

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra základního zpracování dřeva



Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného bukového dřeva

Bakalářská práce

Autor: Petr Morávek

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

Praha 2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petr Morávek

Dřevařství

Název práce

Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného bukového dřeva

Název anglicky

Assessment of elasticity and strength properties of untreated and thermally modified beech wood

Cíle práce

1. Zhodnotit rázovou houževnatost, dynamický a statický modul pružnosti, pevnost v ohybu bukového dřeva, 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 bukového dřeva pro vykonání zkoušek a na relevantním počtu provedení termické úpravy.
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

bukové 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 Příprava, vlastnosti a aplikace, TU Zvolen 2008, ISBN 978-80-228-1920-6.
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

2016/17 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Vlastimil Borůvka, PhD.

Garantující pracoviště

Katedra základního zpracování dřeva

Konzultant

doc. Ing. Aleš Zeidler, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 10. 5. 2016

doc. Ing. Milan Gaff, PhD.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 27. 1. 2017

prof. Ing. Marek Turčáni, PhD.

Děkan

V Praze dne 18. 04. 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci, „Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného bukového dřeva“ jsem vypracoval 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 autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetí osoby.

V Praze dne: _____

Poděkování

Tímto chci poděkovat vedoucímu práce Ing. Vlastimilu Borůvkovi, Ph.D. za vedení při vypracovávání této bakalářské práce a za přínosné rady. Také chci poděkovat Ing. Tomášovi Holečkovi za pomoc při měření a za přípravu vzorků k měření. Dále bych chtěl poděkovat České zemědělské univerzitě v Praze za poskytnutí prostoru a vybavení k měření dat potřebných k vypracování této bakalářské práce.

ABSTRAKT

Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného bukového dřeva

(Assessment of elasticity and strength properties of untreated and thermally modified beech wood)

Souhrn

Bakalářská práce se zabývá změnami, které v bukovém dřevě nastávají vlivem termické úpravy. Posuzuje se vliv úpravy na rázovou houževnatost, pevnost v ohybu, tvrdost, hustotu, statický a dynamický modul pružnosti. V práci se porovnávají tři sady zkušebních vzorků (referenční sada, sada upravená při 165 °C a sada upravená při 210 °C). Po porovnání výsledků bylo zjištěno, že teplotní úprava dřeva má vliv na jeho mechanické vlastnosti. V práci jsou uvedeny grafy, kde je znázorněn vývoj vlastností na stupních úpravy. Dále je zde obsažena tabulka s významnými hodnotami, které vyšly z měření (aritmetický průměr, směrodatná odchylka, maximální a minimální hodnota). V níže uvedených grafech je také znázorněna závislost mezi některými vybranými vlastnostmi.

Summary

This bachelor thesis is considered with changes in beech wood influenced by thermal modification. It analyses the modification influence on impact strength, flexural strength, rigidity, density, static and dynamic modul of elasticity. Three sets of trial samples are compared in this thesis (referential set, set customised on 165 °C and set customised on 210 °C). After the comparison was find out, that thermal modification has influence on his mechanical properties. In the thesis are presented graphs, where is shown the progression of properties on stages of modification, and table with important values, which came out of the measurement (aritmical

average, standart deviation, maximal and minimal value). In lower introduced graphs is shown the dependency between some chosen properties.

Klíčová slova

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

Keywords

beech wood, thermal treatment, properties, static dynamic modulus of elasticity, impact strength, flexural strength, hardness

OBSAH

| | |
|--|----|
| ÚVOD..... | 1 |
| 1 CÍL PRÁCE | 2 |
| 2 ROZBOR PROBLEMATIKY | 3 |
| 2.1 Zkoumaná dřevina | 3 |
| 2.2 Termická úprava..... | 5 |
| 2.2.1 Historie..... | 6 |
| 2.2.2 Postup výroby | 7 |
| 2.3 Vybrané vlastnosti..... | 8 |
| 2.3.1 Šířka letokruhu | 8 |
| 2.3.2 Hustota dřeva..... | 9 |
| 2.3.3 Ohybová pevnost | 10 |
| 2.3.4 Pružnost dřeva | 10 |
| 2.3.5 Houževnatost dřeva | 11 |
| 2.3.6 Tvrdost dřeva | 12 |
| 2.3.7 Vlhkost dřeva | 12 |
| 3 METODIKA..... | 13 |
| 3.1 Výběr vzorků | 13 |
| 3.2 Tepelná úprava vzorků..... | 15 |
| 3.3 Stanovení šířky letokruhů | 16 |
| 3.4 Stanovení hustoty | 16 |
| 3.5 Stanovení rázové houževnatosti | 17 |
| 3.6 Stanovení dynamického modulu pružnosti FAKOPP..... | 19 |
| 3.7 Stanovení statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu | 20 |
| 3.8 Stanovení tvrdosti | 21 |
| 3.9 Stanovení vlhkosti | 23 |
| 4 VÝSLEDKY A DISKUZE | 24 |
| 4.1 Hustota..... | 26 |
| 4.1.1 Vzájemná závislost hustot u velkých a malých vzorků..... | 27 |
| 4.1.2 Vliv hustoty na pevnost v ohybu..... | 29 |
| 4.1.3 Vliv hustoty na tvrdost na tangenciální ploše..... | 29 |
| 4.2 Vlhkost | 30 |
| 4.3 Statický modul pružnosti..... | 31 |

| | | |
|----------------------|--|----|
| 4.3.1 | Závislost statického modulu pružnosti na dynamickém modulu pružnosti | 32 |
| 4.3.2 | Závislost statického modulu pružnosti na ohybové pevnosti | 32 |
| 4.4 | Pevnost v ohybu | 33 |
| 4.5 | Dynamický modul pružnosti | 34 |
| 4.6 | Rázová houževnatost | 35 |
| 4.7 | Tvrдост | 36 |
| 4.7.1 | Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše | 38 |
| 4.7.2 | Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše..... | 39 |
| ZÁVĚR..... | | 40 |
| ZDROJE | | 41 |
| NORMY..... | | 43 |
| SEZNAM GRAFŮ | | 44 |
| SEZNAM TABULEK | | 44 |
| SEZNAM OBRÁZKŮ | | 44 |
| SEZNAM PŘÍLOH..... | | 45 |
| PŘÍLOHA | | 47 |

ÚVOD

V dnešní době se dřevo využívá v exteriérech i interiérech v čím dál tím náročnějších podmínkách jako je vysoká vlhkost nebo vysoké riziko napadení biologickými škůdci. V náročnějších podmínkách se využívá exotické dřevo s vyšší odolností a trvanlivostí. Se současným rozvojem technologií zpracování dřeva se dají nahradit dražší exotické dřeviny za domácí s vhodnými úpravami. Termickou úpravou se u dřeva zvyšuje jeho odolnost vůči vlhkosti a biotickým škůdcům. Na tepelnou úpravu se využívají dřeviny méně trvanlivé a netrvanlivé.

Bakalářská práce se bude skládat ze dvou částí z jedné teoretické a druhé praktické. První část bude věnována dřevině a jejím vlastnostem, dále v této části bude popsána metodika provádění jednotlivých zkoušek, které budou prováděny na vzorcích. V praktické části bude posuzovat a vyhodnocovat výsledky jednotlivých měření.

V práci bude zkoumané bukové dřevo bez úprav a s tepelnými úpravami při 165 a 210 °C. Vzorky budou ve dvou skupinách po třech sériích 31 kusů a budou na nich prováděny zkoušky dle platných norem za normovaných podmínek.

Cílem práce je vyhodnotit změny pevnostních a pružnostních vlastností bukového dřeva. K vyhodnocení výsledků bude zjišťována rázová houževnatost, pevnost v ohybu, dynamický a statický modul pružnosti. Po vyhodnocení všech výsledků bude možné určit, zda je pro bukové dřevo vhodné použití termické úpravy a jaké teploty či nikoliv.

1 CÍL PRÁCE

V této bakalářské práci je cílem zjišťování vybraných mechanických vlastností tepelně upraveného bukového dřeva na určité stupně úpravy. Vliv na mechanické vlastnosti se bude zjišťovat u vzorků upravených při 165 °C a u vzorků upravených při 210 °C. Pro porovnávání vlastností budou všechna měření prováděna i na referenčních vzorcích bez úprav. U jednotlivých sérii se bude zjišťovat rázová houževnatost, pevnost v ohybu, dynamický a statický modul pružnosti. Dále bylo k zadání přidáno zjišťování a posuzování tvrdosti na jednotlivých plochách. V práci bude následně posuzována vzájemná závislost mezi vybranými zkouškami. Výsledné hodnoty budou porovnávány s odbornou literaturou.

2 ROZBOR PROBLEMATIKY

2.1 Zkoumaná dřevina

Buk lesní, znám pod latinským názvem *Fagus sylvatica* je listnatá opadavá dřevina. Charakteristickým znakem vzrostlého stromu je šedá hladká borka (kůra). U nás se buk řadí mezi nejrozšířenější listnatou dřevinu a v českých lesích zabírá 7,7 % rozlohy z celkové plochy lesních porostů. Je to tolerantní dřevina na zástín, roste jak v zápoji, tak samostatně. V zápoji vytváří dlouhé rovné kmeny a větví se ve vyšších výškách. Pokud roste samostatně, tvoří často pokroucené kmeny, větví se v nízké výšce a vytváří košaté koruny. Strom má srdčitý kořenový systém, který ho drží pevně v půdě. Dřevina je velmi náchylná na náhlé oslunění a patří mezi středně trvanlivé dřeviny. Dorůstá výšek 35–40 m a dožívá se 200–400 let. Plodem buku je trojhranná nažka zvaná bukvice. Listy jsou krátké řapíkaté s eliptickým tvarem, na okrajích zubaté a zvlněné.¹

Buk je bělová dřevina s vyzrálým dřevem, které má narůžovělou barvu. U buku se velmi často vyskytuje nepravé jádro (tmavě zbarvená část dřeva okolo dřene jasně ohraničená, nemusí být ohraničena letokruhem, jako je tomu u jádrových dřevin). Buk je roztroušeně pórovitá dřevina s vysokým obsahem ligninu (dobře se plastifikuje). Dřevo je tvrdé, pevné a málo pružné a je využíváno na namáhané plochy, jako jsou schody a podlahy. Dále se také využívá na ohýbaný nábytek, jelikož se snadno plastifikuje.²

¹ BOTANY.CZ: *FAGUS SYLVATICA* L. – buk lesní / buk lesný [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/fagus-sylvatica/>

² Dřevo centrum: *Buk lesní* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/buk-lesni>



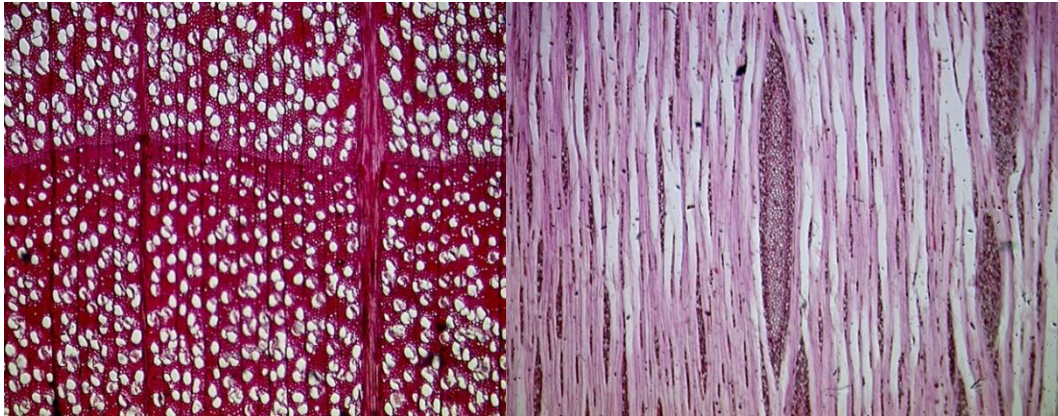
Obrázek 1 Makroskopické řezy buku

Zdroj:

http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?dr evina=bk

Dřevo buku má velké dřeňové paprsky, které jsou viditelné na všech řezech. Na tangenciální ploše tvoří krátké tmavé čárky. V radiální rovině jsou viditelné jako větší lesklé plochy a v příčném řezu vytváří tenké čáry. Patří mezi roztroušeně pórovité dřeviny s vyzrálým dřevem. Dřeňové paprsky jsou homogenní, vícevrstevné útvary, vrstevnatost jednotlivých dřeňových paprsků je 1–25 parenchymatických buněk. Tracheidy jsou u bukového dřeva vláknité, cévovité a vazicentrické. Na cévách se vyskytuje jak žebříčková, tak jednoduchá perforace.³

³ *Lexikon dřev: buk lesní* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?dr evina=bk



Obrázek 2 Mikroskopická stavba buku

Zdroj:

http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?dr evina=bk

2.2 Termická úprava

Termická úprava je trvale udržitelný způsob zvýšení odolnosti dřeva pomocí ekologicky šetrného způsobu tepla a páry. Tepelná úprava mění vlastnosti dřeva a zvyšuje jeho odolnost vůči povětrnostním vlivům, a tak rozšiřuje možnosti použití dřeva jako trvanlivého materiálu. Změnou jeho vlastností se stabilizují tvarové změny dřeva. Ve dřevě se za zvýšené teploty rozdělí hemicelulózy a tím se sníží obsah živin pro tvorbu hub. Tepelná úprava sníží vlhkost ve dřevě na 4–6 %, zároveň se také sníží obsah rovnovážné vlhkosti oproti neupravenému dřevu až na polovinu. V průběhu výroby termicky upraveného dřeva je nejdůležitějším prvkem pára, která zabraňuje tomu, aby dřevo během výroby popraskalo a znehodnotilo se. Termicky upravené dřevo má vyšší termo izolační vlastnosti než neupravené dřevo. Během výroby se odstraní pryskyřice za zvýšené teploty a vlhkosti (u jehličnatých dřevin).⁴

⁴ LUNAWOOD: THERMOWOOD [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.lunawood.com/thermowood/improved-natural-durability/#stability>



Obrázek 3 Vzorky tepelně upraveného bukového dřeva – zleva je referenční úprava, úprava na 165 °C a vpravo úprava na 210 °C

2.2.1 Historie

Způsob ochrany dřeva pomocí tepelné úpravy znali již naši předkové, kteří opalovali dřevo, aby zvýšili jeho trvanlivost a odolnost vůči vnějším vlivům. Způsob modifikace dřeva pomocí termické úpravy byl popsán již ve 20. letech 20. století. Největší podíl na rozvinutí této technologie tepelné úpravy mají ve Finském výzkumném centru VTT, kde se zabývali vývojem technologie zpracování pro finský průmysl. V 90. letech 20. století se podařilo díky moderním technologiím zavést průmyslovou výrobu tepelně upraveného dřeva. Z velké části k vývoji této technologie zpracování dřeva přispěla vysoká cena cizokrajných a kvalitnějších dřevin. Byla snaha o využití domácích dřevin s takovou úpravou, aby se vlastnostmi přiblížily k těm dražším cizokrajným dřevinám. Nejvíce se upravovala borovice, z důvodu její ceny. Tento druh úpravy se začal nazývat thermowood, je to jeho nejčastější obchodní název.⁵

⁵ *Dřevo stavitel: Tepelná modifikace dřeva - Úvod do problematiky* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/tepelna-modifikace-dreva-1-dil>

2.2.2 Postup výroby

Dřevo určené pro tepelnou úpravu se nejprve tvarově upravuje, tak aby jeho průřez byl co nejmenší podle potřeb. Způsob výroby je rozdělen do třech fází, při kterých se dřevo upravuje pomocí tepla.⁶

První fáze

V první fázi se dřevo za pomoci horké páry vysuší a prudce ohřeje na teplotu 100 °C. Materiál se dále pozvolna ohřívá až na teplotu 150 °C, jeho vlhkost se v této fázi blíží k 0 % vlhkosti. Doba trvání první fáze je závislá na druhu, tloušťce a počáteční vlhkosti dřeviny.⁷

Druhá fáze

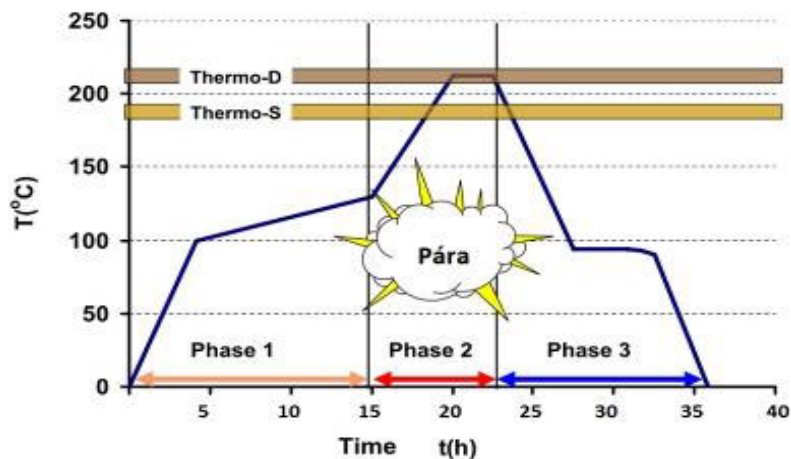
Materiál je v této fázi ohřát na požadovanou teplotu a jeho teplota se udržuje podle požadované teplotní úpravy. Po dosažení požadované teploty se tepelná hladina udržuje v intervalu 2–3 hodiny. Při výrobě se používá pára jako prevence před vznícením a znehodnocením dřeva.⁸

Třetí fáze

Tato fáze ve výrobě slouží k ochlazení a vyrovnání teploty s okolím. Ochlazování musí probíhat pozvolně, tak aby se ve dřevě neobjevovaly trhliny. Při ochlazování se dřevo také vlhčí, aby se vyrovnalo s vlhkostí v okolí. Proces ochlazování

^{6,7,8} Výrobní proces ThermoWood® – tepelně upravené profily: Výrobní proces materiálu ThermoWood®. *PROKOM* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/128-drevene-profily-tepelne-upravene-specialni-technologie-thermowood>

je časově závislý na zvolené teplotě úpravy a trvá 5–15 hodin. Na konci výrobního procesu by dřevo mělo mít vlhkost 5–7 %.⁹



Obrázek 4 Postup výroby thermowoodu

Zdroj: <http://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/128-drevene-profily-tepelne-upravene-specialni-technologie-thermowood>

2.3 Vybrané vlastnosti

V této bakalářské práci se budou zjišťovat určité vlastnosti dřeva, které souvisí s vybranými vlastnostmi. Dřevo má za jistých podmínek určité vlastnosti, které lze zjišťovat a poměřovat mezi sebou a také lze zjišťovat jejich vzájemnou souvislost.

2.3.1 Šířka letokruhu

Šířkou letokruhu se rozumí přírůst dřevní hmoty za jedno vegetační období v radiálním směru. Dřevo přirůstá pomocí dělivého pletiva (kambia), které se nachází na vnějším okraji dřevní hmoty u rostoucího stromu. U dřevin

⁹ Výrobní proces ThermoWood® – tepelně upravené profily: Výrobní proces materiálu ThermoWood®. *PROKOM* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/128-drevene-profily-tepelne-upravene-specialni-technologie-thermowood>

rostoucích v pásmu s měnícími se klimatickými podmínkami vytvářejí letokruhy zřetelnou hranici konce jednoho vegetačního období. V subtropických pásmech, kde se podmínky nemění nebo se mění minimálně, se letokruhy vytvářejí kontinuálně a netvoří výrazné hranice.¹⁰

Letokruhy na příčných řezech všech dřevěných částí stromu tvoří koncentrické vrstvy kolem dřevě (biologická osa stromu). V podmínkách, kde se mění klima (např. roční období) se na dřevě vytvářejí různě barevné letokruhy, což je zapříčiněno rozdílnou strukturou jarního a letního dřeva. Na radiálních řezech letokruhy vytvářejí rovné pásy a na tangenciálních řezech tvoří parabolické útvary.¹¹

Každý letokruh se skládá ze dvou vrstev - jarního a letního dřeva. Jarní dřevo je většinou řidší a vytváří se na počátku vegetačního období, kdy dochází k nejintenzivnějšímu růstu dřeva a letní dřevo je výrazně tmavší a hustší, vytváří se až v druhé polovině vegetačního období. Rozdílnost zbarvení jednotlivých vrstev je dána anatomickou stavbou dřeviny (rozdílnou buněčnou stavbou). Stavba letokruhů se mění s druhem dřeviny, rozlišujeme jehličnaté a listnaté, ty dále můžeme dělit na kruhovité a roztroušeně pórovité.¹²

2.3.2 Hustota dřeva

Hustota dřeva se udává jako hmotnost na jednotku objemu. Mezi základní jednotky hustoty patří kg/m^3 a g/cm^3 . Hustota dřeva je ovlivněna vlhkostí a stavbou dřeva. Nejčastěji se měří při laboratorních podmínkách teploty 20 °C a relativní vlhkosti vzduchu 65 %. Dřeviny dělíme do tří skupin podle hustoty, při 12 % absolutní vlhkosti na dřevo s nízkou hustotou ($\rho \leq 550 \text{ kg/m}^3$), střední hustotou

^{10,11,12} ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. *Stavba dřeva*. Dotisk, 2005 první vydání, 2002. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně: v edičním středisku MZLU v Brně, 2002. ISBN 80-7157-636-0.

(550–750 kg/m³) a vysokou hustotou ($\rho \geq 750 \text{ kg/m}^3$). Za nejméně husté dřevo na světě patří balza s hustotou 130 kg/m³ a za nejhustší dřevinu pokládáme guajak s hustotou 1350 kg/m³.¹³

2.3.3 Ohybová pevnost

Pevnost v ohybu je schopnost dřeva odolávat určité síle, která působí kolmo na plochu zkoušeného vzorku. Měření se provádí na zkušebních tělesech o normovaných rozměrech 20 x 20 x 300 mm a měří se na stroji vhodném k měření ohybového napětí, to se udává v MPa. Měření se může provádět pomocí dvou metod, které se dají mezi sebou porovnávat. První metoda spočívá v tom, že se zkušební vzorek uloží na podpěry ve vzdálenosti 240 mm a na středu se začne zatěžovat silou. Druhá metoda je podobná jako ta první, těleso se uloží na podpěry ve vzdálenosti 240 mm a je zatěžováno dvěma silami, které jsou rozloženy po třetinách (po 80 mm). Zkušební tělesa se mohou ukládat dvěma způsoby tak, aby síla působila kolmo na radiální plochu, nebo na tangenciální plochu.¹⁴

2.3.4 Pružnost dřeva

Dřevo má širokou škálu použití a je důležité znát jeho pružnostní vlastnosti, které se vyznačují tím, že se dřevo po stlačení vrátí do původního tvaru. Pružnostní parametry se využívají například při lisování (např. dých), nebo při sušení tak, abychom během výroby nezměnili vlastnost konečného výrobku. Pružnosti dřeva se také využívá při konstruování dřevěných konstrukcí, které jsou namáhané.

¹³ ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. *Stavba dřeva*. Dotisk, 2005 první vydání, 2002. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně: v edičním středisku MZLU v Brně, 2002. ISBN 80-7157-636-0.

¹⁴ POŽGAJ, Alexander. *METÓDY ZJISŤOVANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DREVA A DREVNÝCH VEĽKOPĽOŠNÝCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁĽOV*. III. Edičné stredisko VŠLD Zvolen: Vysoká škola lesnícká a drevárska Zvolen, 1987.

Mechanické vlastnosti dřeva ovlivňují jeho použití a vhodnost pro určité konstrukce. Pružnost můžeme kvantifikovat pomocí těchto charakteristik: moduly pružnosti (E), Poissonovými čísly (μ), mezí úměrnosti a energií pružné deformace (W_p).¹⁵

Pružnost dřeva je definována jako schopnost dřeva dosáhnou původních tvarů, jaké mělo dřevo před namáháním. Z fyzikálního hlediska je pružnost stav, při kterém jsou atomové vzdálenosti vratné po odlehčení. Z hlediska submikroskopické stavby dřeva nemusí ve dřevě nastávat návratné procesy. Z pozice termodynamiky se mění i objem dřeva, a proto je možné považovat celý proces změny za adiabatický.¹⁶

2.3.5 Houževnatost dřeva

Houževnatost nebo také přerážecí pevnost je schopnost dřeva odolávat rázovému namáhání. Na rázovou houževnatost má největší vliv druh dřeviny, stavba dřeva a směr působící síly. Zkoušení rázové houževnatosti se provádí na zkušebních tělesech, které se zakládají do stroje (přerážecí kladivo), který měří přerážecí práci (práce potřebná na přeražení tělesa). Princip spočívá v tom, že kladivo má v horní pozici nejvyšší energii a po přeražení tělesa se kladivo dostane do určité maximální pozice a tam ukáže hodnotu přerážecí práce. Výsledná hodnota se musí přepočítat na výslednou rázovou houževnatost.¹⁷

^{15,16} POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

¹⁷ POŽGAJ, Alexander. *METÓDY ZJISŤOVANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DREVA A DREVNÝCH VEĽKOPLOŠNÝCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV*. III. Edičné stredisko VŠLD Zvolen: Vysoká škola lesnícká a drevárska Zvolen, 1987.

2.3.6 Tvrdość dřeva

Tvrdość se rozumí schopnost dřeva odolávat vnikání jiného tělesa do jeho struktury. Nejvýrazněji se tvrdość dřeva projevuje při opracování tím, že otupuje nástroje, které vnikají do struktury dřeva (řezání, frézování, ...) a také se projevuje při použití dřeva v náročných podmínkách (podlahy, schody, ...). Tvrdość dřeva se měří na tvrdoměrech, které pracují na principu vnikání určitého tělesa do dřeva. Ke zjišťování tvrdości se nejčastěji používá Brinellova zkouška (do materiálu se vtlačuje kulička o daných rozměrech), nebo Jankova zkouška (do materiálu se vtlačuje raznice).¹⁸

2.3.7 Vlhkość dřeva

Vlhkość dřeva je množství vody ve dřevě a udává se v procentech (%). Vyjádří se pomocí poměru hmotnosti vody a hmotnosti absolutně suchého vzorku, pokud se jedná o absolutní vlhkość. Pokud vyjádříme vlhkość ve dřevě pomocí poměru hmotnosti vody k hmotnosti vlhkého vzorku jedná se o relativní vlhkość dřeva. Obsah vody ve dřevě se nejčastěji vyjadřuje jako absolutní vlhkość dřeva.¹⁹

Ve dřevě se vyskytují dva druhy vody (voda volná a voda vázaná). Voda volná se ve dřevě nachází v kapalném stavu nad BNV (cca 30 %) a vyskytuje se v mezibuněčných prostorech. Voda vázaná se ve dřevě vyskytuje v plynném stavu v buněčné stavbě dřeva, ze dřeva se odstraňuje pod BNV (cca 30 %).²⁰

^{18,19} POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

²⁰ POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

3 METODIKA

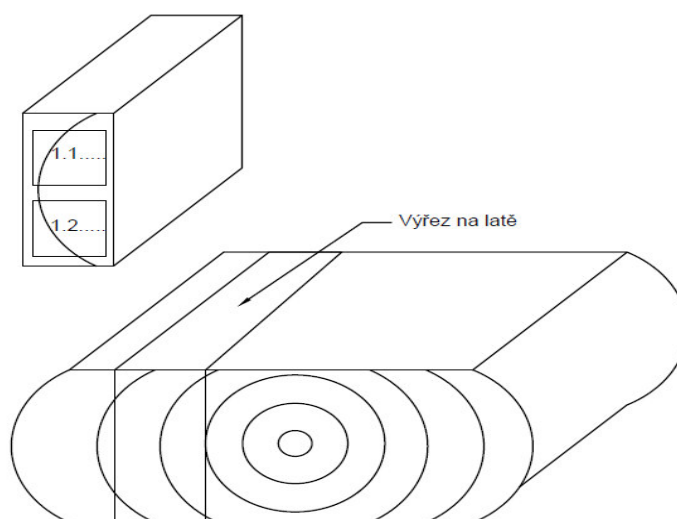
Zkoušky probíhaly na České zemědělské univerzitě v Praze v dřevařském pavilonu. Byly prováděny v laboratořích určených k měření jednotlivých mechanických vlastností. Vzorky byly před zkouškou naklimatizovány na podmínky určené k měření na 20 °C a na relativní vlhkost vzduchu 65 %.

Postupy jednotlivých zkoušek probíhaly v souladu s platnými normami. Vlastní zkoušení probíhalo dle časových možností studenta a zároveň podle volného přístupu k jednotlivým měřicím zařízením. Měření probíhalo pod dohledem a odborným zaučením Ing. Vlastimilem Borůvkou, PhD., nebo Ing. Tomášem Holečkem. Vzorky se připravovaly v truhlářské dílně České zemědělské univerzity v Praze v dřevařském pavilonu, dále se vzorky převezly na školní pracoviště v Kostelci nad Černými lesy, kde se termicky upravovaly. Po úpravách se vrátili na Českou zemědělskou univerzitu v Praze, kde na nich byly prováděny jednotlivé mechanické zkoušky. Před měřením se vzorky uložily do klimatizační komory, aby se klimatizovaly na podmínky určené ke zkouškám. Po naklimatizování se vzorky zvážily a změřily pro zjištění hustoty u velkých vzorků, rozměry bylo nutné zjistit pro další zkoušky. Na tělesa se narýsovaly čárky v dané vzdálenosti od středu pro měření rychlosti prostupu zvuku tělesem (FAKOPP). Vzorky se rozdělily na dvě skupiny po 93 vzorcích (tři druhy úpravy po 31 vzorcích), na první skupině byla měřena rázová houževnatost, konce byly následně odřezány na zkoušku tvrdosti. Druhá skupina vzorků byla určena na měření statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu.

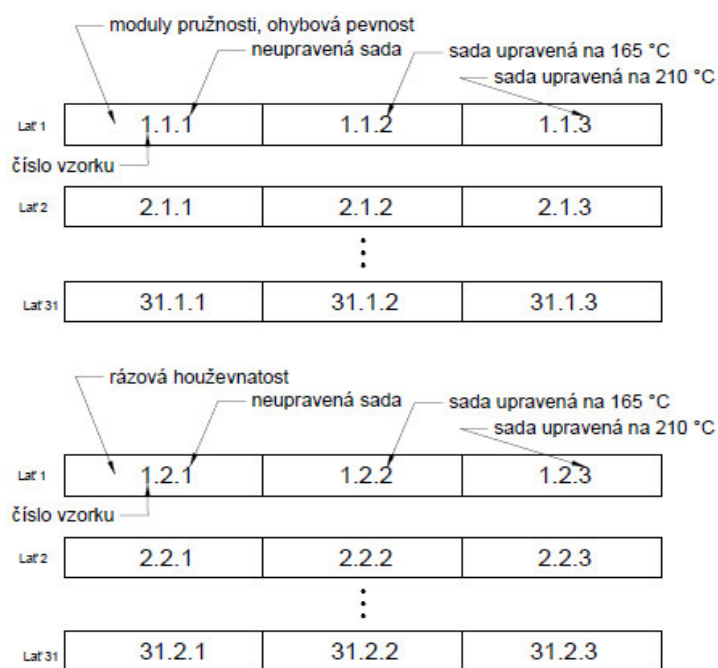
3.1 Výběr vzorků

Vzorky byly připraveny v souladu s normou ČSN 49 0101. Byly vytvořeny latě, ve kterých se za sebou nacházela tři zkušební tělesa o délkách 300 mm a příčných rozměrech 20x20 mm, ta se následně dělila a každé zkušební těleso bylo upraveno na určitou teplotní úpravu. Latě byly vyřezány z bukových fošen o tloušťce 55 mm.

Latě nad sebou byly paralelně, tak aby vzorky na různé druhy zkoušek měly stejné, nebo podobné vlastnosti. První část z jedné strany byla určena jako referenční (bez úprav), druhá (prostřední část) byla určena na úpravu při 165 °C a třetí část byla určena pro úpravu při 210 °C. Po naměření rázové houževnatosti, dynamického a statického modulu pružnosti byly dlouhé vzorky přelomeny a z přelomených vzorků byly odřezány konce (30 mm od konce). Vzorků bylo připraveno 62 pro každý způsob úpravy. Následně se rozdělovaly do skupin na rozdílné zkoušky.



Obrázek 5 Umístění výřezu a latí ve fošně



Obrázek 6 Umístění vzorků v lati

3.2 Tepelná úprava vzorků

Vzorky byly tepelně upraveny v termokomoře, která se nachází na školním pracovišti České zemědělské univerzity v Kostelci nad Černými lesy. Úprava probíhala v komoře od firmy KATRES a vzorky byly před úpravou vysušeny a klimatizovány na laboratorní podmínky 20 °C za relativní vlhkosti vzduchu 65 %.



Obrázek 8 Termokomora (foto: Holeček)



Obrázek 9 Uložení vzorků do termokomory (foto: Holeček)



Obrázek 7 Graf průběhu úprav (foto: Holeček)

3.3 Stanovení šířky letokruhů

Šířkou letokruhu se rozumí tloušťka přírůstu dřeva za jedno vegetační období. Dřevo narůstá pomocí dělivých pletiv (kambia) na vnější straně dřevní hmoty. U našich dřevin vyznačuje hranice letokruhu období, kdy má strom vegetační klid.²¹

Šířka letokruhů se měří z důvodu zjištění vlivu šířky letokruhu na mechanické a fyzikální vlastnosti dřeva. Rozdílná šířka letokruhu je ovlivněna nejvíce růstem dřeviny a polohou, kde se dřevina během růstu nachází. Ke zjištění šířky letokruhů je potřebné naskenovat příčné řezy vzorků, po naskenování je zapotřebí softwaru pro obrazovou analýzu, kde je potřeba naskenovaný obraz ručně změřit a dále přepočíst z pixelu na milimetry. V této práci byla kvalita obrázku 800 pix a pomocí ní byla šířka letokruhu přepočítána přes vzorec

$$s = \frac{\bar{X} * 2,54}{d_{pi}}$$

s – šířka letokruhu v (cm),

\bar{X} – průměrná hodnota (pix),

d_{pi} – kvalita obrázku (pix).

3.4 Stanovení hustoty

U stanovování hustoty dřeva je zapotřebí vzorek zvážit a změřit jeho prostorové rozměry. U dřeva se dá posuzovat hustota odhadem, kdy ho vezmeme do ruky a odhadneme jeho hustotu podle zkušeností z praxe. Pokud je vzorek lehký znamená to, že je hustota nízká a pokud je vzorek těžší, tak to znamená, že má vyšší hustotu. Při zjišťování hustoty musíme uvažovat s vlhkostí dřeva, která nám výrazně ovlivňuje hmotnost. Hustota se vypočítá jako poměr hmotnosti

²¹ ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. *Stavba dřeva*. Dotisk, 2005 první vydání, 2002. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně: v edičním středisku MZLU v Brně, 2002. ISBN 80-7157-636-0.

k objemu tělesa.²² Hustota se stanovuje dle vzorce pro výpočet dle normy ČSN 49 0108

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ – hustota dřeva (kg/m³),

m – hmotnost v (kg),

V – objem (m³).

(ČSN 49 0108)

3.5 Stanovení rázové houževnatosti

Rázová houževnatost je schopnost dřeva absorbovat práci rázovým ohybem. U tohoto typu namáhání se měří síla potřebná pro přeražení tělesa a vyjadřuje se jako J/cm². Čím je síla potřebná pro přeražení vzorku vyšší, tím je dřevo houževnatější a odolnější vůči rázovému namáhání. Kvalita dřeva se dá posuzovat na základě zlomu, který vznikne po přeražení tělesa. Pokud je těleso houževnaté, tak vytváří střapatý zlom. Těleso s průměrnou houževnatostí se vyznačuje krátkými štěpky na straně, kde působí síla. Křehké dřevo se vyznačuje krátkými vlákny a rovným zlomem v místě namáhání. Při namáhání se deformace projevuje podle vláken a je závislá na čase za jak dlouho se těleso zlomí. Rázová houževnatost se zjišťuje pomocí Charpyho kladiva, na kterém se měří přerážecí práce. Na výslednou hodnotu má vliv vzdálenost podpěr, vlhkost, sklon vláken k plochám tělesa, teplota atd..²³ Práce potřebná na přeražení tělesa byla přepočítána na rázovou houževnatost dle normy ČSN 49 0117. Výpočet rázové houževnatosti probíhal podle vzorce

²² ČUNDERLÍK, Igor. *ŠTRUKTÚRA DŘEVA*. I. - 2009. Technická univerzita TU vo Zvolene: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. ISBN 978-80-228-2061-5.

²³ POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

$$A_w = \frac{W}{b * h}$$

A_w – rázová houževnatost při dané vlhkosti (J/cm²),

W – práce potřebná pro přeražení tělesa v (J),

b, h – příčný rozměr tělesa (cm).

(ČSN 49 0117)



Obrázek 12 Charpyho kladivo



Obrázek 10 Vzorky po přerážecí zkoušce bez úprav



Obrázek 11 Vzorky po přerážecí zkoušce s úpravou na 165 °C



Obrázek 13 Vzorky po přerážecí zkoušce s úpravou na 210 °C

3.6 Stanovení dynamického modulu pružnosti FAKOPP

Dynamický modul pružnosti je nedestruktivní zkouška dřeva, při které se zjišťuje čas průchodu ultrazvuku dřevem. Patří ke zkouškám, při kterých se neporuší tvar ani vlastnosti dřeva.

Zjišťuje se čas, za jak dlouho projde ultrazvuk dřevem v dané vzdálenosti. Na materiál se přiloží dva Piezoelektrické ultrazvukové vysílače do určité vzdálenosti. Vysílače měří čas průchodu ultrazvuku materiálem pod nimi pomocí pulzů, které do dřeva vysílají. Pro správnost výsledku je zapotřebí provést jejich korekci, tak abychom dosáhli správného výsledku. Na tělese vyznačíme určité vzdálenosti a změříme čas průchodu na všech pozicích, výsledky zpracujeme a zjistíme korekční koeficient.^{24,25} Výpočty probíhaly podle vzorců

$$v = \frac{1000 * d}{t - korekce}$$

v – rychlost prostupu zvuku (m/s),

d – vzdálenost sond od sebe v (mm),

t – čas průchodu zvuku (μm),

korekce – korekce času průchodu zvuku (μm),

$$E_{dyn,w} = \frac{\rho * v}{1000}$$

E_{dyn,w} – dynamický modul pružnosti (MPa),

ρ – hustota dřeva (kg/m³),

v – rychlost prostupu zvuku (m/s),

²⁴ Fakopp: UltraSonic Timer [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf>

²⁵ KLOIBER, Michal. *Porovnání dynamického a statického modulu pružnosti poškozeného dřeva* POROVNÁNÍ DYNAMICKÉHO A STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI POŠKOZENÉHO DŘEVA [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267712842_Porovnani_dynamickeho_a_statickeho_modulu_pruznosti_poskozeneho_dreva_POROVNANI_DYNAMICKEHO_A_STATICKEHO_MODULU_PRUZNOSTI_POSKOZENEGO_DREVA



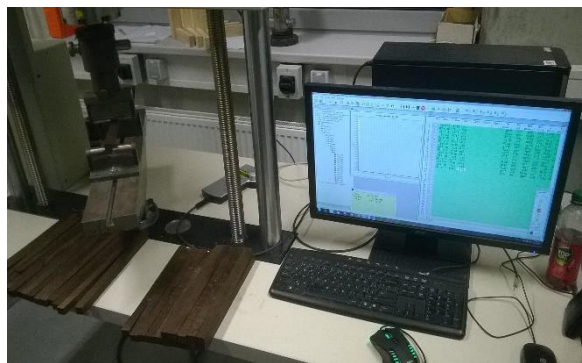
Obrázek 14 Přístroj na měření rychlosti prostupu signálu

Zdroj:

<http://fakopp.com/docs/products/ultrasonic/UltrasonicGuide.pdf>

3.7 Stanovení statického modulu pružnosti a pevnosti v ohybu

Modul pružnosti znázorňuje vnitřní odpor dřeva proti pružné deformaci. S vyšším modulem pružnosti se napětí potřebné pro překonání pružnosti dřeva zvyšuje. Po překonání pružnosti dřeva vzniká deformace. Pro měření v této bakalářské práci byl statický modul pružnosti měřen v radiálním směru E. Z průběhu napětí – deformačního diagramu vyplývá, že po mez úměrnosti je lineární průběh. Po mez úměrnosti má tvar Hookeova zákona, tento poznatek má fyzikální význam. Modul pružnosti je možné charakterizovat jako poměr mezi podílem meze napětí a poměrné deformace. Modul se udává v Pa, ale pro lepší práci s čísly se udává v MPa. Měření statického modulu pružnosti probíhalo v souladu s normou ČSN 49 0116 a mez pevnosti s normou ČSN 49 0115 (normy platí pro čtyřbodový ohyb). Vzorky byly vkládány do měřicího stroje tak, aby síla působila v radiálním směru.



Obrázek 16 Trhací stroj UTS 50



Obrázek 15 Uložení tělesa na podpěry

3.8 Stanovení tvrdosti

Tvrdość dřeva je schopnost odolávat vnikání jiného tělesa do struktury materiálu, nejčastěji se tvrdost projevuje při opracování tím, že otupuje nástroje. Tato vlastnost dřeva se také projevuje při stavebních konstrukcích v místech, kde na sebe dosedají dvě plochy. Pro zjišťování tvrdosti dřeva je možné použít více způsobů, např. Brinellovu tvrdost, Jankovu tvrdost apod.. V této bakalářské práci se tvrdost zjišťuje za pomoci Brinellovy zkoušky, která se vyznačuje tím, že do materiálu je vlačována ocelová kulička o průměru 10 mm. Pro naši zkoušku byl vytvořen tlak 500 N a 250 N. Na dřevě se měří průměr otlaku a z něho se vypočítá tvrdost. Měření probíhalo na tangenciální a na radiální ploše zkušebního tělesa. Pro měření tvrdosti byly vzorky upraveny na menší rozměr 20 x 20 x 30 mm,

tak aby se lépe vkládaly do měřicího zařízení (tvrdoměr).²⁶ Zkoušky probíhaly podle normy určené pro tvrdé nekovové materiály ČSN 64 0128. Tvrdost zkoušeného tělesa si vypočítal stroj sám pomocí vzorce

$$H_B = \frac{2 * F}{\pi * D * (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

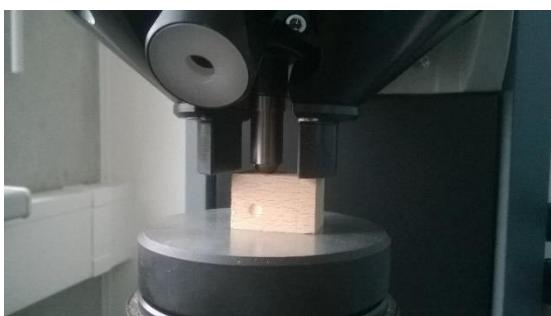
H_B – Brinellova tvrdost (MPa),

F – síla působící na kuličku (N),

D – průměr kuličky (mm),

d – průměr otláčené plochy na vzorku (mm),

(ČSN 64 0128)



Obrázek 17 Detail měření tvrdosti



Obrázek 18 Stroj na měření tvrdosti pomocí Brinellovy zkoušky

²⁶ POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

3.9 Stanovení vlhkosti

Vlhkost dřeva byla zjištěna podle nejběžnější a nepřesnější metody tzv. gravimetrie. Princip zjišťování vlhkosti dřeva spočívá v sušení vzorků v horkovzdušných sušárnách s cirkulací vzduchu pro odvod vlhkosti. Vysoušení vzorků probíhalo při teplotě 103 °C. Dále se sušily a vážily, dokud se jejich hmotnost neustálila na jednotné hodnotě. Měření během sušení se provádělo na jednom referenčním vzorku, tak aby se nemusely vážit všechny.²⁷

Naměřené hodnoty se následně zpracovaly pomocí vzorce na výpočet vlhkosti dřeva. Dřevo obsahuje vodu volnou (kapalné skupenství) a vodu vázanou (plynné skupenství). Voda volná se ve dřevě vyskytuje nad BNV (stav rovnovážné vlhkosti cca 30 %). Voda vázaná je vázaná v buňce a ze dřeva se odstraňuje až po odstranění vody volné. Absolutní vlhkost dřeva byla vypočítána pomocí vzorce

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} * 100$$

w – absolutní vlhkost dřeva (%),

m_w – hmotnost dřeva před vysušením (g),

m_0 – hmotnost dřeva po vysušení (g).

(²⁸)

²⁷ KAČÍK, František a Rastislav SOLÁR. *Štruktúra a vlastnosti DREVA*. I. -april 2000. Technická univerzita vo Zvolene: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 1999. ISBN 80-228-0882-0.

²⁸ Gandelová, L. – Horáček, P. – Šlezingerová, J. *Nauka o dřevě*. 3. vydání. Brno: Ediční středisko, 2012. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Výsledky měření byly zpracovány pomocí grafů vyznačujících intervaly, ve kterých se hodnoty vyskytují. Dále byly vyhodnoceny do tabulek pomocí funkcí v programu Excel. Ve výsledcích byl zjištěn průměr, směrodatná odchylka, maximální a minimální hodnota. Výsledné tabulky s danými hodnotami jsou níže se všemi potřebnými daty. V grafickém zpracování jsou porovnávány naměřené hodnoty mezi jednotlivými způsoby úpravy (REF – referenční vzorky bez úpravy, 165 – vzorky upravené teplotou 165 °C, 210 – vzorky upravené teplotou 210 °C). Vzorky byly naklimatizovány před zkouškami na laboratorní podmínky 20 °C a relativní vlhkost vzduchu 65 %.

Během zkoušek se projevilo výrazné snížení některých vlastností bukového dřeva upraveného na 210 °C. Některé vzorky byly značně zuhelnatělé na koncích z důvodu rozkládání hemicelulóz, proto je tato tepelná úprava méně výhodná pro tuto dřevinu.

Tabulka 1 Statistické hodnoty referenčních vzorků

| Referenční vzorky | průměr | směrodatná odchylka | Maximum | minimum |
|---------------------------------------|--------|------------------------|---------|---------|
| hustota kg/m ³ | 675 | 26 | 729 | 622 |
| vlhkost % | 12,0 | 0,2 | 12,4 | 11,4 |
| statický modul pružnosti MPa | 10026 | 734 | 11142 | 8735 |
| pevnost v ohybu MPa | 102,6 | 8 | 117 | 87 |
| dynamický modul pružnosti MPa | 12942 | 1604 | 16583 | 10107 |
| rázová houževnatost J/cm ² | 8,3 | 2,7 | 16,4 | 4,1 |
| tvrdost na radialní ploše MPa | 41,2 | 10,7 | 60,8 | 14,5 |
| tvrdost na tangencialní ploše MPa | 53,6 | 7,1 | 61,8 | 35,8 |

Tabulka 2 Statistické hodnoty vzorků upravených na 165 °C

| Stupeň úpravy 165°C | průměr | směrodatná odchylka | Maximum | minimum |
|---------------------------------------|--------|------------------------|---------|---------|
| hustota kg/m ³ | 676 | 32 | 742 | 615 |
| vlhkost % | 9,3 | 0,6 | 11,0 | 7,7 |
| statický modul pružnosti MPa | 10707 | 1035 | 12703 | 8909 |
| pevnost v ohybu MPa | 109,1 | 14 | 130 | 75 |
| dynamický modul pružnosti MPa | 13453 | 1818 | 16959 | 10077 |
| rázová houževnatost J/cm ² | 6,0 | 1,8 | 10,0 | 2,5 |
| tvrdost na radialní ploše MPa | 40,7 | 9,6 | 57,3 | 14,8 |
| tvrdost na tangencialní ploše MPa | 55,4 | 7,3 | 65,5 | 32,0 |

Tabulka 3 Statistické hodnoty vzorků upravených na 210 °C

| Stupeň úpravy 210 °C | průměr | směrodatná odchylka | Maximum | minimum |
|---------------------------------------|--------|------------------------|---------|---------|
| hustota kg/m ³ | 642 | 52 | 802 | 579 |
| vlhkost % | 5,9 | 0,8 | 7,5 | 4,1 |
| statický modul pružnosti MPa | 8792 | 1039 | 11072 | 7007 |
| pevnost v ohybu MPa | 41,8 | 9 | 62 | 28 |
| dynamický modul pružnosti MPa | 12234 | 2233 | 18925 | 8779 |
| rázová houževnatost J/cm ² | 1,6 | 0,9 | 3,9 | 0,3 |
| tvrdost na radialní ploše MPa | 25,8 | 11,4 | 53,8 | 13,3 |
| tvrdost na tangencialní ploše MPa | 38,4 | 13,6 | 64,3 | 20,3 |

4.1 Hustota

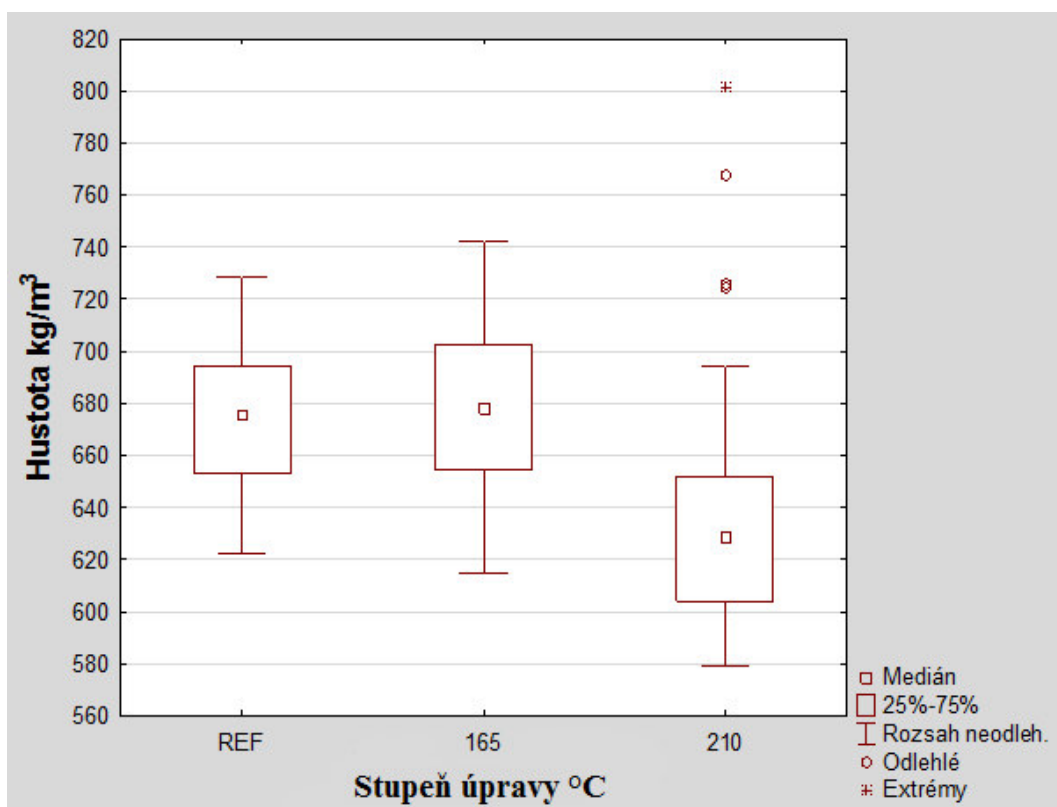
Hustota byla zjišťována na každém stupni tepelné úpravy na 62 vzorcích, výpočet hustoty probíhal, tak že byly změřeny rozměry a hmotnost všech vzorků určených k měření. Hustota byla zjišťována při laboratorních podmínkách dle normy ČSN 49 0108 a na všech vzorcích určených k mechanickým zkouškám. Hustota je závislá na anatomické stavbě dřeviny, a tudíž závisí na šířce letokruhů a vlhkosti dřeva.

Na grafu (graf 1) je vidět, že hustota výrazněji klesá, až u úpravy 210 °C, což může být způsobeno nižší vlhkostí zapříčiněnou tepelnou úpravou. Pokles hustoty také může souviset s rozkladem hemicelulóz během úpravy na vysokou teplotu. Vzorky byly během zkoušky značně zuhelnatělé.

Výsledná hustota byla porovnána s literaturou ²⁹ pouze u referenčních vzorků, kde je hustota neupravených vzorků podobná s hodnotami v této práci. Z výsledků je zřejmé, že se zvyšující se teplotou úpravy klesá hustota vzorku jak je tomu i v literatuře ³⁰, kde hustota klesá při vyšších stupních úpravy.

²⁹ POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

³⁰ *Thermowood Handbook*. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2003 [online]. [cit. 1. 4. 2017]. Dostupné z [www: www.thermowood.fi](http://www.thermowood.fi)

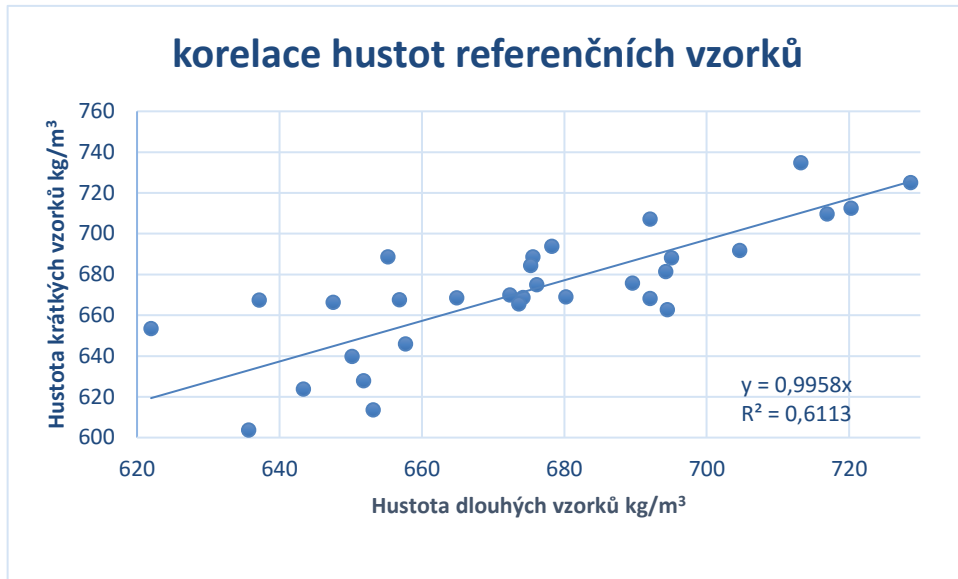


Graf 1 Krabicová graf závislosti hustoty na stupni úpravy

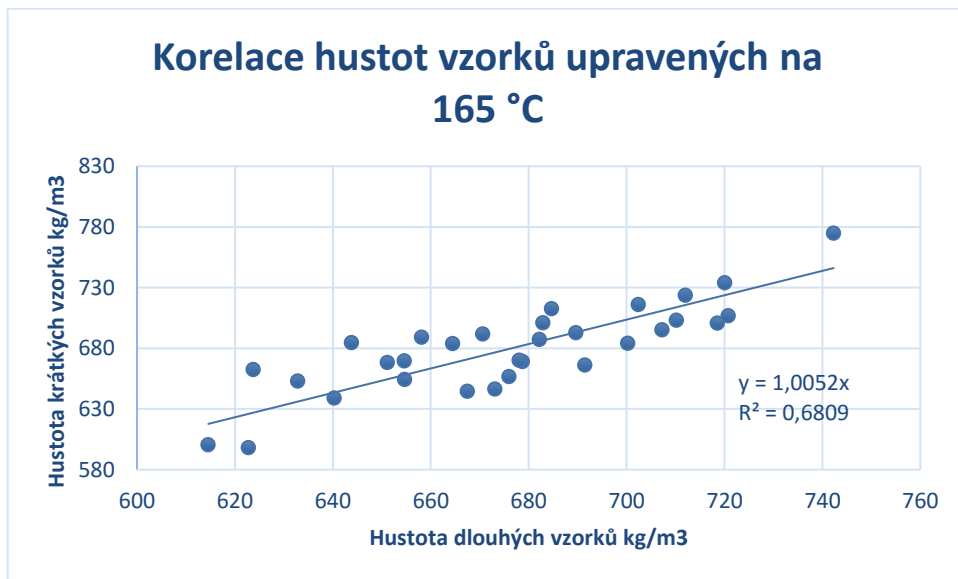
4.1.1 Vzájemná závislost hustot u velkých a malých vzorků

Vzájemný vztah mezi hustotami byl zjišťován kvůli porovnání, zdali se rozdíly nějak mění s velikostí vzorků. Hustota by měla u malých i velkých vzorků vykazovat velmi podobné hodnoty z důvodu paralelnosti zkušebních těles.

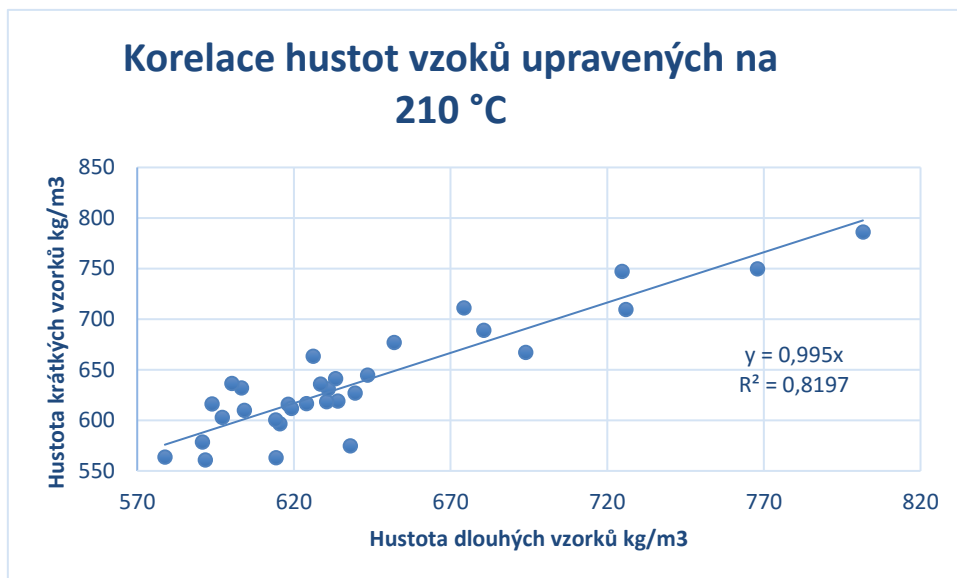
Z výsledných grafů byl odečten korelační koeficient R u každého stupně úpravy. U referenčních vzorků byl korelační koeficient 0,7818 (graf 2), u úpravy při 165 °C byl koeficient 0,8251 (graf 3) a u úpravy 210 °C vyšel 0,9054 (graf 4). Na výsledných koeficientech je vidět, že hustoty malých a velkých vzorků mezi sebou souvisejí.



Graf 2 Korelace hustot referenčních vzorků



Graf 3 Korelace hustot vzorků upravených na 165 °C



Graf 4 Korelace hustot vzorků upravených na 210 °C

4.1.2 Vliv hustoty na pevnost v ohybu

Vliv hustoty na pevnost v ohybu byla zpracována pomocí tří grafů pro různé stupně úpravy. Závislost je znázorněna na grafech pomocí lineární spojnice trendu. Z výsledků byl odečten korelační koeficient, který byl porovnáván.

Z výsledných grafů, byl odečten korelační koeficient R pro referenční vzorky 0,2383 (Příloha 4), pro vzorky upravené při 165 °C vyšel 0,5432 (Příloha 10) a pro vzorky upravené při 210 °C byla hodnota koeficientu 0,2035 (Příloha 16). Obecně můžeme tvrdit, že se zvyšující se hustotou roste ohybová pevnost dřeva, ale důležitým faktorem, který ovlivňuje ohybovou pevnost je stavba dřeva.

4.1.3 Vliv hustoty na tvrdost na tangenciální ploše

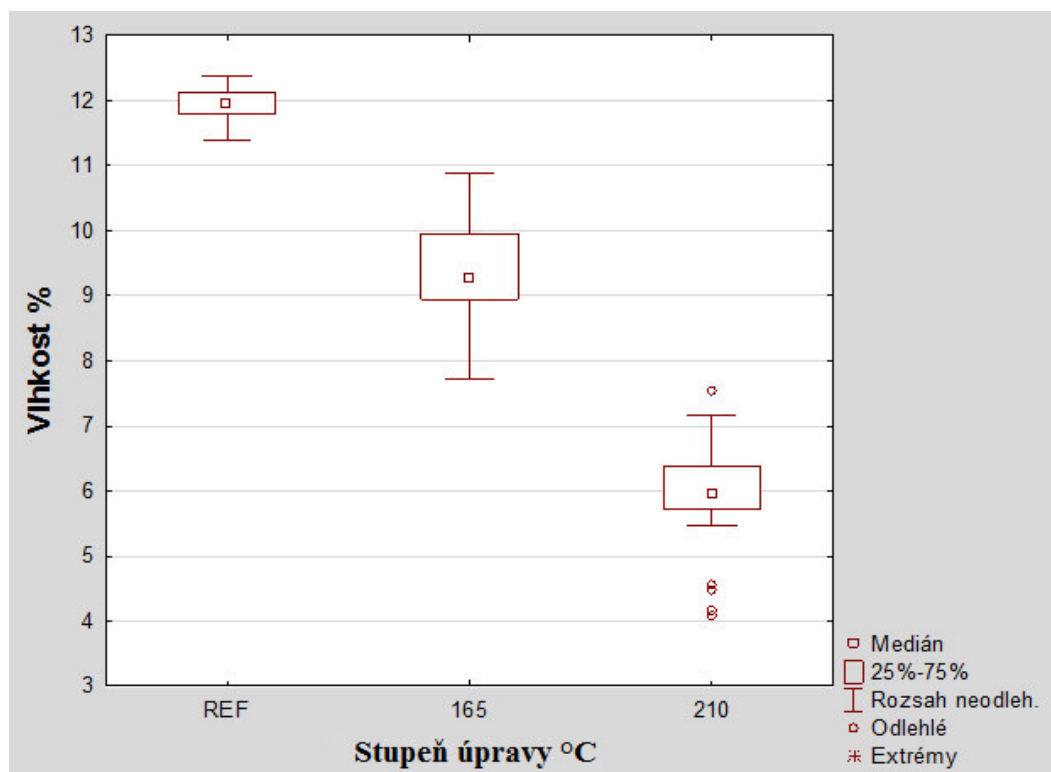
Vliv hustoty na tvrdost na tangenciální ploše byl zjišťován pomocí grafického řešení. Graf byl zpracován pomocí Excelu a byl vypočítán korelační koeficient.

Korelační koeficient R byl odečten ze třech grafů pro různé stupně úpravy. Na prvním grafu byla odečtena hodnota 0,3784 (Příloha 5), u druhého grafu pro 165 °C úpravy byla odečtena hodnota 0,5586 (Příloha 11) a z třetího grafu pro úpravu při 210 °C byla zjištěna hodnota 0,4783 (Příloha 17).

Výsledné grafy byly proloženy lineární křivkou, na které je zřejmé, že při zvyšující se hustotě dřeva roste tvrdost na tangenciální ploše.

4.2 Vlhkost

Při tepelné úpravě došlo ke značnému poklesu vlhkosti u upravených vzorků. Vzorky byly naklimatizovány na laboratorní podmínky, aby se daly porovnávat jejich vlastnosti za stejných podmínek. Na krabicovém grafu (graf 5) je vidět, že trend vlhkosti klesá se zvyšující se teplotou úpravy. Absolutní vlhkost se u našich vzorků pohybovala v předpokládaných hodnotách, u referenčních vzorků kolem 12 %, u vzorků upravených při 165 °C kolem 9 % a u vzorků upravených při 210 °C kolem 6 %.

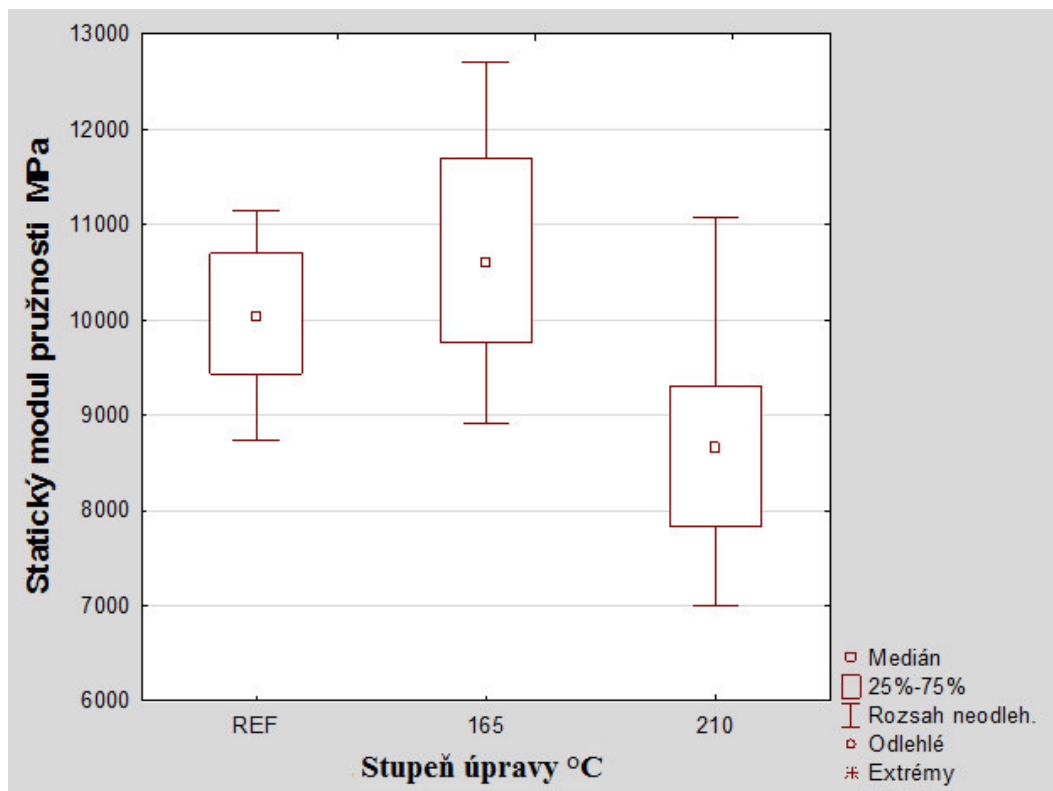


Graf 5 Krabicový graf závislosti vlhkosti na stupni úpravy

4.3 Statický modul pružnosti

Statický modul pružnosti byl zjišťován na vzorcích ve třech sadách po 31 kusech, každá sada měla jiný stupeň úpravy. Zkouška probíhala na stroji, který se používá k měření statického modulu pružnosti (UTS TIRA 50kN).

Z grafu (graf 6) je patrné, že statický modul pružnosti vzroste při úpravě na 165 °C. Při tepelné úpravě na 210 °C statický modul výrazně klesá. Tento poznatek je velice důležitý pro vhodnost použití tepelně upraveného buku pro staticky zatížené konstrukce. Pro konstrukce, které budou staticky zatížené je vhodná z těchto úprav pouze úprava při 165 °C.



Graf 6 Krabicový graf závislosti statického modulu pružnosti na stupni úpravy

4.3.1 Závislost statického modulu pružnosti na dynamickém modulu pružnosti

Závislost mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti byla zjišťována pomocí grafů v Excelu. Hodnoty byly vloženy do grafu a výsledné body byly proloženy lineární přímkou, která znázorňuje závislost mezi moduly.

Z grafů byly odečteny hodnoty korelačního koeficientu R , které mezi sebou byly porovnávány. Odečtení dat bylo provedeno na grafu, pro referenční vzorky byla hodnota 0,5425 (Příloha 1), pro úpravu 165 °C byla hodnota 0,3091 (Příloha 7) a pro úpravu při 210 °C byla hodnota 0,6233 (Příloha 13).

Lineární přímka, která prokládá hodnoty v grafu ukazuje, že u statického a dynamického modulu pružnosti je závislost. Pokud narůstá hodnota statického modulu pružnosti, tak narůstá i hodnota dynamického modulu pružnosti.

4.3.2 Závislost statického modulu pružnosti na ohybové pevnosti

Závislost mezi statickým modulem pružnosti a pevnosti v ohybu byla zjišťována, protože se obě mechanické vlastnosti zjišťovaly na stejném stroji. Hodnoty jednotlivých zkoušek byly vloženy do grafu pomocí Excelu a byl u nich zjištěn korelační koeficient R .

Závislosti byly porovnávány pomocí tří grafů s každým pro jiný stupeň úpravy. V jednotlivých grafech jsme zjistili korelační koeficient pomocí rovnice pro lineární závislost. U referenčních vzorků byla zjištěna hodnota 0,7620 (Příloha 2), u vzorků upravených při 165 °C byla hodnota 0,8270 (Příloha 8) a u vzorků upravených při 210 °C byla hodnota 0,7345 (Příloha 14).

Přímka lineární závislosti ukazuje, že statický modul pružnosti závisí na pevnosti v ohybu. Hodnoty mezi sebou souvisí zřejmě proto, že měření probíhá ve stejný okamžik na stejném stroji.

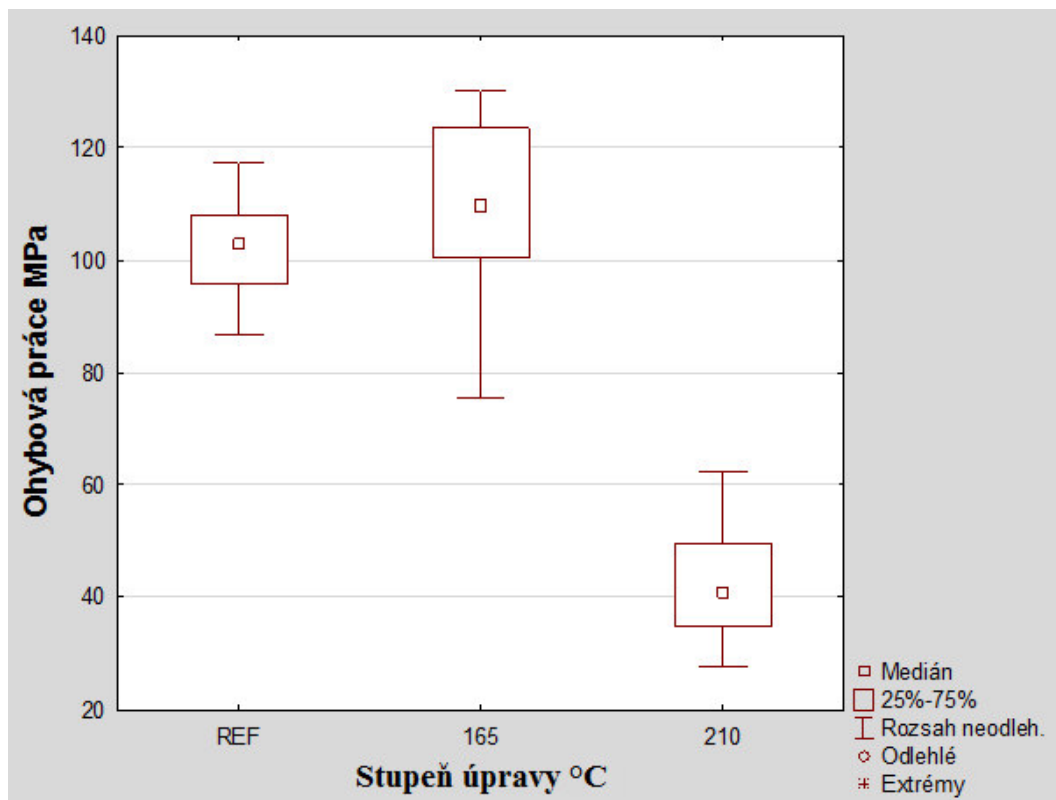
4.4 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu byla měřena pomocí měřicího stroje vhodného pro měření pevnosti v ohybu (UTS TIRA 50kN). Měření probíhalo za laboratorních podmínek na třech sériích po 31 kusech.

Ohybová pevnost se při prvním stupni úpravy při 165 °C zvýší, ale při druhém stupni úpravy při 210°C se výrazně sníží. Toto snížení může být zapříčiněno rozpadem hemicelulóz ve dřevě upraveném na tak vysokou teplotu. V přiložených tabulkách (tabulka 1, 2, 3) jsou hodnoty v číslech na nichž je vidět, o jak vysokou hodnotu ohybová pevnost poklesne. Výsledný pokles je patrný i v porovnání s literaturou³¹, kde se při zvyšující teplotě ohybová pevnost nejprve zvyšovala a od určitého bodu klesala. V porovnání s literaturou³² nám vyšla ohybová pevnost nižší, což může být způsobeno stavbou dřeviny, která tuto vlastnost ovlivňuje.

³¹ *Thermowood Handbook*. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2003 [online]. [cit. 1. 4. 2017]. Dostupné z [www: www.thermowood.fi](http://www.thermowood.fi)

³² POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.



Graf 7 Krabicový graf závislosti ohybové práce na stupni úpravy

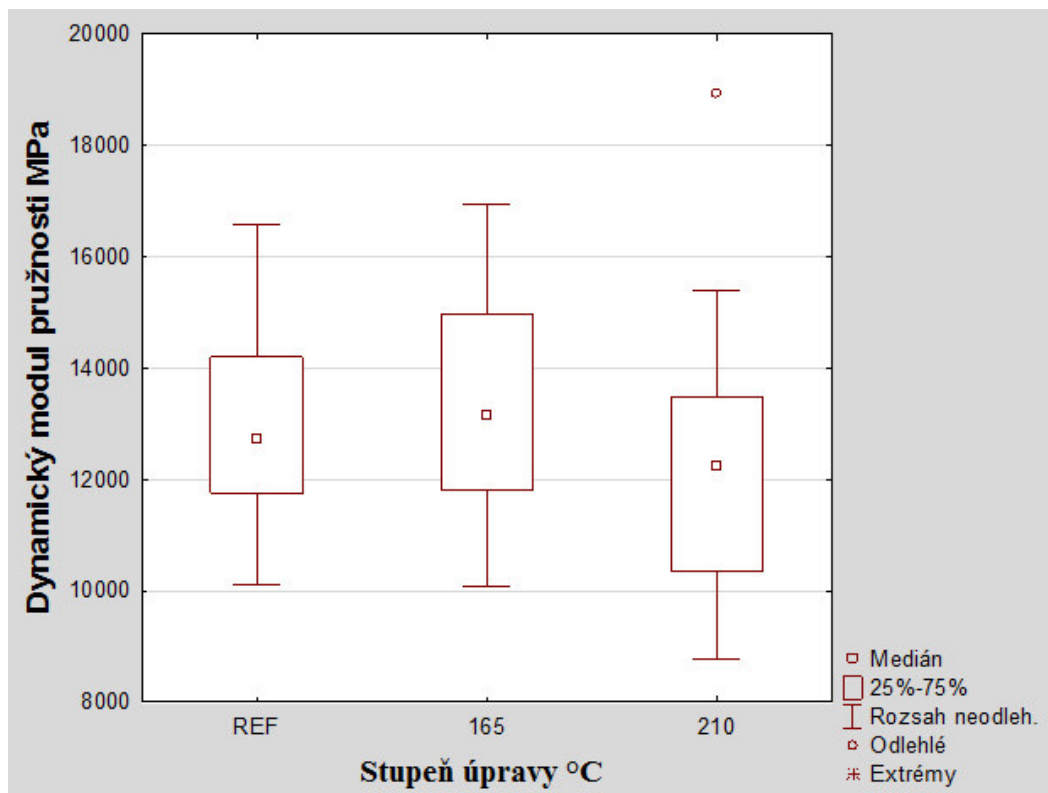
4.5 Dynamický modul pružnosti

Měření probíhalo na vzorcích ve třech sériích po 31 kusech. Dynamický modul pružnosti se během zkoušek měnil jen nepatrně, při prvním stupni úpravy při 165 °C se mírně zvýšil a při druhém stupni úpravy při 210 °C dynamický modul poklesl. Výsledné hodnoty v porovnání s literaturou³³ jsou výrazně nižší. Důvodem nižších hodnot oproti literatuře může být stavba dřeva. V literatuře³⁴ byly rozdíly

³³ POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

³⁴ *Thermowood Handbook*. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2003 [online]. [cit. 1. 4. 2017]. Dostupné z www.thermowood.fi

mezi jednotlivými stupni úpravy výrazně rozdílné, porovnání proběhlo s jinou dřevinou, u které se změny projevily vyššími rozdíly.



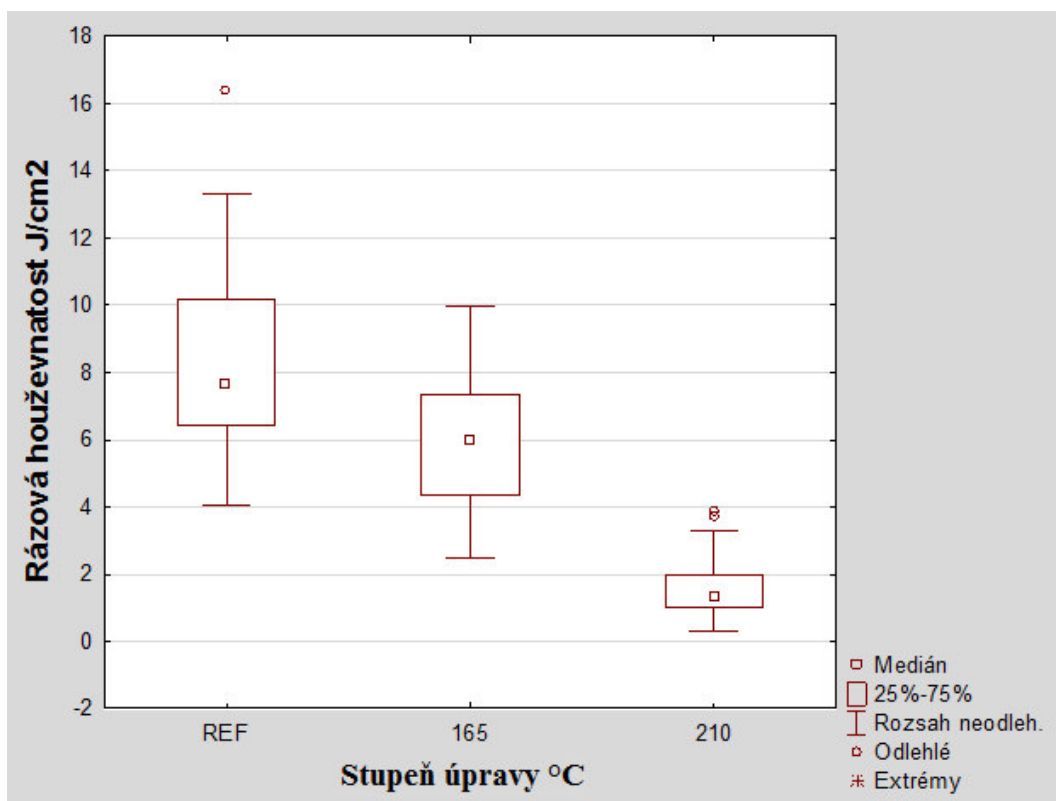
Graf 8 Krabicový graf závislosti dynamického modulu pružnosti na stupni úpravy

4.6 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost byla měřena na přerážecím stroji a byla z něho odečítána práce potřebná pro přeražení tělesa. Přeražení probíhalo na 92 tělesech ve třech sériích podle stupně úpravy. Práce potřebná na přeražení probíhala na dvou strojích s rozdílnou hmotností kladiva potřebného na přeražení tělesa. Vzorky se zakládaly tak, aby síla působila v radiálním směru.

Na grafu (graf 9) se projevuje pokles hodnot rázové houževnatosti s rostoucím stupněm úpravy. Vyplývá z něho, že tepelná úprava není vhodná pro rázové namáhání této dřeviny. Dřevo buku se při zvyšování teploty úpravy stává křehčí a klesá jeho odolnost vůči dynamickým rázům.

Výsledky vyšly podobné s literaturou³⁵, kde byl rozdíl mezi hodnotami minimální. V literatuře³⁶ pro porovnání byl trend vývoje rázové houževnatosti podobný s nižšími rozdíly než v tomto výzkumu.



Graf 9 Krabicový graf závislosti rázové houževnatosti na stupni úpravy

4.7 Tvrdost

Tvrdost byla měřena na vzorcích, které byly odřezány z dlouhých vzorků, na kterých bylo před tím prováděno měření rázové houževnatosti. Konce vzorků nebyly poškozeny během měření houževnatosti, a tak se mohly odřezat a použít na měření tvrdosti.

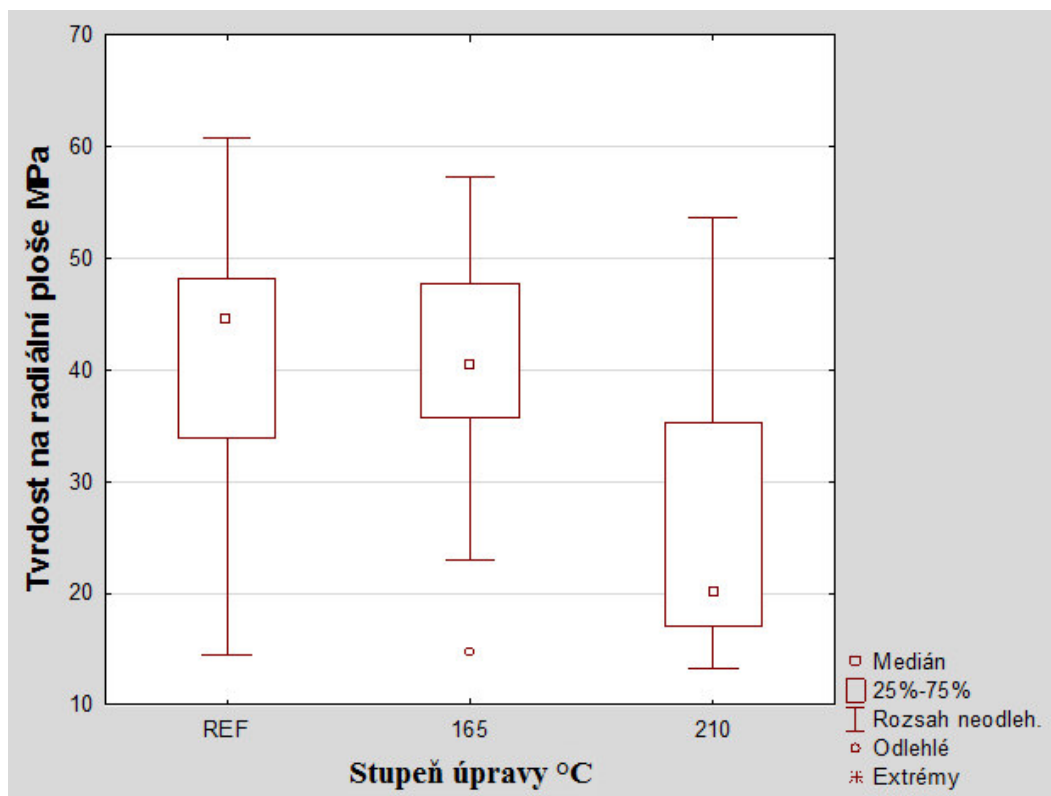
³⁵ POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

³⁶ *Thermowood Handbook*. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2003 [online]. [cit. 1. 4. 2017]. Dostupné z [www: www.thermowood.fi](http://www.thermowood.fi)

Tvrdość byla měřena na tvrdoměru (Dura Vision – 30), kde se zjišťuje tvrdość podle Brinella, vtláčováním ocelové kuličky daných rozměrů. Měření tvrdości muselo být prováděno pomocí dvou metod podle síly (500 N a 250 N), která působila na kuličku. Měření rozdílnými metodami bylo použito z důvodu, že při úpravě vzorku při 210 °C byl povrch křehký a přístroj na měření vyhodnocoval chybu měření. Měření se provádělo ze čtyř stran vzorků na tangenciálních a radiálních plochách. Před měřením byly vzorky naklimatizovány na laboratorní podmínky a z klimatizační komory se vyjímaly pouze malé skupinky vzorků.

Výsledné hodnoty byly zpracovány pomocí grafů, kde byl znázorněn vývoj tvrdości u jednotlivých stupňů úpravy. Naměřené hodnoty byly zprůměrovány pro jednotlivé plochy a porovnány s literaturou³⁷, kde se naše hodnoty u referenčních vzorků výrazně lišily, naše naměřené hodnoty byly výrazně vyšší. Během výzkumu se po vyhodnocení dat projevilo výrazné snížení hodnot na obou plochách při druhém stupni úpravy při 210 °C. Výrazné snížení může být způsobeno výrazným zkřehnutím povrchu, což způsobuje nižší hodnoty. Pro tento stupeň úpravy byla použita metoda 250 N zatížení.

³⁷ POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.

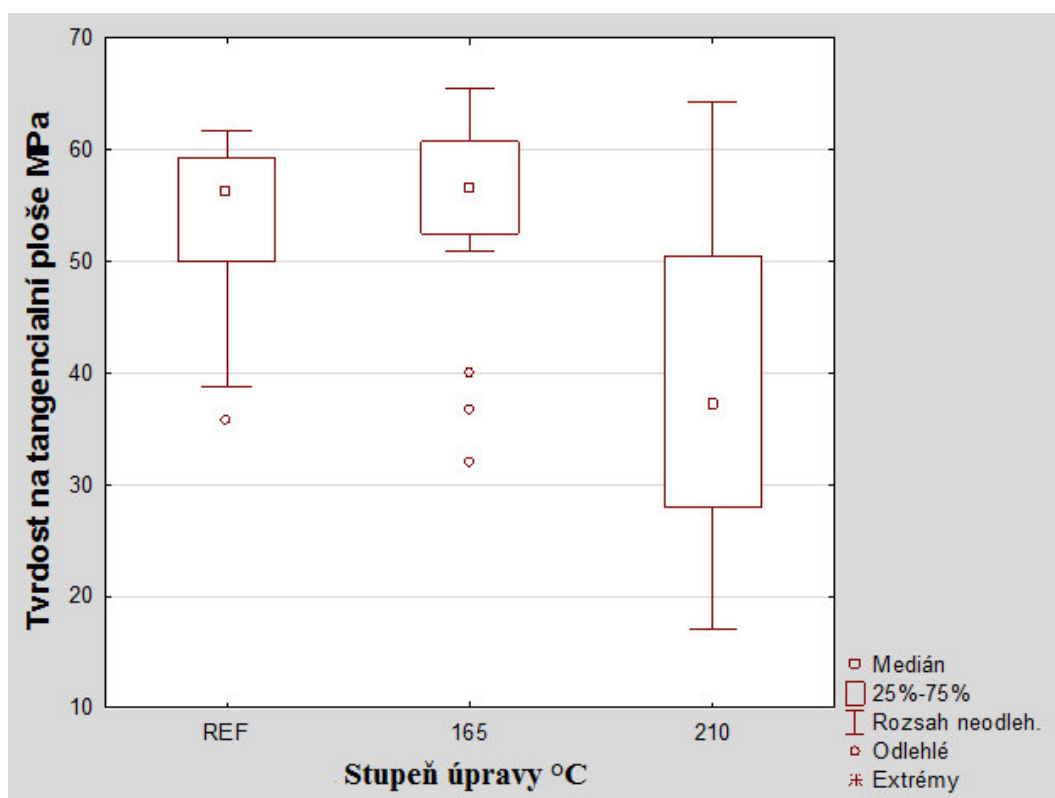


Graf 10 Krabicový graf závislosti tvrdosti na radiální ploše a stupni úpravy

4.7.1 Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše

Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše spolu souvisí pouze přes vzorky, na kterých byly zkoušky prováděny. Hodnoty, které vyšly během zkoušek na zkušebních tělesech byly vloženy do grafu, kde byla znázorněna lineární závislost.

Z grafu byl zjišťován korelační koeficient R u jednotlivých stupňů úpravy. U referenčních vzorků byla hodnota koeficientu 0,2983 (Příloha 3), u vzorků upravených při 165 °C byla hodnota koeficientu 0,3962 (Příloha 9) a u vzorků upravených při 210 °C byla hodnota koeficientu 0,6058 (Příloha 15). Lineární závislost mezi jednotlivými zkouškami ukazuje, že mezi sebou jednotlivé zkoušky souvisí.



Graf 11 Krabicový graf závislosti tvrdosti na tangenciální ploše a stupni úpravy

4.7.2 Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše

Závislost pevnosti v ohybu a tvrdosti na tangenciální ploše spolu souvisí, protože síly použité na měření těchto mechanických vlastností působí ve stejném směru. Síla působí v radiálním směru kolmo na vlákna zkušebních vzorků.

Výsledné hodnoty byly vloženy do grafu, ve kterém byl pomocí funkce Excel zjištěn korelační koeficient R . U referenčních vzorků byla hodnota koeficientu $-1,7152$ (Příloha 6), u vzorků upravených při 165 °C byla hodnota $-0,6782$ (Příloha 12) a u vzorků upravených při 210 °C byla hodnota koeficientu $-1,4191$ (Příloha 18). Lineární závislost ukazuje, že jednotlivé zkoušky mezi sebou souvisí a mají mezi sebou určitou závislost.

ZÁVĚR

V práci je prokázáno, že během termické úpravy dochází ve dřevě ke změnám mechanických vlastností. Změny, ke kterým dochází během termické úpravy jsou nevratné a výrazně ovlivňují strukturu a vlastnosti dřeva. Z výsledných grafů je vidět, že při prvním stupni úpravy se mechanické vlastnosti mírně zvýší, oproti druhému stupni úpravy, kde dochází k výraznému poklesu vlastností. U rázové houževnatosti a vlhkosti se pokles hodnot projevil okamžitě už u prvního stupně úpravy. Statické a dynamické vlastnosti se projevily podobným trendem výsledných změn, nejprve se hodnoty zvyšovaly a následně snižovaly. Dále se porovnávaly vzájemné závislosti mezi jednotlivými vlastnostmi a byla prokázána závislost mezi jednotlivými vlastnostmi u všech druhů úpravy. Závislosti byly zkoumány mezi všemi třemi skupinami vzorků, kde je zkoumán korelační koeficient. U dřeva také docházelo ke změnám barevného odstínu a ke zkrěhnutí povrchu. Práce dále prokázala, že pro bukové dřevo je termická úprava při 210 °C absolutně nevhodná z důvodu znehodnocení dřeva, vzorky upravené na tento stupeň byly zuhelnatělé a křehké.

V práci jsou prokázány změny u bukového dřeva vznikající termickou úpravou, tyto změny mohou ovlivnit vývoj používání termicky upraveného bukového dřeva. Bylo zjištěno, že při nízkém stupni úpravy jsou vhodné bukové prvky i do mechanicky namáhaných konstrukcí. Lepší mechanické vlastnosti u prvního způsobu úpravy mohou přispět k rozšíření jeho použitelnosti v praxi. U bukového dřeva by se mohl použít teplotní stupeň úpravy vyšší jak 165 °C do určité hranice, na které se vlastnosti začnou snižovat. Tato hranice se z této práce nedá určit, protože zkoušky nebyly dělány na více stupních termické úpravy.

ZDROJE

Literatura:

1. POŽGAJ, Alexander. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. PRÍRODA a. s. Bratislava: Kníhtlačiareň Svornosť, Bratislava, 1993. ISBN 80-07-00600-1.
2. KAČÍK, František a Rastislav SOLÁR. *Štruktúra a vlastnosti DREVA*. I. - apríl 2000. Technická univerzita vo Zvolene: Vydavateľstvo TU vo Zvolene, 1999. ISBN 80-228-0882-0.
3. ŠLEZINGEROVÁ, Jarmila a Libuše GANDELOVÁ. *Stavba dřeva*. Dotisk, 2005 první vydání, 2002. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně: v edičním středisku MZLU v Brně, 2002. ISBN 80-7157-636-0.
4. ČUNDERLÍK, Igor. *ŠTRUKTÚRA DREVA*. I. - 2009. Technická univerzita TU vo Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2009. ISBN 978-80-228-2061-5.
5. VALÁŠKOVÁ, Renáta. *Posouzení pružnostních a pevnostních vlastností neupraveného a termicky upraveného dřeva douglasky*. ČZU v Praze, 2015.
6. Gandelová, L. – Horáček, P. – Šlezingerová, J. *Nauka o dřevě*. 3. vydání. Brno: Ediční středisko, 2012. 176 s. ISBN 978-80-7375-312-2.
7. BORŮVKA, Vlastimil, Aleš ZEIDLER a Tomáš HOLEČEK. *Comparison of stiffness and strength properties of untreated and heat-treated wood of Douglas fir and alder*.
8. *Termodrevo: príprava, vlastnosti a aplikácie*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008. ISBN 978-80-228-1920-6.
9. VENHODOVÁ, Ester. *VLASTNOSTI DŘEVA RŮZNÉHO STÁŘÍ S OHLEDEM NA TEPELNÉ NAMÁHÁNÍ*. Brno, 2012. DIPLOMOVÁ PRÁCE.[https](https://www.researchgate.net/publication/312211111)

10. HLOBIL, Vladimír. *Zkoumání vybraných vlastností neupraveného smrkového a modřínového dřeva z pohledu vhodnosti na výrobu šindele*. Brno, 2015. Diplomová práce.
11. POŽGAJ, Alexander. *METÓDY ZJISŤOVANIE MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ DREVA A DREVNÝCH VELKOPLOŠNÝCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV*. III. Edičné stredisko VŠLD Zvolen: Vysoká škola lesnícká a drevárska Zvolen, 1987.

Webové stránky:

1. *BOTANY.CZ: FAGUS SYLVATICA L. – buk lesní / buk lesný* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/fagus-sylvatica/>
2. *NATURFOTO.cz: Buk lesní* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.naturfoto.cz/buk-lesni-fotografie-13644.html>
3. *Dřevo centrum: Buk lesní* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://drevo.celyden.cz/charakteristiky-drevin/buk-lesni>
4. *Dřevo stavitel: Tepelná modifikace dřeva - Úvod do problematiky* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/tepelna-modifikace-dreva-1-dil>
5. Výrobní proces ThermoWood® – tepelně upravené profily: Výrobní proces materiálu ThermoWood®. *PROKOM* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.prokom.cz/tepelne-upravene-drevo-thermowood/128-drevene-profil-y-tepelne-upravene-specialni-technologie-thermowood>
6. *Lexikon dřev: buk lesní* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: http://ldf.mendelu.cz/und/sites/default/files/multimedia/stavba_dreva/lexikon/mikro/index.html?drevina=bk
7. *LUNAWOOD: THERMOWOOD* [online]. [cit. 2017-03-24]. Dostupné z: <http://www.lunawood.com/thermowood/improved-natural-durability/#stability>

8. *Thermowood Handbook*. Helsinki: Finnish Thermowood Association 2003 [online]. [cit. 1. 4. 2017]. Dostupné z www: www.thermowood.fi
9. KLOIBER, Michal. *Porovnaní dynamického a statického modulu pružnosti poškozeného dřeva POROVNÁNÍ DYNAMICKÉHO A STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI POŠKOZENÉHO DŘEVA* [online]. [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/267712842_Porovnaní_dynamickeho_a_statickeho_modulu_pruznosti_poskozeneho_dreva_POROVNANI_DYNAMICKEHO_A_STATICKEHO_MODULU_PRUZNOSTI_POSKOZENEHODREVA
10. JOHANSSON, Dennis. *Heat Treatment of Solid Wood* [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:476979/FULLTEXT01.pdf>
11. [online]. [cit. 2017-04-08]. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=9192
12. ESTEVES, Bruno a Helena PEREIRA. *WOOD MODIFICATION BY HEAT TREATMENT: A REVIEW* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: http://152.1.0.246/index.php/BioRes/article/view/BioRes_04_1_%23%23%23_Esteves_P_Wood_Mod_Heat_Treatment
13. GUNDUZ, Gokhan a Deniz AYDEMIR. *The effects of thermal treatment on the mechanical properties of wild Pear (Pyrus elaeagnifolia Pall.) wood and changes in physical properties* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130690900154X>

NORMY

- ČSN 49 0101 – Drevo. Všeobecné požiadavky na fyzikálne a mechanické skúšky
 ČSN 49 0108 - Drevo. Zisťovanie hustoty. 1993
 ČSN 49 0114 - Skúšky vlastností rastlého dreva. Metóda zisťovania pevnosti v ťahu naprieč vlákien
 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

ČSN 64 0128 - Zkoušky tuhých nekovových materiálů. Tvrdost podle Brinella. 1953

SEZNAM GRAFŮ

| | |
|--|----|
| Graf 1 Krabicová graf závislosti hustoty na stupni úpravy | 27 |
| Graf 2 Korelace hustot referenčních vzorků | 28 |
| Graf 3 Korelace hustot vzorků upravených na 165 °C..... | 28 |
| Graf 4 Korelace hustot vzorků upravených na 210 °C..... | 29 |
| Graf 5 Krabicový graf závislosti vlhkosti na stupni úpravy..... | 30 |
| Graf 6 Krabicový graf závislosti statického modulu pružnosti na stupni úpravy | 31 |
| Graf 7 Krabicový graf závislosti ohybové práce na stupni úpravy | 34 |
| Graf 8 Krabicový graf závislosti dynamického modulu pružnosti na stupni úpravy | 35 |
| Graf 9 Krabicový graf závislosti rázové houževnatosti na stupni úpravy..... | 36 |
| Graf 10 Krabicový graf závislosti tvrdosti na radiální ploše a stupni úpravy | 38 |
| Graf 11 Krabicový graf závislosti tvrdosti na tangenciální ploše a stupni úpravy..... | 39 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tabulka 1 Statistické hodnoty referenčních vzorků..... | 24 |
| Tabulka 2 Statistické hodnoty vzorků upravených na 165 °C..... | 25 |
| Tabulka 3 Statistické hodnoty vzorků upravených na 210 °C..... | 25 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|---|
| Obrázek 1 Makroskopické řezy buku | 4 |
| Obrázek 2 Mikroskopická stavba buku | 5 |
| Obrázek 3 Vzorky tepelně upraveného bukového dřeva – zleva je referenční úprava, úprava na 165 °C a vpravo úprava na 210 °C | 6 |
| Obrázek 4 Postup výroby thermowoodu | 8 |

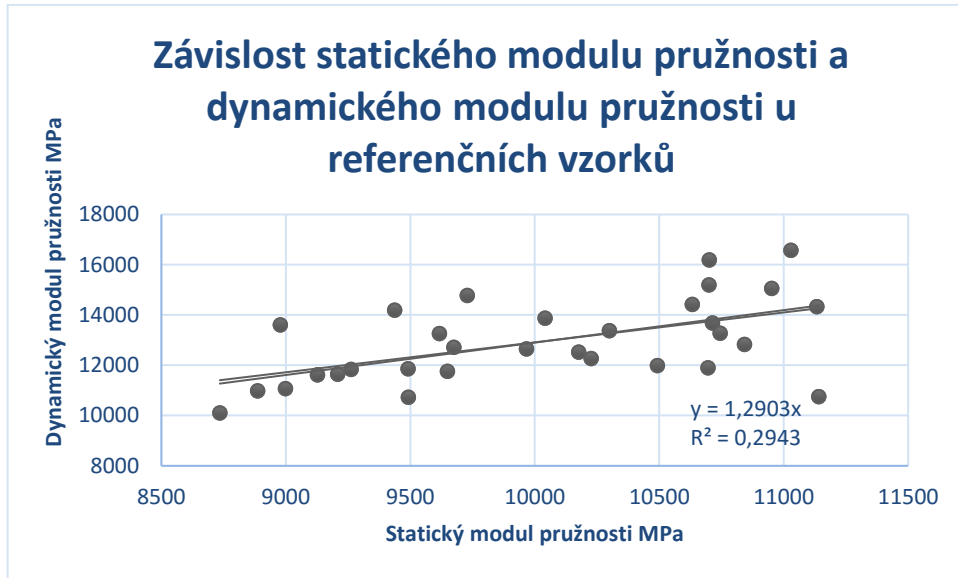
| | |
|--|----|
| Obrázek 5 Umístění výřezu a latí ve fošně | 14 |
| Obrázek 6 Umístění vzorků v lati | 14 |
| Obrázek 7 Termokomora (foto: Holeček) | 15 |
| Obrázek 8 Uložení vzorků do termokomory (foto: Holeček) | 15 |
| Obrázek 9 Graf průběhu úpravy (foto: Holeček) | 15 |
| Obrázek 10 Vzorky po přerážecí zkoušce bez úprav | 18 |
| Obrázek 11 Vzorky po přerážecí zkoušce s úpravou na 165 °C | 18 |
| Obrázek 12 Charpyho kladivo | 18 |
| Obrázek 13 Vzorky po přerážecí zkoušce s úpravou na 210 °C | 18 |
| Obrázek 14 Přístroj na měření rychlosti prostupu signálu | 20 |
| Obrázek 15 Uložení tělesa na podpěry | 21 |
| Obrázek 16 Trhací stroj UTS 50 | 21 |
| Obrázek 17 Detail měření tvrdosti | 22 |
| Obrázek 18 Stroj na měření tvrdosti pomocí Brinellovy zkoušky | 22 |

SEZNAM PŘÍLOH

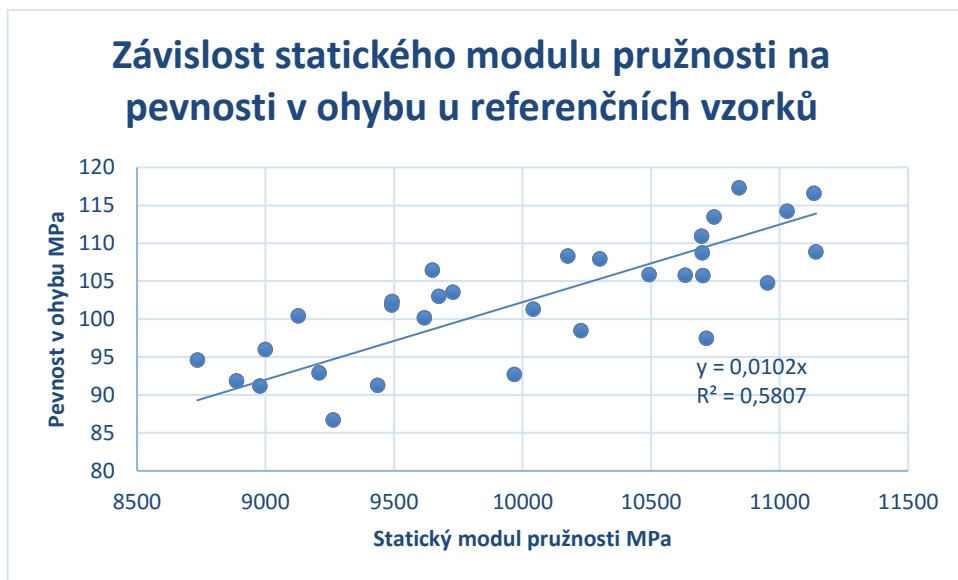
| | |
|--|----|
| Příloha 1 Závislost statického modulu pružnosti na dynamickém u referenčních vzorků | 47 |
| Příloha 2 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v ohybu u referenčních vzorků | 47 |
| Příloha 3 Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše u referenčních vzorků | 48 |
| Příloha 4 Závislost ohybové pevnosti v ohybu na hustotě u referenčních vzorků | 48 |
| Příloha 5 Závislost tvrdosti na tangenciální ploše na hustotě u referenčních vzorků | 49 |
| Příloha 6 Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše u referenčních vzorků | 49 |
| Příloha 7 Závislost statického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti u stupně úpravy na 165 °C | 50 |
| Příloha 8 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v ohybu u stupně úpravy na 165 °C | 50 |
| Příloha 9 Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše u stupně úpravy na 165 °C | 51 |
| Příloha 10 Závislost ohybové pevnosti v ohybu na hustotě u stupně úpravy na 165 °C | 51 |
| Příloha 11 Závislost tvrdosti na tangenciální ploše na hustotě u stupně úpravy na 165 °C | 52 |
| Příloha 12 Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše u stupně úpravy na 165 °C | 52 |
| Příloha 13 Závislost statického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti u stupně úpravy na 210 °C | 53 |

| | |
|--|----|
| Příloha 14 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v ohybu u stupně úpravy na 210 °C | 53 |
| Příloha 15 Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše u stupně úpravy na 210 °C | 54 |
| Příloha 16 Závislost ohybové pevnosti v ohybu na hustotě u stupně úpravy na 210 °C . | 54 |
| Příloha 17 Závislost tvrdosti na tangenciální ploše na hustotě u stupně úpravy na 210 °C | 55 |
| Příloha 18 Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše u stupně úpravy na 210 °C | 55 |

PŘÍLOHA

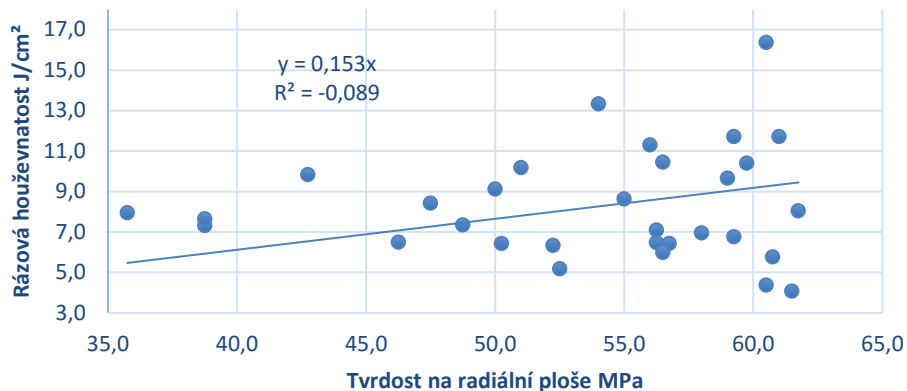


Příloha 1 Závislost statického modulu pružnosti na dynamickém u referenčních vzorků



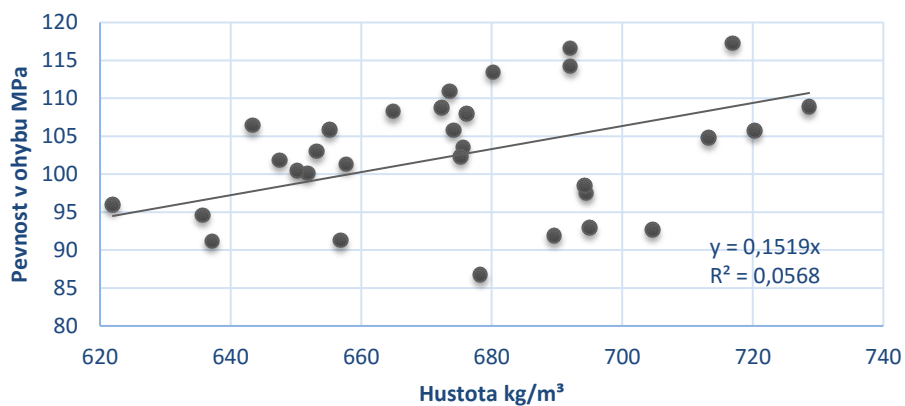
Příloha 2 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v ohybu u referenčních vzorků

Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše u referenčních vzorků

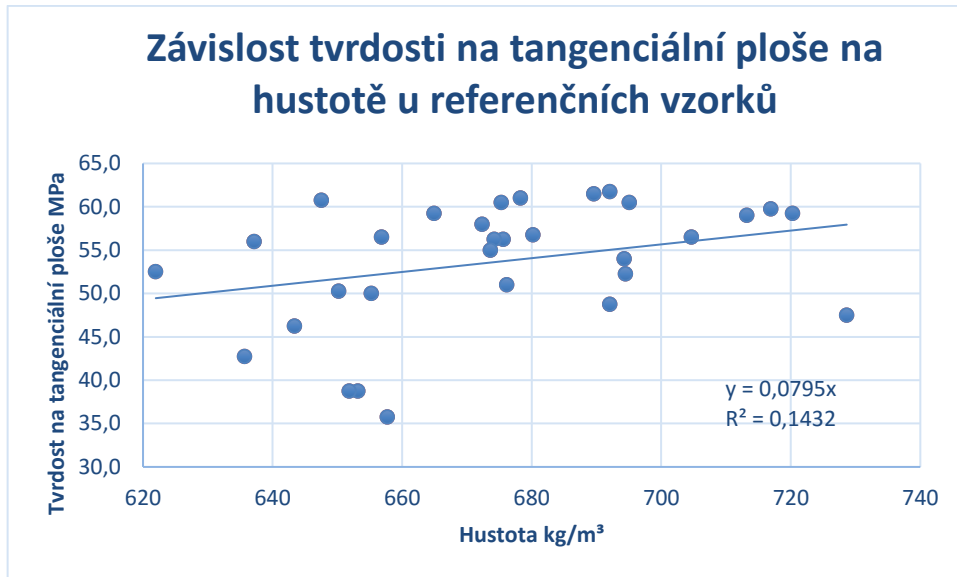


Příloha 3 Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše u referenčních vzorků

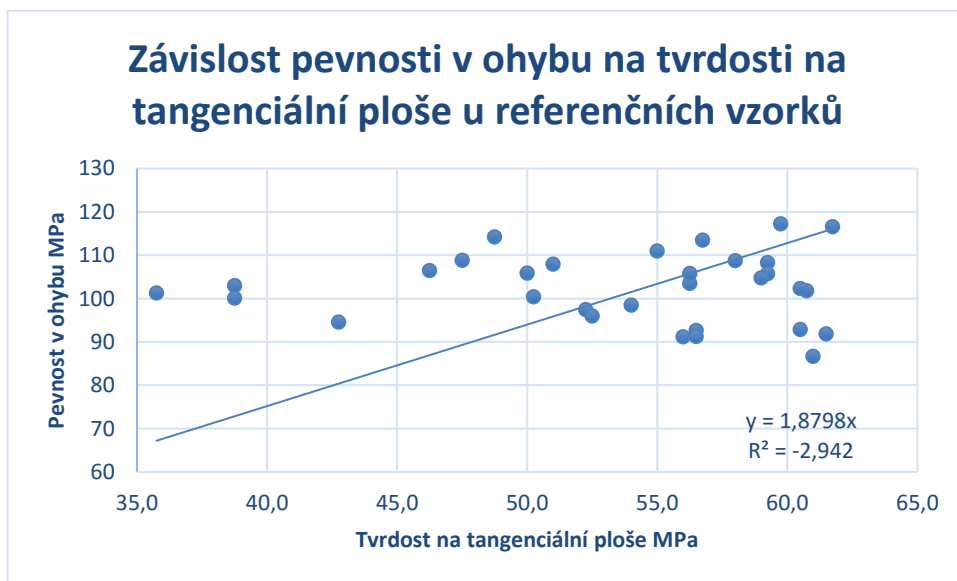
Závislost ohybové pevnosti v ohybu na hustotě u referenčních vzorků



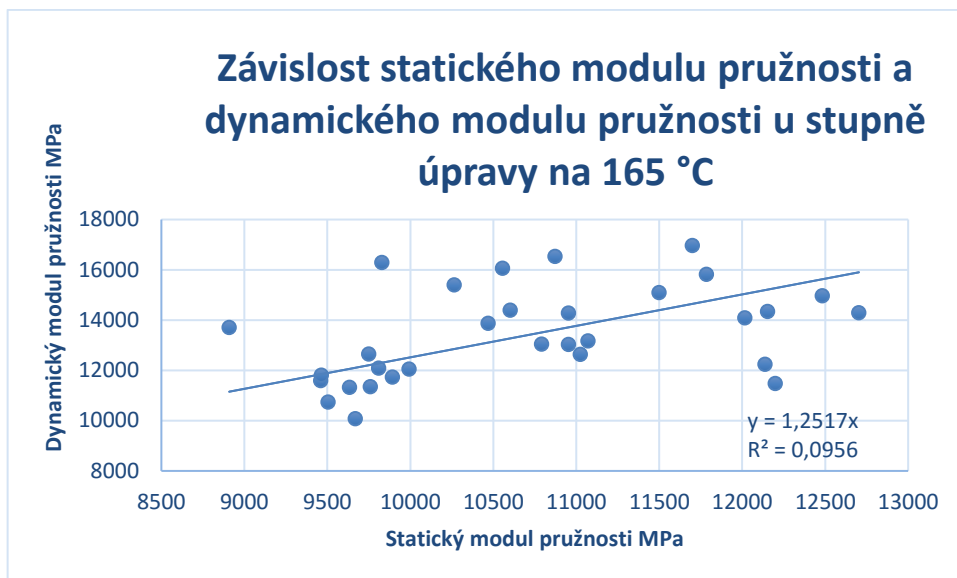
Příloha 4 Závislost ohybové pevnosti v ohybu na hustotě u referenčních vzorků



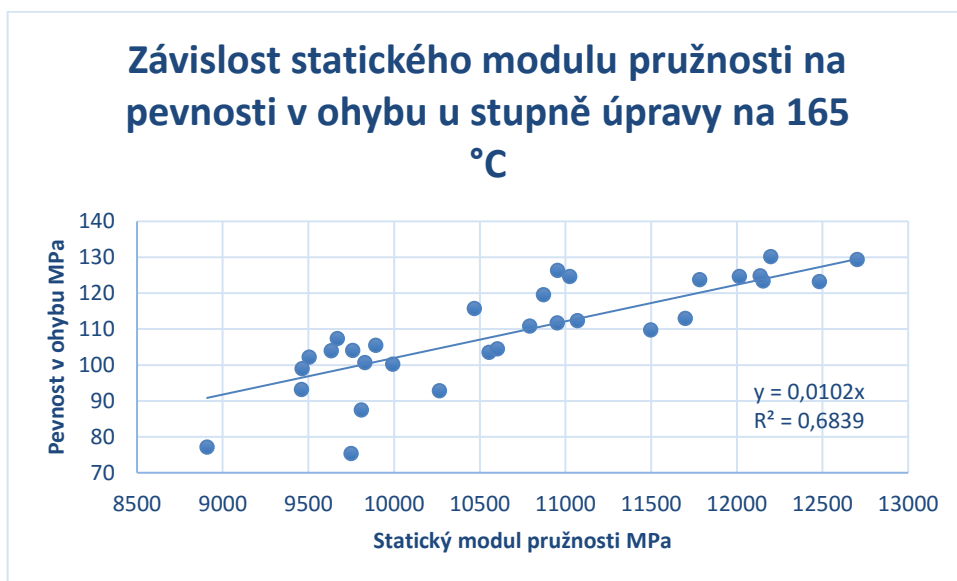
Příloha 5 Závislost tvrdosti na tangenciální ploše na hustotě u referenčních vzorků



Příloha 6 Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše u referenčních vzorků

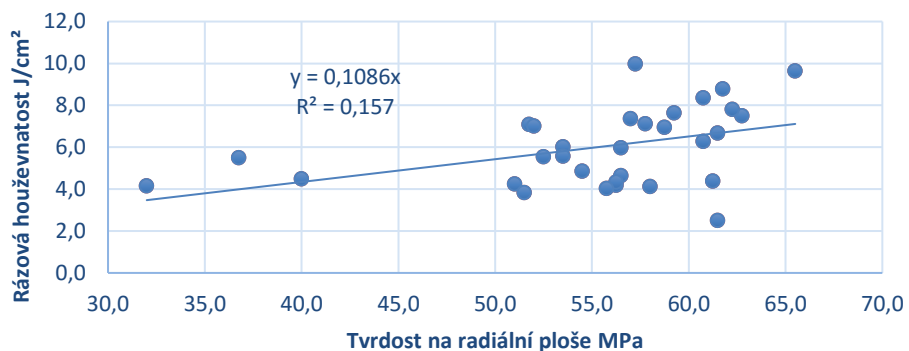


Příloha 7 Závislost statického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti u stupně úpravy na 165 °C



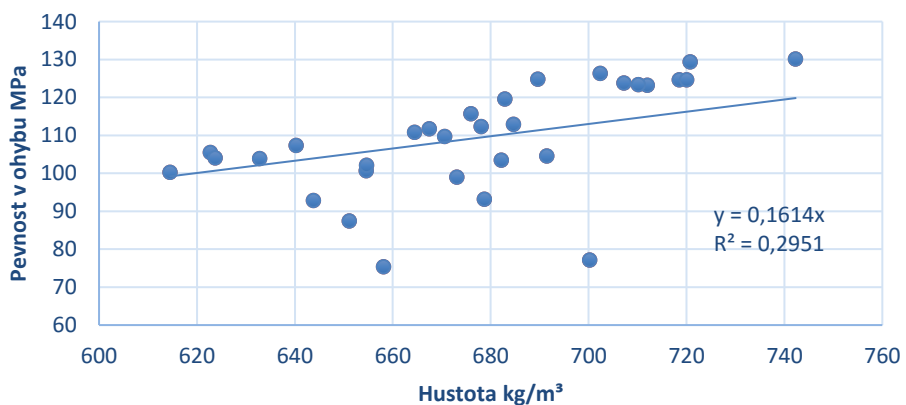
Příloha 8 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v ohybu u stupně úpravy na 165 °C

Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše u stupně úpravy na 165 °C



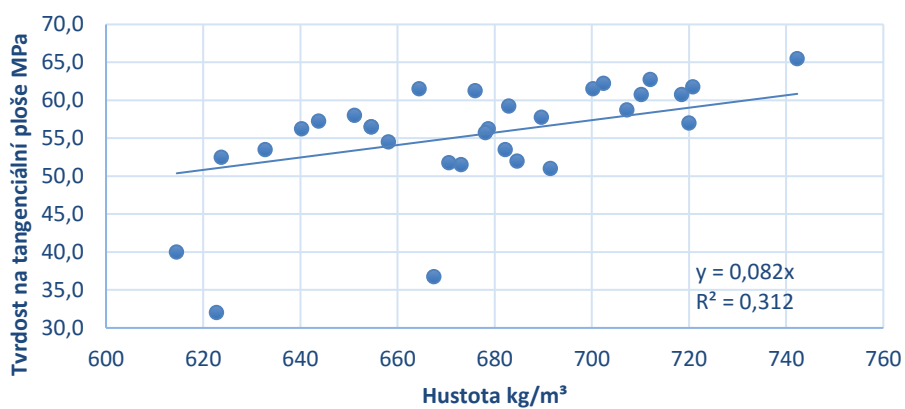
Příloha 9 Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše u stupně úpravy na 165 °C

Závislost ohybové pevnosti v ohybu na hustotě u stupně úpravy na 165 °C



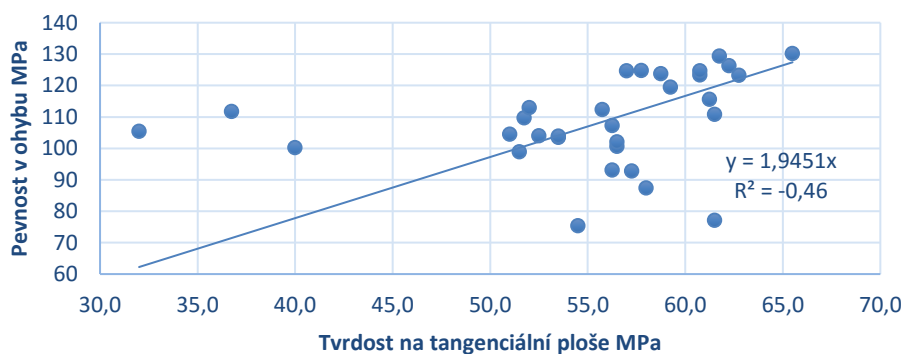
Příloha 10 Závislost ohybové pevnosti v ohybu na hustotě u stupně úpravy na 165 °C

Závislost tvrdosti na tangenciální ploše na hustotě u stupně úpravy na 165 °C

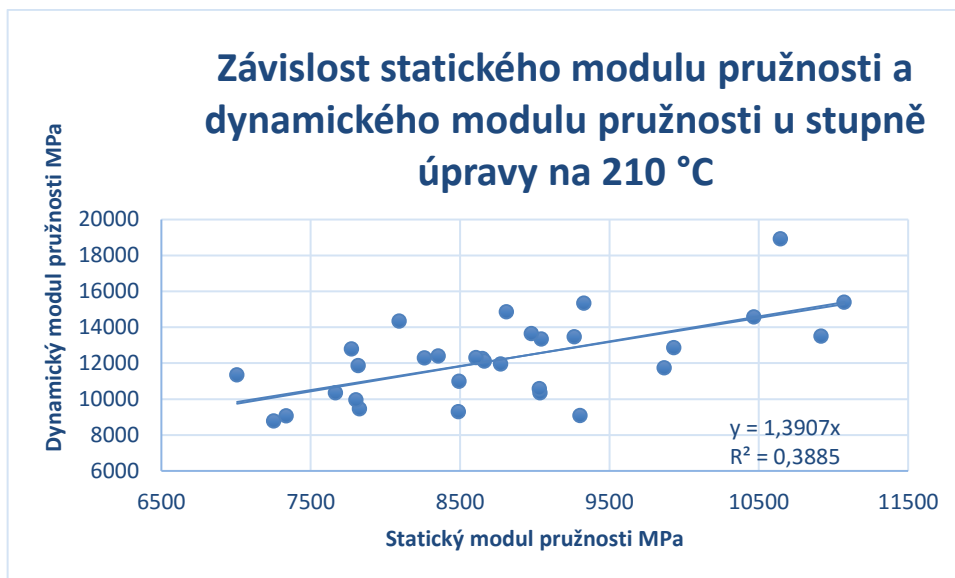


Příloha 11 Závislost tvrdosti na tangenciální ploše na hustotě u stupně úpravy na 165 °C

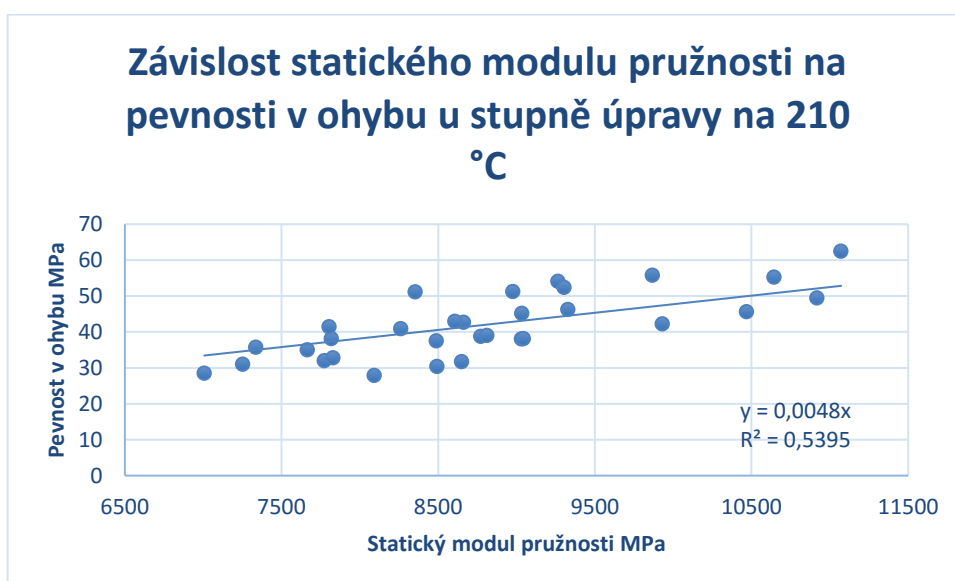
Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše u stupně úpravy na 165 °C



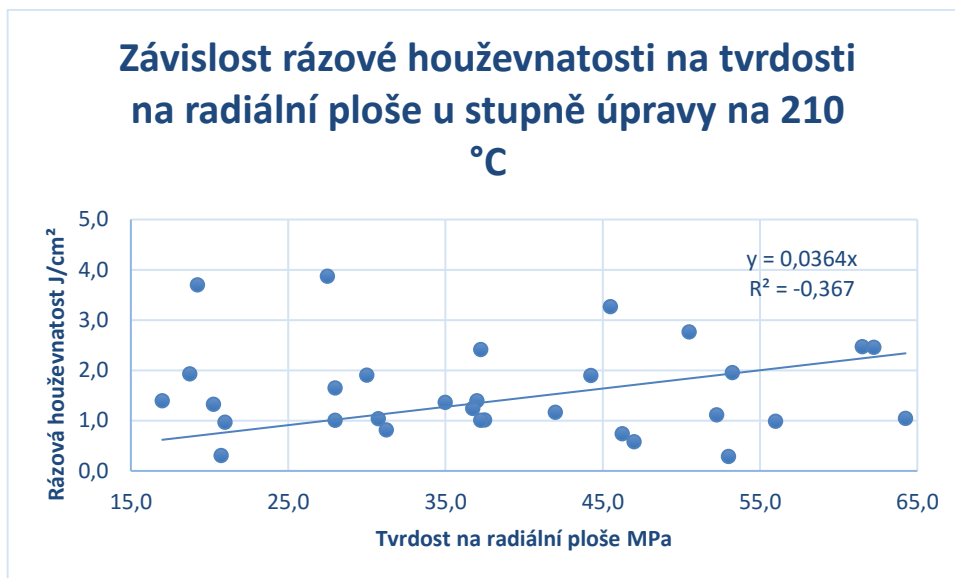
Příloha 12 Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše u stupně úpravy na 165 °C



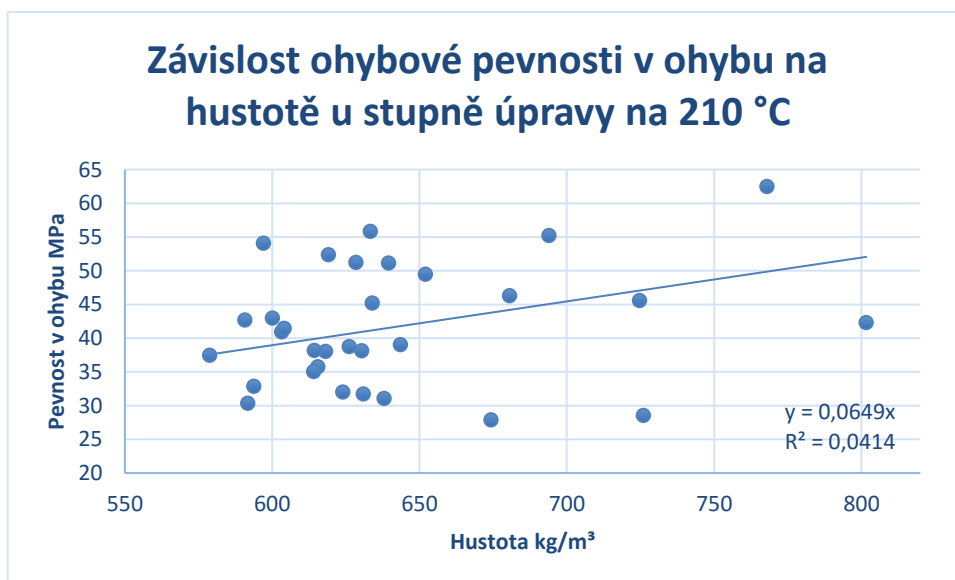
Příloha 13 Závislost statického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti u stupně úpravy na 210 °C



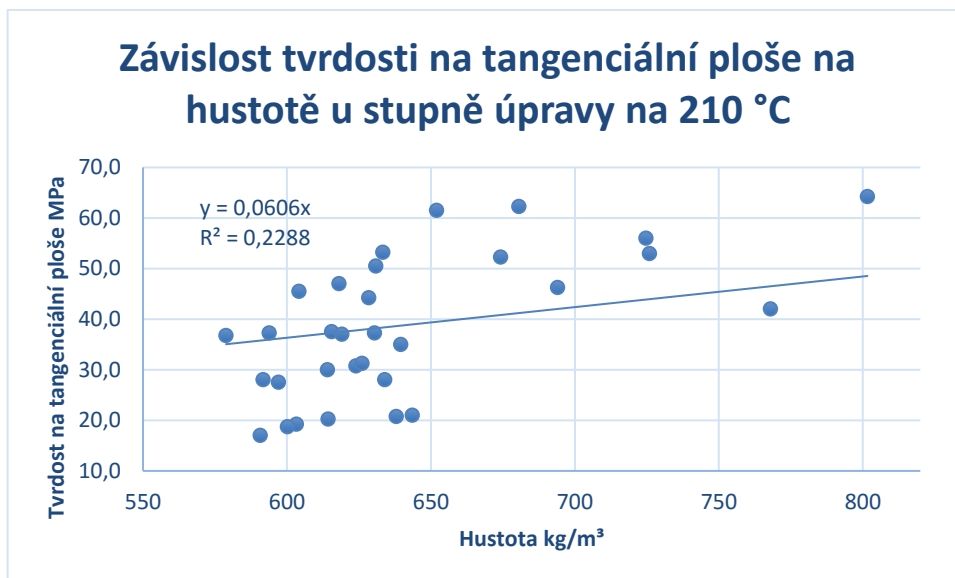
Příloha 14 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v ohybu u stupně úpravy na 210 °C



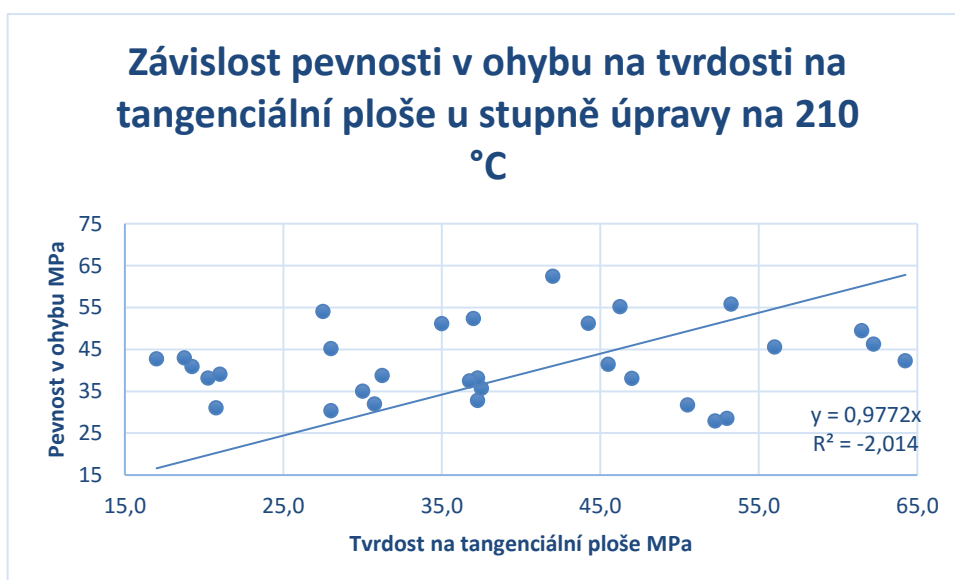
Příloha 15 Závislost rázové houževnatosti na tvrdosti na radiální ploše u stupně úpravy na 210 °C



Příloha 16 Závislost ohybové pevnosti v ohybu na hustotě u stupně úpravy na 210 °C



Příloha 17 Závislost tvrdosti na tangenciální ploše na hustotě u stupně úpravy na 210 °C



Příloha 18 Závislost pevnosti v ohybu na tvrdosti na tangenciální ploše u stupně úpravy na 210 °C