Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva

Vliv cyklického namáhání na ohybovou pevnost zhuštěného dřeva

Diplomová práce

Autor práce: Miroslav Suchopár

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

2015

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra základního zpracování dřeva

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Miroslav Suchopár

Dřevařské inženýrství

Název práce

Vliv cyklického namáhání na ohybovou pevnost zhuštěného dřeva

Název anglicky

Influence of cyclic loading on the bending strength of densified wood

---

Cíle práce

Hlavním cílem práce je experimentální sledování vlivu cyklického namáhání na ohybovou pevnost zhuštěného dřeva a jeji porovnání s rostlým nezhuštěným dřevem. Zjištěné výsledky tvoří základ pro tvorbu vrstvovitých kompozitů z dřeva nebo z kombinace zhuštěného a nezhuštěným dřeva.

Metodika

1. Teoretická východiska pro sledování vlivů jednotlivých faktorů a jejich vzájemné interakce a experimentální hodnocení. Model využití experimentálních výsledků s doporučením pro vědu a praxi.

2. Vyhodnocení zkoušek ohybového zatížení zhuštěného dřeva a následné porovnání s nezhuštěným materiálem. Určení základního ohybových charakteristik (ohybová pevnost, modul pružnosti, koeficient ohýbatelnosti).

3. Určení využití dosažených výsledků a posouzení vlastností zhušteného dřeva z hlediska využití v praxi.

Doporučený rozsah práce

45 – 55 stran textu

Klíčová slova

zhuštěné dřevo, cyklické namáhání, ohybová pevnost, modul pružnosti, plasticita

---

Doporučené zdroje informací

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

CHUCHRJANSKIJ, P. N. 1953. Zušľachťovanie dreva. Časť 1: Lisovanie dreva. Bratislava , Práca, 156 s.

KAFKA, E., COUFAL, R., DRAHOŠ, V. ČERMÁK, J. 1989. Dřevárska Příručka, I. část, Praha, SNTL, 483 s. ISBN: 80-03-00009-2

Odborné články k dané problematice.

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

STOJČEV, A. Lignamon – zušlechtěné dřevo: výroba, vlastnosti a použití. 1.vyd. Praha: VVÚD, 1979, 98 s.

Předběžný termín obhajoby

2015/06 (červen)

Vedoucí práce

Ing. Miroslav Gašparík, PhD.

Elektronicky schváleno dne 17. 3. 2015

Ing. Milan Gaff, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 3. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 14. 04. 2015

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv cyklického namáhání na ohybovou pevnost zhuštěného dřeva“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Gašparíka, PhD. a doc. Ing. Milana Gaffova, PhD. a použil jen prameny, které uvádím v seznamu použitých zdrojů.

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

V Praze, dne . . . . . .

. . . . . .

Miroslav Suchopár

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Miroslavu Gašparíkovi, PhD. a doc. Ing. Milanu Gaffovi, PhD. za cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěli k vypracování této diplomové práce. Dále bych zde rád vyslovil velký dík své rodině za podporu a trpělivost během celého mého studia.

Abstrakt

V diplomové práci byl zjišťován vliv vybraných faktorů (zhuštění, dřevina, počet cyklů a tloušťka) na sledované charakteristiky (modul pružnosti v ohybu a ohybová pevnost). Hlavním cílem této práce bylo zjistit vliv cyklického namáhání na jednotlivých dřevinách (buk lesní, topol osikový) na zhuštěném a rostlém dřevě při různých tloušťkách. Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny pomocí obrázků a statistických tabulek. Z výsledků práce vyplývá skutečnost, že zhuštění dřeviny ovlivňuje její ohybovou pevnost pozitivně, tedy dřevina se zhuštěním stává pevnější. Na modul pružnosti dřeviny má její zhuštění naopak vliv negativní, když zhuštěním se pružnost dřeviny snižuje. Cyklické namáhání nemá výrazný vliv na ohybovou pevnost, ale u pro modul pružnosti bylo statisticky významné.

Klíčová slova: zhuštěné dřevo, cyklické namáhání, ohybová pevnost, modul pružnosti, plasticita

Abstract

This thesis investigated how the selected factors (densification, wood species, number of cycles and thickness) had influence on observed characteristics (bending strength and modulus of elasticity). Cyclic loading influence on individual species (European beech and aspen) investigated on densified and native wood at various thicknesses was the primary goal of this diploma work. The measured values were assessed by statistical graphs and tables for better result interpretation. The main outcome of work is verification that densification of wood has positive impact on bending strength. This evaluation confirms that densified wood has higher strength. On the other side, the densification has converse and negative affecting on modulus of elasticity due to reduction of elasticity by densification. Cyclic loading does not significantly affect the bending strength, while it was statistically significant for modulus of elasticity.

Keywords: densified wood, cyclic loading, bending strength, modulus of elasticity, plasticity

Obsah

Seznam obrázků 9
Seznam tabulek 11
Seznam požitých zkratek 12
1. Úvod 13
2. Cíl práce 14
3. Rozbor literárních poznatků k řešené problematice 15
3.1. Charakteristika materiálu 15
3.1.1. Buk lesní (Fagus sylvatica *L.*) 15
3.1.2. Topol osika (Populus tremula *L.*) 17
3.2. Kategorizace procesů modifikace dřeva 18
3.2.1. Lisování dřeva 20
3.2.1.1. Způsoby lisování 20
3.2.2. Ohýbání dřeva 23
3.2.3. Vrstvovité dřevní materiály 24
3.3. Fyzikální faktory 26
3.3.1. Vlhkost dřeva 26
3.3.2. Hustota dřeva 27
3.3.3. Teplota 28
3.3.4. Kombinace teploty společně s vlhkostí 29
3.4. Mechanické vlastnosti 29
3.4.1. Mechanické namáhání 29
3.4.1.1. Cyklické namáhání 30
3.4.2. Napětí a deformace 30
3.4.2.1. Napětí 30
3.4.2.2. Deformace 31
3.4.2.3. Vztah mezi napětím a deformací 31
3.4.3. Pružnost dřeva 32

3.4.3.1. Moduly pružnosti 32
3.4.4. Pevnost dřeva 33
3.4.4.1. Pevnost dřeva v ohybu 34
3.4.4.2. Trvalá pevnost dřeva 36
3.4.5. Ohyb 38
4. Metodika diplomové práce 39
5. Metodika experimentální práce 40
5.1. Výroba zkušebních vzorků 40
5.2. Označení zkušebních vzorků 45
5.3. Zhušťování zkušebních vzorků 45
5.4. Vlastní zkoušení zkušebních vzorků 47
5.4.1. Zkoušky prováděné pro zjištění mechanických vlastností 47
5.4.1.1. Modul pružnosti v ohybu 49
5.4.1.2. Pevnost v ohybu 50
5.4.1.3. Cyklické namáhání zkušebních vzorků 50
5.4.1.4. Vlhkost dřeva 53
5.5. Vyhodnocení výsledků 54
6. Výsledky a diskuze 55
6.1. Výsledky experimentálně získaných dat 55
6.1.1. Vyhodnocení účinku sledovaných faktorů na hodnotu ohybové pevnosti 55
6.1.2. Vyhodnocení vlivu sledovaných faktorů na hodnotu modulu pružnosti v ohybu 66
7. Závěr 76
Seznam pramenů a literatury 77

Seznam obrázků

Obr. 1 Kresba bukového dřeva v tangenciálním a radiálním řezu 16
Obr. 2 Kresba topolu osiky v tangenciálním a radiálním řezu 16
Obr. 3 Jednoosé lisování na celou plochu, lokální reliéfování 21
Obr. 4 Způsoby lisování 22
Obr. 5 Válcování dřeva 22
Obr. 6 Znázornění ohýbání bez ocelové pásnice a s ocelovou pásnicí 24
Obr. 7 Napětí a deformace při ohýbání dřeva 24
Obr. 8 Orientace dýh v překližce 25
Obr. 9 Orientace dýh v lamelovém dřevě 26
Obr. 10 Vliv vlhkosti na pevnost bukového dřeva 27
Obr. 11 Vliv hustoty a vlhkosti na Youngův modul pružnosti 28
Obr. 12 Vliv teploty na mechanické vlastnosti 29
Obr. 13 Napěťo-deformační diagram dřeva 32
Obr. 14 Zatížení dřeva při ohybu 34
Obr. 15 Průběh ohybového momentu a druhů napětí při zatížení v ohybu 16
Obr. 16 Křivka trvalého zatížení 36
Obr. 17 Wöhlerova křivka 37
Obr. 18 Kruhové pořezové schéma 40
Obr. 19 Kotoučová pila a srovnávací fréza 41
Obr. 20 Tloušťkovací fréza a širokopásová egalizační bruska 41
Obr. 21 Jednotlivé rozměry vzorků 42
Obr. 22 Schéma zkušebních vzorků bukového dřeva 43
Obr. 23 Schéma zkušebních vzorků osikového dřeva 44
Obr. 24 Válcová zhušťovačka a zhušťování zkušebního vzorku 46
Obr. 25 Uspořádání ohybové zkoušky 47
Obr. 26 Trhací stroj FPZ 100/1 48
Obr. 27 Průběh ohybové zkoušky, ALMEMO 2690, nastavení trhacího stroje 49
Obr. 28 Zatěžovací křivka v oblasti pružné deformace 50
Obr. 29 Odvození průhybu pro cyklovací stroj 51
Obr. 30 Cyklovací stroj, vzorek před průhybem, vzorek v průhybu 52
Obr. 31 Digitální váha KERN EWB 620 – 2M, odvětrávaná sušárna HS 62A 53

Obr. 32 Vliv druhu dřeviny na hodnoty ohybové pevnosti dřeva 57
Obr. 33 Vliv zhuštění dřeviny na hodnoty ohybové pevnosti dřeva 57
Obr. 34 Vliv počtu cyklů na hodnoty ohybové pevnosti dřeva 58
Obr. 35 Vliv tloušťky materiálu na hodnoty ohybové pevnosti dřeva 58
Obr. 36 Čtyř-faktorová analýza rozptylu na ohybovou pevnost při tloušťce 4 mm .. 59
Obr. 37 Čtyř-faktorová analýza rozptylu na ohybovou pevnost při tloušťce 6 mm .. 60
Obr. 38 Čtyř-faktorová analýza rozptylu na ohybovou pevnost při tloušťce 10 mm 61
Obr. 39 Čtyř-faktorová analýza rozptylu na ohybovou pevnost při tloušťce 18 mm 62
Obr. 40 Poruchy válcováním dřeva 66
Obr. 41 Vliv druhu dřeviny na hodnotu modulu pružnosti dřeva 68
Obr. 42 Vliv zhuštění dřeviny na hodnotu modulu pružnosti dřeva 68
Obr. 43 Vliv počtu cyklů na hodnotu modulu pružnosti dřeva 69
Obr. 44 Vliv tloušťky dřeviny na hodnotu modulu pružnosti dřeva 69
Obr. 45 Čtyř-faktorová analýza rozptylu modulu pružnosti při tloušťce 4 mm 70
Obr. 46 Čtyř-faktorové analýza rozptylu modulu pružnosti při tloušťce 6 mm 71
Obr. 47 Čtyř-faktorová analýza rozptylu modulu pružnosti při tloušťce 10 mm 72
Obr. 48 Čtyř-faktorové analýza rozptylu modulu pružnosti při tloušťce 18 mm 72

Seznam tabulek

Tab. 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti bukového dřeva při vlhkosti 12% 16
Tab. 2 Fyzikální a mechanické vlastnosti topolu osiky při vlhkosti 12% 16
Tab. 3 Procentuální hodnoty meze trvalé pevnosti z krátkodobé pevnosti 37
Tab. 4 Počet zkušebních vzorků v souboru podle tloušťky 42
Tab. 5 Tloušťka materiálu před a po zhuštění 42
Tab. 6 Průhyby pro cyklovací stroj pro jednotlivé soubory podle tloušťky 52
Tab. 7 Čtyř-faktorová analýza rozptylu hodnotící účinek vlivu jednotlivých faktorů, dvoj-faktorových až čtyř-faktorových interakcí pro ohybovou pevnost 56
Tab. 8 Základní statistické charakteristiky ohybové pevnosti bukového dřeva 63
Tab. 9 Základní statistické charakteristiky ohybové pevnosti osikového dřeva 64
Tab. 10 Čtyř-faktorová analýza rozptylu hodnotící účinek vlivu jednotlivých faktorů, dvoj-faktorových až čtyř-faktorových interakcí pro modul pružnosti v ohybu .. 67
Tab. 11 Základní statistické charakteristiky modulu pružnosti v ohybu bukového dřeva 73
Tab. 12 Základní statistické charakteristiky modulu pružnosti v ohybu osikového dřeva 74

Seznam použitých zkratek

E_m – modul pružnosti v ohybu [MPa]

F – působící síla [N]

l_0 – osová vzdálenost podpěr na trhacím stroji [mm]

l_D – osová vzdálenost podpěr na cyklovacím stroji [mm]

m_0 – hmotnost zkušebních tělísek v absolutně suchém stavu [g]

m_w – hmotnost zkušebních tělísek při vlhkosti w [g]

P – lisovací tlak [MPa]

RDB_N – rostlé dřevo bukové nezhuštěné

RDB_Z – rostlé dřevo bukové zhuštěné

RDO_N – rostlé dřevo osikové nezhuštěné

RDO_Z – rostlé dřevo osikové zhuštěné

R_{min} – minimální poloměr ohybu [mm]

S – plocha tělesa na kterou působí síla [mm^2]

w – absolutní vlhkost zkušebních vzorků [%]

Y_D – maximální průhyb na cyklovacím stroji [mm]

$Y_{\sigma u}$ – okamžitý průhyb na mezi úměrnosti [mm]

α – opravný koeficient

σ – napětí [MPa]

σ_{max} – mez pevnosti [MPa]

σ_p – pevnost v ohybu [MPa]

σ_{tp} – mez trvalé pevnosti [MPa]

σ_{tz} – maximální velikost napětí [MPa]

$\sigma_{ún}$ – mez únavy [MPa]

1. Úvod

Dřevo patří už od pradávna k nejvýznamnějším přírodním surovinám. Jeho využití je v praxi velmi široké, proto je velkým přínosem znát jeho vlastnosti a možnosti využití. Dřevo jako materiál má velký význam ve stavebním a dřevařském průmyslu. Z hlediska přírodního charakteru materiálu je velice často využíván ke zpříjemnění interiérového prostředí. S ohledem na obnovitelnost dřeva má tento materiál silný potenciál i do budoucna.

Ve stavebním a dřevařském průmyslu se můžeme poměrně často setkat se situací, kdy vlastnosti dřeva v rostlém stavu nejsou dostačující pro dané využití, a proto je potřeba jeho vlastnosti modifikovat a přispět tak k jejich zlepšení k požadovanému účelu. Ke změně vlastností materiálu můžeme použít různé druhy modifikací, kterými jsou například zhuštění dřeva, kombinace materiálů, či v dnešní době hojně využívané vrstvení materiálu.

Aby bylo možné dřevo takto kombinovat je potřeba nejdříve provádět zkoušení jednotlivých vstupních materiálů. Této problematice se věnuje tato diplomová práce.

Diplomová práce je zaměřena na sledování vlivu jednotlivých nebo na kombinaci vybraných faktorů (tloušťka materiálu, použitá dřevina, cyklické namáhání a zhuštění) na sledovanou charakteristiku (modul pružnosti v ohybu a ohybovou pevnost). Tyto vlastnosti jsou zkoumané především z hlediska jejich významu při tvorbě nábytku (židle, postel), zejména z důvodu toho, že při cyklickém namáhání je možné tento pohyb simulovat a následně v porovnání s nezatěžovaným dřevem stanovit, jak zkoumaný materiál měnil své vlastnosti.

Výsledky prováděného výzkumu následně slouží jako podklad pro tvorbu vrstvených materiálů, u kterých je možné následně předpokládat jejich vlastnosti při použití. Tímto postupem je umožněn vznik a vývoj nových materiálů s lepšími vlastnostmi při praktickém využití.

2. Cíl práce

Cílem diplomové práce je zjišťování vlivu vybraných faktorů (cyklické namáhání, druh dřeviny, zhuštění a tloušťka) na sledované charakteristiky (ohybová pevnost a modul pružnosti v ohybu).

Výsledky zjištěné v tomto měření budou představovat základ pro další praktické využití dřeva na vrstvovité kompozity, a to jak z rostlého nezhuštěného dřeva, tak i v kombinaci zhuštěného a nezhuštěného dřeva.

3. Rozbor literárních poznatků k řešené problematice

V dřívějších dobách bylo dřevo používáno především na stavbu obydlí, jednoduché nástroje a v neposlední řadě ho bylo využíváno jako zdroj energie. Po letitém zkoumání vlastností, jak už fyzikálních nebo mechanických, je prokazováno, že dřevo je velice dobrý a jako jediný přirozeně obnovitelný materiál.

Dřevo jako přírodní materiál má své pozitivní znaky, ale je třeba zmínit i jeho záporné vlastnosti. Mezi kladné vlastnosti se řadí např. pevnost, pružnost, lehkost, tepelně izolační vlastnosti, také je schopno snášet velké zatížení. Jako záporné vlastnosti se v literatuře udávají nestejnorodá struktura, anizotropie, vady dřeva, sesychání a bobtnání.

Právě tyto nedostatky dřeva je možné do určité míry odstraňovat různými způsoby modifikace. Různými způsoby modifikací se budeme dále zabývat v následných kapitolách (Požgaj *et al*. 1997).

3.1. Charakteristika materiálu

Pro zpracování této experimentální práce byly vybrány dvě dřeviny, které mají od sebe výrazně odlišné vlastnosti. Vybrané dřeviny jsou Buk lesní (Fagus sylvatica *L*.), jako zástupce tvrdé dřeviny a měkká dřevina Topol osika (Populus Tremula *L*.).

3.1.1. Buk lesní (Fagus sylvatica *L*.)

V současné době buk lesní zastává cca 7% z celkové produkce dřevin v České republice. V České republice jsou nejvhodnější podmínky pro jeho růst v nadmořských výškách 500 – 800 m n. m., přičemž běžně roste ve výškách 300 – 1000 m n. m. a ve výjimečných případech roste až do 1250 m n. m. (Hejný a Slavík 2003).

Buk lesní se dožívá věku až 400 let, když nejlepší využití je v letech 100 – 140. Strom běžně dorůstá do výšky 35 – 40 m, s průměrem kmene do 1,5 m. Při růstu v zalesněných prostorech vytváří štíhlé kmeny, jako solitér vytváří košaté habity. Dřevo buku se vyznačuje tím, že je bezjádrová dřevina, nic méně hlavně u stromů vyššího věku se vyskytuje nepravé jádro. Zařazuje se do skupiny středně těžkého a tvrdého dřeva. Dřevo má po seřezání barvu bílou až slabě narůžovělou, je vidět i rozdíl

mezi dřevem a vlhčí bělí, tyto barevné změny se samy odstraní po vyschnutí dřeva a barva je potom sjednocená světlehnědou až narůžovělou. Kůra má hladký povrch, šedé až bělošedé barvy (Fellner *et al*. 2007, Hejný a Slavík 2003).

Dřevo buku je převážně využíváno v nábytkářském průmyslu, nejvíce je z něho vyráběn ohýbaný nábytek. Dále je využit na výrobu lamel, krájených a loupaných dýh a překližek.

Na řezu dřeva jsou velmi dobře viditelné a pro buk velice charakteristické dřeňové paprsky (obr. 1).

Obr. 1 Kresba bukového dřeva v tangenciálním a radiálním řezu (Zeidler 2012)

Fyzikální a mechanické vlastnosti při vlhkosti 12% jsou shrnuté v tabulce 1.

Tab. 1 Fyzikální a mechanické vlastnosti bukového dřeva při vlhkosti 12% (Wagenführ 1974, Sarvaš *et al*. 2010)

Vlastnost	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna
Hustota [Kg/m^3]	720	
Pevnost v tahu [MPa]	135	10,7
Pevnost v tlaku [MPa]	62	
Pevnost ve smyku [MPa]	8	
Pevnost v ohybu [MPa]	123	
Modul pružnosti v ohybu [MPa]	16000	
Houževnatost [$J.cm^{-2}$]		8,04
Tvrdost podle Brinella [MPa]	72	34
Tvrdost podle Janka [MPa]	78	64,1
Sesychání [%]	0,3	5,8

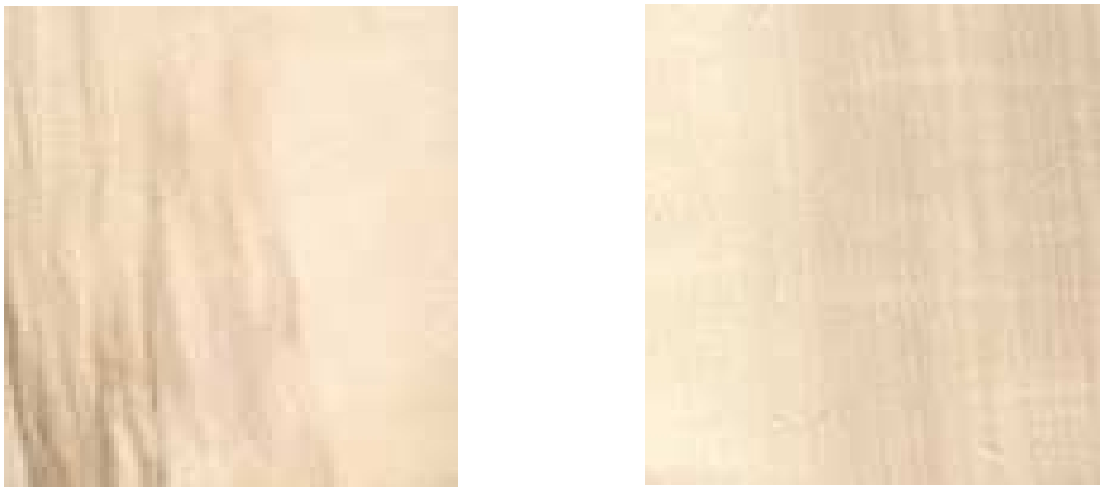
3.1.2. Topol osika (Populus tremula *L.*)

Topol osika má v České republice dobré podmínky pro růst v nížinách až po horské oblasti, a to do maximální nadmořské výšky 1400 m n. m.

Topol osika se dožívá věku až 150 let. Patří do rychle rostoucích dřevin s možností vzrůstu až 30 m, s průměrem kmene okolo 70 cm. Na topolu je viditelné jádro. Dřevina je zařazována do skupiny lehkého a měkkého dřeva, je jednou z nejlehčích a nejměkčích dřevin u nás. Dřevo má barvu v celém průřezu bílou až šedožlutou. Kůra je nejdříve hladká zelenošedé barvy, ale v průběhu let se změní na podélně brázditou černošedé barvy. Dřevina je velice dobrá na opracování, moření a přijímání lepidel (Zeidler 2012, Fellner *et al*. 2007, Hejný a Slavík 2003).

Dřevo topolu osiky se převážně využívá pro výrobu obalového materiálu, palet a při krájení dýh na poddýžky. Kvalitnější výřezy jsou významnou surovinou s využitím na výrobu zápalek.

Na příčném a tangenciálním řezu nejsou viditelné dřeňové paprsky, ale na radiálním řezu se projevují lesklými proužky tmavší barvy, než má základní dřevo (obr. 2).



Obr. 2 Kresba topolu osiky v tangenciálním a radiálním řezu (Vavrčík 2002)

Fyzikální a mechanické vlastnosti topolu osiky při vlhkosti 12% jsou shrnuty v tabulce 2.

Tab. 2 Fyzikální a mechanické vlastnosti topolu osiky při vlhkosti 12% (Wagenführ 1974, Sarvaš *et al.* 2010)

Vlastnost	Rovnoběžně s vlákny	Kolmo na vlákna
Hustota [Kg/m^3]	490	
Pevnost v tahu [MPa]	75	1,7
Pevnost v tlaku [MPa]	40	4,8
Pevnost ve smyku [MPa]	6,8	
Pevnost v ohybu [MPa]	65	
Modul pružnosti v ohybu [MPa]	8800	
Houževnatost [$J.cm^{-2}$]		8,04
Tvrdost podle Brinella [MPa]	23	11
Tvrdost podle Janka [MPa]	31	64,1
Sesychání [%]	0,3	3,5

V této kapitole byly shrnuty mechanické vlastnosti zkoumaného rostlého dřeva. Vlastnosti nejsou vždy odpovídající účelu jejich použití. Za účelem využití dřeva jsou vlastnosti modifikovány. Modifikace jsou prováděny různými způsoby, ale vzhledem k řešené problematice se budeme zaobírat způsobem spadajícím do kategorie mechanických modifikací a do kategorie vrstvení materiálu rozdílných vlastností, které budou podrobněji probrány v následujících kapitolách.

3.2. Kategorizace procesů modifikace dřeva

Modifikace je proces, při kterém dochází k dočasné nebo trvalé změně vlastností materiálu. Tyto modifikace je možné kategorizovat:

1. Chemické:
    - acetylace,
    - esterifikace,
    - a další.
2. Tepelné:
    - vaření,
    - paření:
        - přímé,
        - nepřímé
    - a další.

3. Kombinované:
    - hydrotermická + zhuštění,
    - acetylace + zhuštění,
    - a další.

4. Mechanické:
    - zhuštění:
        - rovnoměrné:
            - kolmo na dřevní vlákna,
            - rovnoběžně s dřevními vlákny,
            - objemové.
        - nerovnoměrné:
            - kolmo na dřevní vlákna.
    - a další.
5. Vrstvení:
    - překližování,
    - lamelování,
    - kombinace materiálů,
    - a další.
6. Energiemi:
    - mikrovlnným ohřevem,
    - vysokofrekvenčním ohřevem,
    - gama záření,
    - infračervené záření,
    - a další.
7. Ostatní.

(Zemiar 1997, Kafka *et al*. 1989, Trebula a Klement 1997, Sergovskij 1977, Stojčev *et al*. 1979)

V následující kapitole se budeme zaobírat vybranými způsoby modifikací, z pohledu zkoumané problematiky.

3.2.1. Lisování dřeva

Lisování je technologický proces, který je prováděn z důvodu zvýšení dřevní hmoty v jednotce objemu, respektive k zvýšení hustoty dřeva. Proces je prováděn pomocí lisovacího tlaku a to za studena bez plastifikace nebo za přítomnosti jiných činitelů využívaných při plastifikaci (Chuchrjanskij 1953).

Lisováním dřevní hmoty se dosahuje zhuštění dřeva. To je možné z důvodu pórovitosti dřeva (Navi a Heger 2004, Navi a Girardet 2000, Tabarsa a Chui 1997)

Tím, že je zvýšený objem dřevní hmoty, se také zároveň zvyšuje i pevnost dřeva, a to za podmínky, že při zhušťování nedošlo k destrukci dřeva.

Zhušťovat je možné všechny dřeviny, ale u dřevin s velkým podílem letního a jarního dřeva se nedoporučuje zhušťovat bez předešlé chemické plastifikace. Toto platí hlavně u jehličnatých dřevin, které nejsou na zhušťování příliš vhodné. U listnatých dřevin je tomu naopak. Ty se dají velice dobře zhušťovat do určité míry i bez předchozí chemické plastifikace, ale při použití chemické plastifikace (amoniakem) dosahuje dřevo listnatých dřevin zdaleka lepších výsledků. Takto upravené dřeviny můžeme hlavně vzhledově porovnat s exotickými dřevinami (eben, teak). Dřevo zhuštěné po předcházející chemické plastifikaci dosahuje lepší tvarové stability ve vlhkém a mokrém prostředí, než dřevo zhuštěné bez chemické plastifikace (Kafka *et al*. 1989).

3.2.1.1. Způsoby lisování

1. **Jednoosé lisování**

Je jedním z nejrozšířenějších způsobů lisování, které je prováděno ve vytápěném hydraulickém lisu kde síla působí pouze v jednom směru. Jednoosé lisování (obr. 3) se rozděluje na dvě další části podle působícího tlaku.

Rovnoměrné – nejběžnější postup pro zhušťování dřeva, kde je vyvíjena na celé ploše tělesa stejná deformace (obr. 4a).

Nerovnoměrné – lisování mezi tvarovými lisovacími deskami, které na lisovací ploše nezpůsobují ve všech místech stejnou deformaci. Jejich výsledkem je po vylisování reliéf (obr. 4b). Lisování je prováděno i mezi rovnými lisovacími deskami s tím rozdílem, že je mezi ně vložen tvarovaný přířez (obr. 4c). Pro lisování jen na části plochy je využíváno lokálního reliéfování (obr. 3).

U jednoosého lisování je potřeba velkého lisovacího tlaku, jelikož lisuje celý průřez na jednou po celé ploše. Při jednoosém lisování je napětí dáno z rovnice 1.

Při použití způsobu lisování je nutno využívat lisovacích forem. Proces je nutné vždy po uzavření lisu a stlačení materiálu zastavit a otevřít lis. Následně vybrat slisovaný materiál a vložit nový, což je pracné a náročné na čas.

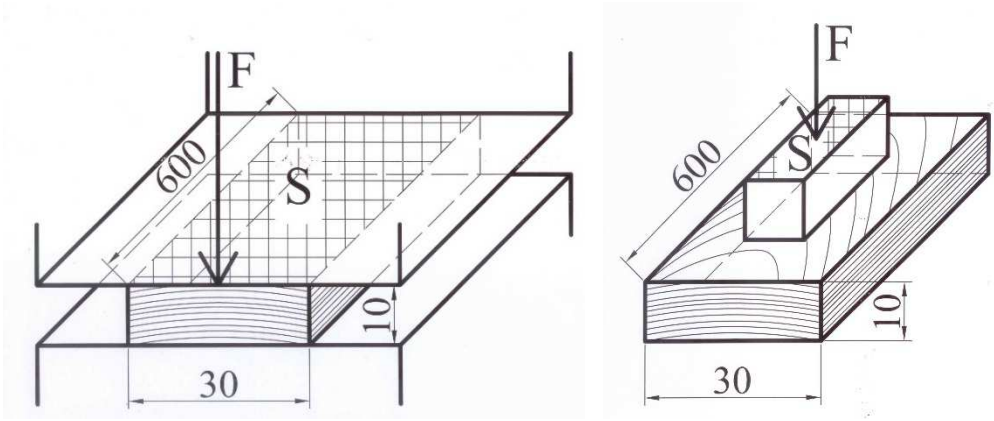
$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{F}}{\mathbf{S}} \ [\mathbf{MPa}] \qquad [\mathbf{1}]$$

Kde:

P – lisovací tlak [MPa]

F – působící síla [N]

S – plocha tělesa na kterou působí síla [mm^2]



Obr. 3 Jednoosé lisování na celou plochu, lokální reliéfování

2. **Dvouosé lisování**

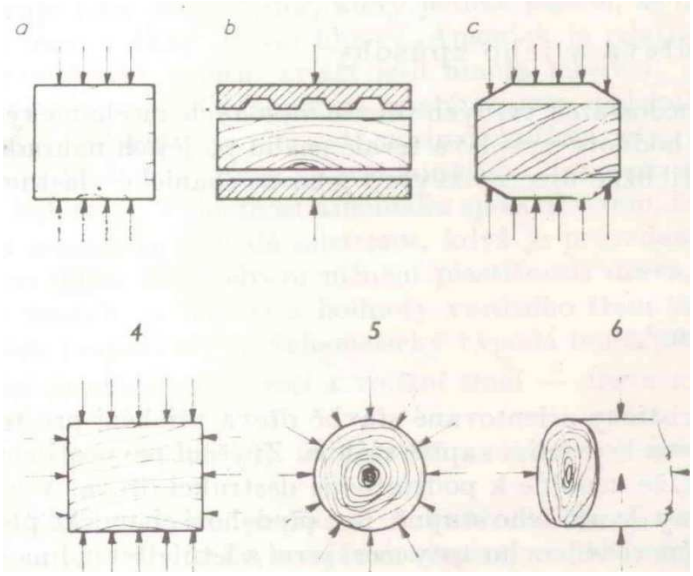
Je působení dvou sil na přířez. Jedna síla zatěžuje přířez v radiálním a druhá v tangenciálním směru (obr. 4/4). Při tomto lisování vzniká zhuštěné dřevo s vysokými mechanickými vlastnostmi.

3. **Obvodové lisování**

Přířez je zatěžován po obvodu v radiálním směru stejnou silou (obr. 4/5). Způsob je určený na výrobu ložisek.

4. Prostorové lisování

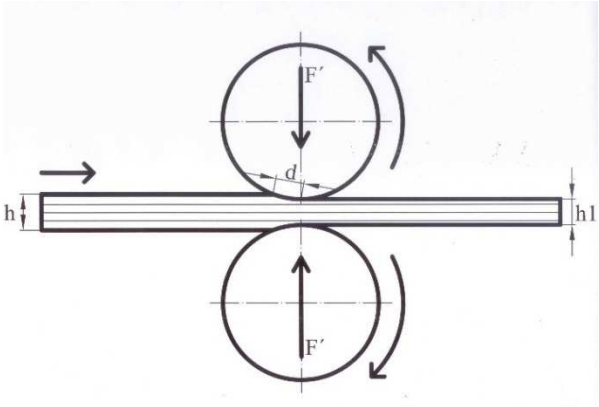
Přířez je lisován a zároveň impregnován za vysokého tlaku několik Mpa v kapalině, která působí na celý povrch přířezu ve stejném čase (obr. 4/6). Při použití tohoto způsobu je důležité, aby k zatížení maximálním tlakem došlo co nejrychleji, v řádu několika vteřin (Kafka *et al*. 1989).



Obr. 4 Způsoby lisování a) lisování rovnoměrné po celé ploše rovnými deskami, b) lisování nerovnoměrné tvarovanými deskami, c) lisování nerovnoměrné tvarovaného přířezu rovnými deskami, 4/4) dvouosé lisování v radiálním a tangenciálním směru, 4/5) obvodové lisování, 4/6) prostorové lisování (Kafka *et al*. 1989)

5. Válcování dřeva

Mezi dvěma válci prochází přířez, který je zhušťován silou vyvinutou přitlačením válců (obr 5). Způsob je využíván při výrobě podlahovin, lamel, obkladů stěn a poddýžek (Kafka *et al*. 1989).



Obr. 5 Válcování dřeva

Válcování dřeva není prováděno pouze jedním přechodem mezi dvěma válci, ale je to proces postupný. Při jednom průtahu je možné zhustit dřevo pouze o určitý stupeň (Vorreiter 1949).

U válcování dřeva je velkou výhodou oproti lisování, že je možné na dřevní hmotu vytvořit větší lisovací tlak, podle rovnice 2.

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{F'}}{\mathbf{S'}} \ [\mathbf{MPa}] \qquad [\mathbf{2}]$$

Kde:

P – lisovací tlak [MPa]

F´ – působící síla [N]

S´ – plocha tělesa na kterou působí síla [mm^2]

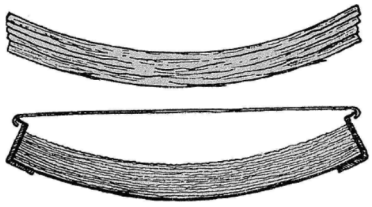
Zhuštěné dřevo má využití jako náhrada za tvrdé dřevo exotického původu, plasty a kovy, ve slévárenství na modely, ve strojírenství na ložiska, v textilním průmyslu na člunky, při výrobě hudebních nástrojů a při výrobě podlahovin (Kafka *et al*. 1989).

3.2.2. Ohýbání dřeva

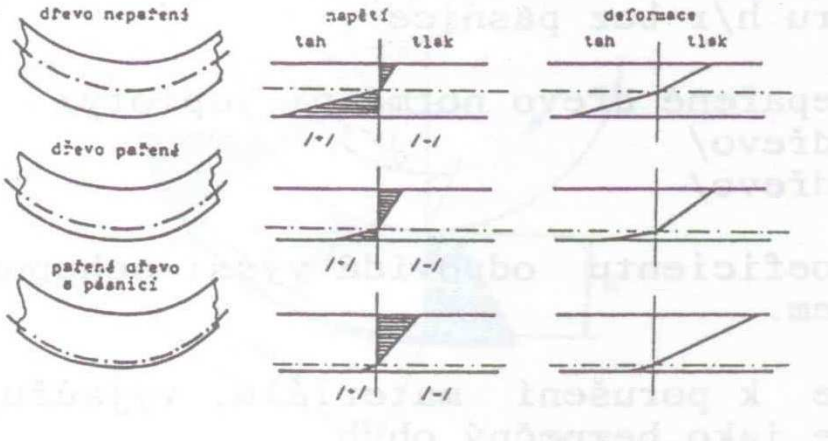
Při technologii ohýbání dřeva se snažíme o posutí neutrální osy, která vzniká na přechodu mezi tlačenou a taženou oblastí průřezu. Snažíme se o to z důvodu toho, že dřevní hmota má větší pevnost v tahu než v tlaku. Při tlakovém namáhání se dřevní hmota dokáže deformovat až o 30%, ale při tahovém namáhání pouze o 2%. V důsledku toho při ohýbání dřevo praskne na vnější tahové straně.

V ohybu je dáno, že neutrální osa se posouvá ke straně s vyšší tuhostí. Aby se neutrální osa posunula k tažené straně a zvětšila se tlaková část průřezu, opatříme přířez ocelovou pásnicí se zarážkami. Ocelová pásnice (obr. 6) přebírá část tahového zatížení (obr. 7) a docílí toho, že ve dřevě dojde převážně k tlakovým a minimálním tahovým deformacím (Vaněk 1952).

Zvětšování tlakové oblasti pomocí ocelové pásnice není jediný způsob posunu neutrální osy, ale využíváme i fyzikálních faktorů nebo kombinaci obojího. Při použití fyzikálních faktorů je u nás vhodné využívat listnaté dřeviny, ze kterých je nejvhodnější dřevinou buk (Požgaj *et al*. 1997, Kafka *et al*. 1989).



Obr. 6 Znázornění ohýbání bez ocelové pásnice a s ocelovou pásnicí (Vaněk 1952)



Obr. 7 Napětí a deformace při ohýbání dřeva (Dejmal 1995)

3.2.3. Vrstvovité dřevní materiály

Vrstvené dřevní materiály mají velký význam a využití v dřevařském a stavebním průmyslu. Rostlé dřevo je materiál s odlišnými vlastnostmi při různém směru vláken, což je limitující při řešení konstrukčního využití. Při tvorbě vrstvovitého materiálu se snažíme tyto nedostatky odstranit nebo aspoň snížit na odpovídající mez. Vrstvením jednotlivých materiálu je zvyšována homogenita. Kombinací materiálů je možné dosáhnout požadovaných vlastností.

Na výrobu mohou být použity i dřeviny menších kvalit a to středové vrstvy. Na povrchové části jsou využívány cennější dřeviny s lepšími mechanickými vlastnostmi.

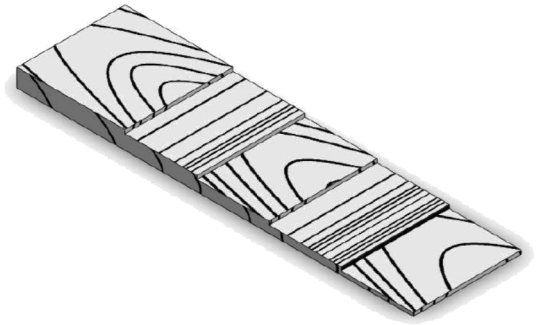
Pro vrstvené materiály se většinou využívá procesů:

1. Překližování.
2. Lamelování.
3. Kombinace materiálu.

V diplomové práci jsme se zabývali zkoumáním určitých mechanických vlastností rostlého a zhuštěného dřeva, konkrétně na bukovém a osikovém dřevu. Poznatky z této diplomové práce, budou sloužit jako teoretický základ pro tvorbu vrstvovitého materiálu.

1. Překližování

Překližování je způsob vrstvení materiálu, při kterém konstrukční deska nebo nábytkové dílce jsou vyrobeny z minimálně třech vrstev na sebe navzájem kolmo slepených dřevních prvků (obr. 8), kterými mohou být dýhy, dýha a laťovkový střed, dýha a nedřevěný materiál. Vždy musí být dodržen lichý počet vrstev. Slepením souboru jednotlivých vrstev na sebe kolmých docílíme zajištění stability materiálu. Materiál takto vyrobený má stejné vlastnosti v obou směrech (Dudas 2008).



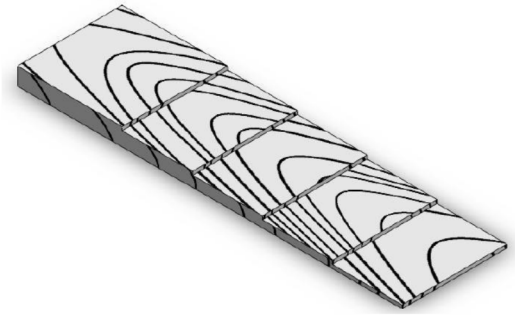
Obr. 8 Orientace dýh v překližce (Minárik 2014)

2. Lamelování

Lamelování je způsob vrstvení materiálu, který vzniká slepením jednotlivých dýh nebo tenkých latěk na sebe, v podélném směru vláken (obr. 9). Při skládání souborů se jednotlivé dýhy otáčejí z důvodu odstraněné paměti dýhy, která vznikla při loupání. Na středovou vrstvu možno použít dýhy menší kvality do povrchové vrstvy využít dýhy vyšších kvalit (Dudas 2008).

Tento materiál dosahuje vysokých pevností v ohybu při dynamickém namáhání. Lamelováním se vyrábějí dílce rovné nebo tvarované. Tvarové dílce jsou lepeny a současně i tvarovány.

Lamelování se využívá především na sedací nábytek a postelové rošty.



Obr. 9 Orientace dýh v lamelovém dřevě (Minárik 2014)

3. Kombinace materiálů

Kombinací materiálu je možné vytvářet nový materiál o určitých požadovaných vlastnostech. Podkladem pro tento způsob je tato diplomová práce, kde je zkoumán jednotlivý materiál a to buď rostlého, nebo modifikovaného dřeva. Z těchto poznatků je možné do určité míry předpokládat vlastnosti nového materiálu. Vlastní kombinací můžeme vytvářet materiál s požadovanými vlastnostmi.

Kombinace materiálu je využívána jak v dřevařském tak i ve stavebním průmyslu.

V následující části se budeme zabývat hlavními činiteli, které ovlivňují mechanické vlastnosti.

3.3. Fyzikální faktory

V experimentálním výzkumu v rámci diplomové práce jsme jako ovlivňující faktory pevnosti a modulu pružnosti zvolili vlhkost, hustotu, teplotu a kombinaci těchto faktorů.

3.3.1. Vlhkost dřeva

Vlhkost dřeva je jeden z faktorů, který nejvíce ovlivňuje mechanické vlastnosti dřeva. Obsah vody ve dřevě se dělí do tří skupin, které mají na mechanické vlastnosti odlišný vliv:

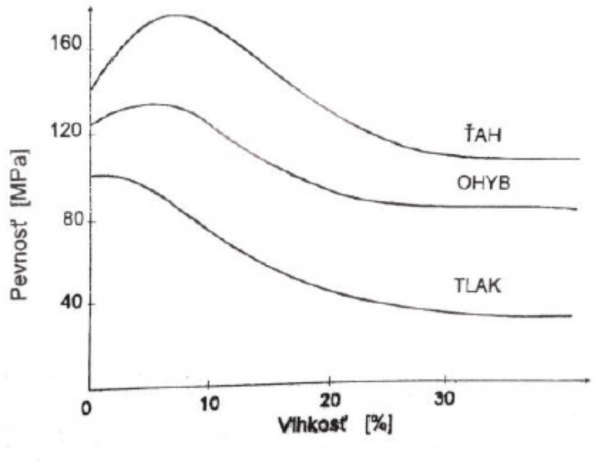
1. Chemicky vázaná voda – nemá žádný význam.
2. Voda vázaná – nejvýznamnější vliv.

3. Voda volná – menší význam než voda vázaná.

Voda vázaná se ve dřevě nachází v buněčných stěnách a je vázána vodíkovými můstky hydroxylové skupiny OH amorfní části celulózy a hemicelulóz. Její výskyt je při vlhkostech 0 – 30% (Gandelová *et al*. 2009).

Dřevo v konstrukci nebo ve výrobku je vystaveno různým povětrnostním vlivům, ve kterých plní svojí funkci. Dřevo má schopnost přijímat vlhkost podle prostředí kde je umístěno a ve většině případů se pohybuje v rozmezí od 9 do 22% vlhkosti. Pokud se změní vlhkost v rozsahu vázané vody o 1%, na pevnosti dřeva se projeví v průměru o 3 až 4%. Dřevo při určování mechanických vlastností se klimatizuje na vlhkost 12%, při této vlhkosti se porovnávají jednotlivé vlastnosti v rámci dřeviny a ostatních dřevin (Požgaj *et al*. 1997).

Na obrázku 10. je znázorněn průběh pevností bukového dřeva a je možné vidět, že hodnota tlakové pevnosti klesá s narůstající hodnotou vlhkosti. U tahové a ohybové pevnosti hodnota do vlhkosti 9% stoupá, ale od vlhkosti 9 až 30% hodnota pevnosti klesá.



Obr. 10 Vliv vlhkosti na pevnost bukového dřeva (Babiak a Dubovský 2001)

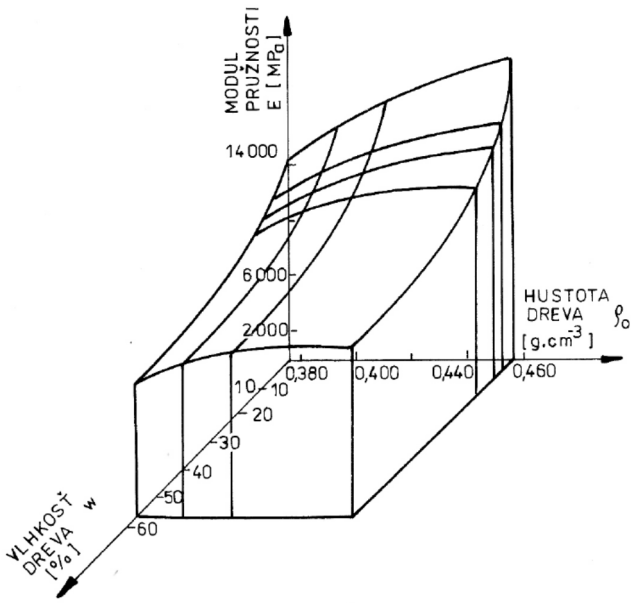
3.3.2. Hustota dřeva

Se stoupající hodnotou dřevní hmoty v jednotce objemu, dokáže materiál vyvinout větší vnitřní odpor vůči vnějšímu zatížení.

Pevnost dřeva nezávisí pouze na obsahu dřevní hmoty v jednotce objemu, ale i na šířce letokruhů a podílu letního dřeva. U listnatých dřevin je šířka ročních kruhů pouhým okem těžko viditelná a není vhodným ukazatelem pevnostních vlastností.

Věrohodnou charakteristikou není ani v podílu letního a jarního dřeva, jelikož podíl není zřetelný. Z toho vyplívá, že hustota je jediným faktorem ovlivňující mechanické vlastnosti dřeva.

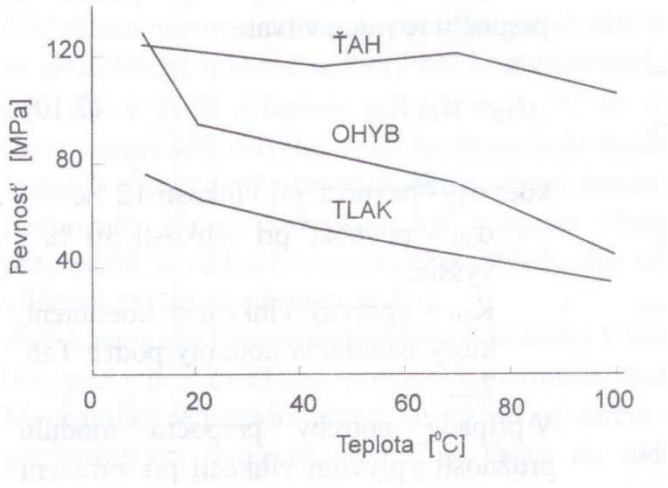
Vliv vlhkosti a hustoty na modul pružnosti je znázorněn na obrázku 11. Podle obrázku je vidět, že na modul pružnosti má značný vliv hustota a vlhkost. Při klesající hodnotě vlhkosti ve dřevě a rostoucí hodnotě hustoty dřeva stoupá současně i modul pružnosti (Požgaj *et al*. 1997).



Obr. 11 Vliv hustoty a vlhkosti na Youngův modul pružnosti (Požgaj *et al*. 1997)

3.3.3. Teplota

Vliv teploty na mechanické vlastnosti je takový, že při rostoucí teplotě klesá hodnota pevnosti (obr. 12) a pružnosti. Při teplotě do 70˚C se mechanické vlastnosti sníží jen dočasně, ale u teploty nad 100˚C se projevují změny trvalého rázu (Gandelová *et al*. 2009).



Obr. 12 Vliv teploty na mechanické vlastnosti (Babiak a Dubovský 2001)

3.3.4. Kombinace teploty společně s vlhkostí

Kombinace těchto faktorů je využíváno především při hydrotermické plastifikaci dřeva. Působením jednotlivých faktorů se pevnost dřeva snižuje, ale při kombinaci se snižuje ještě více (Horáček 2001).

V následujících kapitolách bude seznámeno s mechanickými vlastnostmi, na které mají tyto fyzikální faktory vliv.

3.4. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti dřeva udávají vlastní schopnost materiálu odolávat působení vnějších sil. Mezi hlavní mechanické vlastnosti se řadí pevnost a pružnost dřeva. Tyto dvě vlastnosti jsou hlavním předmětem zkoumání v experimentální části diplomové práce (Gandelová *et al*. 2009).

3.4.1. Mechanické namáhání

Mechanické namáhání chápeme jako děj, ve kterém dochází k působení dvou nebo více mechanických sil na dřevo. Toto namáhání má vliv buď dočasné, nebo trvalé změny tvaru tělesa. U děje nemusí působit vždy jen mechanická síla, ale přidávají se i ostatní fyzikální síly, které by se daly rozdělit na vlhkostní, tepelné a další. Podle umístění namáhaného prvku se většinou namáhání kombinuje. Při umístění dřeva jako konstrukčního prvku vzniká kombinace zatížení mechanického a vlhkostního. Při

takovém druhu zatížení se musí počítat i s faktorem času, jelikož dřevo při mechanickém a vlhkostním namáhání v čase, velice ovlivňuje deformaci dřeva (Požgaj *et al*. 1997).

Aplikací vrstveného dřeva ve výrobcích se častokrát setkáváme s cyklickým namáháním za měnícího se zatížení (postelový rošt). Účelem práce je tvorba vrstveného materiálu s modifikovanými vlastnostmi, které budou těmto namáháním nejvíce odolávat.

3.4.1.1. Cyklické namáhání

Cyklické namáhání je zatěžování zkoušeného vzorku mechanickou silou v jednom směru. Tato síla namáhá těleso opakovaně, až do hodnoty meze úměrnosti a to z důvodu, aby nebyla překročena pružná oblast a nedošlo k porušení. Opakování se určuje pomocí času nebo počtem cyklů. V tomto experimentálním výzkumu bylo zvoleno kritérium počtu cyklů. Když není překročena lineární oblast zkoušeného vzorku, tak by nemělo dojít při nekonečném počtu cyklů k jeho porušení. V této chvíli se projeví pouze únavová pevnost materiálu. A ta se projevuje poklesem hodnoty meze pevnosti, kterou se budeme dále zabývat v následující kapitole.

3.4.2. Napětí a deformace

3.4.2.1. Napětí

Napětí je velikost vnitřních sil v tělese, které jsou vyvolané vnějšími mechanickými silami. Napětí vzniká normálové a tangenciální. Při rovnoměrném rozložení síly na ploše je napětí vyjádřené podílem síly a plochy rovnice (3).

Normálové napětí je pokud síla působí kolmo na plochu průřezu a tangenciální napětí vzniká, pokud síla působí v rovině průřezu (Požgaj *et al*. 1987).

$$\sigma = \frac{F}{S} \ [\mathbf{MPa}] \qquad [3]$$

kde:

σ – napětí [MPa]

F – síla [N]

S – plocha tělesa [mm^2]

3.4.2.2. Deformace

Deformace je změna tvaru a rozměrů dřeva jako reakce na vliv vnějších mechanických sil a vlhkostního napětí. Deformace se v zásadě rozděluje na tři skupiny.

Pružná deformace se nachází u dřeva pouze v pružné oblasti. To znamená, že po odstranění vnějšího mechanického nebo vlhkostního zatížení dojde k navrácení do původního stavu.

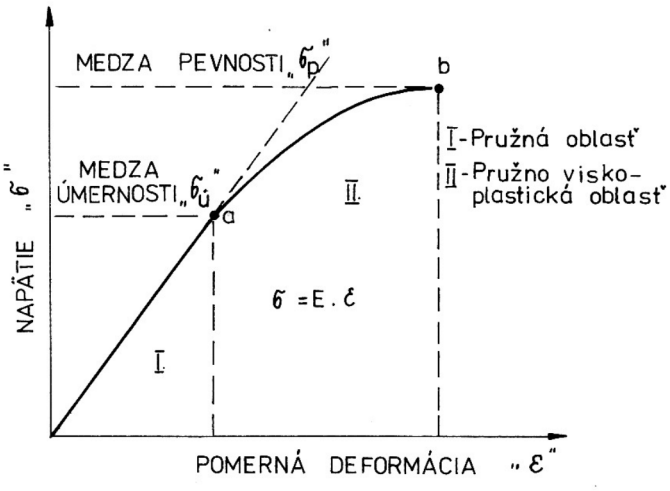
Deformace pružné v čase je deformace projevující se v pružně-viskózní oblasti. Po odstranění vnějšího mechanického nebo vlhkostního zatížení se dřevo nevrátí do původního stavu okamžitě, ale až za určitý čas.

Plastická deformace (trvalá deformace) je stav kdy se těleso trvale deformuje. Při tomto stavu vznikají pružné deformace i deformace pružné v čase v takzvané pružně-viskózně-plastické oblasti. Z toho vyplývá, že po odstranění vnějšího mechanického a vlhkostního zatížení se dřevo nevrátí do původního stavu a deformace dřeva nezmizí. Tím nabývá dřevo nový tvar a rozměr (Požgaj *et al*. 1997).

3.4.2.3. Vztah mezi napětím a deformací

Je vztah mezi napětím a deformací ze kterého se čerpají informace o použití dřeva, kompozitních materiálů a materiálů na bázi dřeva v dřevěných konstrukcích. Na napěťově-deformačním diagramu (obr. 13) můžeme pozorovat, jaký má vliv rostoucí napětí na průběh deformace.

Diagram je možné rozdělit na část lineární, kde působí pouze pružné deformace a část nelineární, kde se projevují deformace pružné v čase a trvalé deformace. Přechod mezi těmito dvěma částmi je nazýván mezí úměrnosti ($\sigma_{ú}$). Lineární oblast je označována jako část od počátku k mezi úměrnosti a nelineární oblast je od meze úměrnosti až po mez pevnosti (σ_p). Toto rozhraní je možno vizuálně určit z napěťo-deformačního diagramu. V obecné rovině platí, že největší zastoupení mají pružné deformace cca 55 – 90% (Požgaj *et al*. 1997, Gandelová *et al*. 2009).



Obr. 13 Napěťo-deformační diagram dřeva (Požgaj *et al*. 1997)

3.4.3. Pružnost dřeva

Pružnost dřeva je definovaná jako vlastní schopnost dřeva se po uvolnění vnějších sil vrátit do původního tvaru a rozměrů.

3.4.3.1. Moduly pružnosti

Moduly pružnosti vyjadřují vnitřní odpor materiálu vůči pružné deformaci. Při zvětšení modulu pružnosti se zvětší i napětí potřebné k deformaci materiálu. Moduly pružnosti dělíme na dva typy a to při normálovém namáhání (tah, tlak, ohyb) a tangenciálním namáhání (smyk, kroucení).

Modul pružnosti v tahu a tlaku je vyjádřený podílem napětí a poměrné deformace. U domácích dřevin jsou hodnoty modulu pružnosti v tahu a tlaku ve směru vláken při absolutní vlhkosti 12% v rozpětí 10 000 – 15 000 MPa. U modulu ve směru vláken je hodnota až 25x menší, ale v radiálním směru je o 20 – 50% větší než v tangenciálním směru.

Modul pružnosti v ohybu je udáván pouze kolmo na vlákna v tangenciálním směru. Modul je odvozován z normálového namáhání tělesa způsobeného ohybovým momentem.

Smykový modul pružnosti je z počátku lineární ke vztahu mezi poměrným posunutím a příslušným napětím. Modul pružnosti ve smyku se udává pro naše dřeviny

v rozpětí 100 – 2 000 MPa, což je ovlivněno anatomickou strukturou ve které působí smykové napětí.

Velikosti modulů pružnosti jsou jednou z hlavních charakteristik dřeva a je možné je poměrně přesně vypočítat. Experimentální měření je prováděno na tělesech přesných rozměrů, které stanovuje příslušná norma pro zjišťování modulu pružnosti (Požgaj *et al*. 1997, Gandelová *et al*. 2009).

3.4.4. Pevnost dřeva

Pevnost dřeva vyjadřuje vlastní odpor dřeva vůči jeho trvalému porušení. Pevnost vyjadřuje zatížení, kterým musíme působit na dřevo, aby došlo k jeho porušení. Mez pevnosti udává zatěžovací síla, která je nazývána jako maximální síla na mezi pevnosti. Při dosažení této hodnoty nebo jejím překročení dojde buď k porušení, nebo úplnému přelomení materiálu. Mez pevnosti se určuje i pro ostatní pevnostní vlastnosti, jako jsou pevnost v tahu, pevnost v tlaku, pevnost v ohybu, pevnost v kroucení a pevnost ve smyku. O některé z těchto pevností bude dále zajímat v dalších částech diplomové práce. Z fyzikálního hlediska se pevnost rozděluje na tři skupiny.

1. Domluvená pevnost.
2. Skutečná pevnost.
3. Ideální pevnost.

Pro zpracování této práce je podstatná pouze skutečná pevnost, která je vyjádřena podílem maximální síly vyvinuté na porušení tělesa o určité ploše rovnice (4) (Požgaj *et al*. 1997).

$$\boldsymbol{\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{S}} \quad [\mathbf{MPa}] \qquad [\mathbf{4}]$$

kde:

σ_{max} – mez pevnosti [MPa]

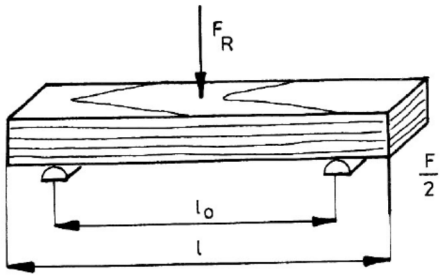
F_{max} – maximální síla na mezi pevnosti [N]

S – plocha tělesa [mm^2]

3.4.4.1. Pevnost dřeva v ohybu

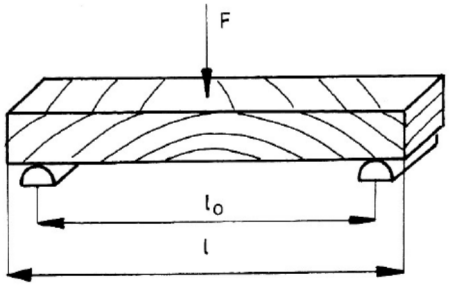
Pevnost dřeva v ohybu je rozdělena do tří skupin podle směru zatěžování tělesa (Obr. 14).

a)



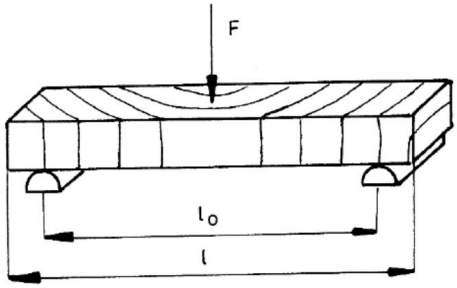
Pevnost v ohybu kolmo na vlákna v radiálním nebo tangenciálním směru

b)



Pevnost v ohybu s průběhem vláken příčně na osu tělesa

c)



Pevnost v ohybu s průběhem vláken rovnoběžně se zatěžujícím břemenem

Obr. 14 Zatížení dřeva při ohybu (Požgaj *et al*. 1997)

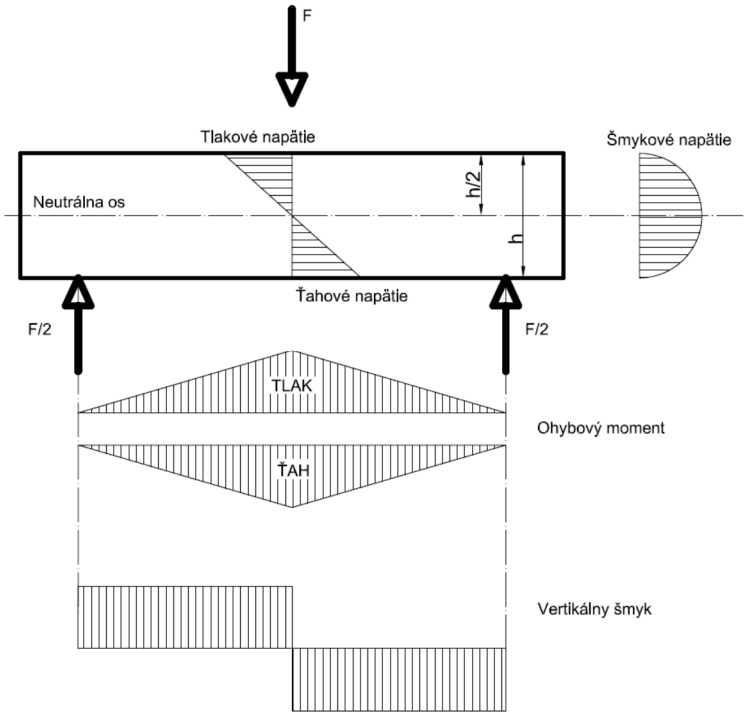
Pevnost v ohybu se udává kolmo na vlákna v tangenciálním a nebo radiálním směru, z důvodu toho, že přenese největší zatížení. Ostatní dva zbůsoby většinou nebere v potaz, jelikož jejich hodnoty dosahují jen 5 – 10% hodnoty meze pevnosti v ohybu kolmo na vlákna. U domácích dřevin se mez pevnosti v ohybu kolmo na vlákna při vlhkosti 12% pohybuje od 50 do 130 MPa. U jehličnatých dřevin se vyskytuje rozdíl v mezi pevnosti kolmo na vlákna v tangenciálním směru o 10 – 12% větší než ve směru radiálním. U listnatých dřevin se tato vlastnost projevuje jen v malé míře, což je 2 – 4% a proto je možné jí považovat za zanedbatelnou (Požgaj *et al*. 1997).

Pro získávání meze pevnosti jsou stanovené zkoušky z dvěma případy zatížení. Když zkoušené těleso zatěžujeme jednou silou působící ve středu podpěr na trhacím stroji, tak hovoříme o trojbodovém ohybu. Když ale zkoušené těleso

zatěžujeme dvěma silami působícími ve třetině rozpětí podpěr na trhacím stroji, tak je těleso namáhané čtyřbodovým ohybem (Dubovský *et al*. 2003).

Při zkoušce v trojbodovém ohybu (Obr. 15.) vznikají tato napětí. V horních vrstvách vzniká napětí tlakové a ve spodní vrstvě vzniká zatížení tahové. V místě přechodu napětí z tlakového na tahové se nachází takzvaná neutrální osa vrstva, která se nijak nedeformuje. Od této vrstvy narůstá napětí směrem k okrajovým vrstvám zkušebního vzorku, přičemž maximálního napětí dosáhnou v krajních vláknech. Napětí je rozloženo symetricky od neutrální osy a po průřezu je průběh lineární.

Mez úměrnosti je přibližná hodnota v rozmezí 1/3 až 2/3 hodnoty meze pevnosti. Když napětí ve dřevě překročí mez úměrnosti a blíží se k mezi pevnosti, vznikají ve dřevě trvalé plastické deformace a následně se dřevo poruší. Při zvyšování napětí zasahuje deformace v tlakové zóně další vlákna směrem k neutrální ose, přičemž zároveň vznikají deformace vláken na tahové straně a následně dojde ke zlomení. Porušení tělesa se nemusí vždy projevovat zlomením, ale může se projevit i jako porušení tělesa v jeho středu po krajích, nebo roztrhnutí vláken na tahové zóně tělesa (Požgaj *et al*. 1997).



Obr. 15 Průběh ohybového momentu a druhů napětí při zatížení v ohybu (Babiak a Dubovský 2001)

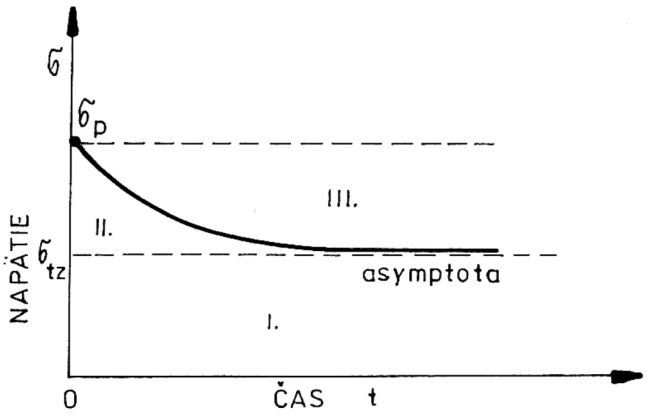
3.4.4.2. Trvalá pevnost dřeva

Je vlastní odpor dřeva vůči působení vnějších sil. Ve dřevěných konstrukcích se neprojevuje pouze náhodné zatížení, ale i dlouhodobé zatížení. Při tomto zatížení se dřevo přetváří a je ovlivňována mez pevnosti v závislosti na rychlosti zatěžování. Pokud dojde k přelomení zatěžovaného vzorku při konstantní velikosti zatížení, tak můžeme říci, že se jedná o trvalou pevnost dřeva, která se rozlišuje na statickou a dynamickou trvalou pevnost. Při trvalém zatížení není možné využívat výsledků zjištěných z měření krátkodobé pevnosti, ale jsou využívány hodnoty příznačné pro dlouhodobé zatížení (Gandelová *et al*. 2009).

Trvalá pevnost při statickém zatížení

Je mechanické napětí, působící vnější síly na dřevo po nekonečně dlouhou dobu, bez projevu porušení nebo zlomení dřeva. Na obrázku 16. můžeme pozorovat průběh napětí v čase, kde v oblasti I. je znázorněno maximální napětí (σ_{tz}), které může působit bez poškození materiálu po nekonečně dlouhou dobu a představuje mez trvalé pevnosti (σ_{tp}). V oblasti II. se nachází ohraničení trvalé pevnosti dřeva mezi trvalým zatížením a mezí trvalé pevnosti. Oblast III. je označována jako krátkodobá pevnost.

V tabulce 3. jsou uvedené procentuální hodnoty pro vyjádření hodnoty meze trvalé pevnosti z krátkodobé pevnosti (σ_p) (Gandelová *et al*. 2009).



Obr. 16 Křivka trvalého zatížení (Požgaj *et al*. 1997)

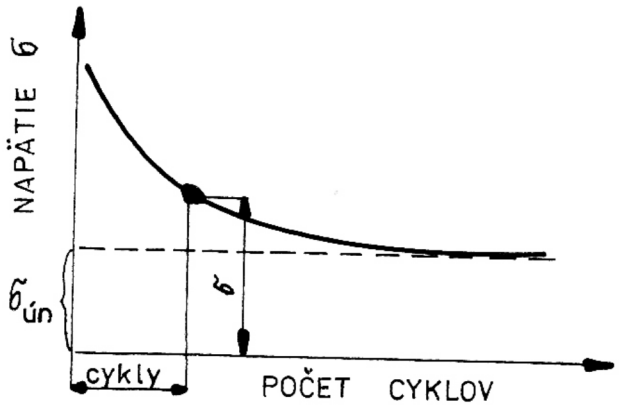
Tab. 3 Procentuální hodnoty meze trvalé pevnosti z krátkodobé pevnosti (Savkov 1965)

Druh namáhání	Doba působení zatížení				
	1 den	1 týden	3 měsíce	3 roky	30 let
tlak || s vlákny	79%	72%	66%	60%	54%
statický ohyb	79%	73%	67%	61%	55%
smyk || s vlákny	74%	66%	59%	52%	44%

Trvalá pevnost při dynamickém zatížení

Mechanické napětí, kde vnější síly působí na dřevo v nekonečném počtu cyklů bez porušení nebo přelomení dřeva, toto napětí se označuje jako únavová pevnost dřeva. Trvalá dynamická pevnost je rozdělena na opakované a střídavé zatížení. Střídavé namáhání se zajímal Wöhler, který výsledky zaznamenal do grafické křivky (obr. 17). Z průběhu křivky je viditelné, že po určitém počtu cyklů se křivka začne blížit ke konstantní hodnotě. Zde je určena asymptota ke křivce a ta je považována za mez únavy ($\sigma_{ún}$), při které dřevo vydrží nekonečný počet cyklů při měnícím se zatížení (Požgaj *et al*. 1997).

Trvalá pevnost dřeva v tlaku a tahu klesá při opakovaném namáhání až na 30 – 15%, při trvalé pevnosti v ohybu u střídavého namáhání od 22 – 38% z krátkodobé pevnosti (Požgaj *et al*. 1997).



Obr. 17 Wöhlerova křivka (Požgaj *et al*. 1997)

3.4.5. Ohyb

Když kroutící moment vzniká v tělese kolmo k průřezu, tak ve dřevě vznikají normálové nebo tangenciální napětí, které vyvolávají zatížení pootočením prvku, nebo prvek zatíží ohybem. K porušení vzorku dojde, když je překročena mez pevnosti dřeva (Požgaj *et al*. 1997).

S ohledem na anizotropii dřeva mohou nastat následující zatížení prvku, za podmínky působení vnější síly.

1. Vlákna jsou rovnoběžně s podélnou osou vzorku a síla působí na zkušební vzorek buď v tangenciálním, nebo radiálním směru.
2. Vlákna jsou kolmo na podélnou osu vzorku a síla působí kolmo na vlákna vzorku buď v tangenciálním, nebo radiálním směru.
3. Vlákna jsou kolmé na podélnou osu vzorku a síla působí rovnoběžně s vlákny vzorku buď v tangenciálním, nebo radiálním směru.

Nejčastěji se v praxi využívá modelu, kdy vlákna jsou rovnoběžně s podélnou osou vzorku a síla působí na vzorek buď v tangenciálním, nebo radiální směru (Požgaj *et al*. 1997).

4. Metodika diplomové práce

Metodika diplomové práce vychází ze zvolených cílů práce, kterými jsou vliv vybraných faktorů ovlivňující změnu vybraných mechanických vlastností zhuštěného dřeva ve srovnání s rostlým nezhuštěným dřevem.

Při praktickém zpracování této práce byly monitorovány následující charakteristiky bukového a osikového dřeva:

1. Modul pružnosti v ohybu.
2. Pevnost v ohybu.

Zkoumané charakteristiky zvoleného druhu dřeva jsou významně ovlivňovány mnohými faktory, jež výrazně působí na mechanické vlastnosti dřeva. My jsme se zaměřili na tyto faktory:

1. Zhuštění dřeva (rostlé dřevo, zhuštěné dřevo).
2. Druh materiálu (Fagus sylvatica *L.*, Populus tremola *L.*).
3. Tloušťka materiálu (4, 6, 10, 18) mm.
4. Počet cyklů (0, 1000, 3000, 7000).

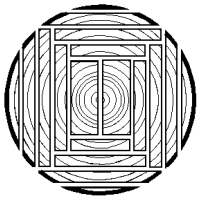
5. Metodika experimentální práce

Metodiku experimentální práce můžeme rozdělit do následujících bodů:

1. Výroba.
2. Označení a třídění.
3. Zhušťování.
4. Měření.
5. Vyhodnocení.

5.1. Výroba zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly vyráběny z bukové a osikové kulatiny, která byla rozřezávána pomocí kmenové pásové pily. Pro prvotní rozdělení kulatiny bylo zvoleno kruhové pořezové schéma (obr. 18). Při zvoleném pořezovém schématu je možné získat maximální výtěžnosti tangenciálního řeziva.



Obr. 18 Kruhové pořezové schéma (Hurajt 2011)

Takto získané řezivo je potřeba dále omítnout, pro tuto operaci byla využita kotoučová pila (obr. 19). Následně pro lepší manipulaci s omítnutým řezivem bylo řezivo rozděleno na menší sdružené části řeziva s dostatečnou nadmírou o délce 650 mm.

Vzhledem k obsahu vody ve dřevě bylo řezivo uloženo do hráně a uskladněno ve skladu řeziva, kde dochází k přirozenému sušení dřeva. Po vysušení bylo řezivo pomocí srovnávací frézy (obr. 19) srovnáno, čímž bylo docíleno toho, že jsme získali na sebe dvě kolmé strany.

Takto připravené řezivo bylo dále opracováváno pomocí tloušťkovací frézy (obr. 20) na přesně stanovené tloušťky, které byly 4, 6, 10 a 18 mm. Tloušťky 10 a 18 mm bylo možné vyrobit přímo na tloušťkovací fréze, ale pro tloušťky 4 a 6 mm bylo třeba opracovávat pomocí širokopásové egalizační brusky (obr. 20) na přesné tloušťky.

Obr. 19 Kotoučová pila a srovnávací fréza

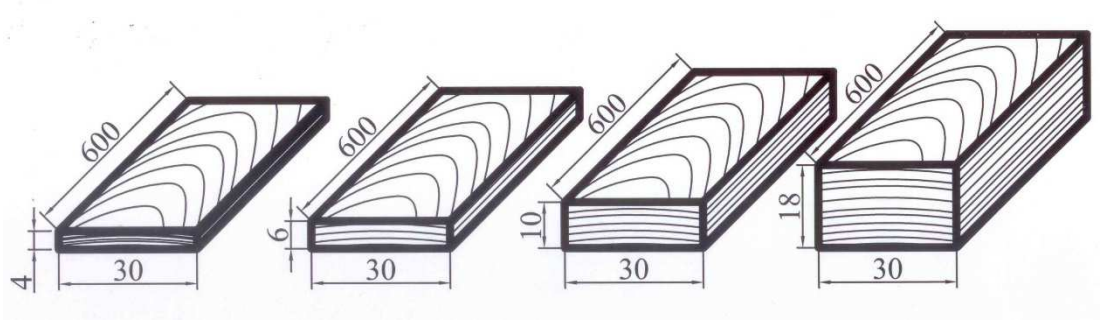
Obr. 20 Tloušťkovací fréza a širokopásová egalizační bruska

V další části výroby byly sdružené přířezy rozřezávány na formátovací pile na jednotlivé přířezy o šířce 30 mm. Následným přesným zkracením na délku 600 mm byly vyrobené vzorky rostlého dřeva a připravené vzorky pro výrobu zhuštěného dřeva.

Na měření jsme použili celkem 448 zkušebních vzorků, které byly rozděleny do samostatných souborů podle následujících kritérií:

1. Druh použité dřeviny (Fagus sylvatica *L.*, Populus tremula *L.).*
2. Tloušťka materiálu (4, 6, 10 a 18 mm).
3. Zhuštění (rostlé dřevo a zhuštěné dřevo).
4. Počet cyklů při namáhání (0, 1000, 3000 a 7000).

Všechny zkušební vzorky měly schodné rozměry délky a šířky, odlišovaly se pouze v tloušťkovém rozměru. Vzorky byly vyrobeny o rozměrech délky 600 mm, šířky 30 mm a tloušťky 4, 6, 10 a 18 mm, jak je zobrazeno v obrázku 21.



Obr.21 Jednotlivé rozměry vzorků

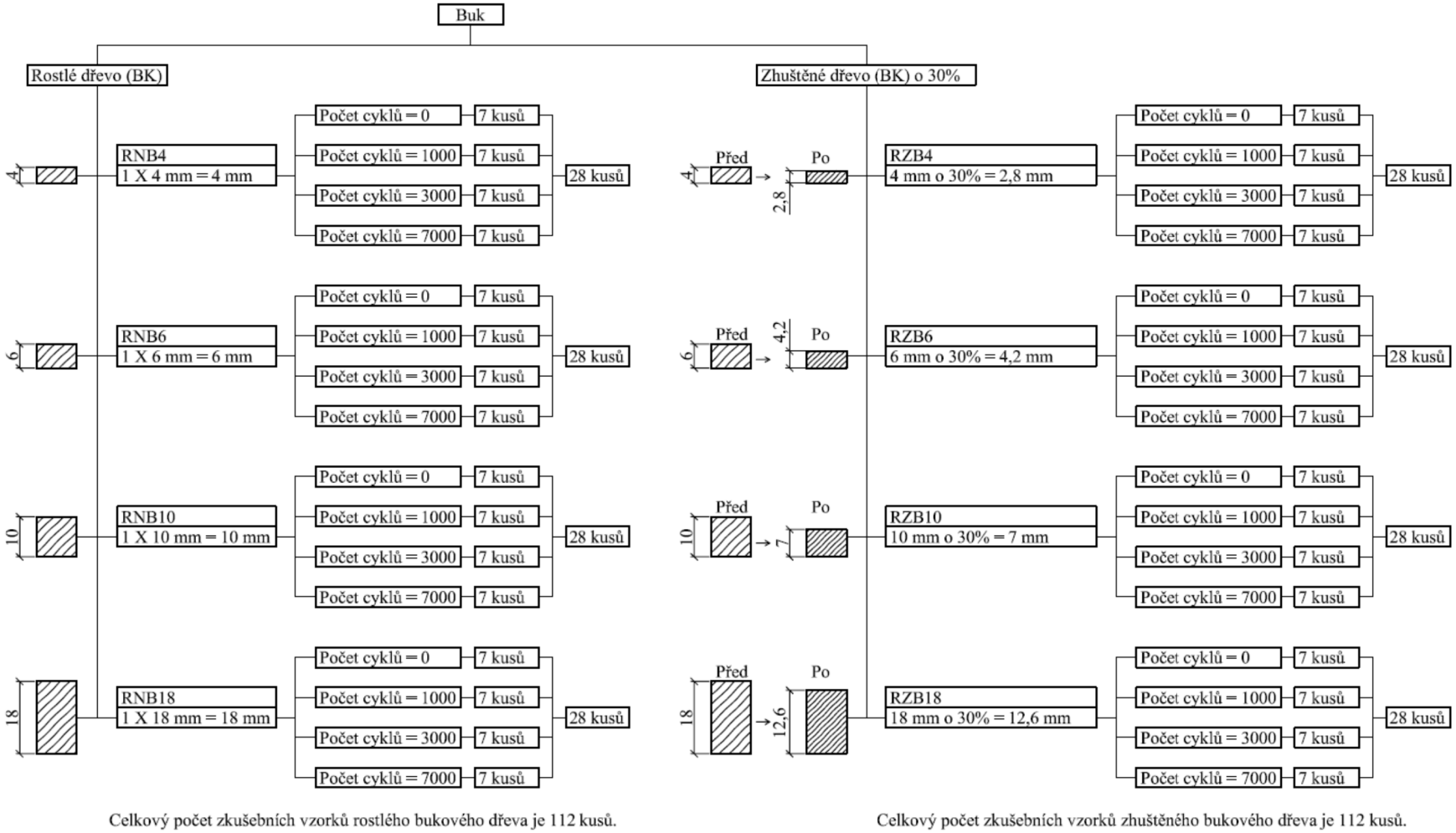
Zkušební vzorky byly rozděleny do souborů podle jednotlivých tlouštěk podle tabulky 4. Dále byly přesně rozděleny podle tloušťky a počtu cyklů ve schématu (obr. 22 a 23). Tloušťky zkušebních vzorků pro zhuštění jsou zobrazeny v tabulce 5.

Tab. 4 Počet zkušebních vzorků v souboru podle tloušťky

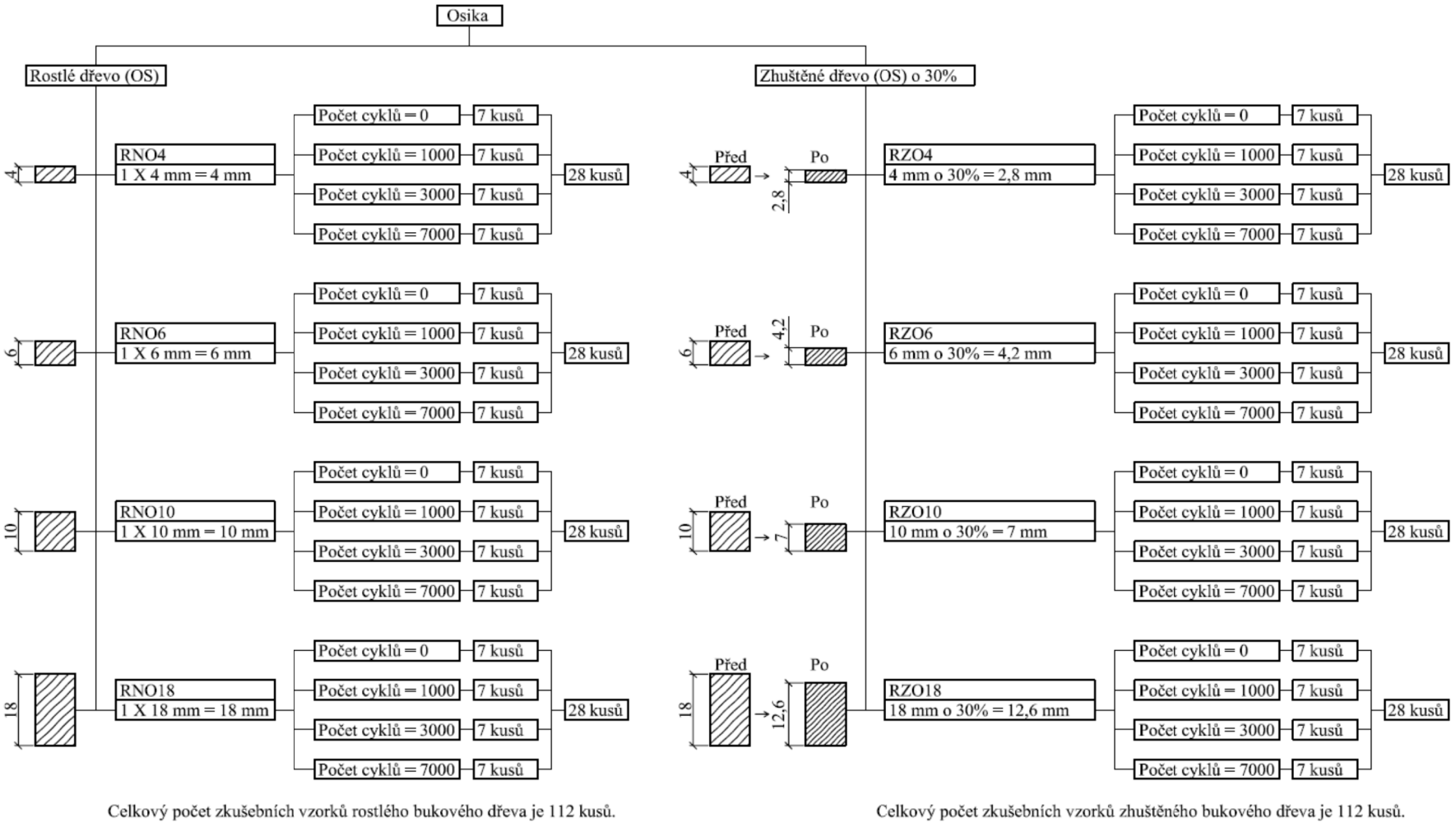
Dřevina	**Tloušťka**	**Počet na soubor**	**Celkem vzorků**	**Dřevina**	**Tloušťka**	**Počet na soubor**	**Celkem vzorků**
Rostlý buk lesní (RNB)	4	28	112	**Rostlý buk lesní (RZB)**	4	28	112
	6	28			6	28	
	10	28			10	28	
	18	28			18	28	
Rostlý topol osika (RNO)	4	28	112	**Rostlý topol osika (RZO)**	4	28	112
	6	28			6	28	
	10	28			10	28	
	18	28			18	28	

Tab. 5 Tloušťka materiálu před a po zhuštění

Tloušťka vstupního materiálu (mm)	**Hodnota zhuštění (%)**	**Výpočet**	**Tloušťka konečného materiálu (mm)**
4	30	4*0,7	2,8
6	30	6*0,7	4,2
10	30	10*0,7	7
18	30	18*0,7	12,6



Obr. 22 Schéma zkušebních vzorků bukového dřeva



Obr. 23 Schéma zkušebních vzorků osikového dřeva

5.2. Označení zkušebních vzorků

Pro snadnější orientaci a přiřazení jednotlivých měřených hodnot k danému vzorku bylo zvoleno následující označení.

Označení zkušebního vzorku rostlého nezhuštěného dřeva:

RNB401

kde:

R – označení rostlé dřeva

N – nezhuštěné dřevo

B – označení materiálu zkušebního vzorku (B - buk, O - osika)

4 – tloušťka zkušebního vzorku (4, 6, 10, 18)

0 – počet cyklů na zkušebním vzorku (0 = 0, 1 = 1000, 3 = 3000, 7 = 7000)

1 – číslo zkušebního vzorku v souboru (1 – 7)

Označení zkušebního vzorku rostlého zhuštěného dřeva:

RZB401

kde:

R – označení rostlé dřevo

Z – zhuštěné dřevo

B – označení materiálu zkušebního vzorku (B - buk, O - osika)

4 – tloušťka zkušebního vzorku (4, 6, 10, 18)

0 – počet cyklů na zkušebním vzorku (0 = 0, 1 = 1000, 3 = 3000, 7 = 7000)

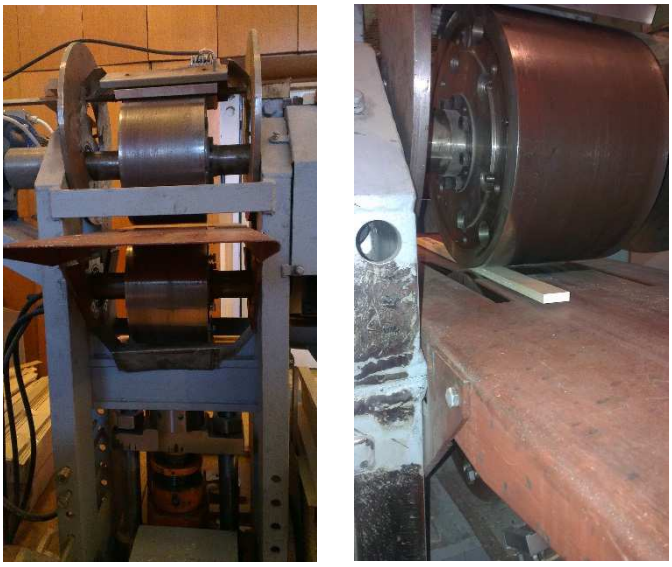
1 – číslo zkušebního vzorku v souboru (1 – 7)

5.3. Zhušťování zkušebních vzorků

V posledním kroku výroby zkušebních vzorků bylo prováděno zhušťování rostlého bukového a osikové dřeva na válcové zhušťovačce (obr. 24):

- Vzorky při zhušťování nebyly nijak plastifikované,
- Tlak při zhušťování byl přibližně kolem 30 MPa,

- mezi dva nad sebou umístěné válce jsme vkládali vzorky pro zhuštění,
- tyto vzorky nejsou zhuštěné hned při prvním průchodu a míra zhuštění se lišila podle zhušťovaného materiálu,
- na bukovém dřevě jsme stlačovali přibližně okolo 0,3 mm při jednom průchodu materiálu,
- osikové dřevo bylo stlačováno rychleji z důvodu měkčí dřeviny a míra stlačení byla okolo 0,4 mm při jednom průchodu materiálu,
- všechny vzorky jsou nakonec zhuštěné přibližně na hodnotu okolo 30 %,
- následně jsou vzorky ponechány v klimatizované místnosti, kde byla teplota 20 ± 2˚C a vlhkost vzduchu 60%, což mělo za výsledek, že vzorky mají shodnou konečnou vlhkost cca 8%.



Obr. 24 Válcová zhušťovačka a zhušťování zkušebního vzorku

Na takto vyrobených a označených zkušebních vzorcích bylo možné začít zjišťovat mechanické vlastnosti před a po cyklickém namáhání a tím se budeme zaobírat v následujících kapitolách.

5.4. Vlastní zkoušení zkušebních vzorků

Pro zkoušení zkušebních vzorků byl zvolen postup:

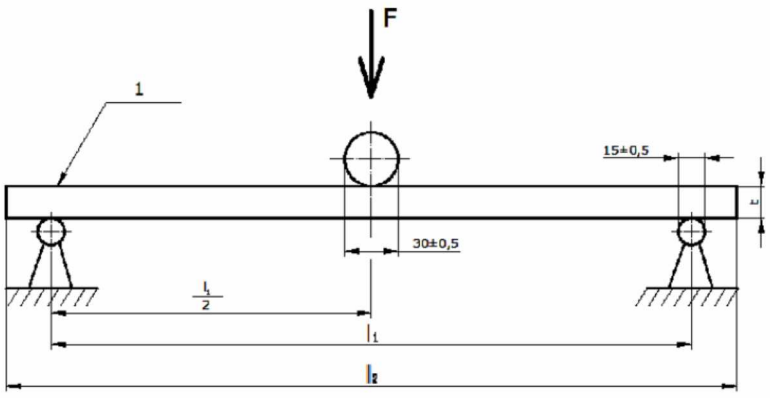
1. Na trhacím stoji stanoveny hodnoty pro určení meze úměrnosti a průhybu na mezi úměrnosti u zkušebních vzorků nenamáhaných cyklickým zatížením.
2. Stanovením 90% meze úměrnosti pro cyklické zatížení.
3. Výpočet průhybu pro cyklické zatížení.
4. Na vzorcích provedeno cyklické namáhání.
5. Na trhacím stoji zjištěny hodnoty pro výpočet pevnosti a modulu pružnosti. v ohybu po cyklickém namáhání.
6. Stanovena vlhkost váhovou metodou.
7. Vyhodnocení výsledků a porovnání hodnot pevnosti a modulu pružnosti v ohybu před a po cyklickém namáhání.

V následující podkapitole jsou uvedeny postupy měření mechanických vlastností.

5.4.1. Zkoušky prováděné pro zjištění mechanických vlastností

Zkoušky mechanických vlastností byly prováděny podle normy ČSN EN 310 (1995). Tato norma se zabývá stanovením modulu pružnosti a pevnosti v ohybu. Tyto zkoušky byly prováděny na trhacím stroji FPZ 100/1 (obr 26).

Na obrázku 25. je zobrazeno schéma ohybové zkoušky s popisem ohybové zkoušky:



Obr. 25 Uspořádání ohybové zkoušky (Šmíd 2010)

- zkušební vzorky byly jednotlivě vkládány do trhacího stroje a zatěžovány,
- zatěžování bylo prováděno válcovou zatěžovací hlavou o průměru (30 ± 0,5) mm, která je umístěna uprostřed mezi dvěma podpěrami,
- válcové podpěry o průměru (15 ± 0,5) mm jsou uloženy rovnoběžně, vzdálenost mezi podpěrami byla nastavována podle vztahu $l_0 = 20 * t$ mm,
- rychlost zatěžování byla nastavena tak, aby k porušení zkušebního tělesa došlo přibližně v době (60 ± 30) sekund,
- průhyb byl měřen ve středu zkušebního tělesa pod zatěžovací hlavou s přesností na 0,1 mm a naměřenou hodnotu spolu s odpovídajícím zatížením jsme zaznamenali s přesností na 1% naměřené hodnoty,
- zaznamenávání hodnot jsme prováděli pomocí dataloggeru ALMEMO 2690 (obr. 27), který byl připojen na počítač a zaznamenával narůstající sílu a průhyb při zatěžování zkoušeného vzorku v průběhu zkoušky,
- z těchto dat byl následně v programu Microsoft Excel sestaven silovo-deformační diagram pro každý vzorek,
- ze silovo-deformačního diagramu je možné stanovit působící maximální sílu a maximální průhyb na mezi úměrnosti i pevnosti,
- zde byla vypočítána podle rovnic (5 a 6) pevnost a modul pružnosti v ohybu.

Obr. 26 Trhací stroj FPZ 100/1

Obr. 27 Průběh ohybové zkoušky, ALMEMO 2690, nastavení trhacího stroje

5.4.1.1. Modul pružnosti v ohybu

Modul pružnosti v ohybu je vypočítáván ze vztahu (5) z normy ČSN EN 310 (1995). Vyhodnocování naměřených vstupních dat při ohybové zkoušce pomocí programu Microsoft Excel.

$$\mathbf{E_m} = \frac{\mathbf{l_0^3} * (\mathbf{F_2} - \mathbf{F_1})}{\mathbf{4} * \mathbf{b} * \mathbf{t^3} * (\mathbf{a_2} - \mathbf{a_1})} \quad [\mathbf{MPa}] \qquad [\mathbf{5}]$$

kde:

E_m – modul pružnosti v ohybu [MPa]

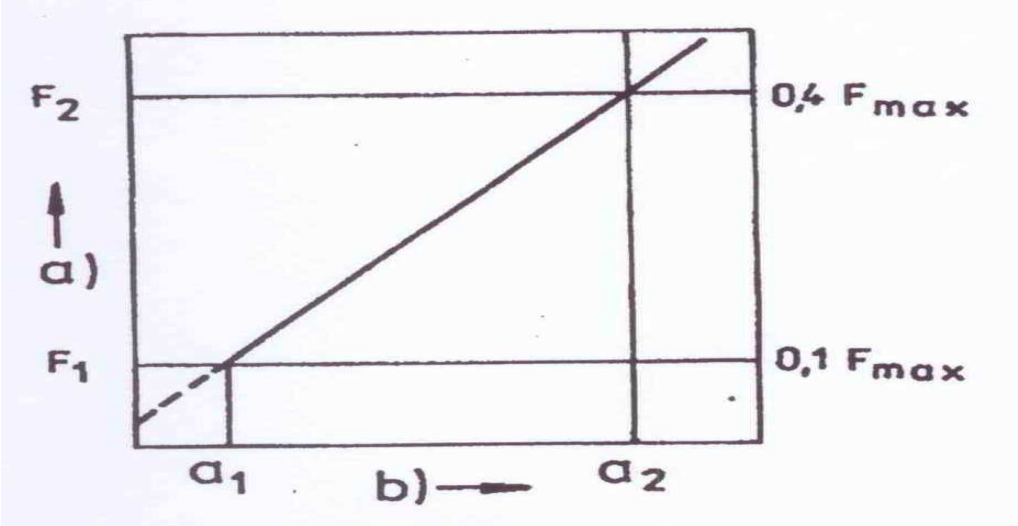
l_0 – osová vzdálenost podpěr na trhacím stroji [mm]

b – šířka zkušebního vzorku [mm]

t – tloušťka zkušebního vzorku [mm]

$F_2 – F_1$ – přírůstek zatížení v přímkové části zatěžovací křivky (obr. 28) v N. F_1 musí být přibližně 10 % a F2 přibližně 40% z maximálního zatížení [N]

$a_2 – a_1$ – přírůstek průhybu ve středu délky zkušebního tělesa (odpovídající $F_1 – F_2$) [mm]



Obr. 28 Zatěžovací křivka v oblasti pružné deformace (ČSN EN 310 1995)

5.4.1.2. Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu je vypočítávána ze vztahu (6) z normy ČSN EN 310 (1995). Vyhodnocování naměřených vstupních dat při ohybové zkoušce pomocí programu Microsoft Excel.

$$\sigma_p = \frac{3 * F_{max} * l_0}{2 * b * t^2} \quad [MPa] \qquad [6]$$

kde:

σ_p – pevnost v ohybu [MPa]

l_0 – osová vzdálenost podpěr na trhacím stroji [mm]

b – šířka zkušebního vzorku [mm]

t – tloušťka zkušebního vzorku [mm]

F_{max} – maximální síla při zatěžování zkušebního vzorku [N]

5.4.1.3. Cyklické namáhání zkušebních vzorků

Cyklické namáhání bylo prováděno pomocí cyklického stroje (obr. 30). Princip tohoto stroje spočívá v tom, že se jednotlivá zkušební tělesa namáhají cyklickým jednoosým zatížením. Pro experimentální měření byl určen počet cyklů 0, 1000, 3000 a 7000. Pomocí předběžného experimentálního měření bylo na zkušebních tělesech stanoveno zatížení statickým ohybem, aby byla zjištěna mez pevnosti a mez úměrnosti vzorků. Ostatní zkušební vzorky cyklicky namáhané byly zatěžovány na

90% meze úměrnosti. Hodnotu 90% meze úměrnosti jsme volili z toho důvodu, aby nebyla vlivem různorodosti materiálu mez překročena. Tím bylo zajištěno, aby nedocházelo při cyklickém zatěžování k překročení pružné oblasti. Pro přepočet na cyklovací stroj byl potřeba nejdříve pomocí okamžitého průhybu na mezi úměrnosti zjistit minimální poloměr ohybu R_{min} pomocí rovnice (7) (Gaff *et al*. 2015):

$$\mathbf{R_{min}} = \frac{\mathbf{l_0^2}}{\mathbf{8 * Y_{\sigma u}}} + \frac{\mathbf{Y_{\sigma u}}}{\mathbf{2}} \quad [\mathbf{mm}] \qquad [\mathbf{7}]$$

kde:

R_{min} – minimální poloměr ohybu [mm]

l_0 – osová vzdálenost podpěr na trhacím stroji [mm]

$y_{\sigma u}$ - okamžitý průhyb na mezi úměrnosti [mm]

Po zjištění minimálního poloměru ohybu jsme z rovnice (8) zjistili maximální průhyb na cyklovacím stroji (Gaff *et al*. 2015).

$$\mathbf{Y_D} = \frac{\mathbf{l_D^2}}{\mathbf{8 * R_{min}}} \quad [\mathbf{mm}] \qquad [\mathbf{8}]$$

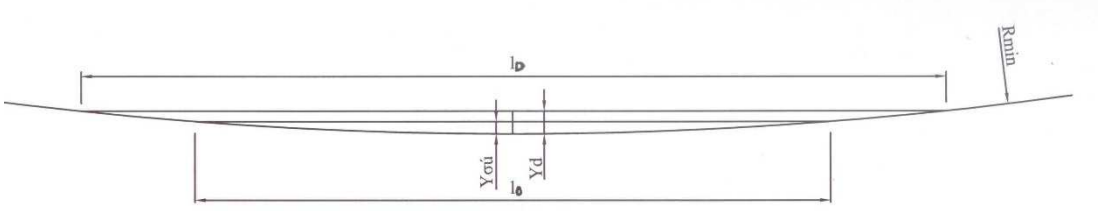
kde:

y_D - maximální průhyb na cyklovacím stroji [mm]

l_D – osová vzdálenost podpěr na cyklovacím stroji = 490 mm [mm]

R_{min} – minimální poloměr ohybu [mm]

Na obrázku 29. je zobrazeno odvození rovnice 7 a 8. Značky, které jsou v obrázku, mají stejný význam jako v rovnici 7 a 8. Po dosazení do uvedených rovnic 7 a 8 dostáváme hodnoty průhybu pro cyklovací stroj pro jednotlivé soubory, které jsou uvedeny v tabulce 6.

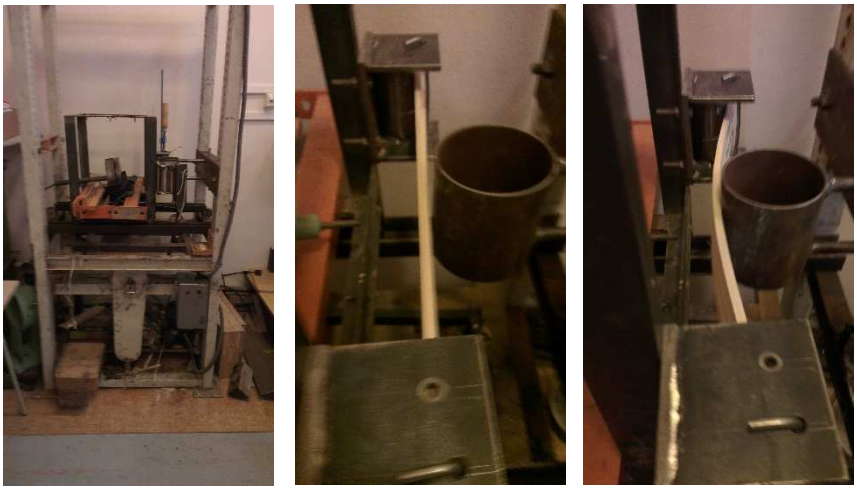


Obr. 29 Odvození průhybu pro cyklovací stroj

Tab. 6 Průhyby pro cyklovací stroj pro jednotlivé soubory podle tloušťky

Rostlé dřevo			Zhuštěné dřevo		
Dřevina	**Tloušťka**	**Průhyb 90% z $\sigma_{ú}$**	**Dřevina**	**Tloušťka**	**Průhyb 90% z $\sigma_{ú}$**
Buk	4	50	**Buk**	2,8 (4)	114,84
Buk	6	45,03	**Buk**	4,2 (6)	57,34
Buk	10	23,82	**Buk**	7 (10)	33,45
Buk	18	11,32	**Buk**	12,6 (18)	12,83
Osika	4	75,31	**Osika**	2,8 (4)	94,41
Osika	6	34,83	**Osika**	4,2 (6)	56,78
Osika	10	24,02	**Osika**	7 (10)	32,24
Osika	18	10,32	**Osika**	12,6 (18)	10,55

Zkušební vzorky byly vkládány do cyklovacího stroje, tak aby byly zatíženy ve středu své délky. Průhyb je na stroji nastaven protikusem, o který se zkušební vzorky ohýbají a ten byl zajištěn proti posouvání dvěma šrouby. Při namáhání byla potřeba zajistit vzorky vůči posouvání a vypadnutí, což se řešilo pomocí malých svěrek. Stroj namáhal vzorky rychlostí 20 cyklů/min. Po zatížení byly vzorky připravené na měření na trhacím stroji.



Obr. 30 Cyklovací stroj, vzorek před průhybem, vzorek v průhybu

5.4.1.4. Vlhkost dřeva

Pro měření vlhkosti jsme se rozhodli zvolit nejpřesnější přímou metodu, kterou je metoda gravimetrická. Vlhkost zkušebních vzorků byla stanovována v souladu s normou ČSN EN 322 (1994).

Pro zjišťování vlhkosti bylo z každého vzorku po odzkoušení na trhacím stroji odřezáno cca 50 mm dlouhé tělísko, na kterém byla měřena vlhkost. Ihned po odřezání zkušebních tělísek byla tělíska vážena a hmotnost označená jako m_w zaznamenána pro další výpočet. Vážení jsme prováděli na certifikovaných digitálních vahách KERN EWB 620 – 2M s povolenou odchylkou 0,01g (obr. 31). Následně byla zkušební tělíska vložena do odvětrávané sušárny HS 62A (obr. 33) a vysušena při teplotě 103 ± 2 ˚C. Vysušené vzorky jsme znovu zvážili a pokud vyšla povolená odchylka, byla zkušební tělíska bránna jako tělíska v absolutně suchém stavu o hmotnosti m_0. Dále jsme stanovovali vlhkost zkušebních vzorků na základě získaných hodnot hmotnosti m_w a m_0 podle rovnice (9) pro absolutní vlhkost.

$$\mathbf{w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100} \ [\%] \qquad [\mathbf{9}]$$

kde:

w – absolutní vlhkost zkušebních vzorků	[%]
m_w – hmotnost zkušebních tělísek při vlhkosti w	[g]
m_0 – hmotnost zkušebních tělísek v absolutně suchém stavu	[g]

Obr. 31 Digitální váha KERN EWB 620 – 2M, odvětrávaná sušárna HS 62A

Po naměření všech hodnot jsme museli všechny získané výsledky přepočítat na vlhkost 12% podle rovnic:

1. Přepočet ohybové pevnosti na 12% vlhkost podle rovnice (10) (ČSN EN 310 1995).

$$\boldsymbol{\sigma_{12} = \sigma_W * [1 + \alpha * (w - 12)]} \quad [\mathbf{MPa}] \qquad [\mathbf{10}]$$

kde:

σ_{12} – pevnost v ohybu při vlhkosti 12% [MPa]

σ_w – pevnost v ohybu při zkoušené vlhkosti w [MPa]

w – vlhkost zkušebních vzorků při zkoušce [%]

α – opravný koeficient pro statický ohyb – 0,04

2. Přepočet modulu pružnosti v ohybu na 12% podle rovnice (11) (Babiak a Dubovský 2001).

$$\mathbf{E_{12}} = \frac{\boldsymbol{E_w}}{\mathbf{1 - \alpha * (w - 12)}} \quad [\mathbf{MPa}] \qquad [\mathbf{11}]$$

Kde:

E_{12} – modul pružnosti v ohybu při vlhkosti 12% [MPa]

E_w – modul pružnosti v ohybu při zkoušené vlhkosti w [MPa]

w – vlhkost zkušebních vzorků při zkoušce [%]

α – opravný vlhkostní koeficient pro modul pružnosti v ohybu – 0,01

5.5. Vyhodnocení výsledků

Naměřené hodnoty byly vyhodnocovány v programu Microsoft Excel, kde byla zároveň i vytvořena základní tabulka statistických hodnot pro každý vzorek. Následným vložením vytvořené tabulky do programu Statistica 12, bylo provedeno statistické vyhodnocení.

6. Výsledky a diskuze

6.1. Výsledky experimentálně získaných dat

Metoda vyhodnocování výsledků je popsána v kapitole 5.5. V diplomové práci jsme se zaměřovali na modul pružnosti v ohybu a ohybové pevnosti.

6.1.1. Vyhodnocení účinku sledovaných faktorů na hodnotu ohybové pevnosti

Pro vyhodnocení naměřených hodnot je použita čtyř-faktorová analýza rozptylu, kde jsou hodnoceny jednotlivé účinky sledovaných faktorů, i účinky dvoj-faktorové a troj-faktorové interakce.

Na základě hladiny významnosti „P“ uvedené v tabulce (tab. 7) je možné konstatovat, že faktory dřevina, zhuštění a tloušťka materiálu je možné považovat za statisticky významně působící faktory na sledovanou charakteristiku. Sledovaný faktor počet cyklů se projevil jako statisticky nevýznamný na ohybovou pevnost.

Z výsledků dvoj-faktorové interakce, je možné na základě hodnoty hladiny významnosti „P“ tvrdit, že za statisticky významné působící interakce lze považovat zhuštění*počet cyklů, dřevina*tloušťka, zhuštění*tloušťka a počet cyklů*tloušťka. Dřevina*zhuštění a dřevina*počet cyklů jsou statisticky nevýznamné na ohybovou pevnost.

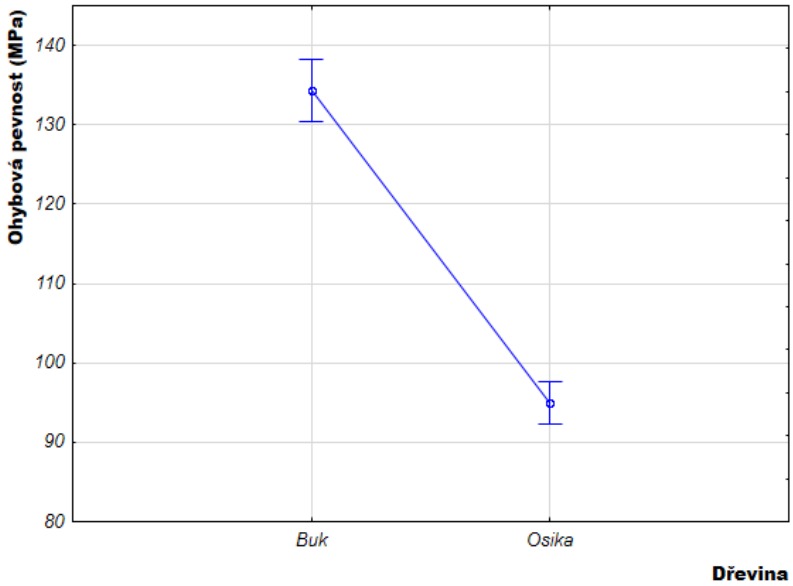
Na výsledcích troj-faktorové interakce je možné konstatovat, že pro hladinu významnosti „P“ jsou statisticky významné kombinace působících faktorů dřevina*zhuštění*tloušťka a zhuštění*počet cyklů*tloušťka. U kombinace faktorů dřevina*zhuštění*počet cyklů a dřevina*počet cyklů*tloušťka jsou kombinace statisticky nevýznamné na ohybovou pevnost.

Při účinku všech čtyř sledovaných faktorů je možné tvrdit, že při vzájemné interakci jsou statisticky významné pro ohybovou pevnost.

Tab. 7 Čtyř-faktorová analýza rozptylu hodnotící účinek vlivu jednotlivých faktorů, dvoj-faktorových až čtyř-faktorových interakcí pro ohybovou pevnost

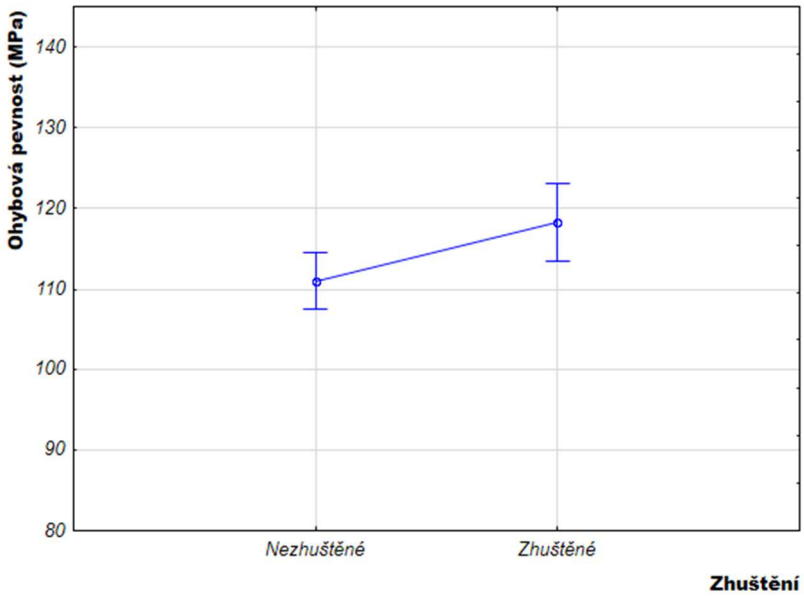
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův T-test	P-hladina významnosti
Intercept	5890575	1	5890575	20675,59	0,000
{1}Dřevina	173705	1	173705	609,69	0,000
{2}Zhuštění	6096	1	6096	21,40	0,000
{3}Počet cyklů	1183	3	394	1,38	0,247
{4}Tloušťka	109155	3	36385	127,71	0,000
Dřevina * Zhuštění	904	1	904	3,17	0,076
Dřevina * Počet cyklů	1783	3	594	2,09	0,102
Zhuštění * Počet cyklů	3123	3	1041	3,65	0,013
Dřevina * Tloušťka	11827	3	3942	13,84	0,000
Zhuštění * Tloušťka	15537	3	5179	18,18	0,000
Počet cyklů * Tloušťka	7691	9	855	3,00	0,002
Dřevina * Zhuštění * Počet cyklů	441	3	147	0,52	0,672
Dřevina * Zhuštění * Tloušťka	6532	3	2177	7,64	0,000
Dřevina * Počet cyklů * Tloušťka	2742	9	305	1,07	0,385
Zhuštění * Počet cyklů * Tloušťka	14014	9	1557	5,47	0,000
Dřevina * Zhuštění * Počet cyklů * Tloušťka	5332	9	592	2,08	0,030
Error	109403	384	285		

Sledovaný faktor druh dřeviny lze považovat za statisticky významně působící na hodnoty ohybové pevnosti. Z hodnot uvedených na obrázku 32 vyplívá, že při dřevině osika jsme zjistili, statisticky významně nižší hodnotu ohybové pevnosti v porovnání s ohybovou pevností dřeviny buk.



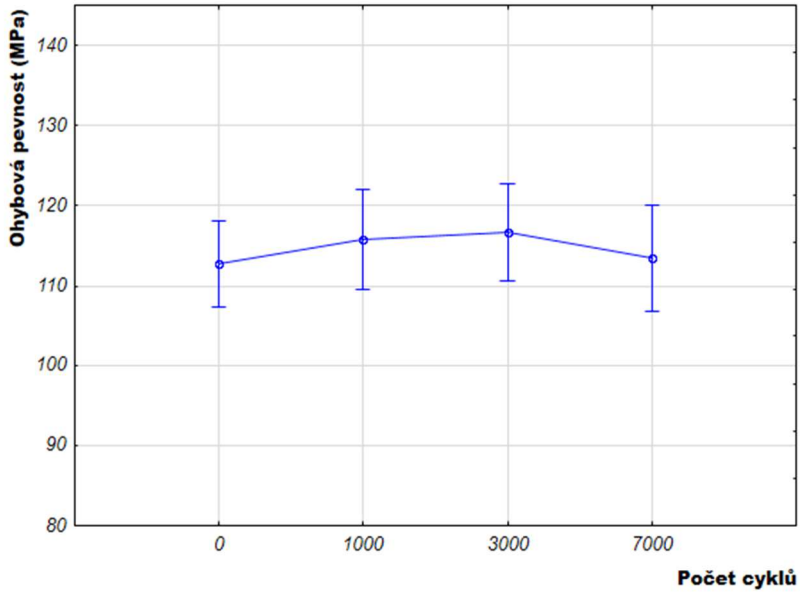
Obr. 32 Vliv druhu dřeviny na hodnoty ohybové pevnosti dřeva

Podobně i zhuštění můžeme považovat za faktor, který je statisticky významně ovlivňující hodnotu meze pevnosti. Z obrázku 33 je zřejmé, že účinek zhuštění dřeva má statisticky významný vliv na narůstající hodnoty meze pevnosti.



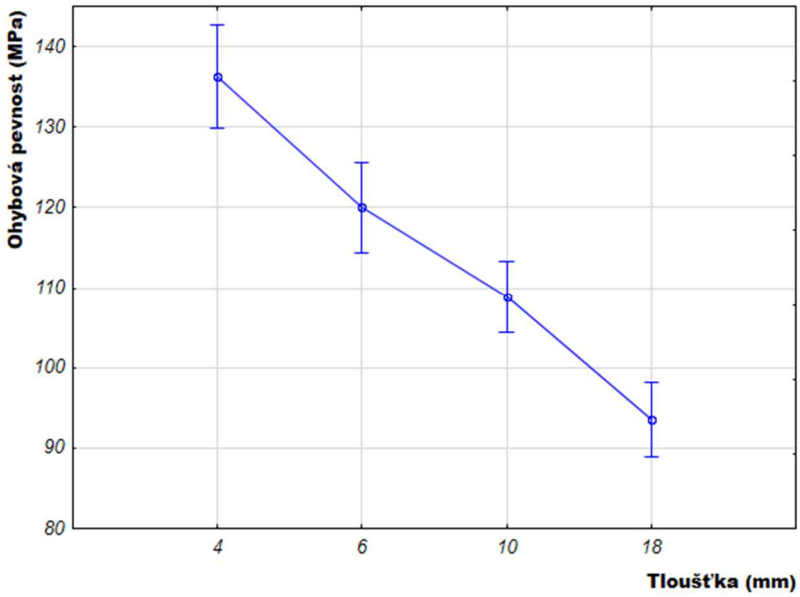
Obr. 33 Vliv zhuštění dřeviny na hodnoty ohybové pevnosti dřeva

Sledovaný faktor počet cyklů se projevil, jako statisticky nevýznamně působící na mez pevnosti což potvrzuje obrázek (obr. 34) a výsledky uvedené v tabulce (tab. 7) statistické významnosti.



Obr. 34 Vliv počtu cyklů na hodnoty ohybové pevnosti dřeva

Z výsledků experimentální práce je zřejmé, že tloušťku materiálu můžeme považovat za faktor významně působící na sledovanou charakteristiku. Z výsledků zobrazených na obrázku (obr. 35) je viditelné, že s narůstající tloušťkou materiálu ohybová pevnost klesá.



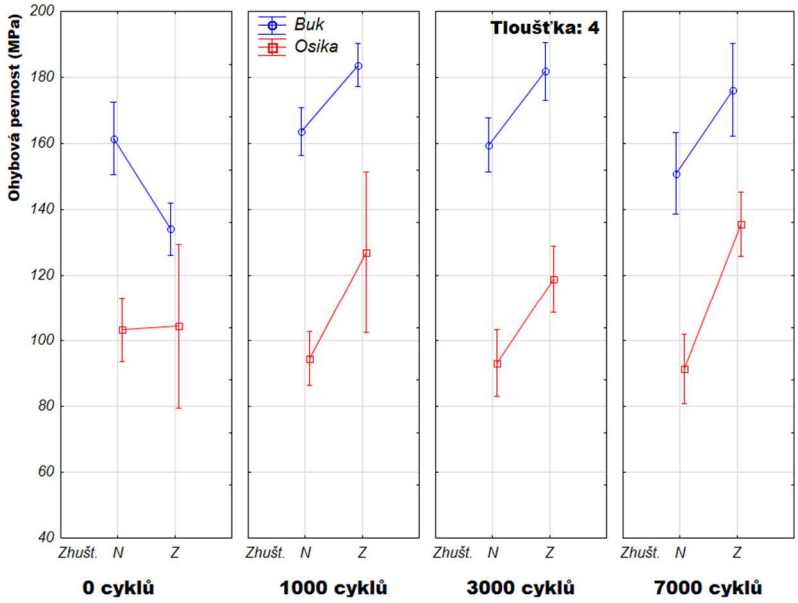
Obr. 35 Vliv tloušťky materiálu na hodnoty ohybové pevnosti dřeva

Z výsledků čtyř-faktorové analýzy rozptylu, je možné tvrdit, že při interakci všech sledovaných faktorů je hladina významnosti „P“ statisticky významně působí na ohybovou pevnost.

Na obrázku 36 je zobrazen vliv všech sledovaných faktorů na ohybovou pevnost dřeva při tloušťce zkušebních vzorků 4mm.

Můžeme pozorovat, že počet cyklů na rostlém nezhuštěném bukovém dřevu (dále jen „RDB_N“) má statisticky významný vliv na ohybovou pevnost. Na rostlém zhuštěném bukovém dřevu (dále jen „RDB_Z“) se projevil statisticky významný pokles hodnoty ohybové pevnosti při 0 cyklech oproti RDB_N. U ostatních vzorků RDB_Z, které jsou cyklicky namáhány, se ve všech sledovaných případech projevil statisticky významný nárůst ohybové pevnosti, který je způsobený zhuštěním dřeva. U RDB_Z je statisticky nejvýraznější nárůst ohybové pevnosti při 1000 cyklech. Pozorováním uvedených hodnot ohybové pevnosti pro stanovený počet cyklů je konstatováno, že účinek cyklického namáhání má statisticky významný vliv na ohybovou pevnost.

U rostlého nezhuštěného osikového dřeva (dále jen „RDO_N“) má počet cyklů statisticky nevýznamný vliv na ohybovou pevnost. U rostlého zhuštěného osikového dřeva (dále jen „RDO_Z“) se projevil počet cyklů ve všech sledovaných případech statisticky významným nárůstem ohybové pevnosti, který je způsobený zhuštěním dřeva. Po sledování ohybové pevnosti při cyklickém namáhání můžeme tvrdit, že cyklické namáhání má staticky významný vliv na ohybovou pevnost. Statisticky nejvýraznější nárůst ohybové pevnosti je u RDO_Z zjištěný při 1000 cyklech.

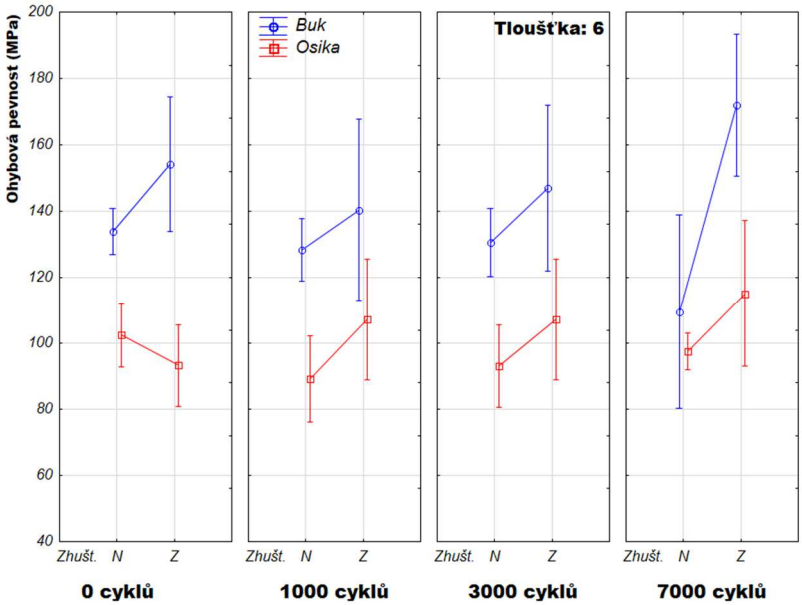


Obr. 36 Čtyř-faktorové analýza rozptylu pro ohybovou pevnost při tloušťce 4 mm

Na obrázku 37 je zobrazen vliv všech sledovaných faktorů na ohybovou pevnost dřeva při tloušťce zkušebních vzorků 6mm.

U RDB_N je zjištěný statisticky významný vliv počtu cyklů na ohybovou pevnost, který má statisticky nejvýraznější pokles hodnoty ohybové pevnosti při 7000 cyklech. U RDB_Z je zjištěn statisticky významný pokles ohybové pevnosti při 1000 cyklech, ale při 7000 cyklech je pozorován statisticky významný nárůst hodnoty ohybové pevnosti. U bukového dřeva se projevil vliv zhuštění na ohybovou pevnost nárůstem její hodnoty, takže je možné tvrdit, že má stoupající charakter.

Na RDO_N má počet cyklů statisticky nevýznamný vliv na rozdílné hodnoty ohybové pevnosti. U RDO_Z je vidět při 0 cyklech pokles hodnoty meze pevnosti oproti RDO_N. Na nárůst hodnoty ohybové pevnosti u RDO_Z má statisticky významný vliv počet cyklů, nárůst je způsoben zhuštěním dřeva, přičemž nejvýraznější nárůst ohybové pevnosti je při 1000 cyklech. Na osikovém dřevě se projevil vliv zhuštění na ohybovou pevnost při 0 cyklech poklesem hodnoty, ale u cyklicky namáhaného dřeva může říci, že hodnota ohybové pevnosti stoupala se stoupajícím počtem cyklů.



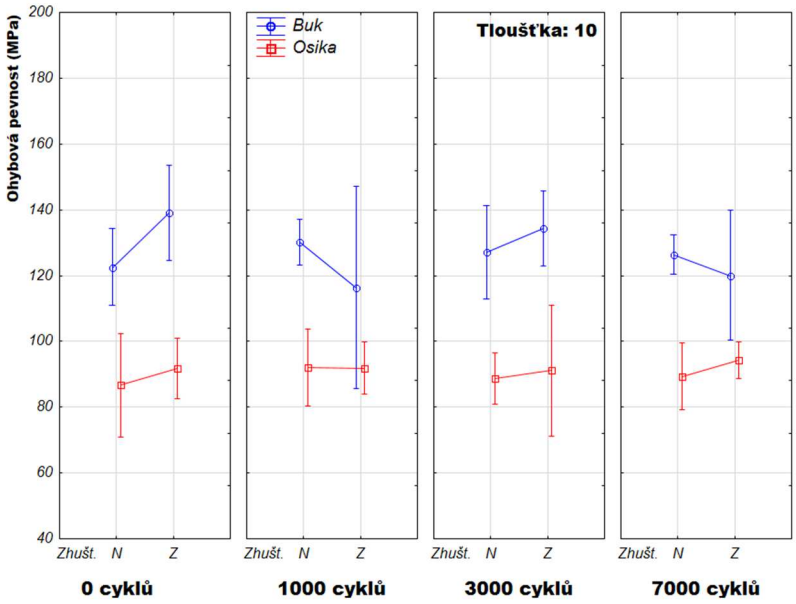
Obr. 37 Čtyř-faktorové analýza rozptylu pro ohybovou pevnost při tloušťce 6 mm

Na obrázku 38 je zobrazen průběh vlivu všech sledovaných faktorů na ohybovou pevnost při tloušťce vzorků 10 mm.

Vliv cyklického namáhání u RDB_N nemá statistický význam na ohybovou pevnost. Na RDB_Z je ve všech sledovaných charakteristikách statisticky významný

pokles hodnoty ohybové pevnosti, které je způsobeno vlivem cyklického namáhání a zhuštěním dřeva. Nejvýraznější pokles hodnoty ohybové pevnosti je při 1000 cyklech.

U RDO_N a RDO_Z se projevil vliv všech sledovaných charakteristik statisticky nevýznamný na rozdíl hodnot ohybové pevnosti.

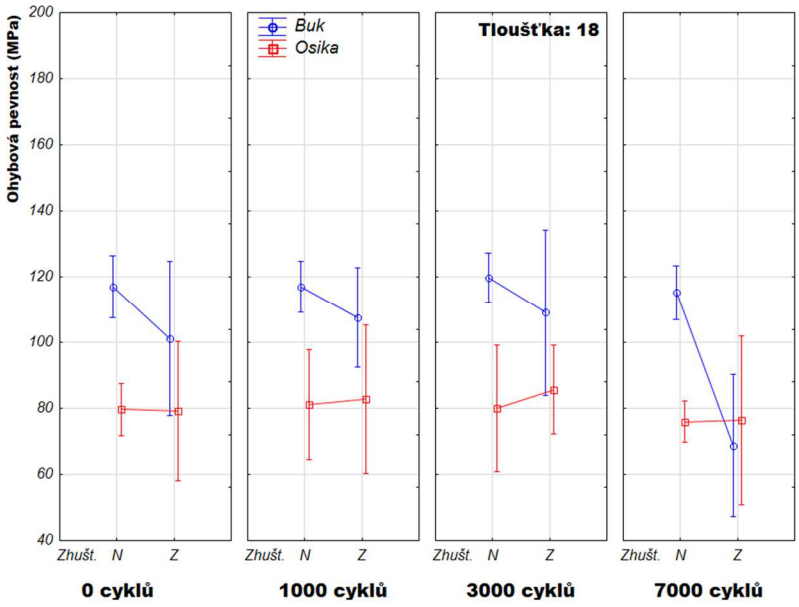


Obr. 38 Čtyř-faktorové analýza rozptylu pro ohybovou pevnost při tloušťce 10 mm

Na obrázku 39 je zobrazen průběh vlivu všech sledovaných faktorů na ohybovou pevnost při tloušťce vzorků 18 mm.

Pro RDB_N je rozdíl hodnot ohybové pevnosti vlivem cyklického namáhání považován za statisticky nevýznamný. U RDB_Z je rostoucí hodnota ohybové pevnost při 0 – 3000 cyklech považována za statisticky nevýznamnou, ale u 7000 cyklů je klesající hodnota ohybové považována za statisticky významnou, zde je také nejvýraznější pokles hodnoty ohybové pevnosti. Na bukovém dřevu má faktor zhuštění za následek klesající hodnotu ohybové pevnosti.

U RDO_N a RDO_Z se projevil vliv všech sledovaných charakteristik statisticky nevýznamný na rozdíl hodnot ohybové pevnosti.



Obr. 39 Čtyř-faktorové analýza rozptylu pro ohybovou pevnost při tloušťce 18 mm

Tab. 8 Základní statistické charakteristiky ohybové pevnosti bukového dřeva

	Dřevina	Zhuštění	Počet cyklů	Tloušťka	Ohybová pevnost [MPa]			
					Aritmetický průměr	Směrodatná chyba	95% interval spolehlivosti	
							-0,95%	0,95%
1	BK	N	0	4	161,42	4,48	150,46	172,39
2	BK	N	0	6	133,93	2,88	126,88	140,97
3	BK	N	0	10	122,61	4,84	110,76	134,46
4	BK	N	0	18	116,97	3,89	107,46	126,47
5	BK	N	1000	4	163,71	2,96	156,46	170,96
6	BK	N	1000	6	128,28	3,87	118,81	137,75
7	BK	N	1000	10	130,33	2,85	123,35	137,31
8	BK	N	1000	18	116,90	3,15	109,19	124,61
9	BK	N	3000	4	159,47	3,35	151,26	167,67
10	BK	N	3000	6	130,68	4,20	120,41	140,95
11	BK	N	3000	10	127,23	5,81	113,02	141,44
12	BK	N	3000	18	119,72	3,10	112,14	127,31
13	BK	N	7000	4	150,92	5,03	138,62	163,22
14	BK	N	7000	6	109,50	11,96	80,24	138,76
15	BK	N	7000	10	126,54	2,43	120,58	132,49
16	BK	N	7000	18	115,23	3,33	107,08	123,38
17	BK	Z	0	4	134,11	3,26	126,14	142,07
18	BK	Z	0	6	154,24	8,31	133,91	174,56
19	BK	Z	0	10	139,13	5,87	124,77	153,49
20	BK	Z	0	18	101,26	9,63	77,70	124,82
21	BK	Z	1000	4	183,73	2,65	177,24	190,21
22	BK	Z	1000	6	140,33	11,19	112,95	167,72
23	BK	Z	1000	10	116,42	12,58	85,64	147,20
24	BK	Z	1000	18	107,60	6,21	92,42	122,79
25	BK	Z	3000	4	181,82	3,60	173,01	190,63
26	BK	Z	3000	6	146,84	10,21	121,85	171,84
27	BK	Z	3000	10	134,41	4,62	123,11	145,72
28	BK	Z	3000	18	109,08	10,29	83,89	134,26
29	BK	Z	7000	4	176,23	5,76	162,13	190,33
30	BK	Z	7000	6	171,97	8,69	150,71	193,24
31	BK	Z	7000	10	120,11	8,13	100,21	140,00
32	BK	Z	7000	18	68,75	8,79	47,24	90,26

Tab. 9 Základní statistické charakteristiky ohybové pevnosti osikového dřeva

	Dřevina	Zhuštění	Počet cyklů	Tloušťka	Ohybová pevnost [MPa]			
					Aritmetický průměr	Směrodatná chyba	95% interval spolehlivosti	
							-0,95%	0,95%
33	OS	N	0	4	103,38	4,00	93,60	113,16
34	OS	N	0	6	102,40	3,93	92,79	112,02
35	OS	N	0	10	86,55	6,39	70,92	102,18
36	OS	N	0	18	79,62	3,28	71,59	87,65
37	OS	N	1000	4	94,58	3,35	86,37	102,79
38	OS	N	1000	6	89,12	5,34	76,05	102,19
39	OS	N	1000	10	91,99	4,78	80,30	103,68
40	OS	N	1000	18	81,11	6,85	64,35	97,87
41	OS	N	3000	4	93,19	4,16	83,01	103,38
42	OS	N	3000	6	93,03	5,09	80,56	105,49
43	OS	N	3000	10	88,72	3,20	80,89	96,55
44	OS	N	3000	18	80,04	7,80	60,95	99,14
45	OS	N	7000	4	91,38	4,28	80,91	101,86
46	OS	N	7000	6	97,54	2,30	91,92	103,16
47	OS	N	7000	10	89,26	4,17	79,06	99,46
48	OS	N	7000	18	75,96	2,54	69,74	82,18
49	OS	Z	0	4	104,39	10,20	79,42	129,36
50	OS	Z	0	6	93,22	5,02	80,93	105,52
51	OS	Z	0	10	91,77	3,74	82,63	100,92
52	OS	Z	0	18	79,12	8,65	57,96	100,28
53	OS	Z	1000	4	126,98	10,01	102,50	151,47
54	OS	Z	1000	6	107,20	7,52	88,80	125,60
55	OS	Z	1000	10	91,78	3,24	83,87	99,70
56	OS	Z	1000	18	82,80	9,19	60,32	105,28
57	OS	Z	3000	4	118,78	4,10	108,75	128,81
58	OS	Z	3000	6	107,20	7,52	88,80	125,60
59	OS	Z	3000	10	91,08	8,13	71,19	110,97
60	OS	Z	3000	18	85,67	5,51	72,18	99,16
61	OS	Z	7000	4	135,64	4,00	125,85	145,43
62	OS	Z	7000	6	115,08	9,05	92,93	137,23
63	OS	Z	7000	10	94,16	2,32	88,48	99,84
64	OS	Z	7000	18	76,49	10,44	50,95	102,03

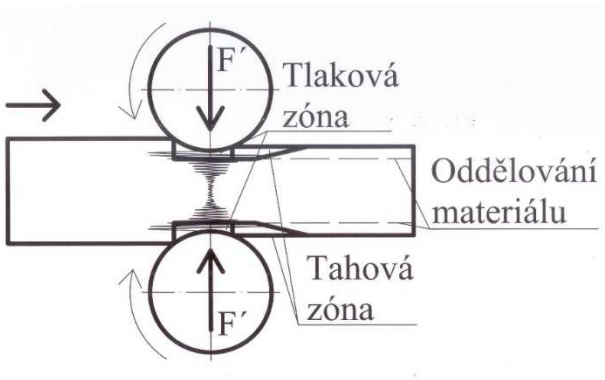
V provedené experimentální části měření jsme získali přesné hodnoty ohybové pevnosti kolmo na vlákna v radiálním směru pro všechny zkušební vzorky (tab. 8 a 9).

Podle Požgaje *et al*. (1997), který udává hodnotu ohybové pevnosti buku lesního 124 MPa při hustotě dřeva 684 kg/m^3, jsou přibližně stejné jako hodnoty, co udává Wagenführ (1974), které jsou pro ohybovou pevnost buku lesního 123 MPa při hustotě dřeva 720 kg/m^3. Při porovnání naměřených hodnot, jež činí pro ohybovou pevnost na nenamáhaném bukovém dřevu 133,7 MPa při hustotě dřeva 726 kg/m^3 a hodnot výše uvedených autorů je možné konstatovat, že na rostlém bukovém dřevu nezhuštěném a cyklicky nenamáhaném je ohybová pevnost srovnatelná.

U rostlého osikového dřeva nezhuštěného udává Sarvaš *et al*. (2010) ohybovou pevnost 61 MPa při hustotě dřeva 420 kg/m^3 a Wagenführ (1974) udává ohybovou pevnost 65 MPa při hustotě dřeva 490 kg/m^3. Z naší práce vychází hodnota ohybové pevnosti nenamáhaných vzorků 93 MPa při hustotě dřeva 531 kg/m^3 což je vzorků o 43% větší než u zmiňovaných autorů.

Zhuštění dřeva má za následek zvýšení ohybové pevnosti cca o 6% oproti nezhuštěnému dřevu. Při zhuštěném dřevu bylo počítáno s nárůstem hodnoty ohybové pevnosti o vyšší hodnotu. To že nárůst hodnoty nebyl tak velký, si je možné vysvětlovat tak, že při zhušťování dřevní hmoty válcováním došlo k poškození dřeva. Jelikož při válcování nám vznikají složitější napěťové stavy, než je tomu při lisování. Lisovací válce nepůsobí na celou plochu zhušťovaného matriálu najednou, ale pouze lokálně v místě válců. Při válcování je velice důležitá vlhkost dřeva. Pokud je vlhkost ve dřevě při zhušťování příliš vysoká může docházek trhání stěn buněk. V opačném případě při velmi nízké vlhkosti pod 5% je způsobeno poškození dřeva vznikem trhlin, odlupováním a další. Toto tvrzení potvrzují Vorreiter (1949) a Chuchrajskij (1953).

U válcování dřeva dochází k teoretickému rozdělení materiálu po výšce na tři části (obr. 40). Přičemž v krajních vrstvách dochází k největšímu zhuštění dřevní hmoty a středová vrstva je zhuštěná méně. Mezi středovou a povrchovou působí nejen tlakové ale i tahové síly a ty mají za následek trhliny a odlupování materiálu.



Obr. 40 Poruchy válcováním dřeva

Průběhy jednotlivých grafů (obr.36-39) potvrzují, že faktor tloušťky má na ohybovou pevnost statisticky významný vliv. Tloušťka se na ohybové pevnosti projevu tak, že se zvětšováním tloušťky nám klesá hodnota ohybové pevnosti. To je zapříčiněno tím, že nám síla roste pomaleji než plocha průřezu, na kterou síla působí. Jelikož síla se následně roznáší přes větší plochu průřezu. Tento charakter se projevuje jak na rostlém dřevu nezhuštěném tak i zhuštěném u bukové a osikové dřeviny.

Charakter faktoru vlivu počtu cyklů není jednoznačně daný a statistické výsledky se od sebe významně neodlišují (tab. 7). Toto tvrzení platí pouze pro sledovaný případ, u počtu cyklů námi zvolených. Při zatěžování větším počtem cyklů není zaručeno, že se neprojeví únavová pevnost materiálu ve větší míře.

6.1.2. Vyhodnocení vlivu sledovaných faktorů na hodnotu modulu pružnosti v ohybu

Pro vyhodnocení naměřených hodnot je použita čtyř-faktorová analýza rozptylu, kde jsou hodnoceny jednotlivé účinky sledovaných faktorů, i účinky dvoj-faktorové a troj-faktorové interakce.

Na základě hladiny významnosti „P“ uvedené v tabulce (tab. 10) je možné konstatovat, že faktory dřevina, zhuštění, počet cyklů a tloušťka materiálu je možné považovat za statisticky významně působící faktory na modul pružnosti.

Z výsledků dvoj-faktorové interakce, je možné na základě hodnoty hladiny významnosti „P“ tvrdit, že za statisticky významné působící interakce lze považovat dřevinu*zhuštění, dřevinu*počet cyklů, zhuštění*počet cyklů a zhuštění*tloušťka. Dřevina*tloušťka a počet cyklů*tloušťka jsou statisticky nevýznamné na modul pružnosti.

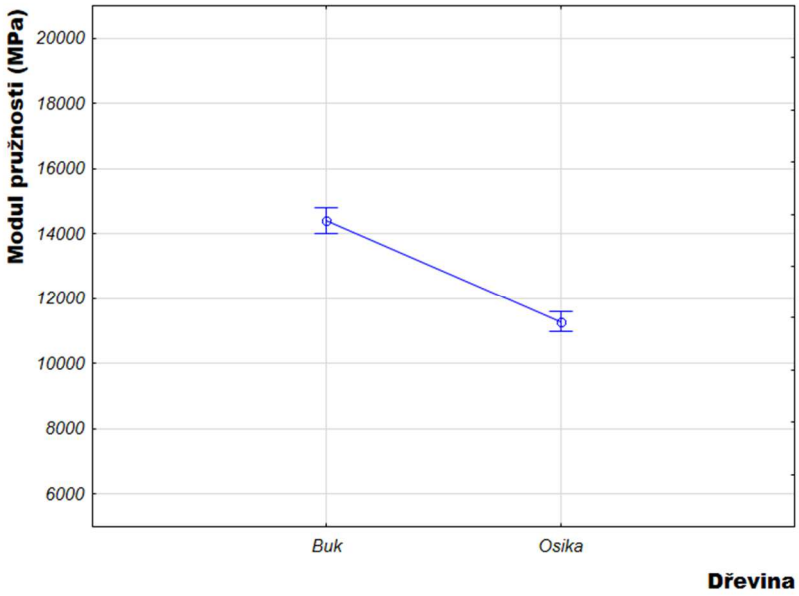
Na výsledcích troj-faktorové interakce je možné konstatovat, že pro hladinu významnosti „P“ jsou statisticky významné kombinace působících faktorů dřevina*zhuštění*počet cyklů, dřevina*počet cyklů*tloušťka a zhuštění*počet cyklů*tloušťka. U kombinace faktorů dřevina*zhuštění*počet je kombinace statisticky nevýznamné na modul pružnosti.

Při účinku všech čtyř sledovaných faktorů je možné tvrdit, že při vzájemné interakci jsou statisticky nevýznamné pro modul pružnosti.

Tab. 10 Čtyř-faktorová analýza rozptylu hodnotící účinek vlivu jednotlivých faktorů, dvoj-faktorových až čtyř-faktorových interakcí pro modul pružnosti v ohybu

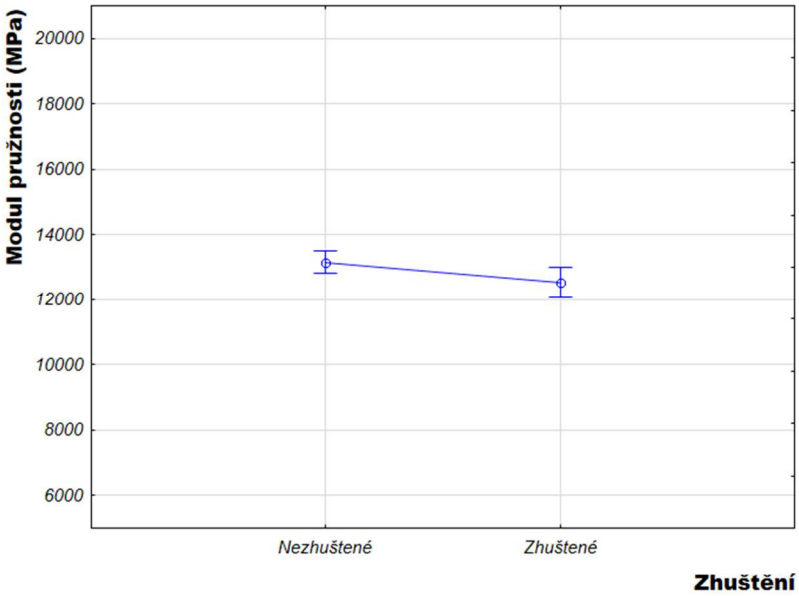
Sledovaný faktor	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Rozptyl	Fisherův T-test	P-hladina významnosti
Intercept	7,3926E+10	1	7,3926E+10	13702,69	0,000
{1}Dřevina	1,0880E+09	1	1,0880E+09	201,66	0,000
{2}Zhuštění	4,3413E+07	1	4,3413E+07	8,05	0,005
{3}Počet cyklů	1,6631E+08	3	5,5436E+07	10,28	0,000
{4}Tloušťka	5,5636E+07	3	1,8545E+07	3,44	0,017
Dřevina*Zhuštění	2,4284E+07	1	2,4284E+07	4,50	0,035
Dřevina*Počet cyklů	7,5697E+07	3	2,5232E+07	4,68	0,003
Zhuštění*Počet cyklů	5,6256E+07	3	1,8752E+07	3,48	0,016
Dřevina*Tloušťka	1,7597E+07	3	5,8658E+06	1,09	0,354
Zhuštění*Tloušťka	9,8388E+07	3	3,2796E+07	6,08	0,000
Počet cyklů*Tloušťka	5,7410E+07	9	6,3789E+06	1,18	0,305
Dřevina*Zhuštění*Počet cyklů	3,1824E+07	3	1,0608E+07	1,97	0,119
Dřevina*Zhuštění*Tloušťka	1,1515E+08	3	3,8382E+07	7,11	0,000
Dřevina*Počet cyklů*Tloušťka	1,9950E+08	9	2,2167E+07	4,11	0,000
Zhuštění*Počet cyklů*Tloušťka	1,1710E+08	9	1,3011E+07	2,41	0,011
Dřevina*Zhuštění*Počet cyklů*Tloušťka	7,7275E+07	9	8,5861E+06	1,59	0,116
Error	2,0717E+09	384	5,3950E+06		

Samostatný faktor dřevina je považován za statistický významný vliv na modul pružnosti. Na obrázku 41 je možné vidět, že modul pružnosti bukového dřeva má vyšší hodnotu než modul pružnosti osikového dřeva.



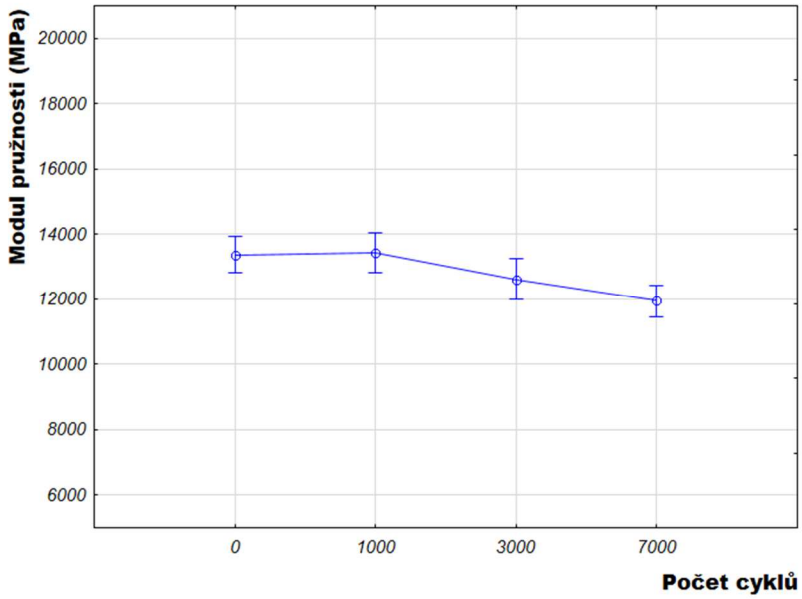
Obr. 41 Vliv druhu dřeviny na hodnotu modulu pružnosti dřeva

Za statisticky významný faktor ovlivňující modul pružnosti je považováno zhuštění dřeva. Na obrázku 42 můžeme pozorovat, že zhuštění mělo negativní vliv na modul pružnosti.



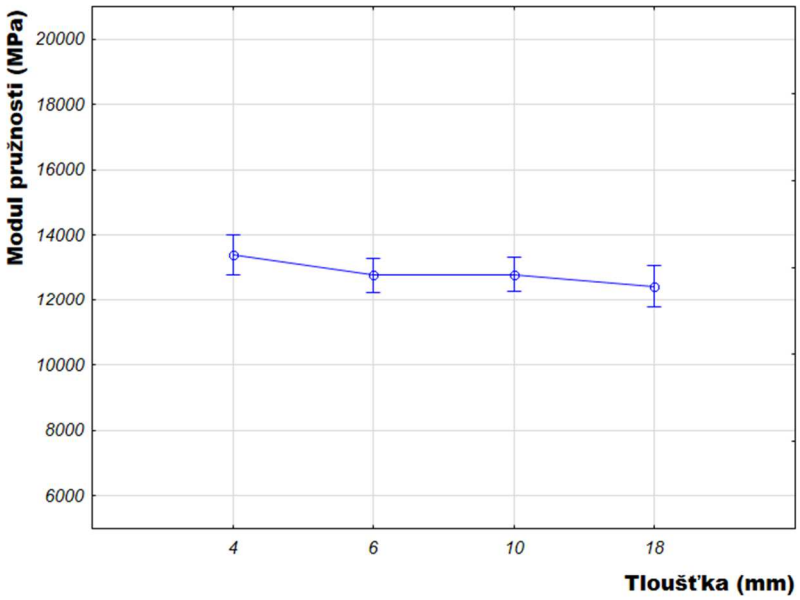
Obr. 42 Vliv zhuštění dřeviny na hodnotu modulu pružnosti dřeva

Sledovaný faktor počet cyklů se na modulu pružnosti projevil jako statisticky významným faktorem. Z obrázku 43 je možné vidět, že se stoupajícím počtem cyklů nám modul pružnosti klesá.



Obr. 43 Vliv počtu cyklů na hodnotu modulu pružnosti dřeva

Z průběhu na obrázku 44 je možné pozorovat klesající hodnotu modulu pružnosti s narůstající tloušťkou a z tohoto důvodu je možné tvrdit, že vliv tloušťky je statisticky významným faktorem na změnu modulu pružnosti.

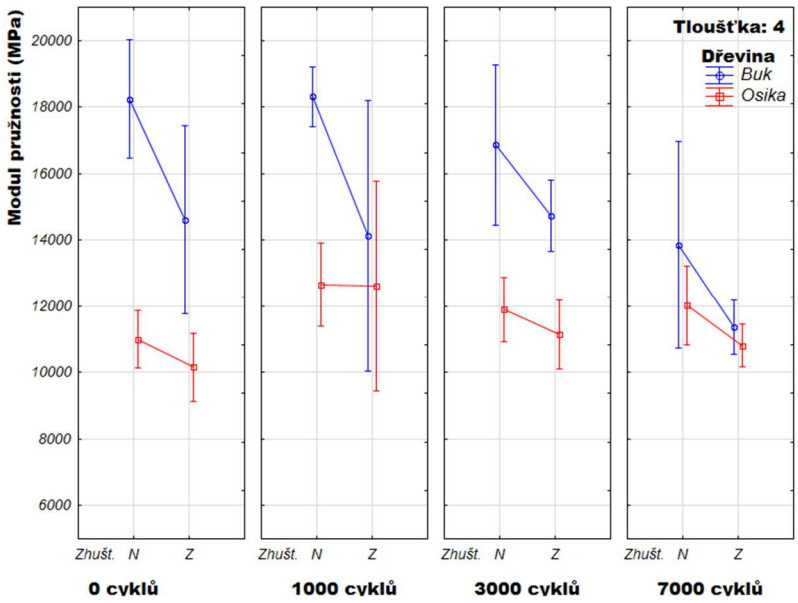


Obr. 44 Vliv tloušťky dřeviny na hodnotu modulu pružnosti dřeva

Na obrázku 45 je zobrazen průběh vlivu všech sledovaných faktorů na modul pružnosti při tloušťce vzorků 4 mm.

Na RDB_N a RDB_Z je počet cyklů statisticky významný faktor ovlivňující modul pružnosti. U RDB_Z je pokles modulu pružnosti u hodnoty 0 počtu cyklů z důvodu zhuštění dřeva. U RDB_N a RDB_Z je průběh modulu pružnosti přibližně stejný s drobnými odchylkami, se stoupajícím počtem cyklů klesá hodnota modulu pružnosti. Nejvýraznější pokles hodnoty byl při 7000 cyklech a to jak pro RDB_N tak i RDB_Z.

U RDO_N je možné pozorovat prvotní nárůst hodnoty modulu pružnosti při 1000 cyklech, u dalšího zvyšování počtu cyklů se nám hodnota modulu pružnosti zvyšuje, ale přírůstek není tak velký jak je tomu při 1000 cyklech. Na RDO_Z se projevuje zhuštění při 0 cyklech poklesem hodnoty modulu pružnosti oproti RDO_N. U RDO_Z je přibližně stejný průběh modulu pružnosti jako je u RDO_N.

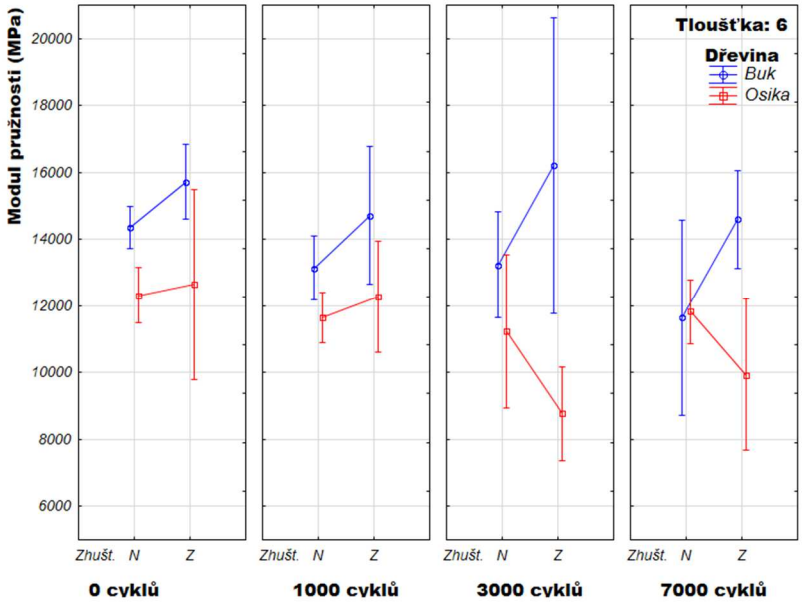


Obr. 45 Čtyř-faktorové analýza rozptylu modulu pružnosti při tloušťce 4 mm

Na obrázku 46 je zobrazen průběh vlivu všech sledovaných faktorů na modul pružnosti při tloušťce vzorků 6 mm.

Na RDB_N má cyklické namáhání statisticky významný vliv na modul pružnosti, s rostoucím počtem cyklů nám hodnota modulu pružnosti klesá. U RDB_Z je střídavý průběh kde můžeme pozorovat při počtu cyklů 1000 a 7000 snížení, ale u počtu cyklů 3000 je zvýšení hodnoty modulu pružnosti. Hodnota modulu pružnosti se na nenamáhaných a namáhaných vzorkách zvedla z důvodu faktoru zhuštění.

U RDO_N nemá statistický významný vliv počet cyklů na klesající modul pružnosti. Na RDO_Z je vidět že při 0 cyklech se modul pružnosti nepatrně zvýšil, ale při cyklickém namáhání modul pružnosti klesá. Proto je možné tvrdit, že počet cyklů má statistický vliv na klesající hodnotu modulu pružnosti, přičemž nejvýraznější hodnota poklesu modulu pružnosti je při 3000 cyklech.

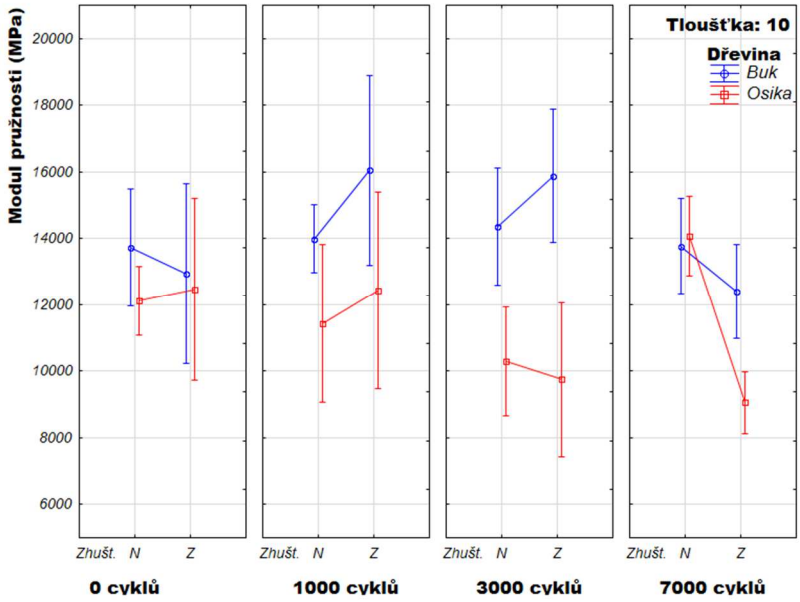


Obr. 46 Čtyř-faktorové analýza rozptylu modulu pružnosti při tloušťce 6 mm

Na obrázku 47 je zobrazen průběh vlivu všech sledovaných faktorů na modul pružnosti při tloušťce vzorků 10 mm.

U RDB_N je možné tvrdit, že počet cyklů je statisticky nevýznamný faktor na rozdílné hodnoty modulu pružnosti. Při 0 počtu cyklů u RDB_Z je vidět že zhuštění má za následek snížení hodnoty modulu pružnosti, ale při zvyšování počtu cyklů na 1000 a 3000 cyklů nám hodnota modulu pružnosti stoupá a při 7000 nepatrně klesá.

U RDO_N může tvrdit, že počet cyklů má statistický významný vliv na modul pružnosti. Při 1000 a 3000 cyklech nám modul pružnosti klesá, ale při 7000 cyklech je zaznamenán nárůst modulu pružnosti. Na RDO_Z má počet cyklů statisticky významný vliv na hodnotu modulu pružnosti. Hodnota modulu pružnosti má u RDO_Z klesající průběh z důvodu projevu cyklického namáhání. Nejvýraznější pokles hodnoty modulu pružnosti je při 3000 cyklech.

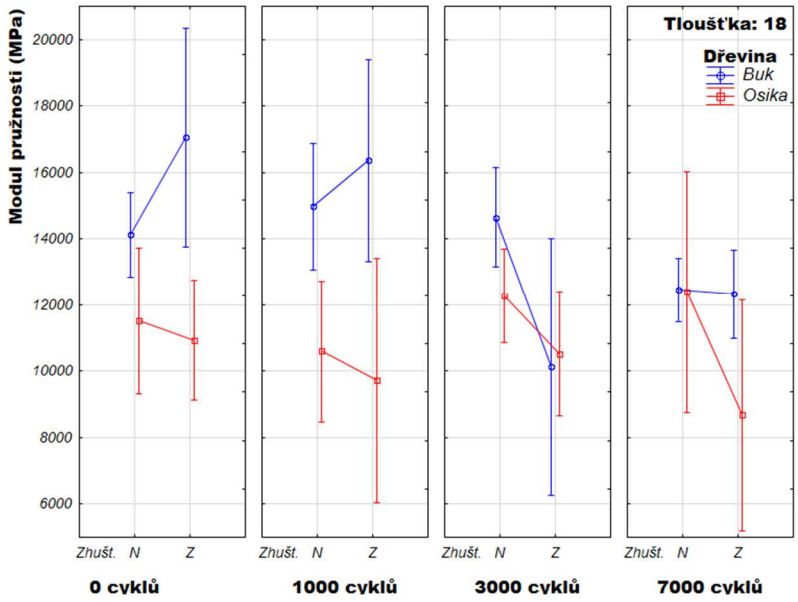


Obr. 47 Čtyř-faktorové analýza rozptylu modulu pružnosti při tloušťce 10 mm

Na obrázku 48 je zobrazen průběh vlivu všech sledovaných faktorů na modul pružnosti při tloušťce vzorků 18 mm.

Na RDB_N je při 1000 a 3000 je zaznamenán menší nárůst, ale u 7000 cyklů je vidět pokles hodnoty modulu pružnosti. U RDB_Z je počet cyklů statisticky významný na klesající hodnotu modulu pružnosti. U RDB_Z je možné pozorovat při 0 a 1000 cyklech nárůst, ale u 3000 a 7000 cyklech je pokles hodnot modulu pružnosti.

U RDO_N je u 1000 cyklů menší pokles, ale u 3000 a 7000 cyklech menší nárůst hodnoty modulu pružnosti. U RDO_Z nám klesá hodnota modulu pružnosti.



Obr. 48 Čtyř-faktorové analýza rozptylu modulu pružnosti při tloušťce 18 mm

Tab. 11 Základní statistické charakteristiky modulu pružnosti v ohybu bukového dřeva

	Dřevina	Zhuštění	Počet cyklů	Tloušťka	Modul pružnosti [MPa]			
					Aritmetický průměr	Směrodatná chyba	95% interval spolehlivosti	
							-95,00%	95,00%
1	BK	N	0	4	18246,84	728,49	16464,30	20029,39
2	BK	N	0	6	14354,50	257,47	13724,49	14984,51
3	BK	N	0	10	13727,58	723,98	11956,07	15499,10
4	BK	N	0	18	14127,31	522,52	12848,75	15405,88
5	BK	N	1000	4	18320,75	364,95	17427,76	19213,74
6	BK	N	1000	6	13142,64	392,28	12182,77	14102,51
7	BK	N	1000	10	13989,21	422,84	12954,55	15023,87
8	BK	N	1000	18	14973,03	777,02	13071,74	16874,32
9	BK	N	3000	4	16864,09	987,70	14447,27	19280,90
10	BK	N	3000	6	13231,24	653,67	11631,76	14830,73
11	BK	N	3000	10	14359,27	720,71	12595,76	16122,77
12	BK	N	3000	18	14654,26	617,25	13143,90	16164,62
13	BK	N	7000	4	13857,01	1276,70	10733,03	16980,98
14	BK	N	7000	6	11652,63	1195,87	8726,43	14578,82
15	BK	N	7000	10	13767,68	586,84	12331,74	15203,62
16	BK	N	7000	18	12453,26	387,71	11504,57	13401,95
17	BK	Z	0	4	14598,75	1159,46	11761,64	17435,86
18	BK	Z	0	6	15716,04	455,75	14600,85	16831,23
19	BK	Z	0	10	12946,34	1108,41	10234,16	15658,53
20	BK	Z	0	18	17058,91	1345,85	13765,72	20352,09
21	BK	Z	1000	4	14126,12	1666,28	10048,87	18203,36
22	BK	Z	1000	6	14713,09	846,96	12640,64	16785,53
23	BK	Z	1000	10	16043,67	1161,22	13202,28	18885,06
24	BK	Z	1000	18	16366,33	1244,10	13322,13	19410,52
25	BK	Z	3000	4	14739,78	438,60	13666,58	15812,98
26	BK	Z	3000	6	16208,87	1809,11	11782,15	20635,60
27	BK	Z	3000	10	15875,67	817,39	13875,59	17875,74
28	BK	Z	3000	18	10125,87	1583,72	6250,64	14001,09
29	BK	Z	7000	4	11360,78	337,74	10534,36	12187,20
30	BK	Z	7000	6	14594,57	599,17	13128,45	16060,70
31	BK	Z	7000	10	12409,56	578,65	10993,64	13825,48
32	BK	Z	7000	18	12325,82	545,38	10991,33	13660,31

Tab. 12 Základní statistické charakteristiky modulu pružnosti v ohybu osikového dřeva

	Dřevina	Zhuštění	Počet cyklů	Tloušťka	Modul pružnosti [MPa]			
					Aritmetický průměr	Směrodatná chyba	95% interval spolehlivosti	
							-95,00%	95,00%
33	OS	N	0	4	10994,74	351,19	10135,42	11854,06
34	OS	N	0	6	12322,32	344,54	11479,27	13165,37
35	OS	N	0	10	12122,64	427,92	11075,55	13169,73
36	OS	N	0	18	11519,52	903,90	9307,76	13731,28
37	OS	N	1000	4	12654,00	514,82	11394,27	13913,73
38	OS	N	1000	6	11659,72	307,51	10907,27	12412,17
39	OS	N	1000	10	11435,86	973,93	9052,74	13818,97
40	OS	N	1000	18	10595,14	867,45	8472,56	12717,72
41	OS	N	3000	4	11893,61	399,69	10915,59	12871,62
42	OS	N	3000	6	11239,89	939,53	8940,93	13538,84
43	OS	N	3000	10	10299,90	670,63	8658,94	11940,87
44	OS	N	3000	18	12265,84	578,00	10851,54	13680,15
45	OS	N	7000	4	12013,02	489,81	10814,50	13211,54
46	OS	N	7000	6	11824,15	396,01	10855,14	12793,15
47	OS	N	7000	10	14073,64	486,41	12883,43	15263,85
48	OS	N	7000	18	12389,79	1488,02	8748,73	16030,85
49	OS	Z	0	4	10153,46	421,05	9123,19	11183,73
50	OS	Z	0	6	12646,52	1164,41	9797,31	15495,73
51	OS	Z	0	10	12460,55	1118,61	9723,42	15197,68
52	OS	Z	0	18	10929,26	742,71	9111,91	12746,60
53	OS	Z	1000	4	12613,94	1295,72	9443,43	15784,45
54	OS	Z	1000	6	12281,11	683,05	10609,75	13952,47
55	OS	Z	1000	10	12435,39	1207,48	9480,79	15389,98
56	OS	Z	1000	18	9720,62	1503,15	6042,56	13398,69
57	OS	Z	3000	4	11137,01	428,05	10089,61	12184,40
58	OS	Z	3000	6	8768,96	571,09	7371,55	10166,37
59	OS	Z	3000	10	9754,93	945,87	7440,48	12069,38
60	OS	Z	3000	18	10527,54	764,76	8656,25	12398,83
61	OS	Z	7000	4	10812,04	258,71	10178,99	11445,09
62	OS	Z	7000	6	9931,07	926,77	7663,36	12198,78
63	OS	Z	7000	10	9047,70	385,27	8104,98	9990,42
64	OS	Z	7000	18	8671,96	1426,94	5180,36	12163,56

V provedené experimentální části měření jsme získali přesné hodnoty ohybového modulu pružnosti pro všechny zkušební vzorky (tab. 11 a 12).

Na sledovaném faktoru vlivu zhuštění na modul pružnosti, můžeme říci, že je statisticky významně ovlivňujícím faktorem modul pružnosti. Požgaj *et al*. (1997) uvádí hodnotu modulu pružnosti bukového rostlého nezhuštěného dřeva 12966 MPa při hustotě dřeva 684 kg/m^3 a podle Wagenführera (1974) je modul pružnosti bukového nezhuštěného dřeva 16000 MPa při hustotě dřeva 720 kg/m^3. V našem měření je stanoven modul pružnosti v ohybu pro rostlé nezhuštěné a nenamáháme bukové dřevo 13131 MPa při hustotě 726 kg/m^3, čímž je možné konstatovat, že hodnota je srovnatelná s výše uvedenými výsledky autorů.

Sarvaš *et al*. (2010) udává hodnoty modulu pružnosti rostlého nezhuštěného topolu osikového 7800 MPa při hustotě dřeva 420 kg/m^3 a podle Wagenführera (1974) je hodnota modulu pružnosti 8800 MPa při hustotě dřeva 490 kg/m^3. Hodnota modulu pružnosti osikového nezhuštěného a nenamáhaného dřeva, zjištěna v našem případě je 10693 MPa při hustotě dřeva 531 kg/m^3. Tato hodnota je o něco vyšší než kterou udávají zmínění autoři, jelikož je stanovena dřevě s větší hustotou.

Zhuštění dřeva má za následek snížení modulu pružnosti v ohybu cca o 3% oproti nezhuštěnému dřevu. Tento pokles si vysvětlujeme zdůvodněním jako je tomu u ohybové pevnosti na str. 65. Dalším důvodem je, že při zhušťování větších tlouštěk materiálu dochází k porušení v důsledku rozdílů napětí mezi zhuštěným a nezhuštěným dřevem, což potvrzuje Makovínyi (2013). Chuchrjanskij (1953) tvrdí, že zhušťováním dřeva s vlhkostí menší než 15% se mikroskopicky porušuje materiál a tím dochází ke snížení pevnosti a modulu pružnosti.

Z průběhu vlivu tloušťky na modul pružnosti je možné konstatovat, že s narůstající tloušťkou materiálu modul pružnosti klesá. Přičemž nejvýraznější pokles nastává mezi tloušťkami 4 a 6 mm, co si vysvětlujeme tím, že při tloušťce 4 mm není brán v úvahu pouze štíhlostní poměr zkušebního vzorku, ale i jeho vlastní pružnost.

Z obrázku průběhu vlivu cyklického namáhání je vidět, že počet cyklů se statisticky významné projevil na modul pružnosti v ohybu klesajícím charakterem. Nejvýznamnější pokles nastává při zatížení 3000 a 7000 cykly kde se začíná projevovat porušení dřeviny válcovým zhušťováním. U nezhuštěného materiálu není vliv cyklického namáhání až tolika zřetelný.

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo zjistit vliv vybraných faktorů (tloušťka materiálu, zhuštění, počet cyklů a dřevina) na sledované charakteristiky (ohybová pevnost a modul pružnosti v ohybu). Provedeným měřením a následnou analýzou byly zjištěny dále uvedené skutečnosti.

Při sledování vlivu vybraných faktorů na ohybovou pevnost je možné konstatovat, že druh dřeviny má statisticky významný vliv na ohybovou pevnost, když bylo zjištěno, že pevnost bukového dřeva je vyšší oproti dřevu osikovému. Zhuštění se také projevilo jako vliv statisticky významný na ohybovou pevnost, a to tak, že se ohybová pevnost vlivem zhuštění materiálu zvětšila. Jak se v průběhu měření ukázalo, toto platí pouze do tloušťky 10 mm, když při zvyšování tloušťky se zhuštění projevilo negativně na hodnotu ohybové pevnosti. Dále bylo zjištěno, že tloušťka materiálu má vliv statisticky významný na ohybovou pevnost, a to takový, že s narůstající tloušťkou materiálu hodnota ohybové pevnosti klesá. Jak bylo zjištěno, počet cyklů je považován za statisticky nevýznamný faktor na hodnotu ohybové pevnosti, když faktor počtu cyklů výrazně neovlivnil vybrané sledované charakteristiky materiálu.

Při sledování vlivu vybraných faktorů na modul pružnosti v ohybu je možné po provedeném měření konstatovat následující závěry. U vybraného faktoru dřevina je možné tvrdit, že má statisticky významný vliv na modul pružnosti, a to takový, že u bukového dřeva je hodnota modulu pružnosti vyšší, než je tomu u topolu osikového. Zhuštění má také statisticky významný vliv na modul pružnosti materiálu a je charakterizován klesající hodnotou modulu pružnosti na zhuštěné dřevině, oproti dřevině nezhuštěné. Další sledovaný faktor počet cyklů, se též při měření projevil jako statisticky významný na modul pružnosti materiálu, když s narůstajícím počtem cyklů hodnota modulu pružnosti klesá. Vliv faktoru tloušťky materiálu se projevil obdobně jako je tomu v případě ohybové pevnosti, tedy s rostoucí tloušťkou materiálu modul pružnosti klesá, čímž se snižuje pružnost dřeviny.

Výše uvedené výsledky slouží jako podklad pro tvorbu vrstvených materiálů. Pro tvorbu těchto materiálů bych na základě závěrů zjištěných měřením doporučil využívat spíše tvrdší dřeviny s menší tloušťkou materiálu.

Seznam pramenů a literatury

BABIAK, M.; DUBOVSKÝ, J. *Problémy z mechanických vlastností dreva.* 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2001. 71 s. ISBN 80-228-1076-2

Česká zemědělská univerzita. *Lexikon dřeva* [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita, 2012 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z WWW: < http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/lexikon_dreva.pdf/>

DEJMAL, A. *Základy hypotermické úpravy a ochrany dřeva*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělská univerzita v Brně, 1995. 193 s. ISBN 80-7157-163-3

DUBOVSKY, J. *et al*. *Textúra, štruktúra a úžitkové vlastnosti dreva – Návody návody na cvičenia*. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2003. 107 s. ISBN 80-228-1290-0

DUBOVSKÝ, J.; BABIAK, M.; ČUNDERLÍK, I. *Textúra, štruktúra a úžitkové vlastnosti dreva.* 3. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2001. 106 s. ISBN 80-228-1014-2

DUDAS, J.; *Konštrukčné drevné materiály pre drevené stavebné konštrukcie a*

FELLNER, J; TEISCHINGER, A; ZSCHOKKE, W. *Spektrum dřevín – vyobrazení, popis a srovnávací údaje*. vyd. Vídeň: proHolz Austria, 2007. 111 s. ISBN 978-3-902320-44-5

GAFF, M; GAŠPARÍK, M; BORŮVKA, V; BABIAK, M; *Simulating stresses associated with the bending of wood using a finite element method.* ResearchGate [online]. 2015, vol. 10, no. 2 [cit. 2015-04-01]. Dostupné z WWW: <https://www.researchgate.net/publication/271828130_Simulating_stresses_associated_with_the_bending_of_wood_using_a_finite_element_method>

GANDELOVÁ, L.; HORÁČEK, P.; ŠLEZINGEROVÁ, J. *Nauka o dřevě*. Brno: Mendelova zemědělská univerzita v Brně, 2009. 178 s. ISBN 978-80-7375-312-2

HEJNÝ, S; SLAVÍK, B. *Květena České republiky 2*. vyd. Praha: Academia, 2003. 540 s. ISBN 80-200-1089-0

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I.*. vyd. Brno: Ediční středisko MZLU, 2008. 124 s.

HURAJT, T.;*Pevnosť v tlaku vrstvovitých materiálov v závislosti na ich skladbe.* Zvolen, 2011. Diplomová práca. Technická univerzita vo Zvolene.

CHUCHRJANSKIJ, P. N. *Zušľachťovanie dreva. I. Část – Lisovanie dreva*. vyd. Bratislava: práca, 1953. 156 s.

KAFKA, E. *et al*. *Dřevařská příručka I. část*. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. 484 s. ISBN 80-03-00009-2

MAKOVINYI, S. *Zhusťovanie dreva valcovanim pre účely tvorby vrstvovitých materiálov.* Zvolen, 2013. Dizertačná. Technická univerzita vo Zvolene.

Mendelova univerzita v Brně. *Lexikon dřeva* [online]. 2002 [cit. 2015-04-01]. DostupnézWWW: <http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/makro/index.html?drevina=os>

MINÁRIK, M.; *Pevnostné vlastnosti lamelových materiálov na báze dreva a nedrevných komponentov.* Zvolen, 2014. Diplomová práca. Technická univerzita vo Zvolene.

NAVI, P.; GIRARDET, F. *Effect of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood*. Holzforschung, 2000. 54(3): 287-293.

NAVI, P.; HEGER, F. *Combined Densification and Thermo-Hydro-Mechanical Processing of Wood*, MRS BULLETIN, 2004. 132 s.

POŽGAJ, A. *Metódy zišťovania mechanickýh vlastností dreva a drevných velkoplošných kompozitných materiálov.* Zvolen: Vysoká škola lesnícka a drevárska Zvolen, 1987. 170 s.

POŽGAJ,A; CHOVANEC, D; KURJATKO, S; BABIAK, M. *Šruktúra a vlastnosti dreva*. vyd. Bratislava: Príroda a. s., 1997. 485 s. ISBN 80-07-00960-4

SARVAŠ, M; BRUCHÁNIK, R; HOFFMANN, J; CHVÁLOVÁ, K; JEŽOVIČ, V. *Základné charakteristiky lesných drevín*. vyd. Zvolen: NLC, 2010. 82 s. ISBN 978-80-8093-112-4

SERGOVSKIJ, P. S. *Hydrotermická úprava a sušenie dreva*. vyd. Bratislava: ALFA, 1977. 402 s.

STOJČEV, A. *Lignamon – zušlechtěné dřevo: výroba, vlastnosti a použití*. vyd. Praha: VVÚD, 1979. 98 s.

ŠMÍD, J.;*Úprava vlastností topolového dřeva vakuovou impregnací sacharózou.* Brno, 2010. Diplomová práca. Mendelova univerzita v Brně.

TABARSA, T; CHUI, Y.H. Effects of hot-pressing on properties of white spruce. Forest Prod. J., 1997. 47(5): 71-76.

TREBULA, P; KLEMENT, I. *Sušenie a hydrotemická úprava dreva – Návody na cvičenia*. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1998. 205 s. ISBN 80-228-0727-3

VANĚK, J.; *ohýbaný nábytek*. vyd. Praha: Průmyslové vydavatelství, 1952. 112 s.

VORREITER, L. *Holztehnologisches Handbuch*, Band 1, Allgemeines, Holzkunde, Holzschutz un Holzvergutung, Verlag Georg Frame, Wien, 1949. 537 s.

výrobky. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 160 s. ISBN 978-80-228-1938-1

WAGENFÜHR, R. *Holzatlas*. vyd. Leipzing: Fachbuhverlag, 1974. 690 s.

ZEMIAR, J.; *Kategorizáca a charakteristika procesov spracovania dreva*. vyd. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 1997. 55 s. ISBN 80-228-0711-7