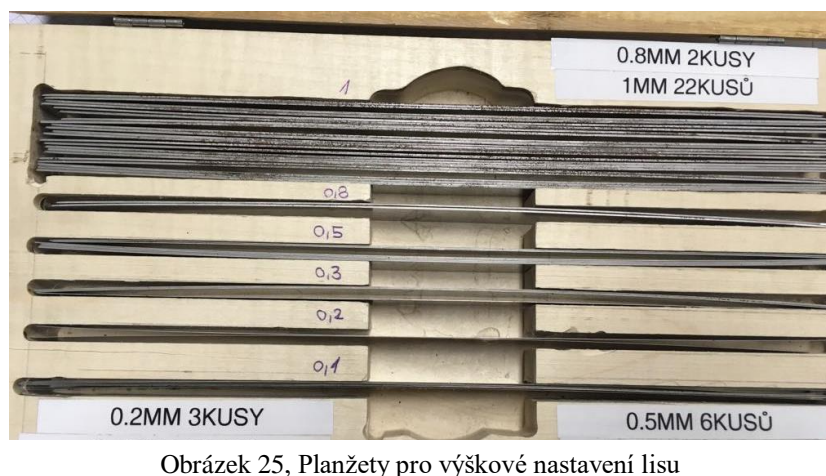


Obrázek 23 Popis zkušebních těles neslepených



Obrázek 24 Popis zkušebních těles slepených

Dalším krokem v přípravě zkušebních těles bylo zhušťování nařezaných lamel. To probíhalo ve vyhřívaném hydraulickém lisu. Lis nebyl vybaven možností výškového nastavení desek v námi požadované přesnosti, kvůli staršímu datu výroby, proto bylo nutné použít ocelové planžety o přesně daném rozměru. Tyto planžety se vyrovnaly na sebe aby vytvořily přesnou výšku, ve které se zastavila horní pohyblivá deska lisu. Planžety byly zhotoveny z nástrojové oceli s tolerancí tloušťky 0,01mm, takže jejich použití bylo velice přesné a bylo tak možné dosáhnout přesného rozměru i bez možnosti nastavení samotného lisu. Lamely byly vyrovnané na okrajích spodní desky lisu.



Lisování probíhalo pro každou trojici lamel zvlášť. Trojice lamel označená příslušným číslem 1-30, 1'-30' a 1''-30'' byla umístěna doprostřed lisu ve stejné vzdálenosti od planžet umístěných na okrajích. Lis byl vyhřátý na 120 °C a působil maximální silou

26MPa. Regulace tlaku nebyla možná kvůli rozdílnému rozměru lamel, proto lis působil maximálním tlakem, který byl schopen vytvořit. Doba lisování zkušebních těles byla 2minuty a stabilizace v zavřeném lisu trvala 5 minut. Lamely byly zhušťovány při vlhkosti 8 %.



Obrázek 20 Lis použitý ke zhušťování



Obrázek 21 Lis použitý ke zhušťování 2

Po vytažení z lisu byly lamely ponechány v kontrolovaném prostředí, aby došlo k rozměrové stabilizaci v čase. Po čtyřdenní stabilizaci zhuštěných lamel došlo ke změně rozměrů o 0,99 %.

Dalším krokem v přípravě zkušebních těles bylo lepení příslušných lamel k sobě za pomoci PVAc lepidla Ag-Coll 8731/L D3. Lepidlo bylo nanášeno jednostranně za pomoci štětce a stěrky v doporučeném množství 80-140 g/m². slepené lamely byly sevřeny ztužidly a byly ponechány v klidu minimálně 15 minut, aby došlo k vytvrzení lepidla.



Obrázek 26, Slepění lamel pomocí ztužidel

Po vytvrzení lepidla byly slepené lamely podlepeny prošívaným uhlíkovým vláknem Sikawrap 150 C/30. Vláknina tkaniny byla orientována paralelně se směrem vláken dřeva lamel, protože v tomto směru má aplikace tkaniny vliv na ohybové vlastnosti dřeva. Při opačné orientaci vláken tkaniny bychom testovali soudržnost průpletu tkaniny. Podlepování carbonem probíhalo plošně pomocí PVAc lepidla, které bylo nanášeno štětcem a stěrkou jednostranně na slepené lamely.

9.3 Tříbodový ohyb

Dalším krokem ve výzkumu byla samotná ohybová zkouška. Byla provedena formou tříbodového ohybu, podle normy EN 310. Vzdálenost podpěr byla 20-ti násobkem tloušťky zkušebního tělesa. Zkouška byla prováděna na stroji TIRA test 2850 S. Posuv příčnicku stroje byl prováděn v takové rychlosti, aby se doba trvání zkoušky pohybovala v intervalu od 30 s do 2 min.



Obrázek 27 testovací zařízení TIRA

9.4 Výpočet sledovaných charakteristik

Výsledkem provedených zkoušek byly pracovní diagramy, ze kterých však nelze odečíst přesnou hodnotu modulu pružnosti a pevnosti v ohybu. Proto musely být konkrétní hodnoty pro jednotlivá zkušební tělesa vypočítány podle níže uvedených vzorců.

9.4.1 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu se vypočítala podle následujícího vztahu, který použili (Gaff *et al.* 2016) ve své práci (9).

$$\sigma = \frac{3F_{max}l}{2bh^2} \quad (9)$$

σ Pevnost dřeva v ohybu [MPa]

F_{max}Síla potřebná ke zlomení tělesa [N]

lVzdálenost mezi podpěrami [mm]

b.....Šířka zkušební tělesa [mm]

h.....Tloušťka zkušební tělesa [mm]

9.4.2 Modul pružnosti

(Gaff *et al.* 2016) ve své práci použili pro výpočet modulu pružnosti následující vzorec (10).

$$MOE = \frac{(F_2 - F_1) \cdot l_0^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot (a_2 - a_1)} \quad (10)$$

MOP.....Modul pružnosti [MPa]

F₂-F₁.....Nárůst síly v lineární části diagramu [N]

l.....Vzdálenost mezi podpěrami [mm]

b.....Šířka zkušební tělesa [mm]

h.....Tloušťka zkušební tělesa [mm]

a₂-a₁.....nárůst průhybu uprostřed tělesa [mm]

9.5 Zpracování výsledků v softwaru statistika 12

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků byla použita faktorová analýza rozptylu v softwaru Statistica 12. Tato analýza rozptylu hodnotí účinky vybraného faktoru na sledované charakteristiky. K tomuto ohodnocení účinku vybraného faktoru byl použit Duncanův test s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. F-test na základě hladiny významnosti P stanoví, zda a v jaké míře je sledovaný faktor statisticky významný. Podle hodnoty P lze testovaný faktor ohodnotit takto:

P < 0,05 vliv faktoru je statisticky významný,

- P > 0,05 vliv faktoru není statisticky významný,
- P = 0,05 vliv faktoru se nachází na hranici statistické významnosti,
- P = 0 faktor působí,
- P < 0,001 vliv faktoru je statisticky velmi významný,

0,001 < P < 0,01 vliv faktoru je statisticky středně významný,

-
- $0,01 < P < 0,05$ vliv faktoru je statisticky málo významný (Gaff & Gáborík, 2009)

10 Výsledky a diskuse

Výsledky pro sledované vlastnosti jsou v tabulkách 2 a 3, kde jsou uvedeny průměrné hodnoty modulu pružnosti a meze pevnosti včetně směrodatné odchylky a variačního koeficientu.

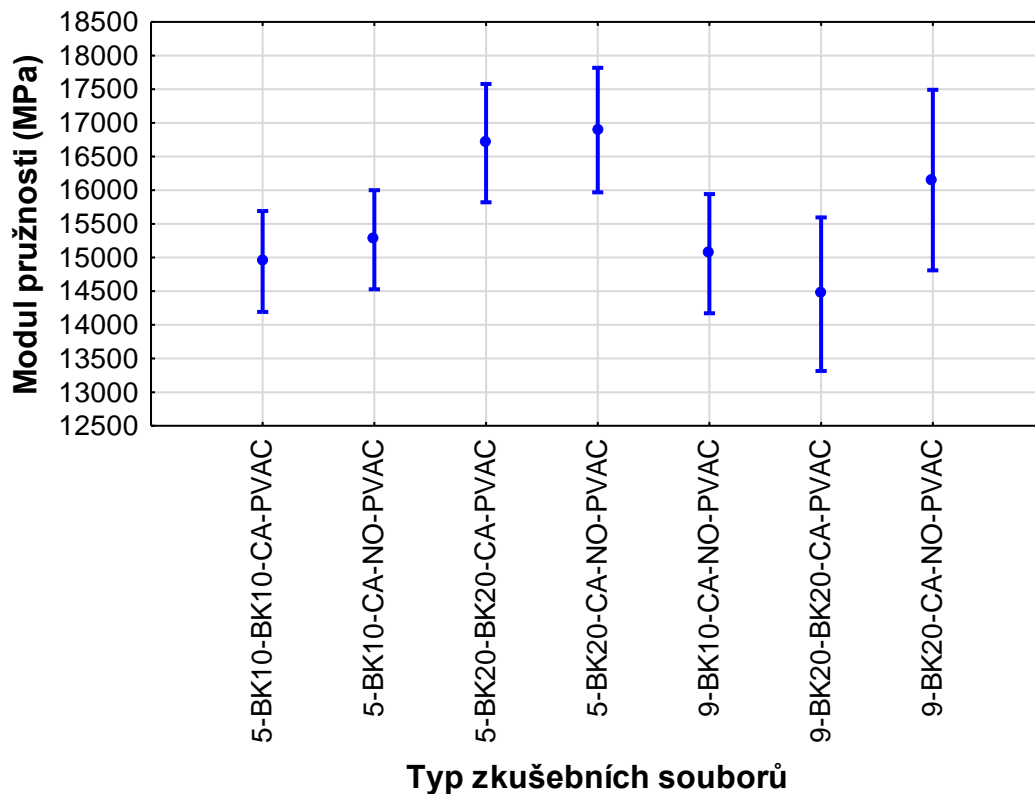
Tabulka 2 Výsledky modulu pružnosti

Název souboru	Modul pružnosti (MPa)	SD	VK
5-BK10-BK10-CA-PVAC	14943,1	2008,8	13,4
5-BK10-CA-NO-PVAC	15264,5	1970,4	12,9
5-BK20-BK20-CA-PVAC	16700,5	2351,0	14,1
5-BK20-CA-NO-PVAC	16894,3	2480,1	14,7
9-BK10-CA-NO-PVAC	15057,2	2370,8	15,7
9-BK20-BK20-CA-PVAC	14456,3	3052,8	21,1
9-BK20-CA-NO-PVAC	16151,1	3593,6	22,2

Z výsledných hodnot v tabulce výše je patrné, že největší modul pružnosti vykazoval soubor zkušebních těles vrstvených, 5 mm silných, zhuštěných o 20 %. Nejnižší hodnoty modulu pružnosti vykazoval soubor těles vrstvených z lamel o tloušťce 9 mm, zhuštěných o 20 %. Z výsledků lze říci, že nevrstvené soubory vykazovaly lepší hodnoty modulu pružnosti, než vrstvené (rozdíl hodnot modulu pružnosti byl v rozmezí od 2 % do desítek %). Tento jev je možné vysvětlit smykovým napětím v oblasti lepeného spoje zkušebního tělesa.

Hodnoty modulu pružnosti pro masivní neupravené bukové dřevo se pohybují okolo 11600 MPa (Gaff *et al.* 2016). Výsledky modulu pružnosti našich měření se pohybují v rozmezí od 14456 MPa do 16894 MPa. Je tedy patrné, že námi použité modifikace zhuštění a vrstvení spolu s použitím nedřevního komponentu mají značný vliv na modul pružnosti.

Pro lepší vizualizaci výsledků přikládáme grafy na obrázcích 24 a 25.



Obrázek 24 grafické znázornění modulu pružnosti

Tabulka 3 výsledky modulu pružnosti

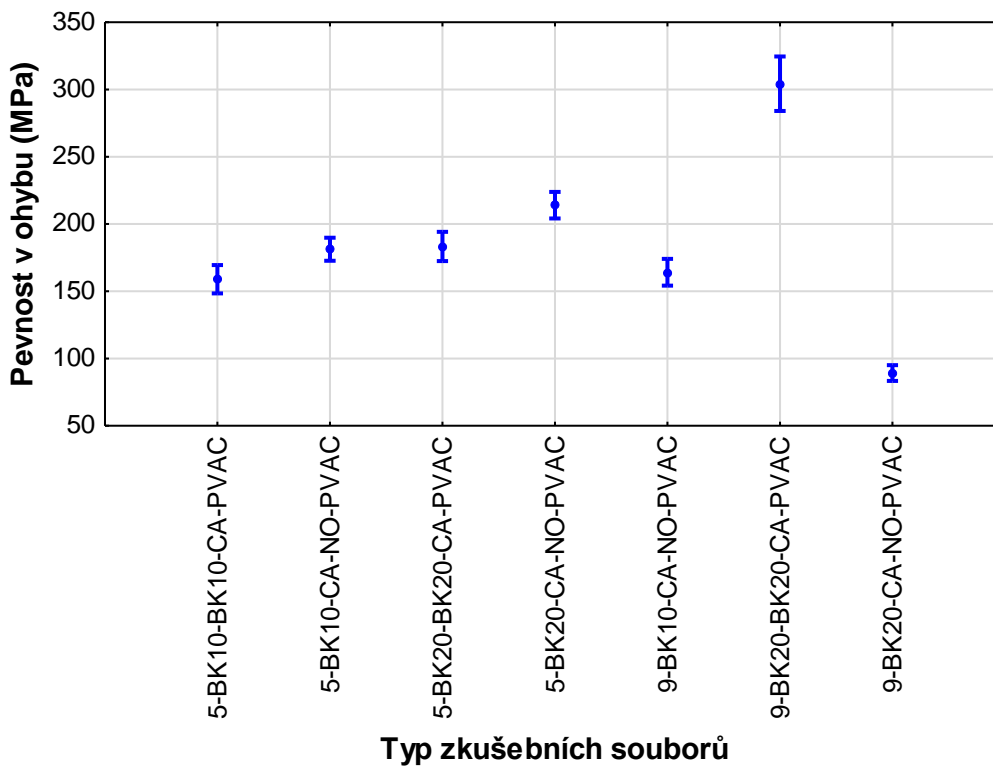
Název souboru	Pevnost v ohybu (MPa)	SD	VK
5-BK10-BK10-CA-PVAC	159,0	28,1	17,7
5-BK10-CA-NO-PVAC	181,2	22,8	12,6
5-BK20-BK20-CA-PVAC	183,3	29,1	15,9
5-BK20-CA-NO-PVAC	214,0	26,5	12,4
9-BK10-CA-NO-PVAC	164,1	26,7	16,3
9-BK20-BK20-CA-PVAC	304,3	54,2	17,8
9-BK20-CA-NO-PVAC	89,2	15,8	17,7

Z tabulky č. 3 lze vyčíst, že největší pevnost v ohybu vykazoval soubor těles vrstvených z 9 mm silných lamel, zhuštěných o 20 %. Nejnižší pevnost v ohybu byla naměřena v souboru nevrstvených, 9 mm silných lamel, zhuštěných o 20 %. Z výsledků je patrné, že pevnost v ohybu se velmi lišila soubor od souboru. Soubor s největší pevností dosahoval hodnot 3,4x větších, než soubor s nejmenší pevností. Dále také

můžeme pozorovat vliv zhuštění na pevnost v ohybu, která byla vždy vyšší u souborů s větší mírou zhuštění (desítky %).

Mez pevnosti v ohybu u námi testovaných zkušebních těles se pohybovala v rozmezí 89 MPa až 304 MPa. Ve své práci uvádí (Wehsener *et al.* 2016) hodnotu meze pevnosti v ohybu pro neupravené masivní bukové dřevo 138 MPa. Je tedy patrný významný vliv modifikací dřeva a použití nedřevního komponentu na mez pevnosti v ohybu.

Výše popsané výsledky můžeme vidět na obrázku 25.



Obrázek 25 grafické znázornění pevnosti v ohybu

11 Závěr

Z výsledků této práce je patrné, že zhušťování dřeva a použití nedřevního komponentu má významný vliv na pevnostní vlastnosti dřeva. Zhušťování zvýšilo hustotu zkušebních těles, což výrazně zvýšilo modul pružnosti a pevnost v ohybu, i když bylo provedeno pouze o 10 % a 20 %. Vrstvení dřeva, jak vyplývá z výsledků naší práce, nemělo výrazný vliv na zlepšení pevnostních vlastností, spíše naopak. Soubory zkušebních těles, které byly vrstvené, vykazovaly lehce nižší hodnoty modulu pružnosti a pevnosti v ohybu, než soubory těles nevrstvených. Jedním z důvodů pro tento jev může být smykové napětí, které vzniká v lepeném spoji zkušebního tělesa při tříbodovém ohybu, jak uvádí literatura. Dalším důvodem může být druh použitého lepidla. Použití nedřevního komponentu (prošívané uhlíkové tkaniny) mělo významný vliv na námi sledované vlastnosti. Při porovnání námi zjištěných hodnot s hodnotami, které uvádí literatura u neupraveného dřeva byly námi zjištěné hodnoty výrazně vyšší. Ohybová pevnost byla u námi vytvořených těles ve většině případů vyšší, než hodnoty neupraveného dřeva, které uvádí literatura.

Námi vytvořený materiál má potenciální význam u konstrukcí s dřevěnými konstrukčními prvky, kde je potřeba zajistit, aby nedocházelo k nežádoucím deformacím jednotlivých prvků. Jeho použití je žádoucí zvláště v konstrukcích na bázi dřeva, kde je vyžadovaná vysoká pevnost konstrukčních prvků

Pro lepší pochopení dané problematiky by bylo možné provést další experiment, ve kterém by byla zkušební tělesa upravena větší mírou zhuštění (až na 50 % objemu) a během zhušťování by měla vyšší vlhkost. Význam by též měl experiment, při kterém by byla použita jiná lepidla, nebo jejich kombinace.

12 Seznam použité literatury

- Böhm, m., Reisner, J., & Bomba, J. (2012). *Materiály na bázi dřeva*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Dřevostavitel. (nedatováno). <https://www.drevostavitel.cz/clanek/drevene-terasy-a-jejich-zivotnost>. Získáno 2019, z www.drevostavitel.cz: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/drevene-terasy-a-jejich-zivotnost>
- Fiberpreg cz a.s. (nedatováno). Získáno 2019, z Kordcarbon: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno
- FLD. (2018). *fakulta lesnická a dřevařská*. Načteno z <https://www.fld.czu.cz/dl/52611?lang=cs>
- Gáborík, J., Gaff, M., Ruman, D., Záborský, V., Kašíčková, V., & Sikora, A. (2016). Adhesive as a Factor Affecting the Properties of Laminated Wood. *Bioresources*. doi:10.15376/biores.11.4.10565-10574
- Gaff, M., & Babiak, M. (2017). Methods for determining the plastic work in bending and impact of selected factors on its value. *Composite Structures*. doi: 10.1016/j.compstruct.2017.11.036
- Gaff, M., & Gáborík, J. (2009). *Vlastnosti povrchu dřeva modifikovaného reliéfováním*. Technická univerzita vo Zvolene. doi: 10.13140/2.1.4752.2241
- Gaff, M., Gašparík, M., Babiak, M., & Vokatý, V. (2017). Bendability characteristics of wood lamellae in plastic region. *Composite Structures*. doi:10.1016/j.compstruct.2016.12.052
- Gorg Blanc, S. (2001). *Dřevo od A do Z* (3.. vyd.). (L. Mikulka, Překl.) Barcelona, Španělsko: Rebo productions CZ.
- Gryc, V., Vavrčík, H., & Gomola, Š. (září 2008). *Researchgate*. Načteno z [researchgate.net](https://www.researchgate.net): https://www.researchgate.net/publication/285739532_Selected_properties_of_European_beech_Fagus_sylvatica_L
- Haygreen, J. G., & Daniels, D. H. (2007). *wfs.swst.org*. Načteno z <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/viewFile/1159/1159>
- Hill, C. (2006). *Wood modification: thermal, chemical and other processes*. Anglie: Willey publ.

-
- Horáček, P. (1998). *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- is.mendelu.cz. (nedatováno). Získáno 2019, z
https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9188
- is.mendelu.cz. (nedatováno). *is.mendelu.cz*. Získáno 2019, z
https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9177;lang=cz
- Kocián, P. (2018). *květena* ČR. Načteno z
<http://www.kvetenacr.cz/detail.asp?IDdetail=860>
- Koželouh, B. (2016). *iMateriály*. Načteno z
https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/konstrukcni-material-vrstvene-drevo_43529.html
- Kuklík, P., & Kuklíková, A. (1. červen 2002). *Agris*. Načteno z Agrární web portál:
http://www.agris.cz/lesnictvi/materialy-na-bazi-dreva?id_a=124464
- ldf.mendelu.cz. (nedatováno). Načteno z
<http://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/woodanatomy/karta.htm?drevina=fagus&jazyk=cz>
- Lesy ČR. (2019). *lesycr.cz*. Načteno z LesyČR: <https://lesycr.cz/>
- Macháček, J. (nedatováno). Získáno 2019, z
<http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNNK/NNK-11.pdf>
- mech.fd.cvut.cz. (nedatováno). Načteno z http://mech.fd.cvut.cz/members/jira/studijni-podklady/tam/pruznost-a-pevnost-zaklady/PP_I_zakladni_pripady.pdf
- Metsä wood*. (2019). Načteno z
<https://www.metsawood.com/global/Products/kerto/Pages/Kerto-Q.aspx>
- Mezistromy.cz. (2019). *Mezistromy.cz*. Načteno z <https://www.mezistromy.cz/ochrana-a-uprava-dreva/modifikacedreva/odborny>
- mmspektrum*. (16. červen 2004). Načteno z MM Spektrum:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/triskove-vlaknite-a-zhustene-drevene-materialy.html>
- NIS. (2013). *Nábytkářský informační systém*. Načteno z <http://www.n-i-s.cz/cz/vlhkost-vnitriho-prostredi/page/494/>
- NIS. (2013). *Nábytkářský informační systém*. Načteno z <http://www.n-i-s.cz/cz/modifikovane-drevo/page/217/>
-

-
- Požgaj, A., Chovanec, D., Kurjatko, S., & Babiak, M. (1993). *Štruktúra a vlastnosti dreva*. Bratislava, Slovenská republika: Príroda a.s.
- Sandberg, D., Kuzman, M. K., & Gaff, M. (2018). *Engineered wood products, Dřevo jako kompozitní a konstrukční materiál* (1. vyd.). Praha, Česká republika: Czech university of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences.
- Scottywood. (nedatováno). *Scottywood*. Získáno 2019, z <https://www.scottywood.ca/>
- Sikora, A., Gaffová, Z., Rajnoha, R., Šatanová, A., & Kminiak, R. (2017). *Researchgate.net*. Načteno z https://www.researchgate.net/publication/314888949_Deflection_of_Densified_Beech_and_Aspen_Woods_as_a_Function_of_Selected_Factors
- Šlesingerová, J., & Horáček, P. (2002). *Nauka o dřevě*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- TON. (2019). *Ton*. Načteno z <https://www.ton.eu/cz/vyroba/>
- Trávník, A. (2005). *Technologické operace výroby nábytku*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita.
- Ústav nauky o dřevě. (2007). [www.ldf.mendelu.cz](http://ldf.mendelu.cz). Načteno z <http://ldf.mendelu.cz/unod/multimedia/woodanatomy/karta.htm?drevina=fagus&jazyk=cz>
- Verma, R., & Netula, P. (2017). Carbon Fibre as a Construction Material. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research*. Načteno z https://www.researchgate.net/publication/321723414_Carbon_Fibre_as_a_Construction_Material
- Wehsener, J., Brischke, C., Hartig, J., Veltrup, L. M., & Haller, P. (2016). THERMALLY AND THERMO-MECHANICALLY TREATED WOOD FOR OUTDOOR APPLICATIONS – BENDING STRENGTH, STRUCTURAL INTEGRITY AND SET RECOVERY. Načteno z https://www.researchgate.net/publication/309809932_THERMALLY_AND_THERMO-MECHANICALLY_TREATED_WOOD_FOR_OUTDOOR_APPLICATIONS_-_BENDING_STRENGTH_STRUCTURAL_INTEGRITY_AND_SET_RECOVERY
-

www.puuinfo.ee. (nedatováno). *www.puuinfo.ee.* Získáno 2019, z
<http://www.puuinfo.ee/files/pdf/WideSpanWoodSports.pdf>

www.simek.eu. (nedatováno). Získáno 2019, z Šimek proficentrum:
[https://www.simek.eu/rakoll-express-d3-1-kg-disperzni-
lepidlo/?utm_campaign=Heureka&utm_medium=cpc&utm_source=Heureka](https://www.simek.eu/rakoll-express-d3-1-kg-disperzni-lepidlo/?utm_campaign=Heureka&utm_medium=cpc&utm_source=Heureka)

www.vos.volyne.cz. (nedatováno). Načteno z
<http://www.vos.volyne.cz/tu/soubory/mechvlast.pdf>

13 Přílohy

Tabulka 5 Výsledky Duncanova testu pro modul pružnosti

číslo souboru	Typ zkušebních souborů	{1} 14943,	{2} 15264,	{3} 16701,	{4} 16894,	{5} 15057,	{6} 14456,	{7} 16151,
1	5-BK10-BK10-CA-PVAC		0,656	0,017	0,009	0,865	0,469	0,102
2	5-BK10-CA-NO-PVAC	0,656		0,042	0,025	0,758	0,279	0,187
3	5-BK20-BK20-CA-PVAC	0,017	0,042		0,773	0,024	0,002	0,414
4	5-BK20-CA-NO-PVAC	0,009	0,025	0,773		0,013	0,001	0,300
5	9-BK10-CA-NO-PVAC	0,865	0,758	0,024	0,013		0,404	0,125
6	9-BK20-BK20-CA-PVAC	0,469	0,279	0,002	0,001	0,404		0,022
7	9-BK20-CA-NO-PVAC	0,102	0,187	0,414	0,300	0,125	0,022	

Tabulka 6 Výsledky Duncanova testu pro mez pevnosti v ohybu

číslo souboru	Typ zkušebních souborů	{1} 158,98	{2} 181,23	{3} 183,33	{4} 213,98	{5} 164,12	{6} 304,32	{7} 89,240
1	5-BK10-BK10-CA-PVAC		0,008	0,004	0,000	0,522	0,000	0,000
2	5-BK10-CA-NO-PVAC	0,008		0,793	0,000	0,033	0,000	0,000
3	5-BK20-BK20-CA-PVAC	0,004	0,793		0,000	0,022	0,000	0,000
4	5-BK20-CA-NO-PVAC	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
5	9-BK10-CA-NO-PVAC	0,522	0,033	0,022	0,000		0,000	0,000
6	9-BK20-BK20-CA-PVAC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000
7	9-BK20-CA-NO-PVAC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	