

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská



Bakalářská práce

Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva douglasky

Autor: Renáta Valášková

Vedoucí práce: Ing. Vlastimil Borůvka, Ph.D.

© 2015 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra základního zpracování dřeva

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Renáta Valášková

Dřevařství

Název práce

Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva douglasky

Název anglicky

Assessment of elasticity and strength properties of untreated and thermally modified Douglas fir wood

Cíle práce

1. Zhodnotit rázovou houževnatost, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu dřeva douglasky a to jak neupraveného (1. zkušební série vzorků), tak i termicky upraveného při teplotě 165 °C (2. série) a při teplotě 210 °C (3. série).
2. Posoudit i vliv hustoty a šířky letokruhů na posuzované vlastnosti.
3. Porovnat zjištěné hodnoty s dostupnými údaji v odborné literatuře.

Metodika

1. Zpracovat literární rešerši o zkoumané dřevině, termické úpravě dřeva (termodřevu), hodnocených vlastnostech a o faktorech ovlivňujících jejich proměnlivost.
 2. Zajistit reprezentativní vzorky dřeva pro vykonání zkoušek a na relevantním počtu provedení termické úpravy dřeva.
 3. Standardizovanými postupy na zkušebních tělesech stanovit rázovou houževnatost, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu, a dále hustotu a šířku letokruhů jako faktory ovlivňující zkoumané vlastnosti.
 4. Výsledky statisticky zpracovat a interpretovat v textové, tabelární a grafické podobě.
-

Doporučený rozsah práce

35-45 stran textu

Klíčová slova

dřevo, termická úprava, vlastnosti, dynamický a statický modul pružnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu

Doporučené zdroje informací

- ČSN 49 0000: Názvoslovie v drevárskom priemysle. Všeobecné pojmy a vlastnosti dreva.
ČSN 49 0103: Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach.
ČSN 49 0108: Drevo. Zisťovanie hustoty.
ČSN 49 0115: Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe.
ČSN 49 0116: Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe. Čunderlík, I.
2009. Štruktúra dreva. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 133 s. ISBN 978-80-228-2061-5.
Dinwoodie, J. M. (2000). Timber: Its nature and behavior, Taylor & Francis New York, USA, 258 s. ISBN 0-419-25550-8.
Gandelová a kol. (2009). Nauka o dřevě. 173 s. ISBN 978-80-7375-312-2.
Horáček, P. (1998). Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 124 s. ISBN 80-7157-347-7.
Kačíková, D., Kačík, F. (2011). Chemické a mechanické zmeny dreva pri termickej úprave. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011. 71 s. ISBN 978-80-228-2249-7.
Požgaj, A. a kol. (1997). Štruktúra a vlastnosti dreva, Príroda a.s., Bratislava 1993, 485 s. ISBN 80-07-00600-1.
Reinprecht, L., Vidholdová, Z. (2008). Termodrevo Príprava, vlastnosti a aplikácie, TU Zvolen 2008, ISBN 978-80-228-1920-6.
Reinprecht, L. Vidholová, Z. (2011). Termodrevo. Česká republika. ŠMÍRA-PRINT, 2011. 89 s. ISBN 978-80-87427-05-7.
Tsoumis, G. (1991). Science and technology of wood structure, properties, utilization. New York: Chapman and Hall, 497 s. ISBN 0-412-07851-1
Wagenführ, R. (2000). Holzatlas. Leipzig: Fachbuchverlag, 707 s. ISBN 978-3446213906
-

Předběžný termín obhajoby

2015/06 (červen)

Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Konzultant

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 4. 11. 2014

Ing. Milan Gaff, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 10. 3. 2015

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 08. 04. 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva douglasky" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 20. 4. 2015

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a odborné vedení při zpracovávání této práce. Dále chci poděkovat Ing. Tomáši Holečkovi za pomoc při přípravě zkušebních těles a při získávání dat.

Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva douglasky

Assessment of elasticity and strength properties of untreated and thermally modified Douglas fir wood

Souhrn

Tato práce se zabývá vlivem termických úprav na pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva douglasky a posouzením vlivu hustoty a šířky letokruhů na tyto vlastnosti. Konkrétně jsou posuzovány rázová houževnatost, pevnost v ohybu, dynamický a statický modul pružnosti. Porovnáním tří sad zkušebních vzorků (sada upravená při teplotě 165 °C, sada s úpravou při teplotě 210 °C a neupravená sada) bylo zjištěno, že teplota použitá během termické úpravy má vliv na pevnostní a pružnostní vlastnosti dřeva. Se stoupající teplotou došlo k poklesu rázové houževnatosti, dřevo se při teplotě 210 °C stalo výrazně křehčím. Pevnost v ohybu a dynamický modul pružnosti při teplotě 165 °C mírně vzrostly, při teplotě 210 °C došlo k jejich poklesu. U statického modulu pružnosti došlo k mírnému nárůstu, ale tento nárůst není statisticky významný. Při posuzování vlivu hustoty a šířky letokruhů na vybrané vlastnosti byl zjištěn jejich vliv na ohybovou pevnost a statický modul pružnosti.

Summary

This bachelor thesis analyses the influence of thermal modification on elasticity and strength properties of Douglas fir wood and reviews the influence of density, width of growth ring in these properties. In fact, there is a review of impact strength, bending strength, dynamic and static modulus of elasticity. The writer has found out, that the temperature used during the thermal modification influences elasticity and strength properties of wood, thanks to comparison of three sets of trial samples (modified set by 165 °C, 210 °C and untreated set). There is a decrease of impact strength during the high temperature, the wood becomes more brittle. There is a slight growth of bending strength and dynamic modulus of elasticity during 165 °C, there is a decrease during 210 °C. There is no statistical significance in static modulus of elasticity. There is influence of density and growth ring on bending strength and static modulus of elasticity.

Klíčová slova: dřevo, termická úprava, vlastnosti, dynamický a statický modul pružnosti, rázová houževnatost, pevnost v ohybu

Keywords: wood, thermal modification, properties, dynamic and static modulus of elasticity, impact strenght, bending strength

Obsah

1	Úvod.....	6
2	Cíle práce.....	7
3	Rozbor problematiky	8
3.1	Popis dřeviny – Douglaska tisolistá – Pseudotsuga menziesii (Mirbel) Franco.....	8
3.1.1	Charakteristika douglasky	8
3.1.1.1	Dendrologická charakteristika.....	8
3.1.1.2	Produkce a zastoupení douglasky v ČR.....	9
3.1.2	Stavba dřeva.....	9
3.1.2.1	Makroskopická stavba dřeva.....	9
3.1.2.2	Mikroskopická stavba dřeva	10
3.1.3	Vlastnosti dřeva a jeho použití.....	10
3.2	Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva	11
3.2.1	Hustota.....	11
3.2.1.1	Hustota dřevní substance	11
3.2.1.2	Hustota dřeva.....	12
3.2.1.3	Redukovaná hustota.....	13
3.2.1.4	Stanovení hustoty	14
3.2.1.5	Vliv některých faktorů na hustotu	14
3.2.2	Vlhkost dřeva	15
3.2.2.1	Stanovení vlhkosti	16
3.2.2.2	Vliv některých faktorů na vlhkost	16
3.2.3	Pevnost dřeva	17
3.2.3.1	Pevnost dřeva v ohybu	17
3.2.3.2	Faktory ovlivňující pevnost dřeva.....	18
3.2.4	Pružnost dřeva.....	18
3.2.4.1	Modul pružnosti ve statickém ohybu.....	19
3.2.4.2	Dynamický modul pružnosti.....	19
3.2.4.3	Faktory ovlivňující moduly pružnosti	20
3.2.5	Vztah mezi pevností v ohybu a modulem pružnosti ve statickém ohybu	20
3.2.6	Rázová houževnatost.....	21
3.2.6.1	Faktory ovlivňující rázovou houževnatost.....	21
3.3	Termická úprava dřeva.....	22
3.3.1	Výroba a klasifikace termicky modifikovaného dřeva.....	22
3.3.1.1	ThermoWood	22
3.3.1.2	PlatoWood.....	24
3.3.1.3	OHT-Wood	24
3.3.1.4	RetificatdWood.....	24

3.3.2 Fyzikální změny tepelně modifikovaného dřeva	25
3.3.2.1 Hustota	25
3.3.2.2 Rovnovážná vlhkost	25
3.3.2.3 Rozměrová stabilita	26
3.3.2.4 Barva a vůně.....	27
3.3.2.5 Tepelně izolační vlastnosti.....	27
3.3.2.6 Akustické vlastnosti.....	27
3.3.3 Chemické změny tepelně modifikovaného dřeva	28
3.3.3.1 Změny celulózy	28
3.3.3.2 Změny hemicelulózy	29
3.3.3.3 Změny ligninu	30
3.3.3.4 Změny extraktiv	30
3.3.4 Anatomické změny tepelně modifikovaného dřeva	30
3.3.5 Mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva	31
3.3.5.1 Rázová houževnatost a pevnost.....	31
3.3.5.2 Ohybová pevnost dřeva	31
3.3.5.3 Pevnost tahová, tlaková, smyková.....	32
3.3.5.4 Tvrdost dřeva.....	33
3.3.5.5 Modul pružnosti	33
3.3.6 Trvanlivost termodřeva.....	34
3.3.6.1 Biologická odolnost.....	34
3.3.6.2 Povětrnostní odolnost	34
3.3.6.3 Protipožární odolnost.....	34
4 Metodika.....	35
4.1 Výběr a příprava vzorků.....	35
4.2 Tepelné ošetření.....	36
4.3 Fyzikální a mechanické zkoušky	36
4.3.1 Podmínky při zkouškách	36
4.3.2 Stanovení rázové houževnatosti.....	37
4.3.3 Stanovení dynamického modulu pružnosti.....	38
4.3.3.1 FAKOPP Ultrasonic timer	38
4.3.3.2 Korekce času pro přítlačné sondy.....	39
4.3.3.3 Dynamický modul pružnosti	39
4.3.4 Stanovení pevnosti v ohybu a statického modulu pružnosti.....	40
4.3.4.1 Pevnost v ohybu	41
4.3.4.2 Statický modul pružnosti	41
4.3.5 Stanovení hustoty	42
4.3.6 Stanovení vlhkosti v době zkoušky	42
4.3.6.1 Příprava zkušebních těles.....	42

4.3.6.2 Stanovení vlhkosti v době zkoušky	42
4.3.7 Zjišťování šířky letokruhů	43
5 Výsledky a diskuse	44
5.1 Vlhkost	45
5.2 Hustota	45
5.3 Rázová houževnatost.....	48
5.3.1 Vliv hustoty a šířky letokruhů na rázovou houževnatost	49
5.4 Pevnost v ohybu.....	49
5.4.1 Vliv hustoty a šířky letokruhů na pevnost v ohybu.....	50
5.5 Statický modul pružnosti.....	51
5.5.1 Vliv hustoty a šířky letokruhů na statický modul pružnosti	52
5.5.2 Vztah mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti	52
5.6 Dynamický modul pružnosti	53
5.6.1 Vliv hustoty a šířky letokruhů.....	54
5.6.2 Závislost mezi dynamickým a statickým modulem pružnosti.....	54
6 Závěr.....	55
7 Použité zdroje.....	56
7.1 Literatura	56
7.2 Elektronické dokumenty.....	57
7.3 Internetové odkazy	57
7.4 Normy.....	57
8 Seznam obrázků	59
9 Seznam grafů.....	60
10 Seznam tabulek	60
11 Seznam příloh.....	60
12 Přílohy	62

1 Úvod

V současné době je snaha využívat dřevo v čím dál náročnějších interiérových a exteriérových expozicích, čímž stoupají požadavky na jeho odolnost a biologickou trvanlivost. Jako alternativou k exotickým dřevinám používaných v exteriéru se v posledních letech začalo využívat termicky upravené dřevo. Vlivem termického působení dochází ke změnám ve struktuře dřeva, které mají za následek zlepšení rozměrové stability, zvýšení odolnosti dřeva vůči vodě a zvýšení biologické odolnosti. Na termickou úpravu se většinou používají dřeviny netrvanlivé nebo méně trvanlivé.

Douglaska byla vyhlášena Lesy ČR v rámci osvětových aktivit dřevinou roku 2014. V současné době není douglaska na našem území rozšířená, zabírá méně než 0,1 % plochy lesů, ale v dlouhodobých koncepcích se předpokládá postupné zvyšování jejího zastoupení. Z tohoto důvodu je důležité zabývat se možným využitím douglaskového dřeva. Jednou z možností je používat douglasku k výrobě termodřeva.

Cílem této práce je zjistit, jaký dopad má teplota během termické úpravy na pružnostní a pevnostní vlastnosti dřeva. Porovnáním zjištěných výsledků vzorků neupravených a termicky upravených při různých teplotách, bude možné vyvodit, jaký stupeň termické úpravy je využitelný pro určité aplikace.

2 Cíle práce

- Zhodnocení rázové houževnatosti, dynamického a statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu dřeva douglasky neupraveného (1. zkušební sada), termicky upraveného při teplotě 165 °C (2. sada) a termicky upraveného při teplotě 210 °C (3. sada).
- Posouzení vlivu hustoty a šířky letokruhů na posuzované vlastnosti.
- Porovnání zjištěných hodnot s dostupnými údaji v odborné literatuře.

3 Rozbor problematiky

3.1 Popis dřeviny – Douglaska tisolistá – *Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco

3.1.1 Charakteristika douglasky

V současné době je douglaska nejvíce zastoupenou cizokrajnou jehličnatou dřevinou v Evropě, kde se považuje za rostlinu nejrychleji rostoucí. Má svou původní domovinu na západním pobřeží severní Ameriky, odkud byla do Evropy dovezena skotským botanikem Douglasem roku 1827 (Svoboda 1952).

3.1.1.1 Dendrologická charakteristika

Jedná se o dlouhověkovou dřevinu, která dorůstá 60 – 100 m výšky, schopná je dosáhnout i 120 m. Na první pohled je typická hluboce rozpraskanou borkou a úzce jehlancovitou korunou. Její jehlice jsou mírně prohnuté, ploché, úzké, tupě zakončené. Rozemnuté mají typicky citrusovou vůni. Svrchu jsou zelené se slabou rýhou uprostřed, zespoda mají modravé zbarvení se dvěma bílými pruhy. Podle barvy jehlic rozlišujeme tři druhy douglasky; douglasku zelenou, šedou a modrou.

Plodnosti douglaska dosahuje mezi 20 a 30 lety. Její šišky jsou hnědé, vejčité, podlouhlého tvaru, rostoucí na konci větví. Dosahují 5 – 9 cm délky, široké jsou 2 – 3 cm. Výrazné jsou trojklanné konce podpůrných šupin, umístěné mezi okrouhlými šupinami šišek souběžně, nebo ohnuté zpět. Semena jsou trojhranná, červenohnědá s hnědým křídlem. Semenáčky jsou choulostivé, v prvním roce uhynou i ze tří čtvrtin. Kořenová soustava je srdčitého tvaru, strom netrpí vývraty.

Douglaska je druh světlomilný, nesnáší zástin. Přistíněné větve v zápoji sesychají. Zelená douglaska se vyskytuje v oblastech s přímořským vlivem, s vysokými srážkami, nevyhovující jsou pro ni vysychavé půdy. Šedá douglaska roste v horských, na srážky bohatých, někdy až polopouštních stanovištích. Snáší tvrdší podmínky než zelená douglaska. Douglaska není vhodná do znečištěného prostředí v okolí průmyslových oblastí a velkých měst. Poškození okusem dokáže rychle regenerovat. (Svoboda 1952, Svoboda 1953, Chmelař 1981)

3.1.1.2 Produkce a zastoupení douglasky v ČR

V současnosti tvoří v České Republice porostní plocha douglasky 5 600 ha, což činí 0,22% zastoupení této dřeviny. Její zásoba je udávána jako 1 mil. m³, což je 0,2 % ze zásob všech dřevin. Douglaska má vysoký produkční potenciál. Její průměrný roční přírůst je 10 m³ na hektar za rok. V produkční schopnosti překonává domácí hospodářské dřeviny. Ve srovnání s o 22 let starším smrkem ztepilým dosahuje o 18 % vyšší hektarovou zásobu a při porovnání se smíšeným porostem dosahuje hektarové zásoby vyšší o 136 %. Budoucnost douglasky je v jejím začleňování do porostů domácích dřevin (Horáček 2014).

3.1.2 Stavba dřeva

Douglaska, stejně jako jiné jehličnaté dřeviny, je typická výraznou odlišností ve stavbě letního a jarního dřeva. Lze říci, že podíl letního dřeva vzrůstá se zvětšující se šířkou letokruhu. Obecně platí, že kvalita dřeva vrůstá s jeho hustotou (Horáček 2014).

3.1.2.1 Makroskopická stavba dřeva

Douglaska patří mezi jádrové jehličnaté dřeviny. Běl dřeva douglasky je středně široká (3 – 5 cm) s barvou bílou až mírně nažloutlou. Jádro je světle hnědé až načervenalé. Jádro čerstvě skáceného dřeva na vzduchu a světle rychle tmavne, ze světle hnědé přechází do červena. V tomto ohledu se podobá modřínu. Letokruhy jsou velmi výrazné, se širokou a ostře ohraničenou zónou letního dřeva. Letní dřevo je v letokruhu zastoupeno i více než z 50 %. Pryskyřičné kanálky jsou zastoupeny řídky a pouhým okem jsou špatně rozeznatelné. Dřevo douglasky je bez výrazného lesku a voní po pryskyřici (Balabán 1955, Zeidler 2012, Horáček 2014).



Obr. 1 – Příčný řez (Zeidler 2012)



Obr. 2 – Tangenciální řez (Zeidler 2012)



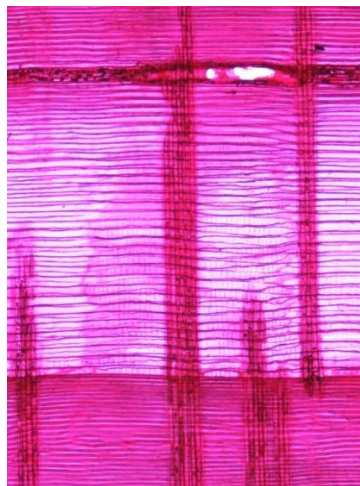
Obr. 3 - Radiální řez (Zeidler 2012)

3.1.2.2 Mikroskopická stavba dřeva

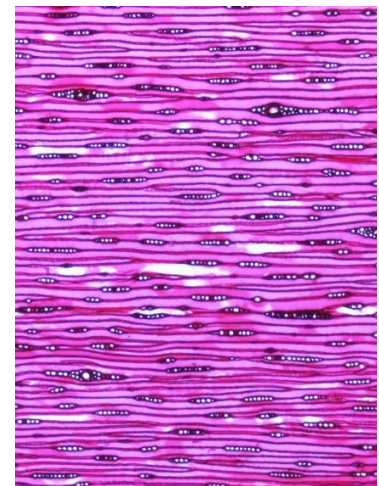
Významným mikroskopickým znakem dřeva douglasky jsou pryskyřičné kanálky, hojně zastoupené v letním dřevě a jemné šroubovice nacházející se ve stěnách některých jarních a většiny letních tracheid. Tečky v křížovém poli jsou piceoidní až taxoidní. Dvojtečky se v radiálních řadách podélných tracheid vyskytují v jedné, vzácněji ve dvou řadách. V tangenciálních řadách se dvojtečky objevují na posledních řadách letních tracheid. Dřeňové paprsky jsou jednovrstevné (častější) i vícevrstevné. Pokud je přítomen vícevrstevný dřeňový paprsek, pak je na tangenciálním řezu patrný uprostřed dřeňového paprsku horizontální pryskyřičný kanálek. Vertikální pryskyřičné kanálky můžeme najít převážně ve dřevě starším. Příčné tracheidy s hladkou stěnou obklopují dřeňové paprsky. Častý je výskyt tlustostěnného dřevního parenchymu (Šlezingerová 2004, Balabán, 1955).



Obr. 4 - Příčný řez
(<http://fld.czu.cz/~zeidler/>)



Obr. 5 - Radiální řez
(<http://fld.czu.cz/~zeidler/>)



Obr. 6 - Tangenciální řez
(<http://fld.czu.cz/~zeidler/>)

3.1.3 Vlastnosti dřeva a jeho použití

V České republice je poptávka po dřevě douglasky malá, zatímco v Německu je považováno za cennější než dřevo jedlové nebo smrkové. V dřevařské praxi u nás není při prodeji dřevo douglasky uváděno jako samostatný druh, ale zpracovává se na základě podobného vzhledu a makroskopické struktury spolu se dřevem borovice nebo modřínu (Horáček 2014).

Dřevo douglasky je charakteristické svou vysokou jakostí a všestranným využitím. Dřevo douglasky je lehké, trvanlivé, rozměrově a tvarově stálé, dobře sušitelné. Má dekorativní vzhled a je dobře zpracovatelné. Hůře se impregnuje, ale lze jej dobře mořit a leštit. Nevýhodou může být větší výskyt suků a poměrně vysoká tvrdost douglaskového

dřeva, což vede k obtížnějšímu spojování konstrukčních prvků a k nutnosti předvrtání otvorů. Vzhledem k většímu zastoupení letního dřeva, má dřevo douglasky dobré mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti se ale mohou lišit na základě polohy v kmeni, protože mají úzkou souvislost s hustotou (Balabán 1955, Horáček 2014).

Pro pořez douglaskové kulatiny se nejčastěji používá kmenová pásová pila. Pořez douglasky je vzhledem k tvrdosti dřeva a jeho odporu, který klade, pomalejší. Její celkové zpracování je oproti jiným dřevinám finančně nákladnější, ale konečný výrobek je pevný a odolný. Pro použití zejména v exteriéru je odolnější než jiné jehličnaté dřeviny s podobnou cenou (Záruba 2014).

Ve své domovině douglaska sloužila především ke stavbě lodí. U nás se využívá podobně jako smrk či borovice. Uplatňuje se především jako konstrukční, tesařské a stavebně truhlářské dřevo do interiéru i exteriéru. Je výhodnou volbou pro zhotovení podlah, oken, dveří či schodišť. Osvědčila se i při stavbě roubenek, za cenu běžného jehličnatého řeziva je tak možné postavit vysoce odolnou stavbu, nenáchylnou k povětrnostním vlivům tak jako jiné dřeviny. Douglaskové dřevo je vstupní surovinou pro překližky, dřevotřískové a dřevovláknité desky. Dřevo douglasky se dále používá na stavbu lodí, či pro výrobu stožárů a pražců (Šlezingerová 2004, Balabán 1955, Svoboda 1953, Záruba 2014).

3.2 Vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva

3.2.1 Hustota

Hustota dřeva patří mezi charakteristiky, které významně ovlivňují jak další fyzikální, tak i mechanické vlastnosti dřeva. Zároveň je sama ovlivňována vlhkostí, která má vliv jak na hmotnost, tak na objem dřeva. Hustota udává podíl hmotnosti dřeva a jeho objemu, udává se v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ nebo v $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Rozlišujeme hustotu dřeva, hustotu dřevní substance a redukovanou hustotu dřeva (Gandelová 2012, Požgaj 1993).

3.2.1.1 Hustota dřevní substance

Dřevní substancí rozumíme hmotu buněčných stěn bez lumenů a mezibuněčných prostor. Hustotu dřevní substance stanovíme jako poměr mezi hmotností dřevní substance a příslušným objemem (Horáček, 2008).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

m_s – hmotnost dřevní substance [kg],

V_s – objem dřevní substance [m³].

Průměrná hustota dřevní substance pro všechny dřeviny se uvádí jako 1530 kg·m⁻³. Jedná se o téměř stálou hodnotu, která je závislá na chemickém složení dřeva. Vzhledem k podobné průměrné hustotě celulózy, hemicelulózy a ligninu hustota dřevní substance téměř nezáleží na druhu dřeviny. Hustota dřevní substance se uplatňuje mimo jiné při výpočtech pórovitosti nebo maximální vlhkosti (Požgaj 1993).

3.2.1.2 Hustota dřeva

Určení hustoty dřeva je oproti jiným materiálům obtížné vlivem hygroskopicity dřeva. Zároveň je jednou z nejdůležitějších kritérií pro posouzení vlastností dřeva. Hustotu dřeva můžeme vyjádřit ve třech vlhkostních stavech. Stanovujeme hustotu dřeva při dané vlhkosti, v suchém stavu a hustotu dřeva při 12% vlhkosti.

Hustotu dřeva v suchém stavu zjišťujeme při nulové vlhkosti. Uvádí se kvůli možnosti porovnání výsledků při teoretických výpočtech.

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

m_0 – hmotnost suchého dřeva [kg],

V_0 – objem suchého dřeva [m³].

(Horáček, 2008)

Hustota vlhkého dřeva se udává podílem hmotnosti a objemu při dané vlhkosti.

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

m_w – hmotnost dřeva při dané vlhkosti [kg],

V_w – objem při dané vlhkosti [m³].

(Gandelová 2012)

Hustota při 12% vlhkosti je speciálním případem. Nalezneme ji ve všech normách, protože pokud dřevo dlouhodobě vystavíme běžným podmínkám, konkrétně teplotě 20 °C a vlhkosti 65 %, dosáhne právě 12 % (Gandelová 2012).

$$\rho_{12} = \frac{m_{12}}{V_{12}} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

m_{12} – hmotnost dřeva při vlhkosti 12 % [kg],

V_{12} – objem při vlhkosti 12 % [m³].

Obecně se za nejlehčí dřevo pokládá balza s hustotou $\rho_0=130 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, za nejtěžší dřevo je považován guajak s hustotou $\rho_0=1360 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Naše domácí dřeviny můžeme podle hustot zařadit do několika skupin (Horáček, 2008).

- Dřeva s nízkou hustotou ($\rho_{12} < 540 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – borovice, smrk, jedle, topol, lípa, vrba, olše, osika, douglaska, jírovec;
- dřeva se střední hustotou ($\rho_{12} = 540 - 750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – modřín, bříza, buk, dub, ořešák, jilm, platan, jabloň, jasan, jeřáb, třešeň, kaštanovník;
- dřeva s vysokou hustotou ($\rho_{12} > 750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) – habr, moruše, akát, hrušeň.

(Gandelová 2012)

3.2.1.3 Redukovaná hustota

Redukovaná hustota udává, kolik dřevní sušiny je obsaženo ve dřevě při určité vlhkosti.

$$\rho_{rw} = \frac{m_0}{V_w} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

m_0 – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu [kg],

V_w – objem při dané vlhkosti [m³].

Úzce s redukovanou hustotou souvisí hustota konvenční, která je užívána při práci s čerstvým dřevem, například při váhové přejímce právě čerstvého dřeva. Udává, podíl sušiny v maximálně nabobtnalém dřevě. Můžeme ji také nazývat redukovanou hustotu v čerstvém stavu.

$$\rho_k = \rho_{r\check{c}} = \frac{m_0}{V_{max}} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

m_0 – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu [kg],

V_{max} – objem dřeva v maximálně nabobtnalém stavu [m³].

(Gandelová 2012).

3.2.1.4 Stanovení hustoty

Pro stanovení hustoty dřeva se nejčastěji postupuje podle ČSN 49 0108. Podstatou zkoušky je zjištění hmotnosti a objemu při určité vlhkosti. Hustota se spočítá dle příslušného vzorce jako poměr hmotnosti a objemu. Redukovanou hustotu zjistíme podle normy jako poměr mezi hmotností absolutně suchého tělesa a objemu tělesa při dané vlhkosti (ČSN 49 0108).

Hustotu dřeva můžeme také stanovit na základě Archimédova zákona. Naklimatizovaná zkušební tělesa se ponoří do odměrného válce, ze kterého odečteme na stupnici hustotu dřeva. Tato metoda slouží pouze pro orientační zjištění hustoty. Tímto způsobem zjištěná hustota bývá vyšší než hustota stanovená podle normy, protože dřevo po ponoření do vody začne vodu okamžitě přijímat, čímž se zvyšuje jeho hmotnost.

Pokud nemá zkušební těleso pravidelný tvar, lze pro stanovení hustoty použít rtuťový objemometr. Jednou z nedestruktivních metod pro zjištění hustoty je stanovení na základě absorpce nebo průchodu různých druhů záření dřevem (Požgaj 1993).

3.2.1.5 Vliv některých faktorů na hustotu

Hustota je ovlivňována vlhkostí, šířkou letokruhů nebo podílem letního dřeva v letokruzích. Rozdíly v hustotě jsou patrné i na základě polohy v kmeni stromu či věku stromu (Horáček 2008).

S vlhkostí se hustota dřeva zvyšuje. Hmotnost se zároveň zvyšuje až do úplného nasycení, zatímco objem se zvyšuje jen do bodu nasycení vláken. Nad touto hranicí je objem dřeva stálý. Redukovaná hustota se v závislosti na vlhkosti mění. Hmotnost je uvedena v suchém stavu, objem se zvyšující vlhkostí roste jen do bodu nasycení vláken. Se stoupající vlhkostí tedy redukovaná hustota klesá (Požgaj 1993).

Obecně platí, že u jehličnatých dřevin se hustota směrem od dřeně k obvodu zvyšuje. Letokruhy ovlivňují hustotu u jehličnatých a listnatých dřevin rozdílně. V závislosti na šířce například hustota u borovice stoupá se zvyšující se šířkou letokruhu, na základě vyššího podílu letního dřeva, ale do šířky 2 mm. Poté nastává náhlý pokles podílu letního

dřeva, tak i hustoty. Kromě některých listnatých dřevin s roztroušeně pórovitou stavbou je u listnáčů trend opačný. Rozdíly v hustotě jarního a letního dřeva některých jehličnanů jsou uvedeny v tabulce (Požgaj 1993, Gandelová 2012).

Tabulka 1 – Rozdíl v hustotě jarního a letního dřeva vybraných dřevin (Požgaj 1993)

	Hustota jarního dřeva ρ_0 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Hustota letního dřeva ρ_0 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Douglaska	300	790
Smrk	350	870
Borovice (jádro/běl)	340/360	810/900

3.2.2 Vlhkost dřeva

Vlhkostí dřeva rozumíme množství vody nacházející se ve dřevě. Vlhkost ovlivňuje vlastnosti dřeva. Jsou s ní úzce spojeny rozměrové změny, hustota, fyzikální a mechanické vlastnosti nebo odolnost dřeva proti napadení.

Rozlišujeme vlhkost absolutní a relativní. Poměr hmotnosti vody a hmotnosti absolutně suchého dřeva označujeme jako absolutní vlhkost, uplatňuje se při popisu fyzikálních a mechanických vlastností. Podíl hmotnosti vody a hmotnosti mokrého dřeva označujeme jako vlhkost relativní, kterou používáme, jakmile potřebujeme znát procentuální zastoupení vody v mokrému dřevě.

$$w_{abs} = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

$$w_{rel} = \frac{m_w - m_0}{m_w} \cdot 100 = \frac{m_v}{m_w} \cdot 100 \quad [\%]$$

m_w – hmotnost mokrého dřeva [kg],

m_0 – hmotnost dřeva v absolutně suchém stavu [kg],

m_v – hmotnost vody obsažené v mokrému dřevě [kg].

(Gandelová 2012).

Vodu přítomnou ve dřevě můžeme rozdělit na vodu vázanou a volnou. Voda vázaná je buď chemicky vázaná jako součást chemických sloučenin, kterou nejde sušením odstranit, nebo hygroskopická, vodíkovými můstky vázaná ve stěnách buněk. Volná voda vyplňuje mezibuněčné prostory a lumény buněk. Voda hygroskopická významně ovlivňuje

fyzikální a mechanické vlastnosti. Vyskytuje se při 0 – 30 % vlhkosti. Volná voda se vyskytuje, pokud hygroskopická voda dosáhne meze, bodu nasycení buněčných stěn, tedy od vlhkosti 30 % až po 150 – 200 % dřeva (Gandelová 2012, Požgaj 1993).

3.2.2.1 Stanovení vlhkosti

Pro zjištění vlhkosti dřeva používáme přímé a nepřímé metody. Přímými metodami lze vážením přímo zjistit množství vody ve dřevě, nepřímé metody zjišťují vlhkost dřeva na základě jejího již známého vztahu s jinou veličinou. Výhodou přímých metod je jejich široký rozsah zjišťování vlhkosti pohybující se od nuly až po maximální nasycení vodou a přesnost. Nevýhodou je poměrně dlouhá doba při získávání hodnoty vlhkosti. Nepřímým metodám stačí ke stanovení vlhkosti relativně krátký čas, avšak přesnost měření je po korekci na konkrétní dřevinu zaručena v rozmezí 5 – 26 %.

Mezi metody přímé řadíme gravimetrickou metodu, kde vlhkost stanovíme jako hmotnost vody obsažené ve dřevě. Dále známe destilační metodu, kde určíme hmotnost vody obsažené ve dřevě zjištěním objemového množství vody a jodometrickou titrací, kdy vlhkost určíme na základě spotřebovaného objemu činidla použitého na titraci.

Mezi nepřímé metody zjišťování vlhkosti řadíme hygrometrickou metodu, metody elektrické a zjišťování vlhkosti na základě optických vlastností. Elektrická metoda využívá elektrické vlhkoměry – odporové, kapacitní nebo mikrovlnné – založené na měření elektrického odporu, vodivosti, či kapacity. Hygrometrickou metodou lze stanovit tlak vodních par ve dřevě v předem připraveném otvoru. Vlhkost poté stanovíme pomocí tabulek či diagramu pro stanovení rovnovážné vlhkosti. Princip vlhkoměru pro zjištění vlhkosti na základě optických vlastností spočívá v odrazu či pohlcování infračervené a viditelné oblasti spektra.

(Požgaj1993)

3.2.2.2 Vliv některých faktorů na vlhkost

Vlhkost rostoucího stromu je závislá na ročním období, druhu dřeviny a poloze v kmeni. U jehličnatých dřevin je rozdílná vlhkost u jádra a běli, jádro dosahuje i čtyřikrát menší vlhkosti než běl. U listnatých dřevin je rozložena rovnoměrněji. Největší vlhkosti dosahuje dřevo během zimního období, nejmenší naopak v létě (Horáček 2008).

3.2.3 Pevnost dřeva

Pevnost dřeva lze obecně charakterizovat jako odolnost dřeva proti jeho trvalému porušení. Vzhledem k tomu, že pevnost dřeva nelze teoreticky stanovit pro žádný způsob mechanického namáhání, stanovuje se jako skutečná pevnost dřeva (Gandelová 2012).

3.2.3.1 Pevnost dřeva v ohybu

Dřevo se díky své poměrně vysoké ohybové pevnosti používá na konstrukční prvky, které jsou namáhány na ohyb. Při Stanovování ohybové pevnosti dřeva výpočtem vycházíme ze zjednodušeného vzorce, který předpokládá lineární průběh napětí až do meze pevnosti předem definovaného vzorku. Stanovení skutečného průběhu napětí během ohybu je pro praktické účely příliš komplikované. Maximální napětí v povrchových vrstvách vyjadřuje Navierův vzorec.

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

F – působící síla [N],

l_0 – vzdálenost mezi podpěrami [m],

h – výška [m],

b – šířka nosníku [m],

Vzorec vychází z předpokladu, že máme na dvou podpěrách umístěný nosník, v jehož středu působí síla F. (Gandelová 2012, Požgaj 1993)

Vzhledem k průběhu dřevních vláken můžeme pevnost dřeva v ohybu rozdělit do tří skupin. Jedná se o

- pevnost v ohybu, kdy podélná osa tělesa probíhá rovnoběžně s vlákny a síla působí kolmo na vlákna ať už v radiálním nebo tangenciálním směru;
- pevnost v ohybu, kdy jsou vlákna orientována kolmo k podélné ose tělesa;
- pevnost v ohybu, kdy vlákna probíhají rovnoběžně se zatěžující silou F.

Prakticky se sleduje pevnost v ohybu s průběhem vláken rovnoběžně s osou tělesa, ostatní dvě uvedené možnosti se vzhledem k dimenzi trámů a výrazně nižší pevností neuvažují (Požgaj 1993).

Tělesa se zkoušejí většinou v tangenciálním směru se zatížením působícím kolmo na vlákna. U jehličnanů je pevnost v radiálním a tangenciálním směru rozdílná, při tangenciálním ohybu je o 10 – 12 % větší. U listnatých dřevin je ohybová pevnost v obou směrech prakticky totožná (Gandelová 2012).

Z technického hlediska je pevnost v ohybu významná pro posuzování prken, fošen nebo trámů ve stavebnictví (Dřevařská technická příručka 1970).

3.2.3.2 Faktory ovlivňující pevnost dřeva

Pevnostní a pružnostní vlastnosti se snižují se zvyšující se vlhkostí do meze hygroskopicity. Závislost pevnosti a obsahu vody ve dřevě vázané má nelineární průběh. Změna vlhkosti o 1 % v rámci vody vázané způsobí změnu pevnosti o 3 – 4 %, s výjimkou pevnosti v tahu (Gandelová 2012). Pevnost v ohybu klesne o 4 % za zvýšení vlhkosti o 1 % pod bodem nasycení vláken (Dřevařská technická příručka 1970).

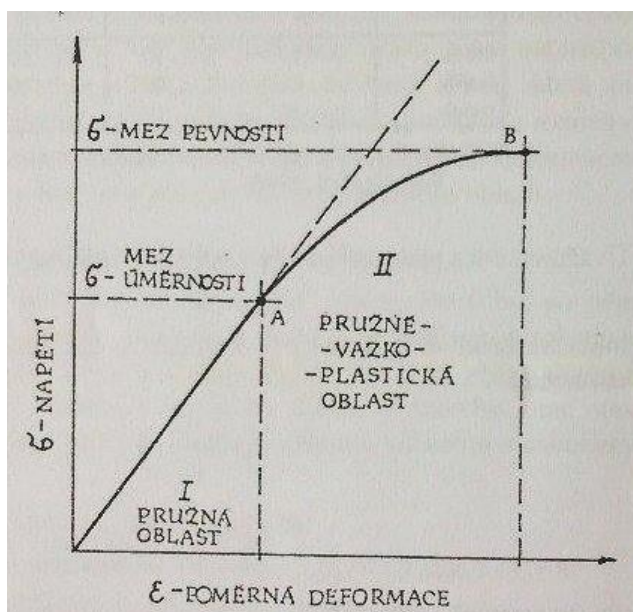
Posouzení vlivu hustoty na pevnost je složitější, protože hustota je mimo jiné závislá na anatomické stavbě. Při posuzování vlivu hustoty na mechanické vlastnosti vylučujeme přepočtem na 12% nebo 0% vlhkost vliv vody ve dřevě. Obecně lze říci, že se zvyšující se hustotou pevnost dřeva roste. Jejich vztah ale nemusí být vždy statisticky významný. Pro přesnější stanovení závislosti mezi hustotou a mechanickými vlastnostmi je potřeba věnovat pozornost makroskopické stavbě letokruhů (Gandelová 2012).

3.2.4 Pružnost dřeva

Pružnost dřeva všeobecně charakterizujeme jako schopnost dosáhnout po uvolnění všech vnějších sil zpět svého tvaru a rozměrů. Pružnost můžeme charakterizovat na základě jednotlivých parametrů pracovního diagramu; modulu pružnosti, Poissonova čísla, mezi úměrnosti a energií pružné deformace (Požgaj 1993).

Modulem pružnosti označujeme vnitřní odpor daného materiálu proti pružné deformaci. Čím je větší napětí k vyvolání pružné deformace, tím větší je pak modul pružnosti. (Gandelová 2012). Při stanovování modulu pružnosti působíme na těleso silami pouze do meze úměrnosti, tedy aby se deformace po uvolnění síly dostaly zpět do výchozí polohy bez porušení struktury dřeva (Požgaj 1993).

Modulem pružnosti vyjadřujeme poměr mezi zatížením a velikostí pružné deformace. Modul pružnosti lze označit jako míru tuhosti. Čím je modul pružnosti vyšší, tím je menší průhyb nosníku a jeho tvarové změny (Dřevařská technická příručka 1970).



Obr. 7 - Obecný tvar pracovního diagramu (Gandelová 2012)

3.2.4.1. Modul pružnosti ve statickém ohybu

Modul pružnosti ve statickém ohybu vzniká působením normálových napětí, která jsou způsobena ohybovým momentem. Zkouší se téměř výhradně v tangenciálním směru kolmo na vlákna.

Výpočet modulu pružnosti v ohybu pro nosník pravoúhlého průřezu zatíženého uprostřed vycházíme z rovnice

$$E_L = \frac{F \cdot l_0^3}{4 \cdot b \cdot h^3 \cdot \Delta y} \quad [MPa]$$

F – působící síla [N],

l_0 – vzdálenost podpěr [mm],

b – šířka zkušební tělesa [mm],

h – výška zkušební tělesa [mm],

Δy – průhyb tělesa [mm].

(Gandelová 2012)

3.2.4.2 Dynamický modul pružnosti

Dřevo má velmi dobré akustické vlastnosti. Zvuk v prostředí se šíří rychlostí, která je ovlivněna materiálem, vlhkostí a teplotou prostředí. Rychlost šíření zvuku ve dřevě lze stanovit ze vzorce (Požgaj 1993).

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad [m \cdot s^{-1}]$$

E – Youngův modul pružnosti [MPa],

ρ – hustota dřeva [$kg \cdot m^{-3}$].

Rychlost šíření zvuku ve dřevě klesá v závislosti na stoupající vlhkosti. Je ovlivněná také druhem dřeviny (Gandelová 2012).

Po úpravě vzorce lze vypočítat z naměřené rychlosti šíření zvuku ve dřevě a jeho hustoty modul pružnosti.

$$E = c^2 \cdot \rho \quad [MPa]$$

Rychlost průchodu zvuku dřevem je využívána při nedestruktivním stanovení modulu pružnosti dřeva. Využívání ultrazvuku ke stanovení modulu pružnosti dřeva je založené na rychlosti šíření elastické deformace v konstrukci (Kloiber 2005).

3.2.4.3 Faktory ovlivňující moduly pružnosti

S moduly pružnosti vykazuje kladnou lineární závislost hustota dřeva. Její vliv je nejvíce patrný u vysušeného dřeva, s vlhkostí nad mezí hygroscopicity již vliv hustoty patrný není (Gandelová 2012). Se zvýšením vlhkosti o 1 % pod bodem nasycení vláken klesne statický modul pružnosti zhruba o 2 % (Dřevařská technická příručka 1970).

3.2.5 Vztah mezi pevností v ohybu a modulem pružnosti ve statickém ohybu

Vzhledem k použití řeziva v dřevěných konstrukcích se k hodnocení kvality dřeva používá právě ohybová metoda. Na normalizovaném zkušebním tělese bez chyb je vztah mezi pevností v ohybu a souvisejícím modulem pružnosti velmi těsný. Vysoká hodnota korelačního koeficientu znamená, že se zvyšující se pevností dřeva v ohybu roste i jeho modul pružnosti.

Prakticky je možné u dřeva určit modul pružnosti dřeva, u jehož stanovení dochází jen k pružným deformacím a na základě lineární závislosti mezi modulem pružnosti a pevností v ohybu stanovit i jeho ohybovou pevnost. Uvedená metoda lze s vysokou korelační závislostí uplatnit i na náhodně vybraná tělesa s velkým rozměrem a chybami. (Požgaj 1993)

3.2.6 Rázová houževnatost

Rázovou houževnatostí je nazývána schopnost dřeva vstřebat energii vykonanou při rázovém zatížení. Rázová houževnatost je vyjádřena velikostí energie v J spotřebované k přeražení dřeva za daných podmínek, vztaženou k rozměrům průřezu tělesa v místě přeražení.

Rázovou houževnatost zjišťujeme pomocí přerážecích kladiv, například pomocí Charpyho kladiva. To pracuje na principu rozdílu polohových energií před přerážením tělesa (bez překážky) a po přeražení zkušebního tělesa. Polohová energie je spotřebována ve formě vynaložené práce na porušení tělesa.

Při stanovení rázové houževnatosti pomocí Charpyho kladiva vycházíme ze vztahu

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} \quad [J \times cm^{-2}]$$

A_w – rázová houževnatost (přerážecí práce),

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J],

b, h – rozměry tělesa v radiálním a tangenciálním směru [cm].

(Požgaj 1993)

Při zjišťování rázové houževnatosti používáme tělesa většinou čtvercového průřezu. Rázová houževnatost je především závislá na rozměrech tělesa a vzdálenosti podpěr. Požgaj uvádí poměr vzdálenosti podpěr k výšce tělesa v poměru $\frac{l_0}{h} \geq 12$, pro lepší pohlcení energie při zkoušce. Na velikosti výsledné rázové houževnatosti se mimo jiné podílejí sklon dřevních vláken, vlhkost nebo teplota. Rázová houževnatost se stanovuje v tangenciálním směru kolmo na vlákna. U listnáčů a kruhovitě pórovitých dřevin lze tuto vlastnost měřit i v radiálním směru, kde je o 20 – 50 % větší (Gandelová 2012, Požgaj 1993).

Zjištění rázové houževnatosti přerážecí zkouškou je významné při namáhání dřeva náhlými těžkými břemeny, jako je tomu u sportovního a tělocvičného náradí (Dřevařská technická příručka 1970).

3.2.6.1 Faktory ovlivňující rázovou houževnatost

Vystavování dřeva teplotám nad 200 °C má velký vliv na rázovou houževnatost. Při těchto teplotách dochází k pyrolýze dřeva a dřevo se stává křehkým. U listnáčů se rázová houževnatost snižuje výrazněji kvůli vyššímu obsahu pentózanů (Požgaj 1993).

3.3 Termická úprava dřeva

Je známo už po staletí, že opalováním dřeva v ohni se zvyšuje jeho odolnost při jeho venkovním použití.

Především v západní Evropě se používá už několik let. Nejintenzivněji a nejkompexněji byla termická modifikace dřeva prozkoumána ve Finsku. Termicky upravené dřevo je charakteristické zvýšenou trvanlivostí, čímž se stává vhodným pro exteriérové expozice bez kontaktu s terénem. (ThermoWood Handbook 2003).

Při termické úpravě působíme na dřevo vysokými teplotami. Ty mají za následek zlepšení vlastností ošetřovaného dřeva, především odolnost proti vodě a biologickým škůdcům. Jiné vlastnosti jako ohybová pevnost se naopak zhoršují. Vlivem zvýšené teploty dochází ke změnám ve struktuře dřeva. Výrazněji k nim dochází při teplotách 180 – 280 °C působících po dobu 15 minut až 24 hodin. Změny ve struktuře dřeva se projevují v jeho vlastnostech. Tyto změny jsou ovlivněny podmínkami prostředí při termické úpravě, druhem dřeviny a počáteční vlhkostí dřeva (Reinprecht 2008a).

Dřevo po termické úpravě má tmavší barvu. Výhodou termické úpravy oproti jiným modifikacím dřeva je, že není potřeba používat dalších látek, které by mohly mít dopad na ekologickou kvalitu konečného výrobku a na prostředí (Kačíková 2011).

Vlivem termických úprav ve dřevě dochází k chemickým, fyzikálním a mechanickým změnám (Reinprecht 2008b).

3.3.1 Výroba a klasifikace termicky modifikovaného dřeva

Známe několik technologií pro výrobu termicky upraveného dřeva. Mezi nejpoužívanější patří

- ThermoWood – příprava v atmosféře vzduchu;
- PlatoWood – příprava v prostředí vodní páry;
- OHT-Wood – příprava v olejích;
- RetificatedWood – příprava v prostředí inertních plynů.

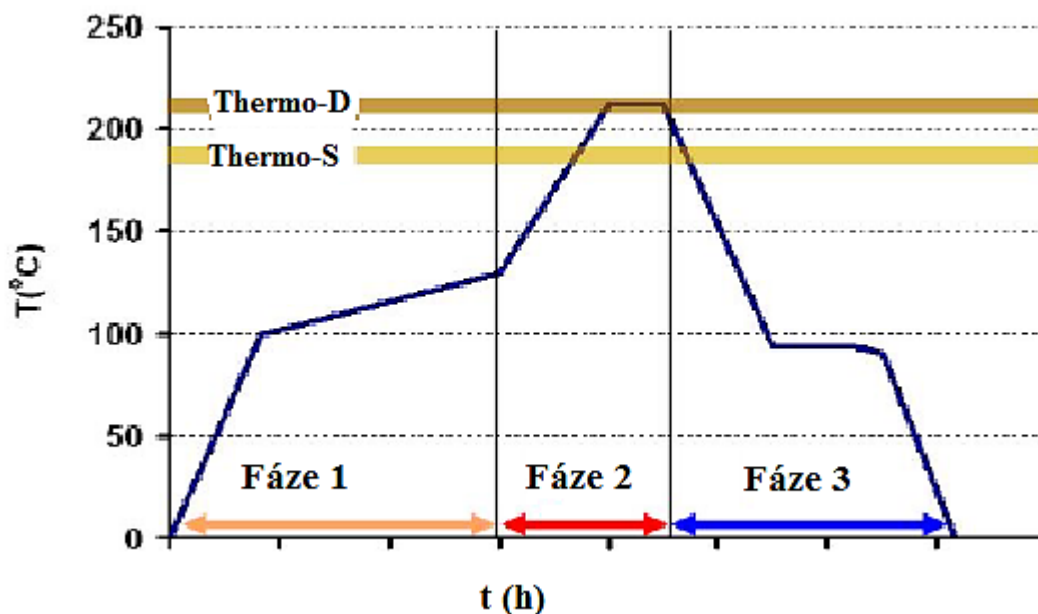
3.3.1.1. *ThermoWood*

Na výrobu ThermoWoodu se používají jehličnaté i listnaté dřeviny. Jeho výrobu dělíme do tří částí.

- Zvýšení teploty a sušení – v této fázi dochází za působení vodní páry k rychlému nárůstu teploty v sušárně na 100 °C a poté zvolna stoupá k 130 °C; sušení probíhá horkým vzduchem nebo horkou párou přibližně na nulovou vlhkost.

- Tepelná úprava – v této etapě působí po dobu 2 až 3 hodin teplota 185 – 230 °C; doba a teplota se odvíjejí dle požadavků na další použití (Thermo-S, Thermo-D).
- Chlazení a úprava vlhkosti – v poslední fázi dochází k postupnému ochlazení až k 80 – 90 °C kdy se upraví vlhkost na 4 – 7 %.

(Reinprecht 2008b; ThermoWood Handbook 2003)



Obr. 8 - Diagram výrobního procesu ThermoWood (ThermoWood Handbook 2003)

Nejčastěji se pro výrobu ThermoWoodu používají smrk a borovice. Borovice má nevýhodu ve vytékání pryskyřice a uvolňování suků. U smrku může zase dojít k roztržení suků. Pro použití v saunách se upravuje bříza (Reinprecht 2008b).

ThermoWood se vyrábí ve dvou standartních třídách úpravy – ThermoWood-S a ThermoWood-D. Pro použití v interiéru je vhodný ThermoWood-S. Označení „S“ je od slova „stability“, protože stabilita a vzhled materiálu jsou klíčovými vlastnostmi této třídy. Používá se mimo jiné na parkety, kuchyňský nábytek, nebo obklady. Písmeno „D“ v názvu ThermoWood-D je odvozeno od „duralibility“, tedy od trvanlivosti. Spolu se vzhledem materiálu, biologickou trvanlivostí a odolností tvoří požadované vlastnosti na upravovaný materiál této třídy, který je vhodný pro použití v exteriéru. Používá se na okna, dveře, ploty, protihlukové stěny nebo dětská hřiště (ThermoWood Handbook 2003, Kačíková 2011).

3.3.1.2. PlatoWood

Tato výrobní technologie používající čerstvé dřevo je rozdělena do čtyř částí. Proces výroby probíhá při nižších teplotách v prostředí vodní páry. Provádí se za normálního i zvýšeného tlaku. Celková doba úpravy závisí na druhu dřeviny, tloušťce materiálu a jeho celkových rozměrech (Kačíková 2011, Reinprecht 2008b).

- Hydrotermolýza – do první fáze vstupuje čerstvé, nebo vzduchosuché dřevo, které se dále upravuje při zvýšeném tlaku a teplotě 150 – 190 °C ve vlhkém prostředí;
- Sušení – dřevo se suší 3 – 5 dní na vlhkost 8 – 10 %.
- Vytvrzování – v této fázi probíhá stabilizace dřeva při teplotách 150 – 190 °C po dobu 12 – 16 hodin za omezeného přístupu vzduchu a bez vlhkosti; vlhkost dřeva dosahuje méně než 1 %.
- Kondicionování – v poslední etapě dochází k opětovnému zvlhčování dřeva na vlhkost 4 – 6 %.

K výrobě PlatoWood se nejčastěji používá smrk, ale i douglaska, borovice, bříza nebo topol. Využívá se pro zahradní nábytek (Reinprecht 2008a, Kačíková 2011).

3.3.1.3 OHT-Wood

Proces OHT výroby spočívá v použití rostlinných olejů, které mají vysokou teplotu pohybující se okolo 200 – 220 °C. Díky oleji dochází k dobrému ohřevu a zároveň zamezuje přístup kyslíku, ale vzrůstá kvůli němu hmotnost dřeva až o 50 – 70 %. Nejpoužívanější je lněný olej, jehož nevýhodou je nepříjemný zápach, ale zaručuje rovnoměrný a rychlý přenos tepla. Celkový čas výroby zabere zhruba 18 hodin pro sloup o délce 4 m a průměru 0,1 m (Kačíková 2011, Reinprecht 2008b).

3.3.1.4 RetificatedWood

Při výrobě retifikovaného dřeva se pracuje v atmosféře dusíku maximálně s 2% koncentrací kyslíku při teplotách 200 – 240 °C. Dřevo vstupující do procesu výroby je předsušené na 12% vlhkost. Po úpravě zůstává více méně zachována pevnost dřeva (Reinprecht 2008a, Kačíková 2011).

3.3.2 Fyzikální změny tepelně modifikovaného dřeva

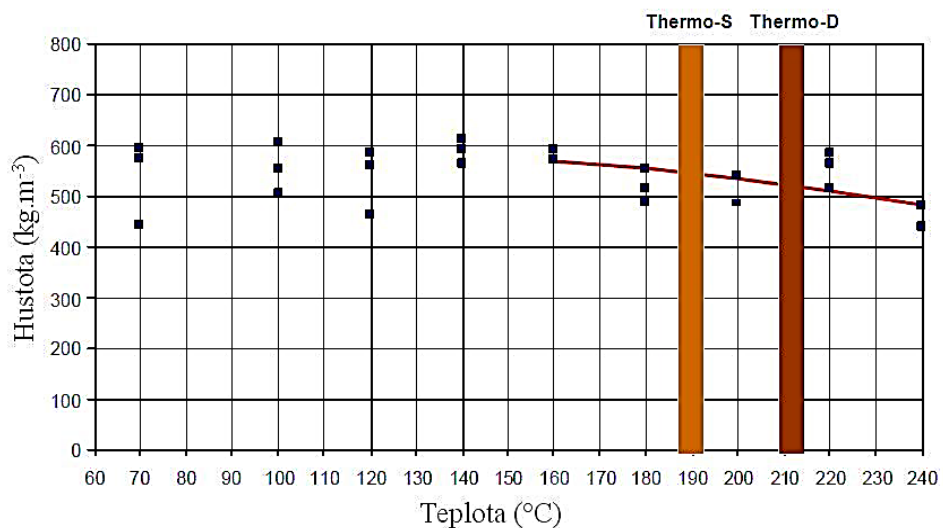
3.3.2.1 Hustota

Během termické úpravy dřeva dochází k úbytku hmotnosti. Jedná se o jednu z nejdůležitějších charakteristik a můžeme podle ní vyjadřovat kvalitu. Je ovšem problematické porovnávat výsledky jednotlivých experimentů, protože probíhaly při různých podmínkách úpravy (Kačíková 2011).

Při posuzování vlivu termické úpravy na chemické složení a mechanické vlastnosti osiky a břízy bylo zjištěno, že k významnému úbytku hmotnosti dochází při teplotách, kdy pozorujeme změny v mechanických vlastnostech (Kocaeffe 2008).

Při termické úpravě dochází k odbourávání složek dřeva, hlavně hemicelulóz. Dochází při tom ke zmenšování objemu a úbytku hmotnosti, což má za následek mírný pokles hustoty (Reinprecht 2008b).

Z grafu (Obr. 8) je patrné, že se vzrůstající teplotou úpravy klesá hustota. Zároveň hustota kolísá vlivem přirozeného kolísání hustoty v rámci stromu (ThermoWood Handbook 2003).



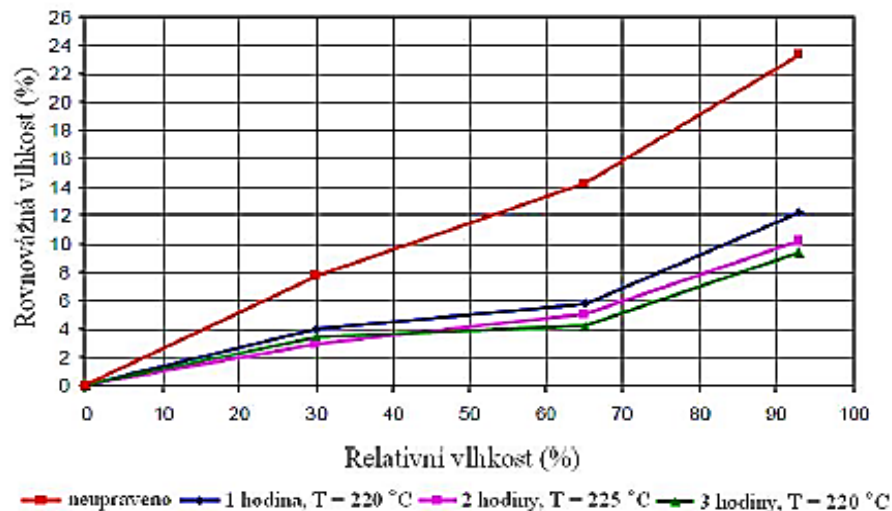
Obr. 9 - Vliv teploty termické úpravy na hustotu borovice (ThermoWood Handbook 2003)

3.3.2.2 Rovnovážná vlhkost

Mezi hlavní důsledky termické úpravy dřeva patří snížení rovnovážné vlhkosti dřeva. Tato vlastnost dále ovlivňuje rozměrovou stabilitu dřeva a jeho odolnost vůči biologickým škůdcům. Výraznější pokles rovnovážné vlhkosti nastává při působení vyšších teplot a delším čase úpravy (Reinprecht 2008b). Při teplotě 220 °C je rovnovážná vlhkost

o polovinu nižší než u neupraveného dřeva. Rozdíl v hodnotách vlhkostí dřeva je vyšší, pokud je vyšší i relativní vlhkost vzduchu (Kačíková 2011).

Pokles rovnovážné vlhkosti vzniká vlivem odbourávání hemicelulóz (ThermoWood Handbook 2003). Hydroxylové –OH funkční skupiny obsažené v hemicelulózách se vlivem svého hydrofilního charakteru podílejí na hygroskopicitě dřeva. Degradaci hemicelulóz dochází k poklesu hygroskopicity (Kocafe 2008).



Obr. 10 - Vliv Relativní vlhkosti vzduchu na rovnovážnou vlhkost dřeva smrku (ThermoWood Handbook 2003)

3.3.2.3 Rozměrová stabilita

Vlivem poklesu rovnovážné vlhkosti během termické úpravy dochází ke zlepšení rozměrové stability dřeva. Své rozměry při změně relativní vlhkosti vzduchu mění oproti neupravenému dřevu méně. Tento jev lze zdůvodnit nejen částečným odbouráním hemicelulóz, ale i tvorbou vazeb mezi ligninem a hemicelulózou, což má za následek zvýšení odolnosti buněčných stěn proti vstupu molekul vody.

Rozměrově stabilnějším můžeme označit dřevo upravené již při 110 °C. Například dřevo typu ThermoWood dosahuje 50 – 90 % hodnot bobtnání a sesychání neupraveného dřeva. Proto se různé druhy termicky upravovaných dřev využívají tam, kde se vyžaduje snížené pracování dřeva vlivem působení vlhkosti.

(Kačíková 2011, Reinprecht 2008, ThermoWood Handbook 2003)

3.3.2.4 Barva a vůně

Barva termicky upraveného dřeva je ovlivněna podmínkami ohřevu, teplotou a časem úpravy. Čím je vyšší teplota, tím je upravené dřevo tmavší. Barva je často podobná tropickým druhům dřeva. Při dlouhodobém vystavení povětrnostním podmínkám bylo zjištěno, že barevný odstín termicky upraveného dřeva není stálý, časem bledne.

Termicky upravené dřevo má charakteristickou vůni přirovnatelnou ke karamelu. Je tomu tak v důsledku uvolnění prchavých organických látek po rozkladu hemicelulóz. Při vyšším podílu těchto prchavých látek může být kvůli zápachu použití termicky upraveného dřeva problematické při použití v interiérech.

(ThermoWood Handbook 2003, Reinprecht 2008b).



Obr. 11 - Barva tepelně upraveného dřeva borovice (ThthermoWood Handbook 2003)

3.3.2.5 Tepelně izolační vlastnosti

Termickou úpravou se tepelná vodivost dřeva snižuje o 10 – 30 %. Díky tomu je nachází termicky upravené dřevo použití pro okna, exteriérové dveře a obklady nebo sauny (Reinprecht 2008b).

3.3.2.6 Akustické vlastnosti

Termickou úpravou získává dřevo zajímavé akustické vlastnosti. Při mírnějších teplotních podmínkách lze připravit speciální termodřevo pro hudební nástroje. Akustické vlastnosti

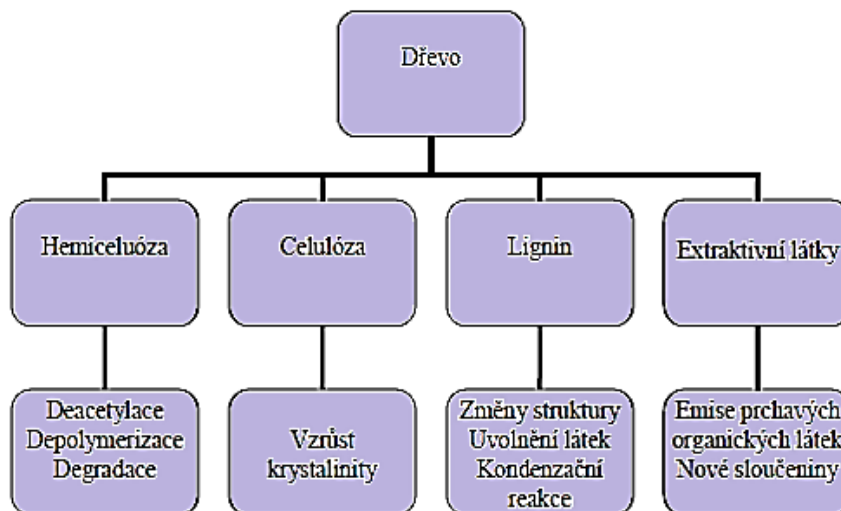
termicky upraveného dřeva jsou často podobné dřevu vzácných historických hudebních nástrojů. Této podobnosti se využívá při jejich restaurování. Důležitou roli pro použití termodřeva na hudební nástroje zastává i dobrá rozměrová stabilita (Reinprecht 2008b).

3.3.3 Chemické změny tepelně modifikovaného dřeva

Hlavní složky dřeva, jako celulózy, hemicelulózy a lignin, vlivem teploty různě degradují. K degradaci celulózy a ligninu dochází pomaleji než k degradaci hemicelulózy. Extraktiva obsažená ve dřevě degradují snadněji, vypařují se ze dřeva už v průběhu tepelné úpravy (ThermoWood Handbook 2003).

Na dřevo vystavené teplotám 20 – 150 °C působí proces sušení, kdy dřevo ztrácí vodu volnou i vázanou. Při vystavení dřeva teplotám v rozsahu 180 – 250 °C používaných při termické úpravě dochází k chemickým změnám ve dřevě. Při teplotách nad 250 °C dochází již k zuhelnatění dřeva (Kačíková 2011).

Mezi faktory ovlivňující průběh chemických reakcí ve složkách dřeva při termické úpravě patří druh dřeva, tlak prostředí, intenzita přiváděného tepla, přístup kyslíku ke dřevu nebo počáteční vlhkost dřeva (Reinprecht 2008b).



Obr. 12 - Chemické změny hlavních složek dřeva při termické úpravě (Kačíková 2011)

3.3.3.1 Změny celulózy

Celulóza je nejrozšířenější polysacharid. Má stavební funkci, tvoří kostru zdřevnatělých buněčných stěn dřevních elementů. Obsah celulózy ve dřevě se pohybuje v rozmezí 35 – 56 %. Vyšší zastoupení najdeme u jehličnanů s 46 -56% zastoupením celulózy, u listnáčů se jedná o 41 – 48% zastoupení (Gandelová 2012).

Při záměrné termické degradaci dochází k dehydratačním a depolymeračním reakcím, které vedou ke snížení stupně polymerace celulózy. Oproti hemicelulózám je celulóza při termickém působení na dřevo odolnější díky své krystalické struktuře. K depolymeraci krystalické celulózy dochází až při teplotách nad 300 °C za vzniku levoglukózanu. Depolymerační procesy probíhající v řetězcích amorfni celulózy mají vliv na pokles například na tahovou a ohybovou pevnost (Reinprecht 2008, Kačíková 2011).

Při ohřevu dřeva se mění poměr mezi podílem krystalické a amorfni celulózy. Během krátkého ohřevu do oblasti 200 °C dochází k navýšení krystalického podílu, při prodloužení času ohřevu dochází opět k jejímu poklesu. Krystalický podíl významně roste s množstvím molekul vody. Vzrůst krystalinity celulózy je podmíněn snazším odbouráváním amorfniho podílu, čímž dojde k zhoršení přístupu molekul vody a tím dojde k poklesu rovnovážné vlhkosti dřeva (Reinprecht 2008, Kačíková 2011).

V závislosti na změnách podílu krystalické celulózy dochází ke změnám modulu pružnosti (Kocaefe 2005).

3.3.3.2 Změny hemicelulózy

Polysacharidy doprovázející celulózu v buněčných stěnách anatomických dřevních elementů se souhrnně označují jako hemicelulózy. Stmelují celulózové řetězce a váže se na ně lignin. Od celulózy je odlišuje složení, nižší stupeň polymerace a nízký podíl krystalické části. Chemicky jsou oproti celulóze méně stálé. Obsah hemicelulóz ve dřevě se pohybuje mezi 15 – 35 %, kdy jejich zastoupení je vyšší u dřeva listnáčů než u dřeva jehličnanů (Gandelová 2012).

Z hlavních složek dřeva podléhají nejrychleji termickému působení hemicelulózy. K jejich degradaci dochází už při teplotách pod 200 °C. Vznikající kyselina octová při deacetylaci působí jako katalyzátor a urychluje rozklad polysacharidů. Množství sacharidů během termické úpravy klesá v závislosti na druhu dřeviny, čase a teplotě během úpravy (Kačíková 2011).

Hemicelulózy se odbourávají snadněji než celulóza. Z hemicelulóz se nejsnadněji degradují xylany. Při vyšších teplotách kolem 230 °C množství manózy a xylózy klesá, zatímco arabinóza a galaktóza se úplně rozkládají. Po rozkladu hemicelulózy během termické úpravy není ve dřevě dostatek výživných látek pro růst hub způsobujících hnilobu (Reinprecht 2008b, Kačíková 2011).

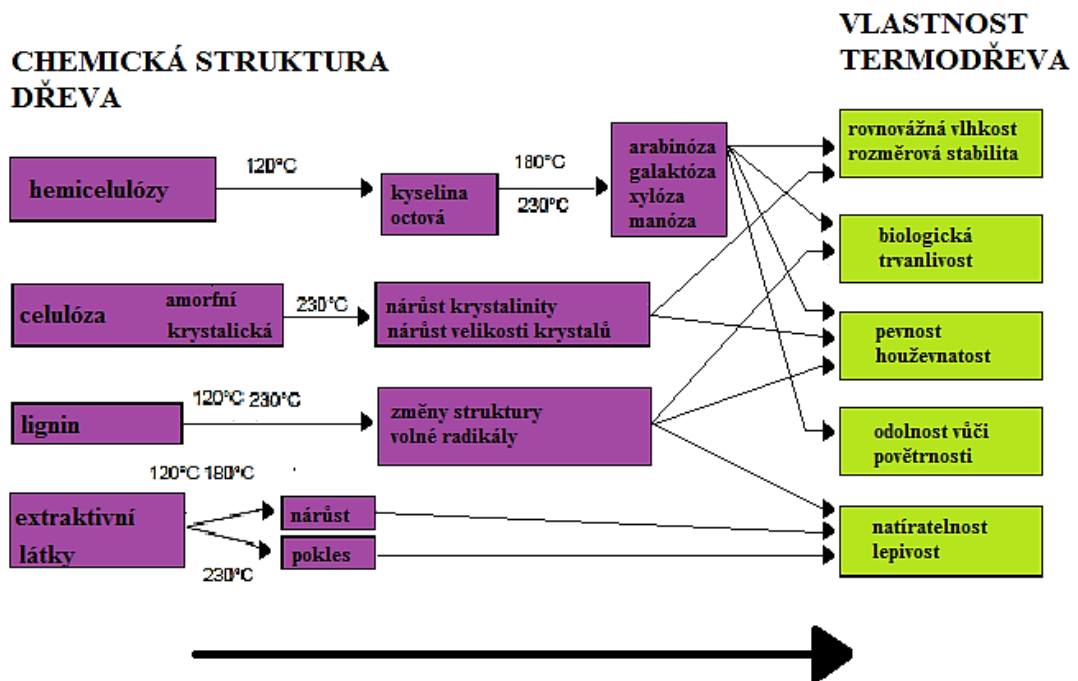
3.3.3.3 Změny ligninu

Lignin dodává dřevu pevnost. Jeho množství ve dřevě se pohybuje mezi 15 – 35 %, více je zastoupen ve dřevě jehličnanů, než ve dřevě listnáčů (Gandelová 2012).

Lignin je ze všech složek z chemického hlediska při termické úpravě nejstabilnější. Je to díky kovalentním vazbám, které dobře odolávají termolýze a termooxidaci. Chemické reakce v ligninu probíhají až při vyšších teplotách. Částečný rozpad ligninu je patrný už při teplotě pod 300 °C, výrazněji probíhá až při teplotách nad 300 – 400 °C za intenzivního rozpadu propanových jednotek a aromatických jader (Reinprecht 2008b).

3.3.3.4 Změny extraktiv

Dřevo obsahuje méně než 5 % extraktiv. Jedná se o látky různé chemické povahy, ovlivňující mimo jiné mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva, jeho barvu a vůni nebo opracování. Řadíme sem terpeny, vosky, tuky a fenoly. Extraktiva nepatří mezi konstrukční prvky a většina těchto sloučenin se v průběhu tepelné úpravy vypařuje (Gandelová 2012, ThermoWood Handbook 2003).



Obr. 13 - Změny v chemické struktuře dřeva při teplotách 120 - 230 °C a jejich vliv na vlastnosti termodřeva (Reinprecht 2008b)

3.3.4 Anatomické změny tepelně modifikovaného dřeva

Působením zvýšených teplot při termické úpravě dochází ke změnám v anatomické struktuře dřeva. Dochází k sesychání buněčných stěn anatomických elementů a následnému vzniku trhlin. Jehličnaté dřeviny jsou náchylnější ke vzniku trhlin

v tangenciálním směru. Náchylnější jsou také dřeviny s náhlým přechodem mezi jarním a letním dřevem a dřeviny s úzkými letokruhy (Kačíková 2011).

3.3.5 Mechanické vlastnosti tepelně modifikovaného dřeva

Termická úprava dřeva má obecně negativní dopad na jeho mechanické vlastnosti. Zvláště se termicky upravené dřevo nedoporučuje pro použití na nosné konstrukce. Změna mechanických vlastností při termické úpravě je závislá na druhu dřeviny a podmínkách úpravy. Některé vlastnosti jako pevnost, tvrdost nebo rázová houževnatost se zhoršují, jiné jako modul pružnosti se mohou v závislosti na stupni tepelné úpravy i zlepšit. (Kačíková 2011).

3.3.5.1 Rázová houževnatost a pevnost

Při termické úpravě dochází k narušení stavebních polymerů. Se stupněm jejich narušení klesá houževnatost a pevnost dřeva (Reinprecht 2008b). Pevnost dřeva je závislá na jeho hustotě. Termicky upravené dřevo má nižší hustotu, tudíž i pevnost termicky upraveného je v některých případech nižší. Pevnost dřeva je také ovlivněna obsahem vlhkosti ve dřevě, kdy je termicky upravené dřevo zvýhodněno díky své nižší rovnovážné vlhkosti (ThermoWood Handbook 2003).

Při ohřívání mokrého dřeva dochází k plastifikaci ligninu, který se ale po usušení vrací do původního stavu. Tohoto jevu se využívá při výrobě ohýbaného nábytku. Obecně lze říci, že houževnatost a pevnost dřeva se snižuje v závislosti na použité dřevině a zvoleným výrobním procesem.

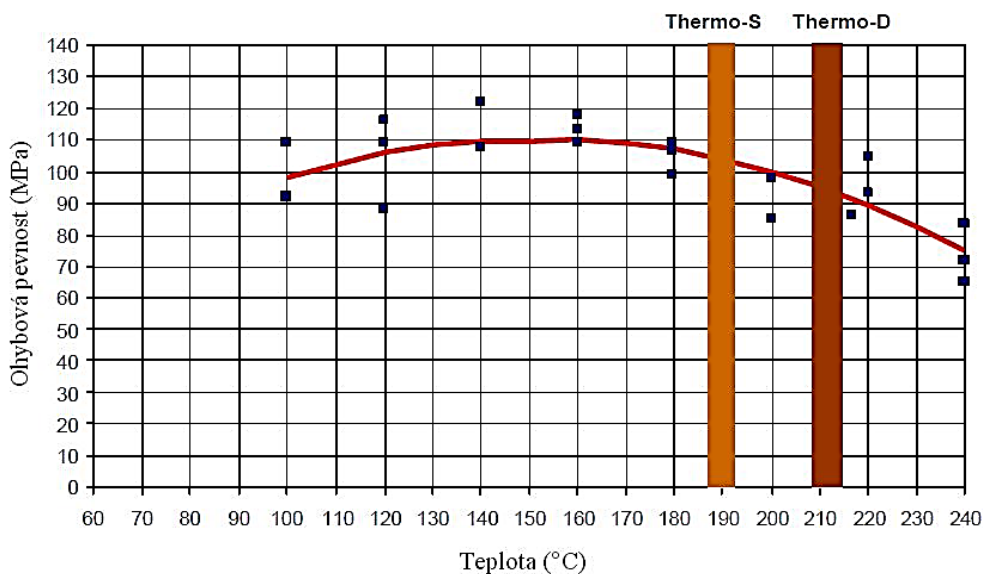
Pokles pevnosti a houževnatosti o 30 – 50 % je pro většinu dřevařských výrobků neakceptovatelné. Proto je nutné při termické úpravě dlouhodobě nepřekračovat teplotu 220 °C a omezovat přísun vzduchu. Pokud se dřevo teplotě 220 °C vystavuje dlouhodoběji, pak je nutné ohřev provádět bez přístupu kyslíku (Reinprecht 2008b).

3.3.5.2 Ohybová pevnost dřeva

Změna ohybové pevnosti záleží na druhu dřeviny a způsobu úpravy. Ohybová pevnost klesá o 20 % zhruba za tři dny při teplotě úpravy 155 °C, při teplotě 135 °C asi za dva týdny a při teplotě 115 °C zhruba za 15 týdnů. Při mírnějších teplotách ohřevu borovice v rozmezí 100 – 180 °C dochází k mírnému nárůstu ohybové pevnosti, která klesá o 30 % až při vystavení teplotě 240 °C. Pokles ohybové pevnosti u termicky upravených dřev se pohybuje v rozsahu 5 – 30 % (Reinprecht 2008b). Výrazný pokles ohybové pevnosti

nastává při termické úpravě při teplotě přesahující 220 °C (ThermoWood Handbook 2003).

Bylo dokázáno, že při vystavení nižším teplotám dochází k mírnému nárůstu ohybové pevnosti, která prudce klesne po zvýšení teploty úpravy a při delším času termické úpravy. Pokles nebo nárůst ohybové pevnosti záleží na podmínkách úpravy. Je dokázáno, že při úpravě dřev v atmosféře vzduchu dochází oproti jeho úpravě v inertním prostředí dusíku k jeho zhoršení. Úpravou v atmosféře vzduchu je dřevo křehčí. Pokles ohybové pevnosti je způsobený tvorbou kyseliny uhličité během procesu termické úpravy, která podporuje hydrolyzu karbonátových polymerů (Kocaefe 2008).



Obr. 14 - Vliv teploty při termické úpravě na ohybovou pevnost dřeva borovice (ThermoWood Handbook 2003)

3.3.5.3 Pevnost tahová, tlaková, smyková

Pevnost v tahu při termické úpravě klesá obdobně jako ohybová pevnost dřeva. Pevnost v tlaku podél vláken se téměř nemění, dokonce můžeme sledovat i její nárůst. Rozdíl je patrný v křehkosti termicky upraveného dřeva. Při sledování deformací v průběhu tlakového zatěžování se oproti dřevu sušenému v sušárně rozpadá na více kusů při maximálním zatížení. Smyková pevnost v radiálním i tangenciálním směru klesá v závislosti na druhu dřeviny a způsobu termické úpravy (Reinprecht 2008b).

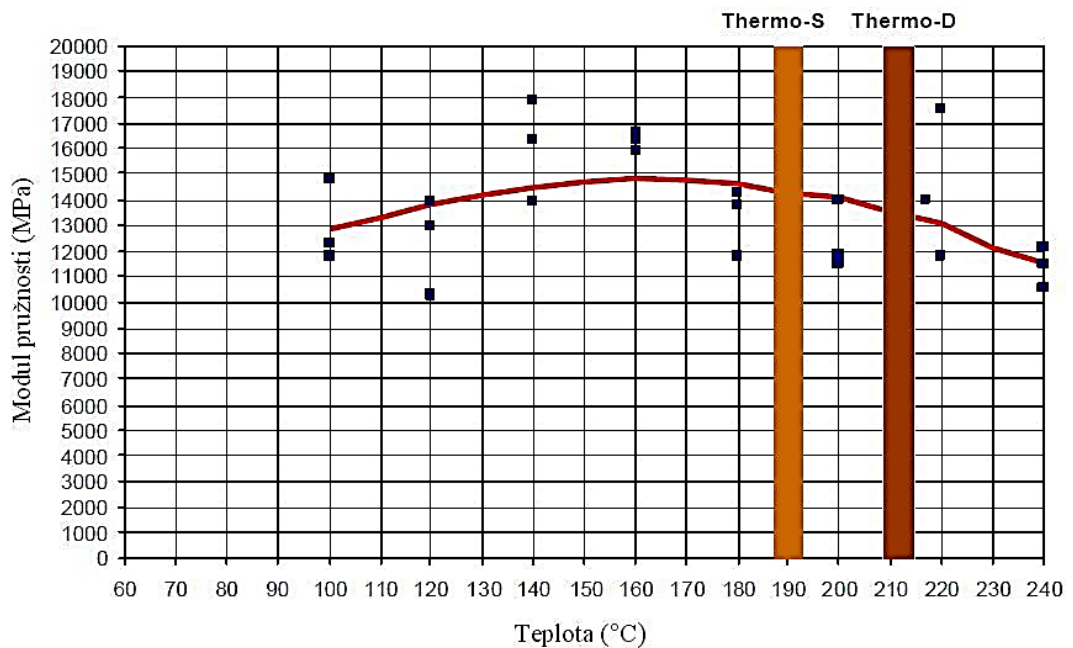
3.3.5.4 Tvrdost dřeva

Termická úprava s teplotou ohřevu dřeva v rozsahu 100 – 240 °C tvrdost neovlivňuje, dokonce ji může i o něco zvýšit. V praxi je toto zlepšení zanedbatelné (Reinprecht 2008b).

Na nárůst tvrdosti při teplotách pod 200 °C má vliv nárůst krystalického podílu celulózy během degradace amorfních částí hemicelulóz (Kocaefe 2008).

3.3.5.5 Modul pružnosti

Při teplotách do 165 °C a při kratší době ohřevu se modul pružnosti zvyšuje. Při zvýšení teploty nad 160 – 190 °C dochází už i za kratší dobu ohřevu ke snižování modulu pružnosti, ale oproti pevnosti klesá pomaleji (Reinprecht 2008b). Při porovnání poklesu modulů pružnosti u osiky a břízy je u břízy patrný pokles, zatímco u osiky modul pružnosti vzrůstá i při vyšších teplotách. Bříza má oproti osice nižší obsah celulóz a vyšší obsah hemicelulóz. Kvůli vyššímu obsahu hemicelulóz má termická úprava na břízu větší dopad než na osiku (Kocaefe 2008).



Obr. 15 - Vliv teploty termické úpravy na modulu pružnosti dřeva borovice (ThermoWood Handbook 2003)

3.3.6. Trvanlivost tepelně upraveného dřeva

3.3.6.1 Biologická odolnost

Podstatou zlepšení biologické odolnosti termicky upraveného dřeva jsou změny v chemické struktuře. Podstatné zlepšení je zaznamenáno při teplotách 150 – 230 °C. Jedná se například o změny, kdy klesá množství –OH funkčních skupin, zvyšování hydrofobnosti dřeva, snížení sorpční schopnosti dřeva a následnou nižší vlhkostí pro škůdce. Také se vytvářejí z extraktivních látek a termicky degradovaných složek dřeva látky s biocidním účinkem.

Termicky upravené dřevo lépe odolává houbám nebo hmyzu. Úpravou méně trvanlivých nebo netrvanlivých dřevin dostaneme dřeviny středně až velmi trvanlivé. Lze říci, že termicky upravené dřevo má vyšší odolnost vůči celulózo- a ligninovým houbám. Ne zcela jednoznačné je zlepšení vůči plísním a dřevozbarvujícím houbám.

Dřevokazný hmyz neprojevuje zájem klást do termicky upraveného dřeva vajíčka kvůli absenci terpenoidů.

(Reinprecht 2008b)

3.3.6.2 Povětrnostní odolnost

Odolnost termicky upraveného dřeva vůči povětrnostním vlivům, jako sluneční záření, působení vody nebo emisí, se odvíjí od podmínek jejich výroby. Barva termicky upraveného dřeva při vystavení povětrnostním podmínkám bledne a mění se na šedou. Při jeho použití v exteriéru se doporučuje ošetření olejem nebo barvou s pigmentem. Na povrchu termicky upraveného dřeva se trhliny vyskytují méně než u dřeva neupraveného. Je to dáno nižší rovnovážnou vlhkostí (Reinprecht 2008b).

3.3.6.3 Protipožární odolnost

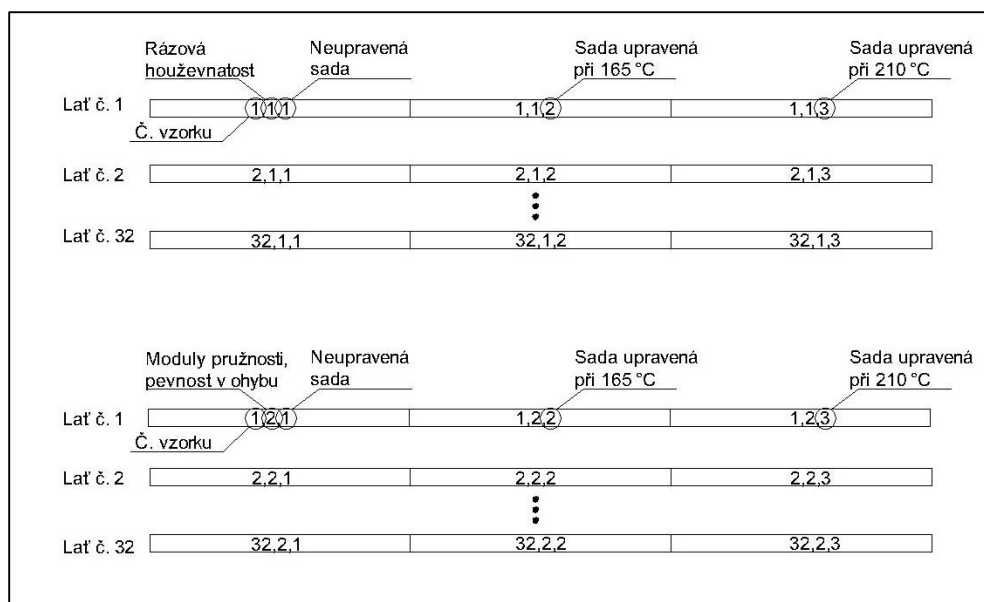
Při porovnání termicky upraveného a neupraveného dřeva z hlediska požární odolnosti nepozorujeme výrazné změny. Rozdílem je menší tvorba dýmu při hoření u termicky modifikovaného dřeva. Při výrobě OHT procesem je odolnost vůči šíření plamene dokonce menší. Likvidování termicky upravených dřev lze provést běžným způsobem používaným pro likvidaci odpadů (Reinprecht 2008b).

4 Metodika

4.1 Výběr a příprava vzorků

Příprava vzorků podléhala normě ČSN 49 0101. Tělesa byla zhotovena ve třech sadách tak, že z jedné latě byly vždy zhotoveny vzorky do každé ze tří sad. První sada byla neupravená, druhá sada byla termicky upravená při teplotě 165 °C a třetí sada byla termicky upravena při teplotě 210 °C.

Vzorky byly dále rozděleny do dvou skupin v každé sadě podle mechanických zkoušek na nich vykonávaných. Polovina zkušebních vzorků z každé sady byla použita k určení rázové houževnatosti, na druhé části vzorků v každé sadě byl nejdříve změřen dynamický modul pružnosti a poté se na nich určovala pevnost v ohybu a zároveň statický modul pružnosti na trhacím stroji.



Obr. 16 - Příprava vzorků

4.2 Tepelné ošetření

Pro tepelné ošetření vzorků byla použita termokomora vyrobená firmou KATRES, umístěná v areálu výzkumného střediska na Trubech. Vzorky pro termickou úpravu byly předem vysušeny a poté umístěny do termokomory. Průběh termické úpravy a parametry nastavené v termokomore jsou uvedeny v obrázcích v příloze (Příloha 1, Příloha 2).

Po tepelném ošetření byly vzorky naklimatizovány v klimatizační komoře při 65% vlhkosti a 20 °C.



Obr. 17 - Uložení vzorků v termokomoře



Obr. 18 - Klimatizování vzorků po termické úpravě

4.3 Fyzikální a mechanické zkoušky

Vzhledem k nedostupnosti klimatizační skříně v době zkoušek vykonávaných na neupravené sadě vzorků, nebyly neupravené vzorky naklimatizovány na 12 % vlhkosti. Proto jsou výsledné hodnoty na 12 % vlhkosti přepočteny. Sady termicky upravených vzorků byly vystaveny zkouškám po jejich klimatizaci při 20 °C a 65% relativní vlhkosti vzduchu.

4.3.1 Podmínky při zkouškách

Zkoušky byly vykonány v prostoru zkušebny Fakulty lesnické a dřevařské České zemědělské univerzity v Praze. Provedené zkoušky byly vykonány v laboratorních podmínkách.

4.3.2 Stanovení rázové houževnatosti

Při zkoušce rázové houževnatosti (stanovení přerážecí práce) byla použita norma ČSN 49 0117. Pro vykonání zkoušky bylo použito 32 vzorků z neupraveného dřeva, 32 vzorků tepelně modifikovaných při 165 °C a 32 vzorků tepelně modifikovaných při 210 °C. Zkušební tělesa o průřezu 20×20 mm a délce 300 mm byla nejdříve v jejich středu posuvným měřítkem změřena a na laboratorních vahách s přesností 0,01 g zvážena. Poté bylo zkušební těleso umístěno na podpěry, jejichž středová vzdálenost je 240 mm tak, aby bylo přeraženo na radiální ploše. Následně byla vykonána zkouška na Charpyho kladivě. Práce absorbovaná tělesem při přeražení byla měřena s přesností na 1 J.

Rázová houževnatost byla měřena při vlhkosti, která byla v laboratoři. Vlhkost těles v době zkoušky se zjišťovala na vzorcích o rozměrech 20×20×30 mm odříznutých z již přeražených těles. Po jejím stanovení se rázová houževnatost při zjištěné vlhkosti přepočítala na rázovou houževnatost při 12% vlhkosti.

Vzorce použité pro výpočet:

$$A_w = \frac{W}{b \cdot h} \quad [J \cdot cm^{-2}]$$

A_w – rázová houževnatost,

W – práce spotřebovaná na přeražení tělesa [J],

b, h – rozměry tělesa v radiálním a tangenciálním směru [cm].

Přepočet na 12% vlhkost

$$A_{12} = A_w \cdot [1 + \alpha \cdot (w - 12)] \quad [J \cdot cm^{-2}]$$

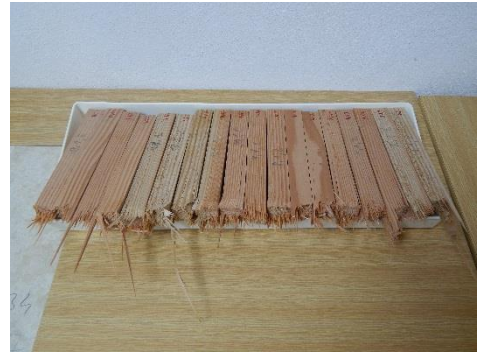
α – opravný koeficient, pro všechny dřeviny 0,02,

w – vlhkost dřeva [%].

(ČSN 49 0117, Požgaj 1993)



Obr. 19 - Charpyho kladivo



Obr. 20 - Vzorky upravené při 165 °C po vykonání zkoušky rázové houževnatosti



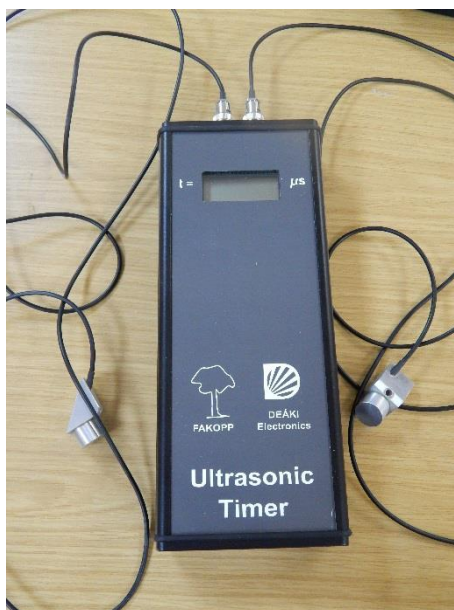
Obr. 21 - Vzorky upravené při 210 °C po vykonání zkoušky rázové houževnatosti

4.3.3 Stanovení dynamického modulu pružnosti

Tělesa určená ke zjištění dynamického modulu pružnosti byla nejdříve v jejich středu změřena posuvným měřítkem s přesností 0,01 mm a zvážena s přesností 0,01 g. Dynamický modul pružnosti byl zjišťován pomocí metody měření času průchodu zvuku dřevem použitím přístroje FAKOPP ULTRASONIC TIMER. Měření bylo provedeno pomocí přitlačných sond.

4.3.3.1 FAKOPP Ultrasonic timer

Dvě stejné přitlačné 45kHz piezo-elektrické sondy jsou spojeny s materiálem. Z jedné ze sond vychází krátký ultrazvukový impulz a ve stejném čase se spouští měření. Zvuk prochází materiálem až k druhé sondě, kde po dosažení úrovně napětí 0,12 V je měření zastaveno. Doba průchodu zvuku materiálem je zobrazena v μs na displeji přístroje (FAKOPP Ultrasonic timer user's guide).



Obr. 22 - FAKOPP Ultrasonic timer

4.3.3.2 Korekce času pro přitlačné sondy

Před vlastním měřením je potřeba provést kalibraci přístroje, protože korekce je výrobcem stanovená pouze pro jedli se vzdáleností mezi sondami od 6 do 47 cm (FAKOPP Ultrasonic timer user's guide).

Časová korekce byla provedena pro každou sadu vždy na jednom vzorku. Hodnoty byly naměřeny ve vzdálenostech 6, 10, 14, 18 a 22 cm. Naměřené hodnoty vyneseny do grafu byly proloženy přímkou a na základě rovnice této přímky se odečetla korekce v μs neboli čas, který by byl naměřen v nulové vzdálenosti přitlačných sond.

4.3.3.3 Dynamický modul pružnosti

Na vzorcích, kde nebyla vykonána korekce, byl naměřen čas průchodu vždy se vzdáleností 14 cm mezi sondami. Na základě zjištěného času průchodu a časové korekce byla vypočítána rychlost šíření zvuku pomocí vzorce

$$v = \frac{1000 \cdot d}{t - \text{korekce}} \quad [m/s]$$

d – vzdálenost mezi sondami [mm],

t – zjištěný čas průchodu [μm],

korekce – [μm].

Na základě vypočítané rychlosti byl zjištěn dynamický modul pružnosti při dané vlhkosti. U neupravené sady vzorků byl zjištěný dynamický modul pružnosti přepočítán na 12% vlhkost.

$$E_{dyn,w} = \frac{\rho_w \cdot v^2}{1000} \quad [MPa]$$

ρ_w – hustota při dané vlhkosti [$g \cdot cm^{-2}$],

v – rychlost šíření zvuku [$m \cdot s^{-1}$].

Přepočet na 12% vlhkost

$$E_{dyn,12\%} = E_{dyn,w} \cdot [1 - 0,01 \cdot (w - 12)] \quad [MPa]$$

w – skutečná vlhkost v době zkoušky [%].

4.3.4 Stanovení pevnosti v ohybu a statického modulu pružnosti

Zkušební tělesa, na kterých byl určován dynamický modul pružnosti, byla dále vystavena působení ohybového zatížení na trhacím stroji UTS 50 (modernizovaný softwarem TIRA). Na tomto trhacím stroji byla zjištěna pevnost v ohybu a statický modul pružnosti.



Obr. 23 – UTS 50 trhací stroj



Obr. 24 – Zatěžování ohybem – 2. stupeň



Obr. 25 – Zatěžování ohybem – 3. stupeň

4.3.4.1 Pevnost v ohybu

Přepoččet na 12% vlhkost

$$\sigma_{12} = \sigma_w \cdot [1 + \alpha \cdot (w - 12)] \quad [MPa]$$

w – vlhkost dřeva v době zkoušky;

ρ_w – pevnost dřeva při zkoušce;

α – opravný koeficient pro pevnost v ohybu 0,04
(ČSN 49 0115)

4.3.4.2 Statický modul pružnosti

Při působení síly na trhacím stroji do meze úměrnosti bylo na základě průhybu tělesa, jeho rozměrů šířky a výšky tělesa a vzdálenosti podpěr vypočten i statický modul pružnosti. U neupravené sady vzorků byl statický modul pružnosti přepočítán na 12% vlhkost podle vzorce

$$E_{stat,12} = \frac{E_{stat,w}}{1 - 0,01 \cdot (w - 12)} \quad [MPa]$$

w – skutečná vlhkost v době zkoušky [%].

(ČSN 49 0116)

4.3.5 Stanovení hustoty

Pro zjištění hustoty byla zkušební tělesa při dané vlhkosti o rozměrech 20×20×300 mm zvážena na digitální váze s přesností 0,01 g a změřena posuvným měřítkem s přesností 0,01 mm. Hustota při dané vlhkosti byla zjištěna ze vzorce

$$\rho_w = \frac{m_w}{V_w} \quad [kg \cdot m^{-3}]$$

m_w – hmotnost dřeva při dané vlhkosti [kg],

V_w – objem při dané vlhkosti [m³].

(Gandelová 2012)

Na neupravené sadě vzorků byl proveden přepočít na 12% vlhkost podle vzorce

$$\rho_{12} = \rho_w \cdot \left[1 - \frac{(1 - 0,85 \cdot \rho_w) \cdot (W - 12)}{100} \right] \quad [kg \cdot m^{-3}; g \cdot cm^{-3}]$$

ρ_w – hustota při dané vlhkosti [kg·m⁻³; g·cm⁻³],

w – vlhkost v době zkoušky [%].

(ČSN 49 0108)

4.3.6 Stanovení vlhkosti v době zkoušky

4.3.6.1 Příprava zkušebních těles

Ze všech těles o průřezu 20×20 mm a délce 300 mm, která byla vystavena výše uvedeným mechanickým zkouškám, byla odříznuta normalizovaná tělesa o rozměrech 20×20×30 mm. Na těchto tělesech byla hned po jejich zhotovení zjišťována jejich skutečná vlhkost v době zkoušky. Dále na nich byla měřena šířka letokruhů.

4.3.6.2 Stanovení vlhkosti v době zkoušky

Při zjišťování vlhkosti byla použita norma ČSN 49 0103. Zhotovená zkušební tělesa byla zvážena na digitální váze s přesností 0,01 g. Následně byla tělesa umístěna do laboratorní

sušárny, kde se vysušila na 0% vlhkost. Po vysušení se tělesa opět převážila a ze získaných údajů byla stanovena vlhkost w v době zkoušky podle vzorce

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

m_1 – hmotnost před vysušením (g),

m_0 – hmotnost po vysušení (g).

(ČSN 49 0103)

4.3.7 Zjišťování šířky letokruhů

Vzorky byly naskenovány a pomocí softwaru pro obrazovou analýzu NIS Elements AR 4.11 (Laboratory Imaging) se na každém jednotlivém vzorku změřila průměrná šířka letokruhů v pixelech, která se následně přepočítala na rozměry v mm.

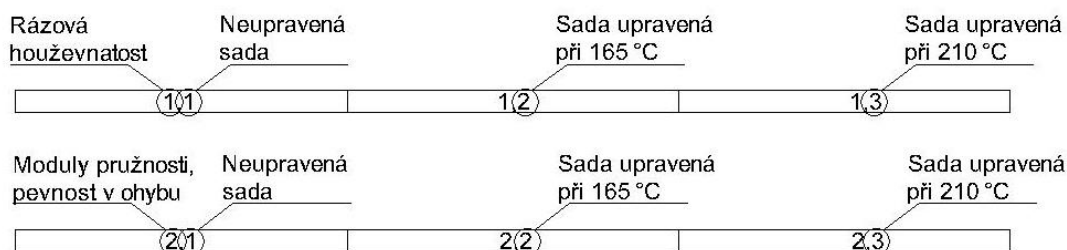
5 Výsledky a diskuse

Výsledky jsou uvedeny v grafické a tabelární podobě pro jednotlivé zjišťované vlastnosti. V grafické části jsou porovnány jednotlivé stupně úpravy (1. stupeň – neupravená sada, 2. stupeň – sada upravená při 165 °C, 3. sada – úprava při 210 °C). V tabelární podobě jsou zobrazeny výsledky se základní statistikou.

U neupravené sady jsou pro porovnání výsledků jednotlivých vlastností používány přepočty na 12% vlhkost. Vzorky po termické úpravě byly klimatizovány v podmínkách pro dosažení 12 % vlhkosti referenčního dřeva, tedy při relativní vlhkosti vzduchu 65 % a teplotě 20 °C, ale po naklimatizování dosahují nižší rovnovážnou vlhkosti. Pro porovnání vycházíme z toho, že vzorky svojí rovnovážnou vlhkostí odpovídají podmínkám dosažených při výše uvedených parametrech prostředí, a není tedy nutné je dále přepočítávat, tedy je to v podstatě jejich výhoda.

Sady vzorků ve výsledcích jsou označovány dvěma čísly. První číslo označuje mechanickou zkoušku, která na nich byla vykonána, druhé stupeň úpravy.

Označení sad vzorků



Obr. 26 - Označení vzorků

Pro posouzení vlivu hustoty a šířky letokruhů na jednotlivé vlastnosti vycházíme z grafu lineární regrese a korelačního koeficientu R, který určuje závislost proměnných.

Výsledné hodnoty referenčního neupraveného dřeva jsou při porovnání s literaturou celkově vyšší (Tabulka 1). Hodnota výsledné průměrné hustoty u sady určené pro ohybovou pevnost a u sady pro rázovou houževnatost vyšla z experimentu vyšší, než udává dostupná literatura. Vzhledem k tomu, že většina mechanických vlastností je ovlivněna právě hustotou dřeva, vyšší hustota zjištěná u vzorků mohla mít za následek zvýšení hodnot u mechanických zkoušek.

Tabulka 2 - Porovnání naměřených hodnot neupraveného dřeva s literaturou

	Hustota		Pevnost v ohybu	Modul pružnosti	Rázová houževnatost
	g·cm ⁻³		MPa	MPa	J·cm ⁻²
Zjištěné průměrné hodnoty	0,594	0,597	92,12	12625	8,9
Holz Atlas	0,51		66,7 - 80,4	11278 - 13240	3,73
Dřevařská technická příručka	0,51		79	11500	3,8
Dřevařská příručka	0,53		80	12000	

5.1 Vlhkost

U termicky upravených vzorků došlo k poklesu rovnovážné vlhkosti. Vzorky byly po termické úpravě naklimatizovány při teplotě 20 °C a vlhkosti 65 %. Pokud by se uvedeným podmínkám vystavilo neupravené dřevo, získá po naklimatizování 12% vlhkost.

Tabulka 3 - Vlhkost - vzorky pro rázovou houževnatost [%]

	1,2	1,3
Průměr	7,64	6,11
Směrodatná odchylka	0,58	0,29
Variační koeficient	7,61	4,79
Medián	7,65	6,10

Tabulka 4 - Vlhkost - vzorky pro ohybovou pevnost a moduly pružnosti [%]

	2,2	2,3
Průměr	7,84	6,35
Směrodatná odchylka	0,27	0,32
Variační koeficient	3,41	5,01
Medián	7,86	6,36

Dřevo po termické úpravě má nižší rovnovážnou vlhkost vlivem odbourávání hemicelulóz a blokačí hydrofilních funkčních skupin (Kačíková 2011).

5.2 Hustota

Hustota byla určena na všech tělesech, na kterých byly vykonány mechanické zkoušky. Pro porovnání hustoty v závislosti na stupni úpravy bylo použito tedy celkem 192 vzorků, rozdělených ve dvou sadách podle mechanických zkoušek na nich vykonávaných.

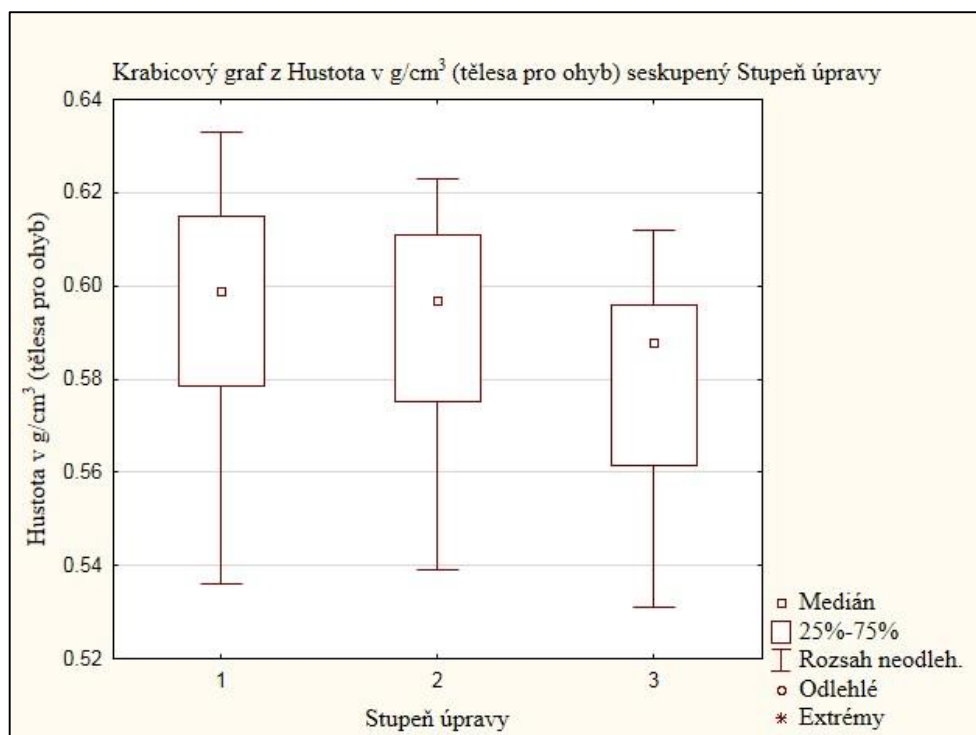
Se zvyšující se teplotou při termické úpravě klesá hustota (ThermoWood Handbook 2003). Tento pokles je patrný i z grafu (Graf 1). Je to dáno tím, že během termické úpravy

vlivem odbourávání především hemicelulóz klesá hmotnost dřeva a zmenšuje se i jeho objem. To má za následek pokles hustoty v závislosti na teplotě při úpravě.

Posouzení vlivu hustoty na mechanické vlastnosti je obtížné, protože hustota je závislá na anatomické stavbě letokruhů (Gandelová 2012). Douglaska má vysoký podíl letního dřeva, které má oproti jarnímu podílu dřeva lepší mechanické vlastnosti, je ale potřeba brát zřetel na stavbu letokruhů u jednotlivých vzorků, protože šířka letokruhů v rámci jednoho kmene je variabilní. V tabulce (Tabulka 3) je uveden rozdíl v hustotě jarního a letního dřeva douglasky (Požgaj 1993).

Tabulka 5 - Rozdíl v hustotě jarního a letního dřeva douglasky (Požgaj 1993)

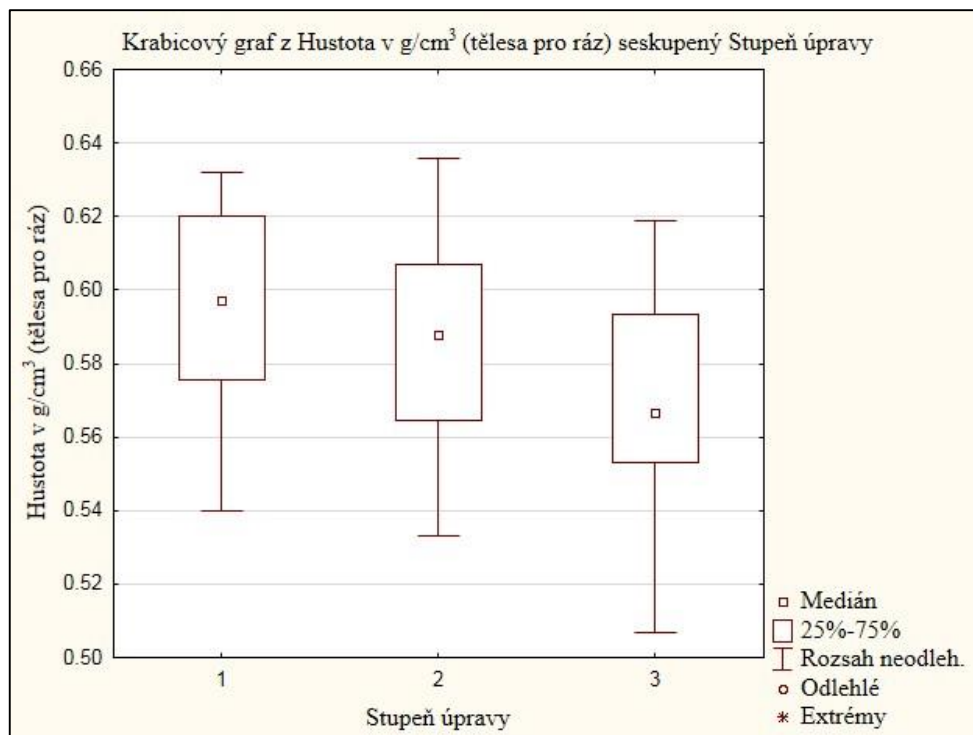
	Hustota jarního dřeva ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Hustota letního dřeva ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Douglaska	300	790



Graf 1 – Krabicový graf hustota v závislosti na stupni úpravy

Tabulka 6 – Hustota – vzorky pro ohybovou pevnost a moduly pružnosti [$g \cdot cm^{-3}$]

	2,1	2,2	2,3
Počet vzorků	32	32	32
Průměr	0,597	0,592	0,580
Směrodatná odchylka	0,024	0,022	0,023
Variační koeficient	4,009	3,645	3,932
Medián	0,599	0,597	0,588



Graf 2 - Krabicový graf hustota v závislosti na stupni úpravy

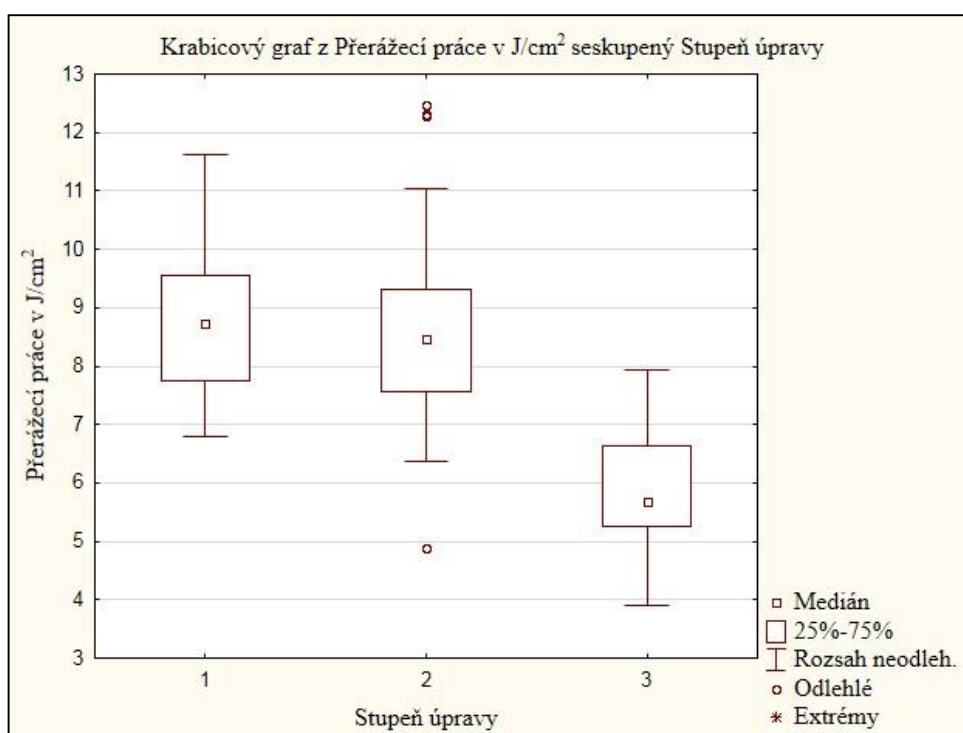
Tabulka 7 – Hustota – vzorky pro rázovou houževnatost [$g \cdot cm^{-3}$]

	1,1	1,2	1,3
Počet vzorků	32	32	32
Průměr	0,594	0,585	0,570
Směrodatná odchylka	0,026	0,029	0,028
Variační koeficient	4,420	4,881	4,988
Medián	0,597	0,588	0,566

5.3 Rázová houževnatost

Zkouška pro rázovou houževnatost (zjištění přerážecí práce) byla vykonána celkem na 96 vzorcích zařazených ve třech sadách dle stupně úpravy.

Z grafu je patrné, že se zvýšením teploty termické úpravy rázová houževnatost klesá. Mezi neupravenou sadou a sadou upravenou při 165 °C není pokles příliš patrný, ale u sady upravené při 210 °C už je pokles hodnot výrazný. Během termické úpravy dochází k narušení stavebních polymerů, což má za následek snížení houževnatosti dřeva (Reinprecht 2008b). Z tohoto důvodu je pokles výsledných hodnot nejvíce patrný u sady s nejvyšším stupněm úpravy.



Graf 3 - Krabicový graf závislosti rázové houževnatosti na stupni úpravy

Tabulka 8 - Rázová houževnatost [$J \cdot cm^{-2}$]

	1,1	1,2	1,3
Počet vzorků	32	32	32
Průměr	8,9	8,7	5,8
Směrodatná odchylka	1,4	1,8	1,1
Variační koeficient	15,7	20,2	18,5
Medián	8,7	8,5	5,7

Se zvyšováním teploty během termické úpravy se dřevo stávalo křehčím. Děje se tak při vystavení dřeva teplotám nad 200 °C vlivem pyrolýzy dřeva (Požgaj 1993). Po namáhání

rázem se některé vzorky ze sady upravené při 210 °C téměř rozpadly. Fotografie těchto vzorků je v příloze (Příloha 3).

5.3.1 Vliv hustoty a šířky letokruhů na rázovou houževnatost

Při posuzování vlivu hustoty a šířky letokruhů na rázovou houževnatost nebyla zjištěna statisticky významná závislost.

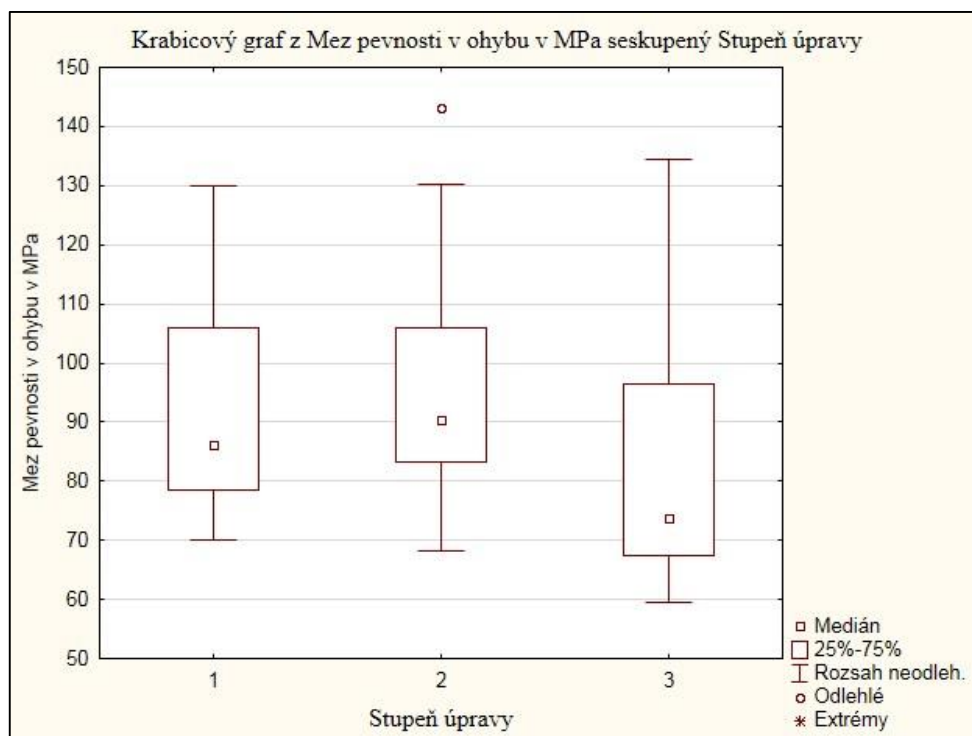
S rostoucí hustotou se obecně mechanické vlastnosti zlepšují. Tato závislost ale nemusí být vždy statisticky významná, protože záleží na konkrétní stavbě letokruhu (Gandelová 2012). Douglaska má vysoký podíl letního dřeva, které má oproti jarnímu podílu dřeva lepší mechanické vlastnosti, je ale potřeba brát zřetel na stavbu letokruhů u jednotlivých vzorků, protože šířka letokruhů v rámci jednoho kmene je proměnlivá (Horáček 2014).

5.4 Pevnost v ohybu

Zkouška pevnosti v ohybu byla vykonána celkem na 96 vzorcích zařazených ve třech sadách dle stupně úpravy.

Z tabulky (Tabulka 7) a grafu (Graf 4) je patrné, že vlivem teploty 165 °C pevnost v ohybu v porovnání s neupravenou sadou mírně vzrostla, konkrétně z průměrné hodnoty 92,12 MPa na hodnotu 95,31 MPa. Po úpravě při teplotě 210 °C došlo k poklesu ohybové pevnosti na průměrnou hodnotu 84,90 MPa. Při mírnějších teplotách úpravy (do 180 °C) může dojít k mírnému nárůstu pevnosti v ohybu, ale při teplotách vyšších dojde k poklesu ohybové pevnosti (Reinprecht 2008b). Tento jev je patrný i z grafu (Obr. 13) uvedeného v ThermoWood Handbook (2003).

Nárůst pevnosti při nižším stupni úpravy může být daný snížením rovnovážné vlhkosti vlivem termické úpravy a následným zlepšením pevnostních vlastností s vlhkostí souvisejících.



Graf 4 - Krabicový graf závislost pevnosti v ohybu na stupni úpravy

Tabulka 9 - Pevnost v ohybu [MPa]

	2,1	2,2	2,3
Počet vzorků	32	32	32
Průměr	92,1	95,3	84,9
Směrodatná odchylka	17,8	17,5	22,9
Variační koeficient	19,4	18,4	26,9
Medián	86,3	90,4	73,8

5.4.1 Vliv hustoty a šířky letokruhů na pevnost v ohybu

Pro zjištění vlivu hustoty na pevnost v ohybu vycházíme z grafu lineární regrese a korelačního koeficientu R.

Při posouzení vlivu hustoty na mez pevnosti v ohybu byla zjištěná lineární závislost u všech tří sad. Korelační koeficienty R vyšly pro neupravenou sadu 0,6633 (Příloha 4), pro sadu upravenou při 165 °C 0,5725 (Příloha 5) a pro sadu upravenou při 210 °C 0,7045 (Příloha 6).

Závislost byla zjištěna i při posuzování vlivu šířky letokruhů na pevnost v ohybu. Korelační koeficient pro neupravenou sadu je 0,6679 (Příloha 7), pro sadu upravenou při 165 °C 0,5442 (Příloha 8) a pro sadu upravenou při 210 °C 0,7213 (Příloha 9).

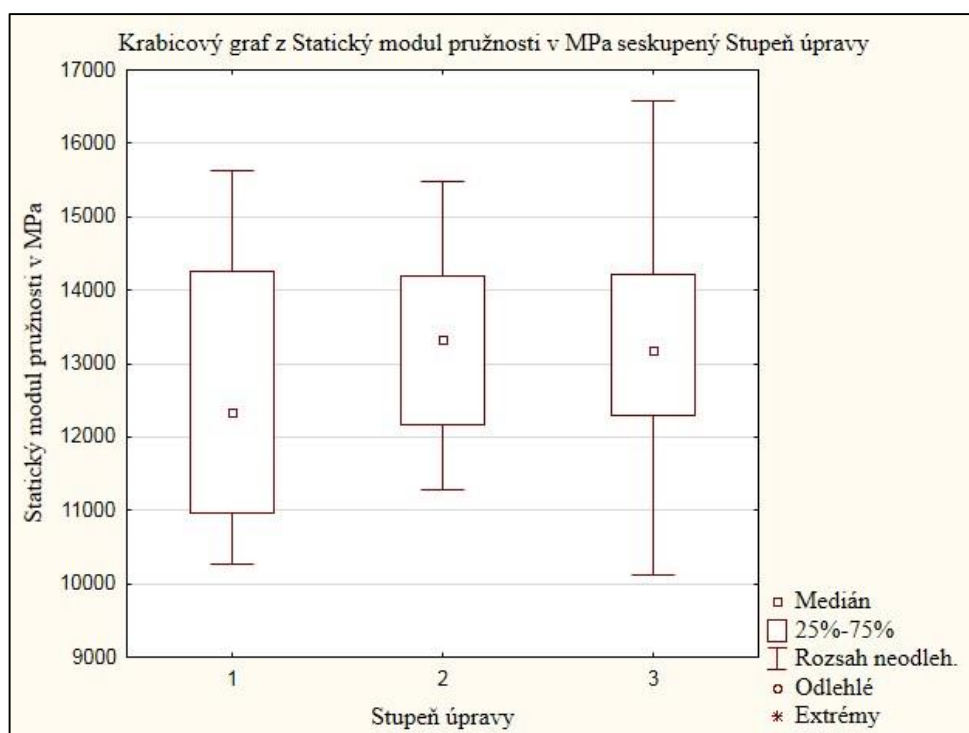
Obecně lze říci, že se zvyšující se hustotou pevnost dřeva roste, ale pro přesnější stanovení této závislosti je potřeba věnovat pozornost makroskopické stavbě letokruhů (Horáček 2008).

5.5 Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti byl zjišťován celkem na 96 vzorcích zařazených ve třech sadách podle stupně úpravy.

Z grafu (Graf 5) a tabulky (Tabulka 8) je patrné, že statický modul pružnosti se spolu se stoupající teplotou při termické úpravě mírně zvyšuje. Tento nárůst je o něco výraznější při srovnání neupravené sady a sady upravené při 165 °C. V porovnání sady s druhým stupněm úpravy a sady upravené při 210 °C je nárůst statického modulu pružnosti již menší. Tento mírný nárůst není statisticky významný.

Zvyšování statického modulu pružnosti může být způsobeno poklesem rovnovážné vlhkosti.



Graf 5 - Krabicový graf závislost statického modulu pružnosti na stupni úpravy

Tabulka 10 - Statický modul pružnosti [MPa]

	2,1	2,2	2,3
Počet vzorků	32	32	32
Průměr	12625	13259	13309
Směrodatná odchylka	1777	1175	1695
Variační koeficient	14	9	13
Medián	12335	13329	13175

5.5.1 Vliv hustoty a šířky letokruhů na statický modul pružnosti

Z grafu lineární regrese pro zjištění závislosti statického modulu pružnosti na hustotě vyplývá silná závislost. Korelační koeficient udává pro neupravenou sadu hodnotu 0,7275 (Příloha 10), pro sadu upravenou při 165 °C 0,8176 (Příloha 11) a pro sadu upravenou při 210 °C udává hodnotu 0,8006 (Příloha 12).

S moduly pružnosti hustota dřeva vykazuje kladnou lineární závislost. Její vliv je nejvíce patrný u vysušeného dřeva, s vlhkostí nad mezí hygroskopicity již vliv hustoty není patrný (Gandelová 2012).

Při posuzování vlivu šířky letokruhů na statický modul pružnosti byla zjištěna lineární závislost. Korelační koeficient nabývá hodnoty pro neupravenou sadu 0,6928 (Příloha 13), pro sadu upravenou při 165 °C 0,7566 (Příloha 14) a pro sadu upravenou při 210 °C nabývá hodnoty 0,7981 (Příloha 15).

5.5.2 Vztah mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti

Vztah mezi pevností v ohybu a souvisejícím statickým modulem pružnosti je velmi těsný. Vysoká hodnota korelačního koeficientu znamená, že se zvyšující se pevností dřeva v ohybu roste i jeho modul pružnosti (Požgaj 1993).

Na základě vynesené lineární regrese pro zjištění závislosti mezi statickým modulem pružnosti a ohybovou pevností je patrná silná lineární závislost. Korelační koeficienty R pro jednotlivé sady udávají hodnoty 0,9317 (Příloha 16) pro neupravenou sadu, 0,7583 (Příloha 17) pro druhý stupeň úpravy a 0,9167 (Příloha 18) pro třetí stupeň úpravy.

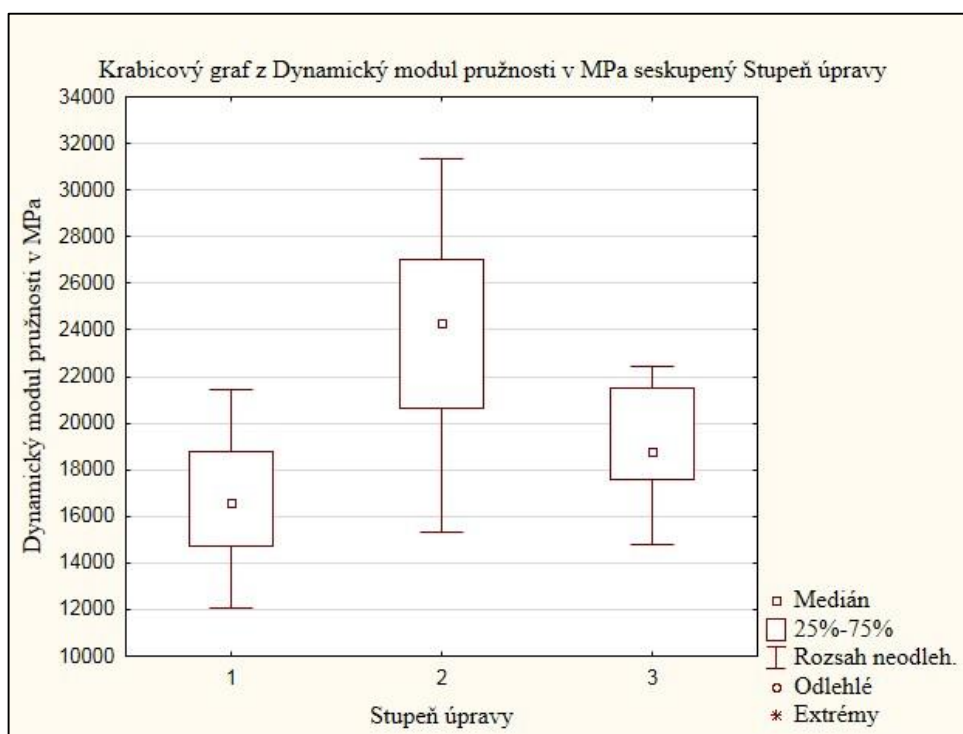
Statický modul pružnosti a ohybová pevnost mají silnou závislost. Na normalizovaných tělesech je prakticky možné stanovit modul pružnosti na základě pružných deformací a díky lineární závislosti pevnost v ohybu určit (Požgaj 1993).

5.6 Dynamický modul pružnosti

Během prvního stupně termické úpravy provedené při 165 °C je oproti neupravené sadě patrný nárůst dynamického modulu pružnosti. Podle Reinprechta (2008b) tomu tak je při kratší době ohřevu a teplotách do 165 °C. Modul pružnosti je ovlivňován vlhkostí dřeva do meze hygroscopicity (Gandelová 2012). Tento nárůst může být tedy daný i tím, že dřevo termicky upravené má po naklimatizování nižší rovnovážnou vlhkost a tím modul pružnosti vzrůstá. Zároveň nedochází k tak výrazným změnám ve stavbě dřeva, které by měly na modul pružnosti větší dopad.

Při zvýšení teplot nad 160 – 190 °C modul pružnosti klesá (Reinprecht 2008b). To je patrné i z grafu, kde při srovnání sady s druhým stupněm úpravy při 210 °C dochází ke zřejmému poklesu dynamického modulu pružnosti. Úpravou při teplotě 210 °C sice rovnovážná vlhkost ještě klesá, ale už dochází k výrazným změnám ve stavbě dřeva, které převáží pozitivní vliv snížené rovnovážné vlhkosti.

Stejný závěr ukazuje i příručka ThermoWood Handbook (2003) kde je z grafu patrný nejdříve vzrůstající modul pružnosti, který s vyššími teplotami opět klesá (Obr. 14).



Graf 6 - Krabicový graf závislost dynamického modulu pružnosti na stupni úpravy

Tabulka 11 - Dynamický modul pružnosti [MPa]

	2,1	2,2	2,3
Počet vzorků	32	32	32
Průměr	16696	20215	22341
Směrodatná odchylka	2558	3380	2685
Variační koeficient	15	17	12
Medián	16616	20711	21815

5.6.1 Vliv hustoty a šířky letokruhů

Při posuzování vlivu hustoty a šířky letokruhů na dynamický modul pružnosti nebyla zjištěna statisticky významná závislost.

5.6.2 Závislost mezi dynamickým a statickým modulem pružnosti

Statisticky významná závislost mezi dynamickým a statickým modulem pružnosti nebyla prokázána. U sady s druhým a třetím stupněm úpravy není závislost statisticky významná.

Dynamický modul pružnosti může být ovlivněn skrytými vadami ve vzorcích, které se projeví při průchodu ultrazvukovou vlnou vzorkem. Při statickém zatížení za předpokladu, že skrytá vada je mimo zatěžovací zónu, se vliv těchto vad na výsledcích neprojeví.

6 Závěr

Při termické úpravě dochází ke změnám ve struktuře dřeva vlivem teplot. Při použití nižších teplot je možné mírné zlepšení některých mechanických vlastností. Za použití vyšších teplot dochází však u mechanických vlastností jako je ohybová pevnost, pružnost nebo houževnatost k výraznému poklesu. To ovlivňuje další využití termicky upraveného dřeva.

Dřevo s vyšším stupněm úpravy není vzhledem ke snížení pružnostních a pevnostních vlastností vhodné používat pro konstrukce, kde je nutné přenášet větší zatížení. Využití nachází v aplikacích, kde jsou kladeny vyšší nároky na rozměrovou stabilitu. Jeho vhodné použití je na vnější obklady, zahradní nábytek, lávky a jako interiérové konstrukce do saun. Dřevo s nižším stupněm lze použít tam, kde od dřeva očekáváme stabilitu materiálu a vzhled. Je vhodný pro interiérové konstrukční prvky, nábytek, podlahy nebo pro saunové vybavení.

Tato práce přispěla k ověření a porovnání pružnostních a pevnostních vlastností tepelně upraveného dřeva douglasky s neupraveným dřevem. Tato zjištění mohou přispět k rozšíření možného uplatnění dřeva douglasky. Také byly ověřeny předpoklady o dopadu působení různých teplot během termických úprav na pružnostní a pevnostní vlastnosti upravovaného dřeva.

7 Použité zdroje

7.1 Literatura

Balabán, K. *Nauka o dřevě první část - Anatomie dřeva*. 1. vydání. Praha: Státní zemědělské nakladatelství, 1955. 216 s.

Gandelová, L. – Horáček, P. – Šlezingerová, J. *Nauka o dřevě*. 3. vydání. Brno: Ediční středisko, 2012. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

Horáček, P. – Timko, P. Stavba a vlastnosti dřeva Douglasky tisolisté (*Pseudotsuga Menziesii* (Mirb.) Franco). In *Douglaska: dřevina roku 2014*. Sborník z konference: Zámek Křtiny, 2. – 3. 9. 2014. 1. vydání. Praha: Česká lesnická společnost, 2012. 173 s. ISBN 978-80-02-02537-5.

Horáček, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 2. přepracované vydání. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 978-80-7375-169-2.

Chmelař, J. *Dendrologie s ekologií lesních dřevin – 1. část Jehličnany*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1984. 91, XXVIII s.

Kačíková, D. – Kačík, F. *Chemické a mechanické změny dřeva při termické úpravě*. 1. vydání. Zvolen: TU vo Zvolene, 2011. 71 s. ISBN 978-80 -228-2249 -7.

Kolektiv autorů. *Dřevařská technická příručka*. 1. vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970. 748 s.

Peschel, P. a kol. *Dřevařská příručka – tabulky, technické údaje*. Praha: Sobotáles, 2002. 320 s. ISBN 80-85920-84-0.

Požgaj, A. – Chovanec, D. – Kurjatko, S. – Babiak, M. *Štruktúra a vlastnosti dřeva*. 1. vydání. Bratislava: Príroda, 1993. 485 s. ISBN 80-07-00600-1.

Reinprecht, L. – Vidholdová, Z. *Termodrevo – príprava, vlastnosti a aplikácie*. 1. vydání. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 89 s. ISBN 978-80-228-1920-6.b

Reinprecht, L. *Ochrana dřeva*. 1. vydání. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. 453 s. ISBN 978-80-228-1863-6.a

Svoboda, P. – Pokorný, J. *Lesní dřeviny a jejich porosty: skripta z dendrologie pro technický směr*. 1. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1953. 112 s. ISBN

Svoboda, P. *Lesní dřeviny a jejich porosty: skripta k předmětu dendrologie. Část 1.* 2. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1952

Šlezingerová, J. – Gandelová, L. *Stavba dřeva – cvičení.* 1. vydání. Brno: Ediční středisko MZLU, 1999. 132 s. ISBN 80-7157-400-7.

Wagenführ, R. *Holzatlas.* Leipzig: Fachbuchverlag, 2000. 707 s.

Záruba, V. – Záruba J. Zkušenosti se zpracováním dřeva douglasky. In *Douglaska: dřevina roku 2014.* Sborník z konference: Zámek Křtiny, 2. – 3. 9. 2014. 1. vydání. Hradec Králové: Dřevozpracující družstvo. 133 – 140 s. ISBN 978-80-02-02537-5.

7.2 Elektronické dokumenty

FAKOPP Ultrasonic timer user's guide [online]. [cit. 23. 2. 2015]. Dostupné z [www: www.fakopp.com](http://www.fakopp.com)

Kloiber, M. – Kotlíňová, M. *Vliv orientace a šířky letokruhů na šíření ultrazvuku ve struktuře dřeva* [online]. 2005. [cit. 16. 4. 2015]. Dostupné z [www: http://www.researchgate.net/](http://www.researchgate.net/)

Kocaefe, D. – Poncsak, S. – Boluk, Y. *Effect of thermal treatment on the chemical composition and mechanical properties of birch and aspen* [online]. BioResources. 2008, vol. 3, no 2. [cit. 8. 4. 2015]. Dostupné z [www: www.ncsu.edu/bioresources/](http://www.ncsu.edu/bioresources/)

Thermowood Handbook. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2003 [online]. [cit. 8. 4. 2015]. Dostupné z [www: www.thermowood.fi](http://www.thermowood.fi)

Zeidler, A. *Lexikon dřeva.* Česká zemědělská univerzita v Praze: 2012 [online]. [cit. 23. 2. 2015]. Dostupné z [www: http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/](http://fld.czu.cz/~zeidler/lexikon_dreva/)

7.3 Internetové odkazy

Mikroskopický atlas dřevin. Dostupné online na http://fld.czu.cz/~zeidler/atlas_drev/

7.4 Normy

ČSN 49 0101 Dřevo. Všeobecné požadavky na fyzikálne a mechanické skúšky. 1980

- ČSN 49 0103 Drevo. Zisťovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach. 1979
- ČSN 49 0108 Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993
- ČSN 49 0115 Drevo. Zisťovanie medze pevnosti v statickom ohybe. 1979
- ČSN 49 0116 Drevo. Metóda zisťovania modulu pružnosti pri statickom ohybe. 1982
- ČSN 49 0117 Drevo. Rázová húževnatost v ohybe. 1977.

8 Seznam obrázků

Obr. 1 – Příčný řez (Zeidler 2012)	9
Obr. 2 – Tangenciální řez (Zeidler 2012)	9
Obr. 3 – Radiální řez (Zeidler 2012)	9
Obr. 4 – Příčný řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/)	10
Obr. 5 – Radiální řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/)	10
Obr. 6 – Tangenciální řez (http://fld.czu.cz/~zeidler/)	10
Obr. 7 – Obecný tvar pracovního diagramu (Gandelová 2012)	19
Obr. 8 – Diagram výrobního procesu ThermoWood (ThermoWood Handbook 2003) ..	23
Obr. 9 – Vliv teploty termické úpravy na hustotu borovice (ThermoWood Handbook 2003)	25
Obr. 10 – Vliv Relativní vlhkosti vzduchu na rovnovážnou vlhkost dřeva smrku (ThermoWood Handbook 2003)	26
Obr. 11 – Barva tepelně upraveného dřeva borovice (ThermoWood Handbook 2003)	27
Obr. 12 – Chemické změny hlavních složek dřeva při termické úpravě (Kačíková 2011)	28
Obr. 13 – Změny v chemické struktuře dřeva při teplotách 120 - 230 C a jejich vliv na vlastnosti termodřeva (Reinprecht 2008b)	30
Obr. 14 – Vliv teploty při termické úpravě na ohybovou pevnost dřeva borovice (ThermoWood Handbook 2003)	32
Obr. 15 – Vliv teploty termické úpravy na modulu pružnosti dřeva borovice (ThermoWood Handbook 2003)	33
Obr. 16 – Příprava vzorků	35
Obr. 17 – Uložení vzorků v termokomoře	36
Obr. 18 – Klimatizování vzorků po termické úpravě	36
Obr. 19 – Charpyho kladivo	38
Obr. 20 – Vzorky upravené při 165 °C po vykonání zkoušky rázové houževnatosti	38
Obr. 21 – Vzorky upravené při 210 °C po vykonání zkoušky rázové houževnatosti	38
Obr. 22 – FAKOPP Ultrasonic timer	39
Obr. 23 – UTS 50 trhací stroj	41
Obr. 24 – Zatěžování ohybem – 2. stupeň	41
Obr. 25 – Zatěžování ohybem – 3. stupeň	41
Obr. 26 – Označení vzorků	44

9 Seznam grafů

Graf 1 – Krabicový graf hustota v závislosti na stupni úpravy	46
Graf 2 – Krabicový graf hustota v závislosti na stupni úpravy	47
Graf 3 – Krabicový graf závislosti rázové houževnatosti na stupni úpravy	48
Graf 4 – Krabicový graf závislost pevnosti v ohybu na stupni úpravy	50
Graf 5 – Krabicový graf závislost statického modulu pružnosti na stupni úpravy	51
Graf 6 – Krabicový graf závislost dynamického modulu pružnosti na stupni úpravy	53

10 Seznam tabulek

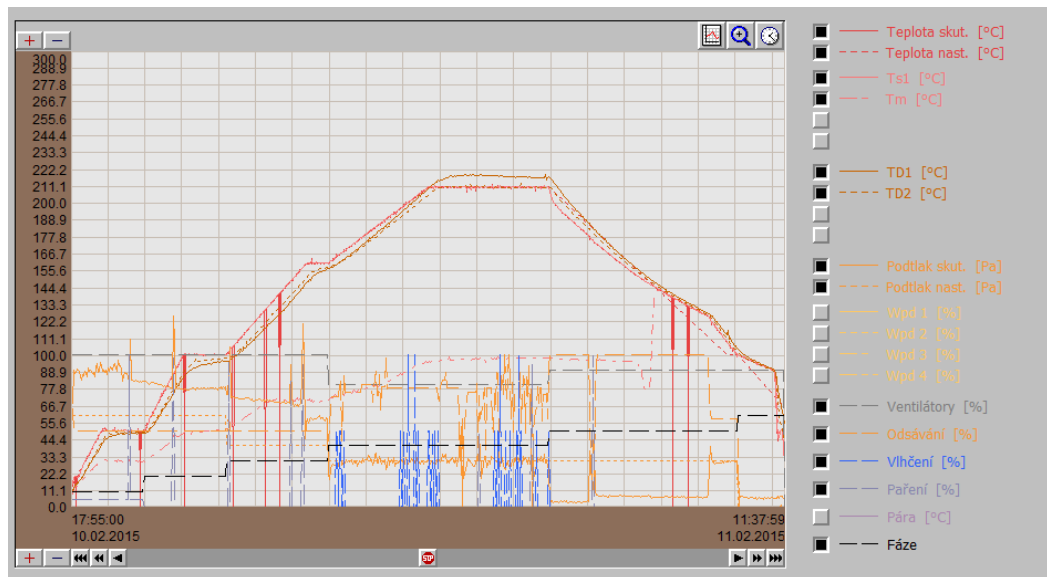
Tabulka 1 – Rozdíl v hustotě jarního a letního dřeva vybraných dřevin (Požgaj 1993)	15
Tabulka 2 – Porovnání naměřených hodnot neupraveného dřeva s literaturou	45
Tabulka 3 – Vlhkost - vzorky pro rázovou houževnatost [%]	45
Tabulka 4 – Vlhkost - vzorky pro ohybovou pevnost a moduly pružnosti [%]	45
Tabulka 5 – Rozdíl v hustotě jarního a letního dřeva douglasky (Požgaj 1993)	46
Tabulka 6 – Hustota – vzorky pro ohybovou pevnost a moduly pružnosti [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	47
Tabulka 7 – Hustota – vzorky pro rázovou houževnatost [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	47
Tabulka 8 – Rázová houževnatost [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$]	48
Tabulka 9 – Pevnost v ohybu [MPa]	50
Tabulka 10 – Statický modul pružnosti [MPa]	52
Tabulka 11 – Dynamický modul pružnosti [MPa]	54

11 Seznam příloh

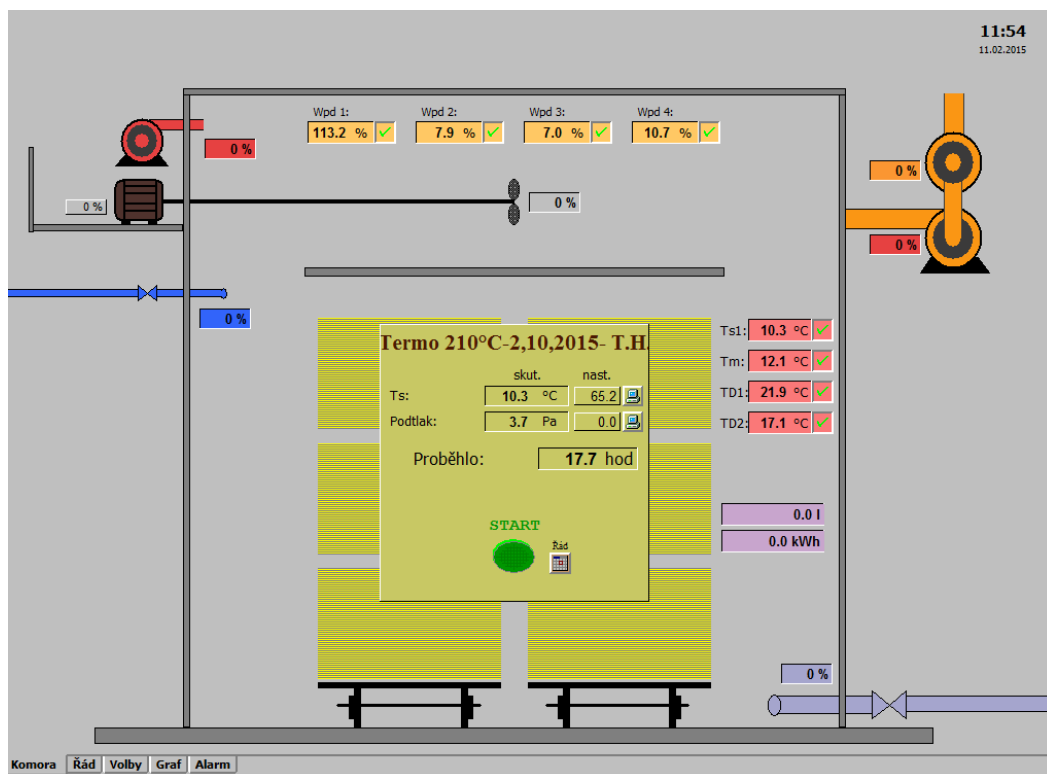
Příloha 1 – Průběh termické úpravy při 210 °C	62
Příloha 2 – Parametry nastavené v termokomoře při 210 °C	62
Příloha 3 – Některé vzorky s úpravou při 210 °C po vykonání zkoušky na ráz	63
Příloha 4 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na hustotě.....	63
Příloha 5 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na hustotě – úprava při 165 °C	64
Příloha 6 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na hustotě – úprava při 210 °C	64
Příloha 7 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na šířce letokruhů – neupravená sada	65

Příloha 8 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na šířce letokruhů – úprava při 165 °C	65
Příloha 9 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na šířce letokruhů – úprava při 210 °C	66
Příloha 10 – Graf závislosti statického modulu pružnosti na hustotě – neupravená sada	66
Příloha 11 – Graf závislosti statického modulu pružnosti na hustotě – úprava při 165 °C	67
Příloha 12 – Graf závislosti statického modulu pružnosti na hustotě – úprava při 210 °C	67
Příloha 13 – Graf závislosti statického modulu pružnosti na šířce letokruhů – neupravená sada	68
Příloha 14 – Graf závislosti statického modulu pružnosti na šířce letokruhů – úprava při 165 °C	68
Příloha 15 – Graf závislosti statického modulu pružnosti na šířce letokruhů – úprava při 210 °C	69
Příloha 16 – Graf závislosti mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti – neupravená sada	69
Příloha 17 – Graf závislosti mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti – úprava při 165 °C	70
Příloha 18 – Graf závislosti mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti – úprava při 210 °C	70

12 Přílohy



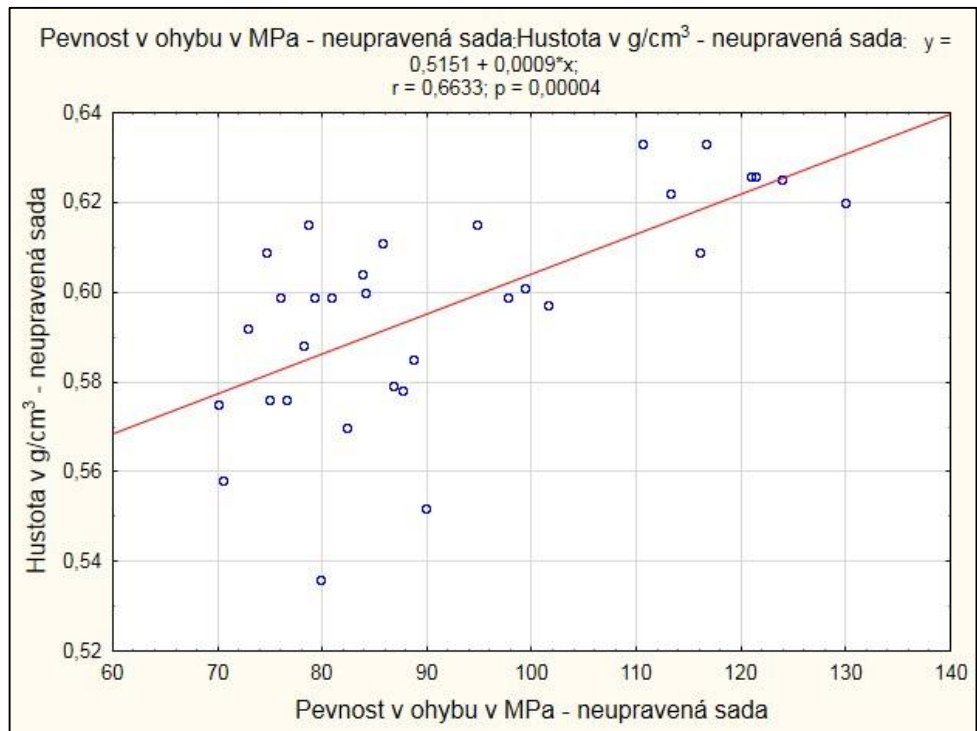
Příloha 1 - Průběh termické úpravy při 210 °C



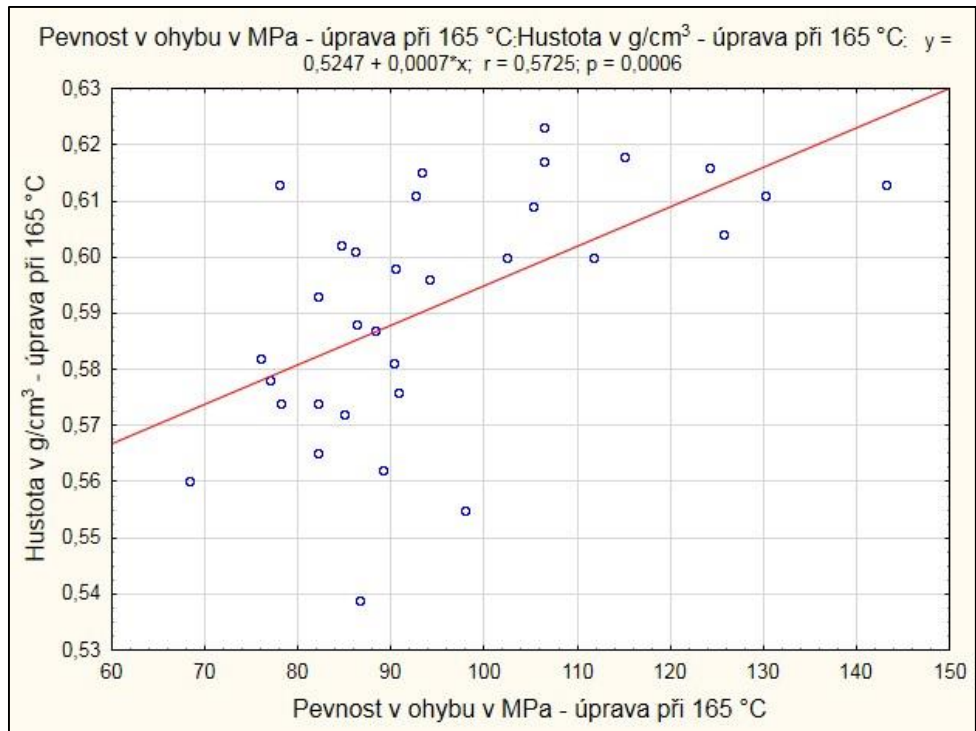
Příloha 2 - Parametry nastavené v termokomoře při 210 °C



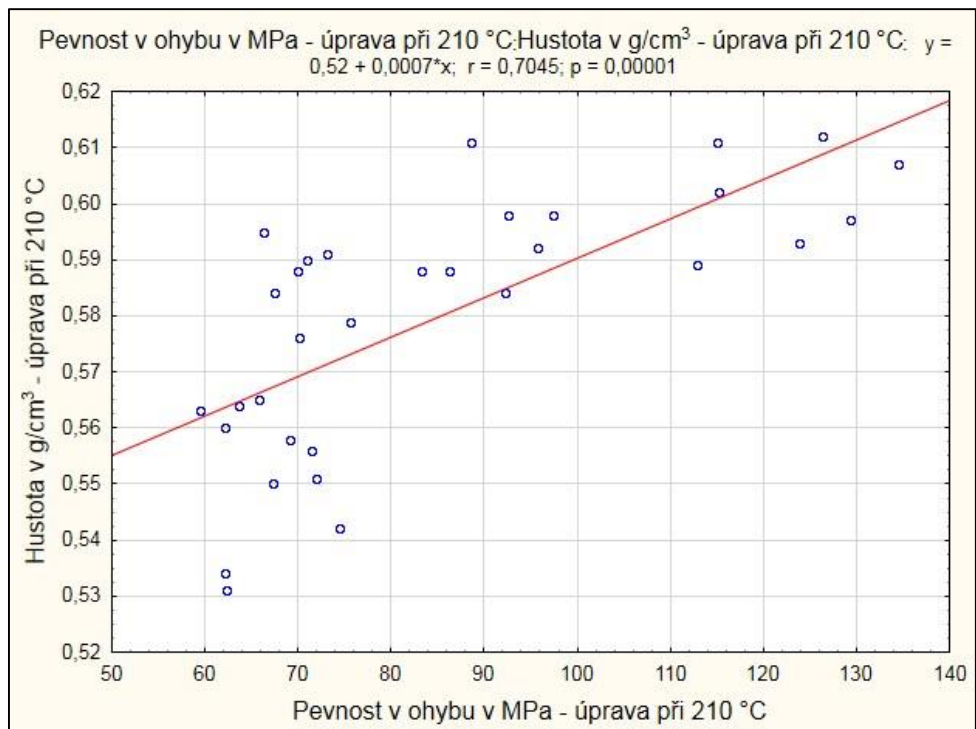
Příloha 3 - Některé vzorky s úpravou při 210 °C po vykonání zkoušky na ráz



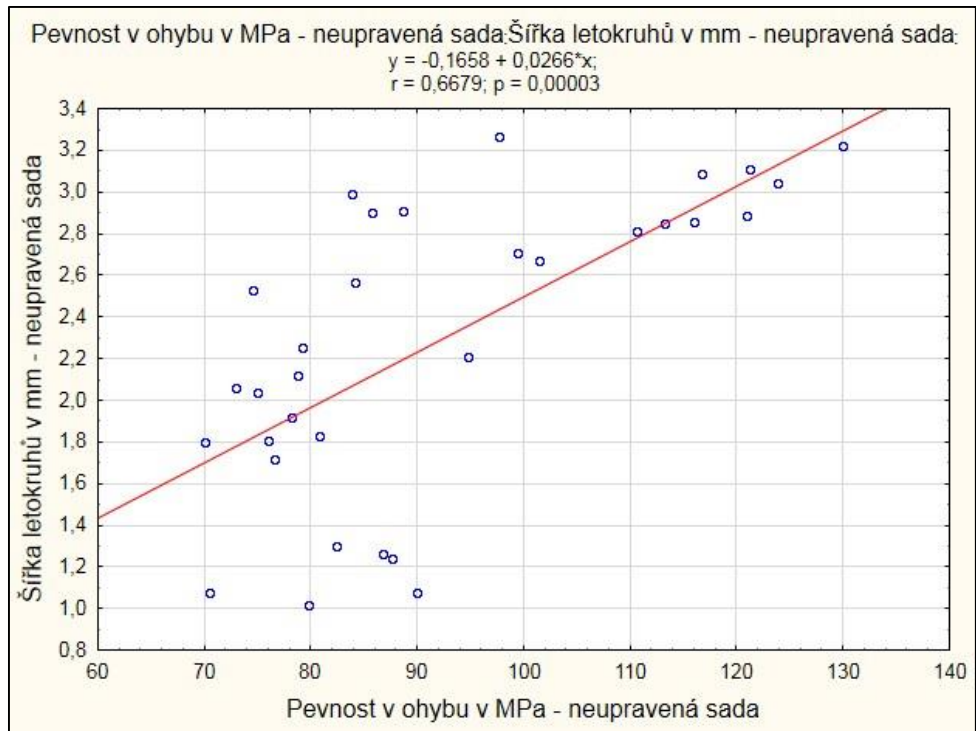
Příloha 4- Graf závislosti pevnosti v ohybu na hustotě



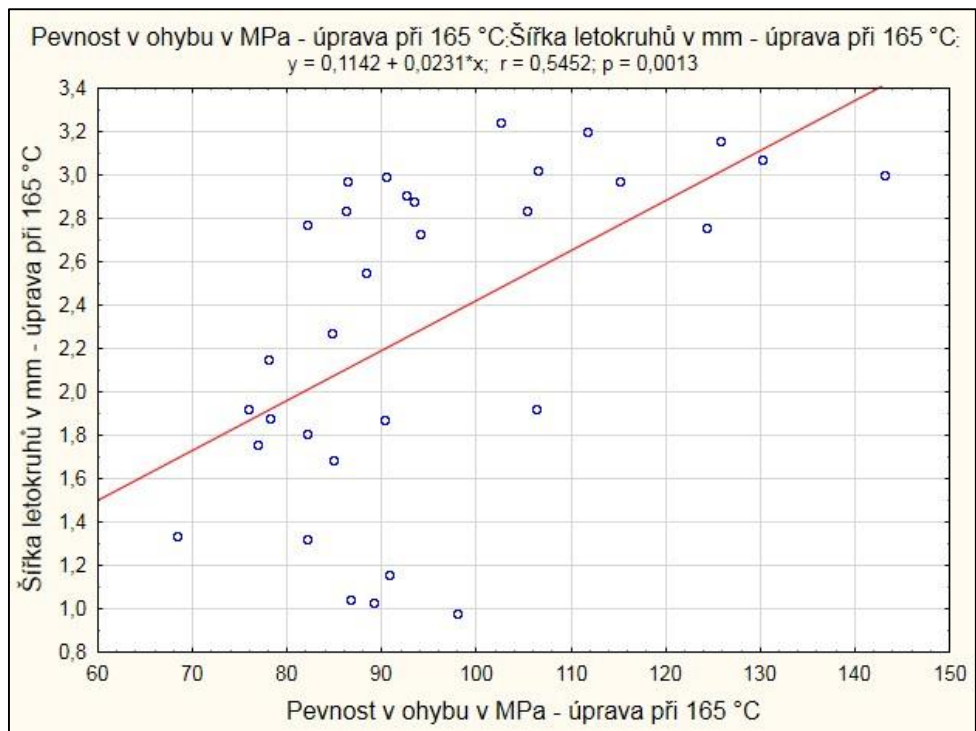
Příloha 5 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na hustotě - úprava při 165 °C



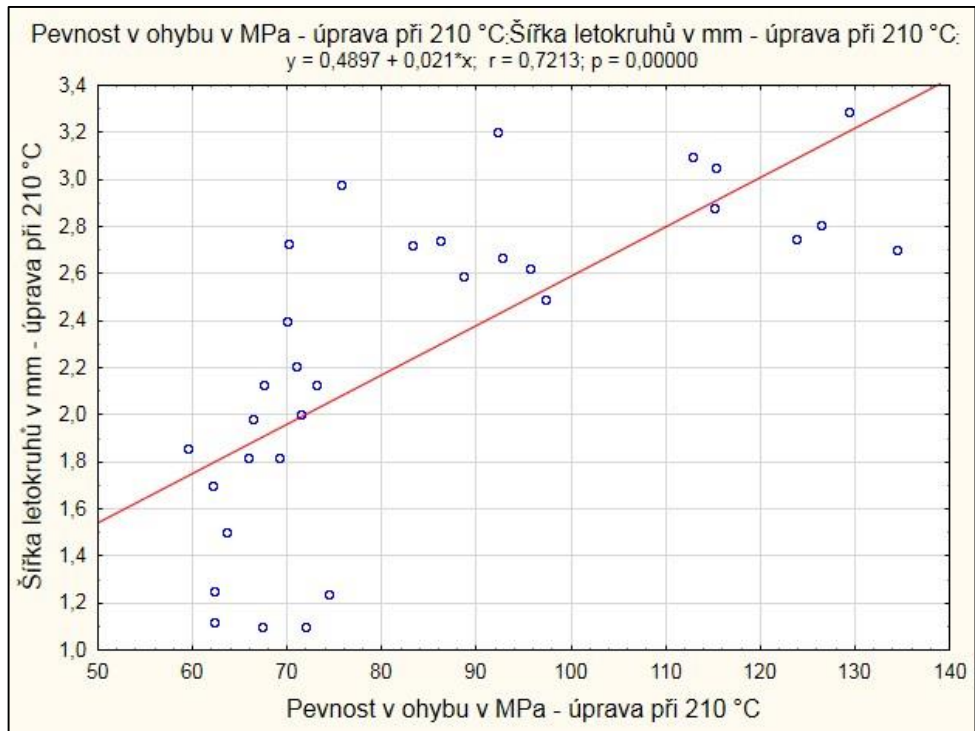
Příloha 6 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na hustotě - úprava při 210 °C



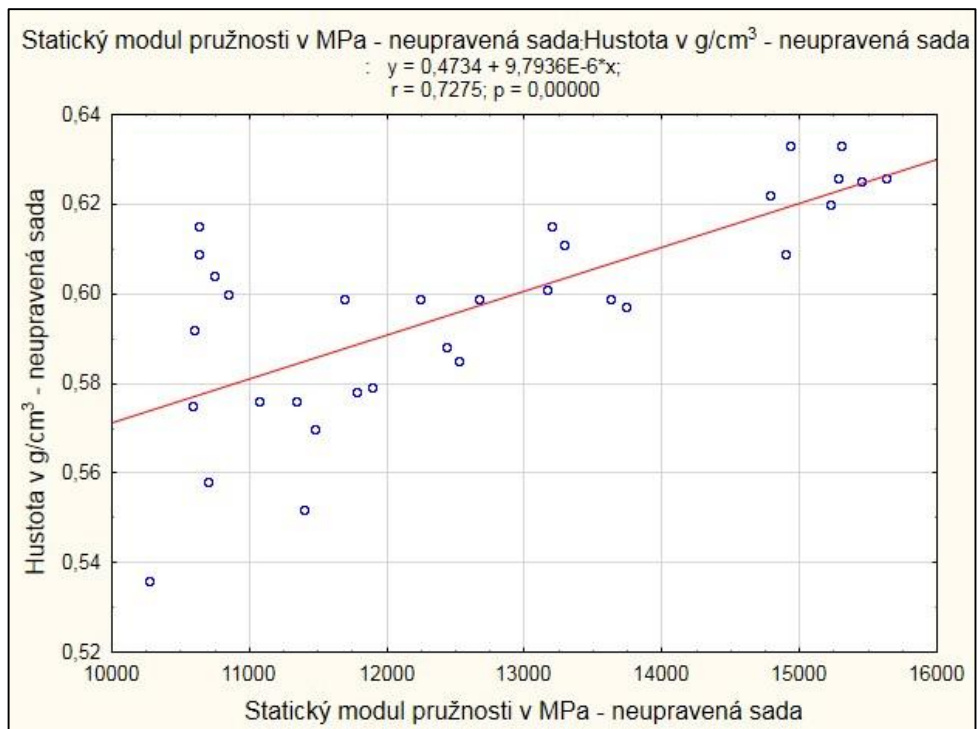
Příloha 7 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na šířce letokruhů - neupravená sada



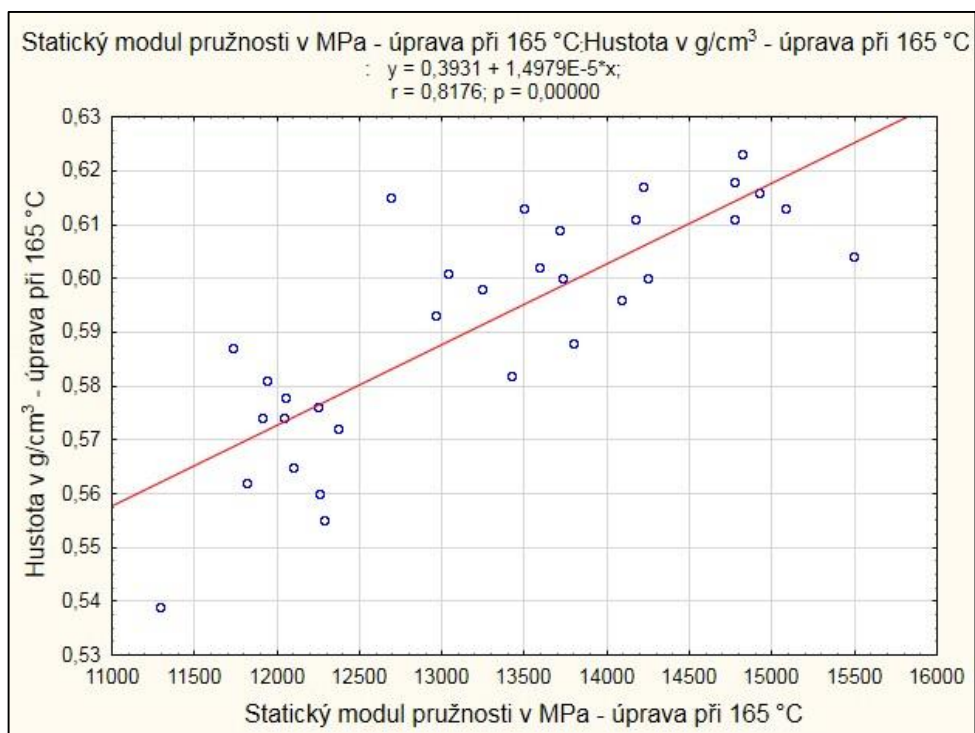
Příloha 8 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na šířce letokruhů - úprava při 165 °C



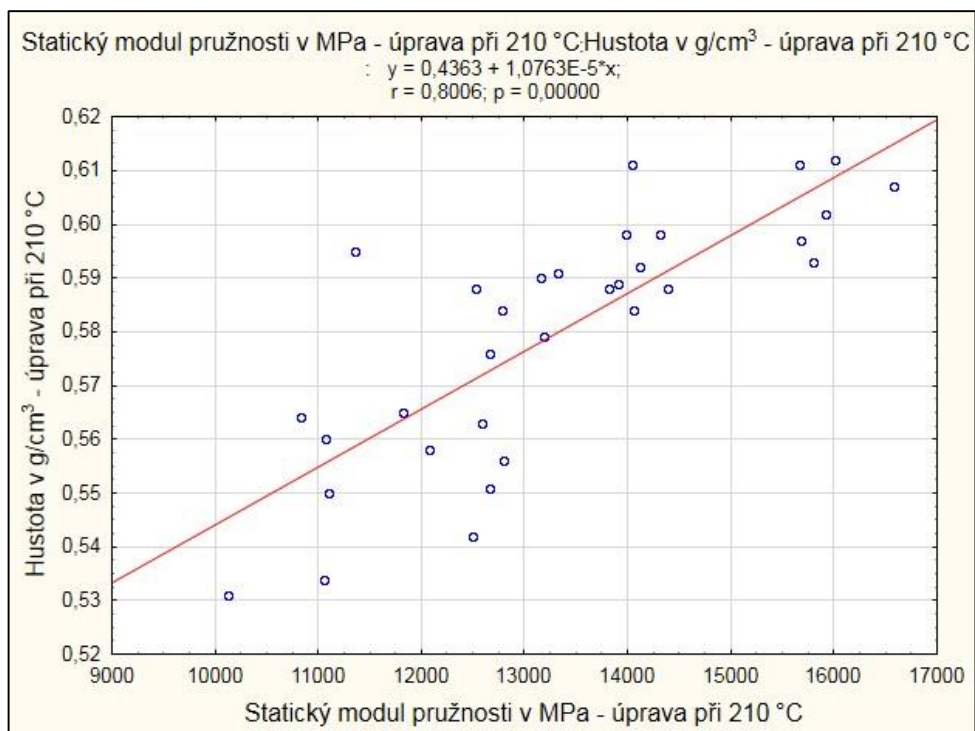
Príloha 9 – Graf závislosti pevnosti v ohybu na šírce letokruhů - úprava při 210 °C



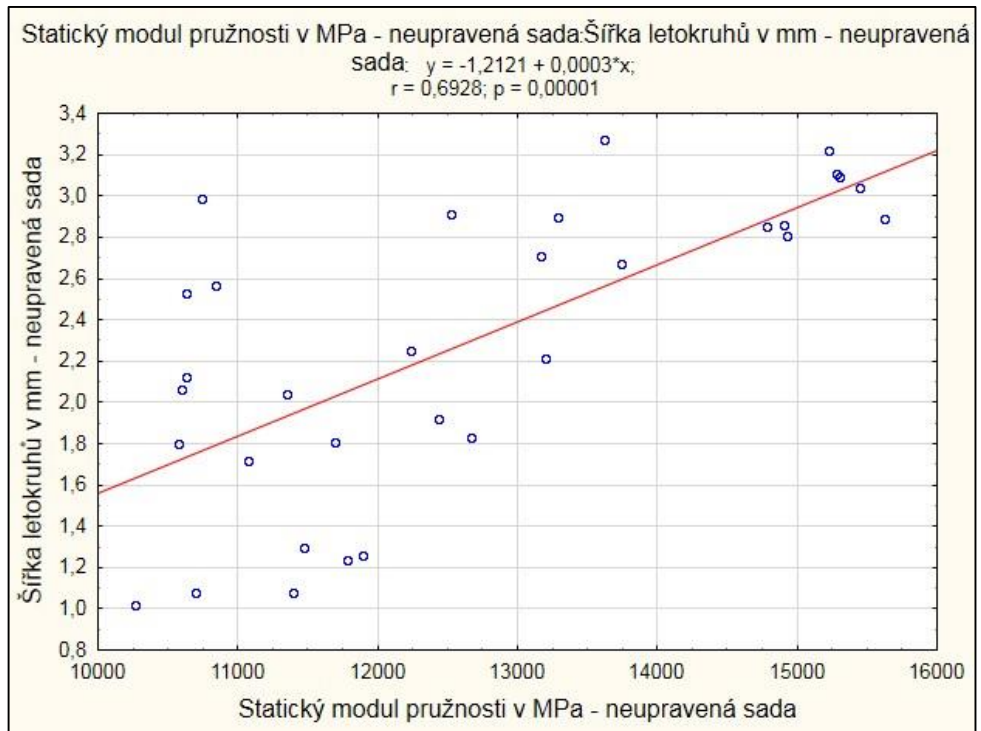
Príloha 10 – Graf závislosti statického modulu pružnosti na hustotě - neupravená sada



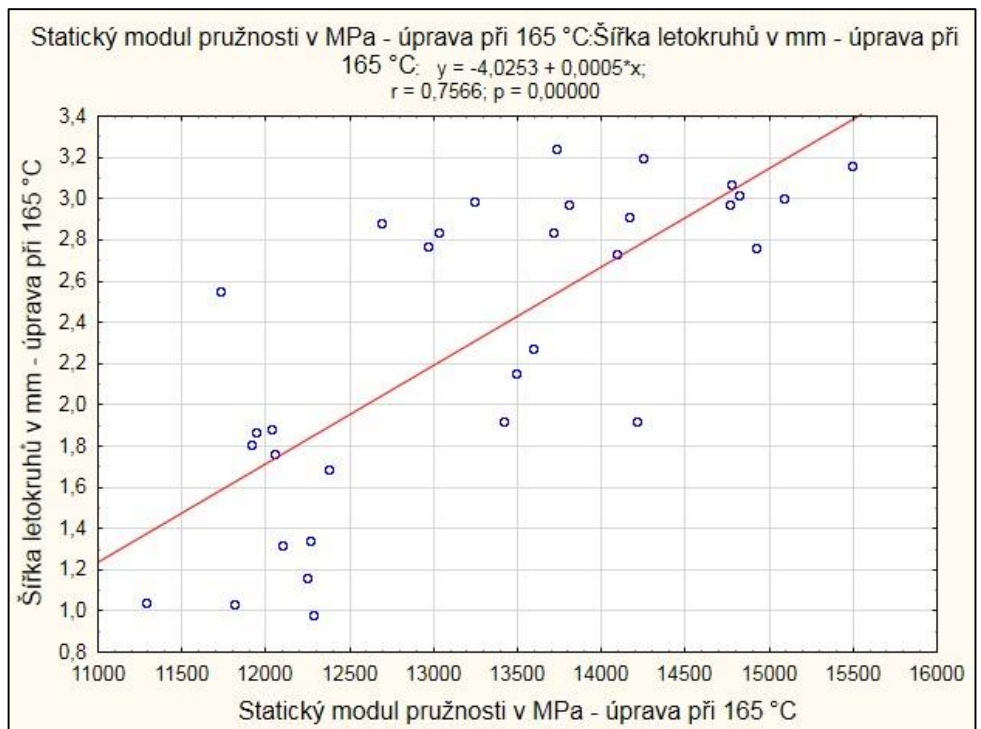
Příloha 11 - Graf závislosti statického modulu pružnosti na hustotě - úprava při 165 °C



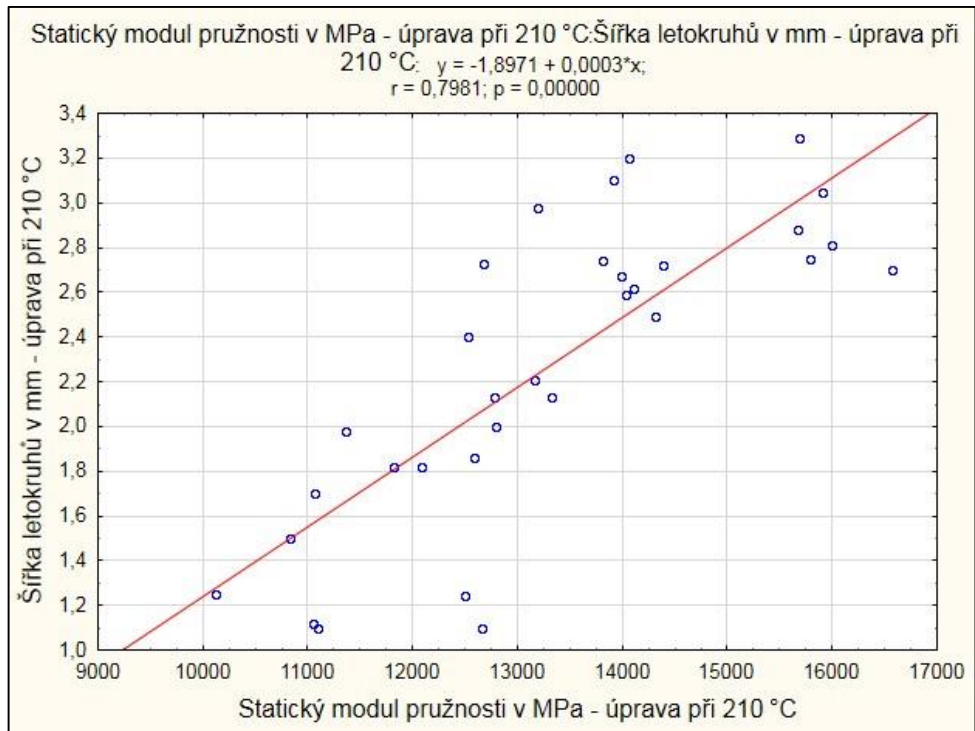
Příloha 12 – Graf závislosti statického modulu pružnosti na hustotě - úprava při 210 °C



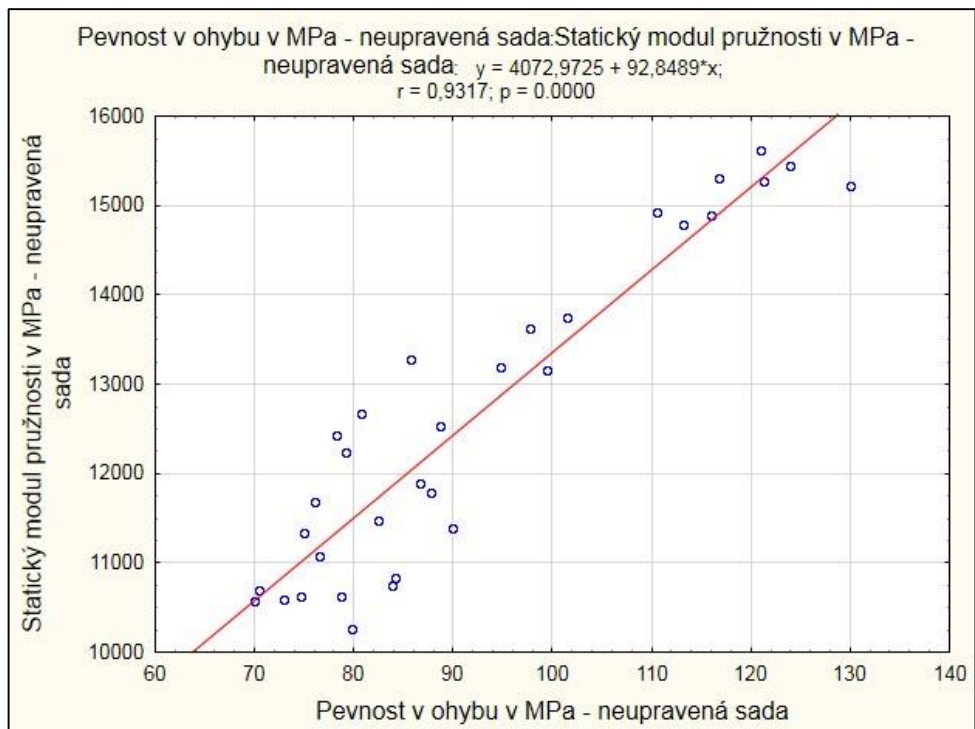
Příloha 13 - Graf závislosti statického modulu pružnosti na šířce letokruhů - neupravená sada



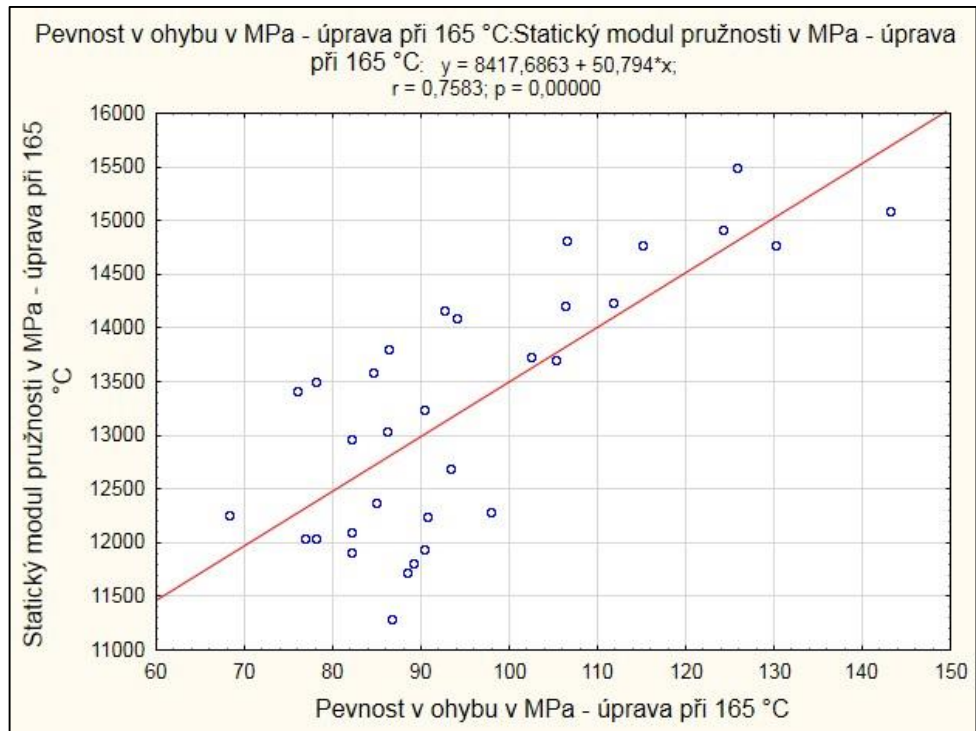
Příloha 14 - Graf závislosti statického modulu pružnosti na šířce letokruhů - úprava při 165 °C



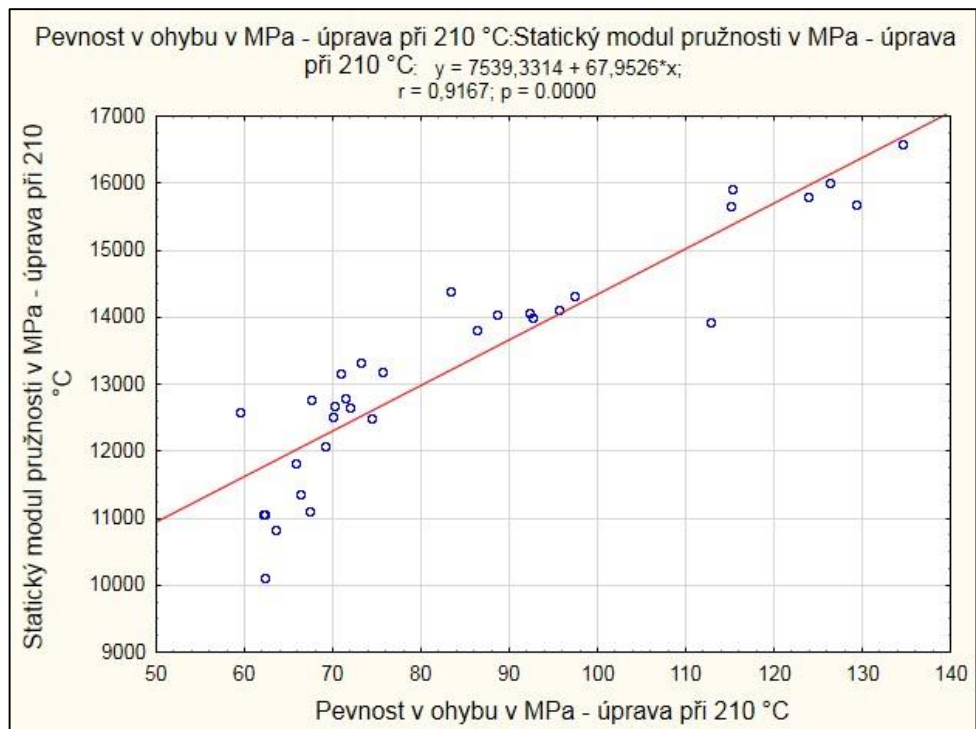
Příloha 15 - Graf závislosti statického modulu pružnosti na šířce letokruhů - úprava při 210 °C



Příloha 16 - Graf závislosti mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti - neupravená sada



Příloha 17 - Graf závislosti mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti - úprava při 165 °C



Příloha 18 - Graf závislosti mezi pevností v ohybu a statickým modulem pružnosti - úprava při 210 °C